Beitrag für eine ereignisorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle auf Grundlage eines 4D-BIM im Brückenbau

Vom Fachbereich Bauingenieurwesen
der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität
Kaiserslautern-Landau
zur Verleihung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)

genehmigte

DISSERTATION

von

Thomas Günter Tschickardt, M. Eng.

aus Mainz

Dekan:	Prof. Dr.-Ing. Karsten Körkemeyer
1. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Christian Glock
2. Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar

Tag der mündlichen Prüfung: 03.02.2025

Kaiserslautern 2024

(D 386)

Thomas Günter Tschickardt

Beitrag für eine ereignisorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle auf Grundlage eines 4D-BIM im Brückenbau

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Dissertation entstand in der Zeit von Dezember 2020 bis Oktober 2024 im Rahmen einer externen Promotion im Fachgebiet Bauingenieurwesen, Fachbereich Massivbau und Baukonstruktion der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) in Kooperation mit der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Unternehmen der Zech Group.

Meinem Doktorvater, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Christian Glock, danke ich für die Möglichkeit zur Promotion und die Übernahme des Erstreferats. Seine Aufgeschlossenheit gegenüber meinen Forschungsinteressen sowie seine stetige fachliche und moralische Unterstützung legten das Fundament für diese Arbeit. Auch danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Blaschko für sein Interesse und seine Unterstützung meiner Dissertation.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Hamid Sadegh-Azar danke ich für die Übernahme des Koreferats und die Erstellung des zweiten Berichtes. Zudem möchte ich mich auch bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Kurz für die Leitung der Prüfungskommission bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Daniel Krause möchte ich dafür danken, dass er es mir ermöglichte, meine fachlichen Interessen weiter zu vertiefen und so den Anstoß zu meiner Promotion gab.

Für die Unterstützung, den intensiven, kritischen sowie konstruktiven Austausch während der Anfertigung dieser Arbeit und die vielen netten Gespräche darüber hinaus danke ich ganz besonders meinen Kollegen Hanna Lermen, Anne-Sophie Knappe, Nico Oerter sowie Anna Swoboda. Weiterhin danke ich den Herren Marius Schellen und Fabian Kaufmann für die fachlich interessanten Diskussionen zum Thema und allen Bearbeitenden von Bachelor-, Master- oder sonstigen Studienarbeiten für die Unterstützung und die gute Zusammenarbeit während der Betreuung ihrer Abschlussarbeiten.

Zutiefst dankbar bin ich meiner Frau Julia, die mich bei der Anfertigung der Arbeit unterstützt, mir Verständnis für unzählige Arbeitsstunden entgegengebracht und mir zu jeder Zeit Rückhalt gegeben hat. Ohne sie hätte diese Arbeit nicht entstehen können.

Bad Vilbel, im Oktober 2024

Thomas Tschickardt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis i

Zusammenfassung v

Abstract vi

Definitionen vii

Formelzeichen und Abkürzungen viii

1 Einleitung 1
1.1 Ausgangssituation und Motivation 1
1.2 Zielsetzung 3
1.3 Vorgehensweise und Aufbau 3

2 Stand der Wissenschaft und Technik 6
2.1 BIM im Bauwesen 7
2.1.1 Einführung und Begriffsdefinition von BIM 7
2.1.2 Offener Datenaustausch mittels IFC 8
2.1.3 Geometrische Repräsentationen von BIM 8
2.1.4 Modellbasierte Terminplanung 9
2.2 Grundlagen der Datenerfassung 12
2.2.1 Erfassungstechnologien und -plattformen 12
2.2.2 Eignung von Erfassungstechnologien 16
2.2.3 Aktuelle Gesetzeslage in Deutschland 17
2.3 Planung der Datenerfassung 18
2.4 Modellbasierte Baufortschrittskontrolle 21
2.5 Lean Construction 25
2.5.1 Prinzipien der Lean Methodik 25
2.5.2 Pull-Prinzip 26
2.5.3 Kontinuierliche Verbesserung 27
2.6 Forschungsbedarf und Beitrag dieser Arbeit 28

3 Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien 30
3.1 Anwendungsfallbezogene Nutzwertanalyse 30
3.1.1 Methodik und Randbedingungen 31
3.1.2 Durchführung der anwendungsfallbezogenen NWA 32
3.1.2.1 Organisation des Arbeitsumfeldes 32
3.1.2.2 Benennung des Entscheidungsproblems 32
3.1.2.3 Eingrenzung der Erfassungstechnologien 32

3.1.2.4 Festlegung der untersuchten AWF 33
3.1.2.5 Auswahl der Bewertungskriterien 34
3.1.2.6 Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien 36
3.1.2.7 Festlegung der Bewertungsskala 37
3.1.2.8 Nutzwertberechnung 38
3.1.2.9 Sensitivitätsanalyse 41
3.1.3 Ergebnisse 41
3.1.3.1 Aussage über die Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien 41
3.1.3.2 Nutzwerte der Erfassungstechnologien 42
3.1.3.3 Sensitivitätsanalyse als Aussage zur Robustheit 43
3.1.4 Schlussbetrachtung 43
3.2 Empirische Studie zum Einsatz von Drohnen 44
3.2.1 Methodik und Randbedingungen 44
3.2.2 Durchführung der empirischen Studie zum Einsatz von Drohnen 45
3.2.2.1 Vorbereitung der Datenerhebung 45
3.2.2.2 Auswahl der Stichprobe 45
3.2.2.3 Datenerhebung 45
3.2.2.4 Datenauswertung 46
3.2.3 Ergebnisse 46
3.2.3.1 Ergebnisse zu Fragen zur Demografie 46
3.2.3.2 Ergebnisse zum Einsatz und Erfahrungen von Drohnen 46
3.2.4 Schlussbetrachtung 50
3.3 Erkenntnisgewinn 51

4 Methodik zur Umsetzung einer schlanken Baufortschrittskontrolle 52
4.1 Methodik und Strategieansatz 53
4.1.1 Festlegungen 53
4.1.2 Einführung des Fachmodells "Drohnenbasierte Datenerfassung" 54
4.2 Vorgangsbezogene Initiierung und Planung der Datenerfassung auf Grundlage des 4D-BIM 55
4.2.1 Detaillierungsgrad eines 4D-BIM 56
4.2.2 Geometrische Änderung eines Vorgangs 57
4.2.3 Simplifizierung der Vorgangsgeometrie 61
4.2.3.1 Ableitung der Geometrie mittels IFC-Formats 61
4.2.3.2 Simplifizierung der Vorgangsgeometrie zur kritischen Fläche 64
4.2.4 Planung der Datenerfassung 66
4.2.4.1 Suchzeit und Zeitpunkt zur Festlegung der Befliegung 66
4.2.4.2 Wegpunkte und Flugroute auf Grundlage der kritischen Fläche 68
4.2.4.3 Navigierbarer Raum für die vorgangsbezogene Erfassung 69
4.2.4.4 Kontinuierliche Verbesserung der Datenerfassung 70
4.2.4.5 Datenweitergabe mittels des JSON-Formates 71

4.3 Parameter für eine photogrammetrische Baufortschrittskontrolle 72
4.3.1 Methodik und Randbedingungen 73
4.3.2 Durchführung der synthetischen Befliegung 74
4.3.2.1 Vorbereitung der Datenerhebung 74
4.3.2.2 Datenerhebung 76
4.3.2.3 Datenauswertung der Flugparameter 76
4.3.2.4 Datenauswertung der RANSAC-Parameter 78
4.3.3 Ergebnisse der Parameter 81
4.3.3.1 Flugparameter der Datenerfassung 81
4.3.3.2 Parameter des RANSAC-Algorithmus zur Baufortschrittskontrolle 84
4.3.4 Schlussbetrachtung 85
4.4 Schlanke Baufortschrittskontrolle 87
4.4.1 Abgleich der erfassten Daten 88
4.4.1.1 Import der Punktwolke und Transformation in lokales Koordinatensystem 89
4.4.1.2 Konstruktion des Interessensvolumens mittels Toleranzwert 89
4.4.1.3 Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf die vorgangsbezogene Punktmenge und weitere Analyse 92
4.4.2 Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM 93
4.5 Softwareintegration der prozessorientierten und praxisgerechten Umsetzung im 4D-BIM 94

5 Umsetzung der entwickelten Methodik anhand von zwei Fallstudien 98
5.1 Vorgehensweise der zwei Fallstudien 98
5.2 Projekt "Brückenbauwerk im Zuge der BAB 24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum" 101
5.2.1 Bauablauf der Fallstudie 102
5.2.2 Vorgangsbezogene Initiierung der Datenerfassung 102
5.2.3 Planung und Durchführung der Datenerfassung 105
5.2.4 Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolke und Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM 107
5.3 Projekt "Ersatzneubau Brücke Lohring Bochum" 111
5.3.1 Bauablauf der Fallstudie 112
5.3.2 Vorgangsbezogene Initiierung der Datenerfassung 112
5.3.3 Planung und Durchführung der Datenerfassung 114
5.3.4 Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolke und Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM 116
5.4 Schlussbetrachtung der Fallstudien 119

6 Zusammenfassung und Ausblick 120
6.1 Zusammenfassung 120

6.2 Ausblick 122

Literaturverzeichnis 123

Anhang A Zusatzinformationen zu Abschnitt 2.2.1 150

Anhang B Zusatzinformationen zu Abschnitt 2.2.3 151

Anhang C Nutzwert- und Sensitivitätsanalyse 152

Anhang D Empirische Studie zum Einsatz von Drohnen 167

Anhang E Zusatzinformationen zu den Abschnitten 4.1.2 und 4.2.2 178

Anhang F Zusatzinformationen zu den Abschnitten 4.3.3 und 4.4.1 187

Anhang G Zusatzinformationen zu Abschnitt 4.5 193

Anhang H Zusatzinformationen zu Abschnitt 5.2.3 201

Lebenslauf 205

Zusammenfassung

Die Bauindustrie hat durch die Digitalisierung eine Transformation erfahren, die neue Geschäftsmodelle und innovative Lösungen hervorgebracht hat. Dazu zählen die digitale Abwicklung von Bauprojekten auf Grundlage eines Bauwerksinformationsmodells (BIM) sowie der Einsatz von modernen Erfassungstechnologien. Nichtsdestotrotz ist eine manuelle und isolierte Datenerfassung für eine Fortschrittsmeldung während der operativen Projektabwicklung nach wie vor weit verbreitet. Da diese zeitaufwendig ist und das Risiko menschlicher Fehler birgt, besteht deutlicher Bedarf an der Weiterentwicklung von Methoden für eine (teil-)automatisierte Datenerfassung mittels bauzeitlichem BIM (4D-BIM). Die Nutzung einheitlicher Informationen für eine Datenerfassung und insbesondere für eine modellbasierte Baufortschrittskontrolle bietet erhebliche Vorteile, um die Effizienz der Baustelle zu steigern.

Die vorliegende Arbeit widmet sich daher der Entwicklung eines Beitrags für eine ereignisorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle auf Grundlage eines 4D-BIM basierend auf Lean Prinzipien im Brückenbau.

Als Grundlage dieser Entwicklung wird zunächst eine Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien durchgeführt. Diese Analyse umfasst eine Nutzwertanalyse und anschließend eine empirische Studie, um zu identifizieren, welche Technologie das größte Potenzial für eine automatisierte Erfassung bietet. Obwohl Drohnen mit Laserscanner auf dem Markt an Akzeptanz gewonnen haben, besteht keine ausreichende Marktdurchdringung. Im Gegensatz dazu sind photogrammetrische Drohnen weitaus verbreiteter und erfreuen sich im untersuchten Anwendungsbereich deutlich größerer Beliebtheit.

Darauf aufbauend wird eine vorgangsbezogene Initiierung und Planung der Datenerfassung auf Grundlage des 4D-BIM durchgeführt, wobei die verknüpfte Vorgangsgeometrie auf sogenannte "kritische Flächen" simplifiziert wird. Eine synthetische Studie, die sich auf Flugparameter der Datenerfassung (Abstand, Überlappung und Geschwindigkeit) sowie auf Auswertungsparameter zur Baufortschrittskontrolle konzentriert, gibt Empfehlungen für diese ab. Die Empfehlungen beinhalten unter anderem den Abstand zur kritischen Fläche auf weniger als 20 m festzulegen und die Drohne mit einer Geschwindigkeit von höchstens einem Meter pro Sekunde fliegen zu lassen. Durch die Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf die erfasste vorgangsbezogene Punktmenge wird eine schlanke Baufortschrittskontrolle umgesetzt, um den Fortschritt auf der Baustelle zu messen und entsprechend in das 4D-BIM zu melden.

Zum Abschluss der Arbeit wird die entwickelte Methodik anhand von zwei Fallstudien validiert. Bei der Validierung wurde die zweite Fallstudie neben synthetischen Daten auch durch eine reale Befliegung erprobt. Trotz herausfordernder Wetterbedingungen aufgrund starker Böen und daraus resultierenden Abweichungen in der Flugroute konnte eine drohnenbasierte Datenerfassung und schlanke Baufortschrittskontrolle unter realen Bedingungen durchgeführt werden. Der Fortschritt wurde innerhalb der Toleranzschwelle von einem Tag gemeldet.

Im Ergebnis hat sich die Methodik als geeignet und praxistauglich erwiesen, da sie erfolgreich dazu beigetragen hat, zunächst eine vorgangsbezogene Datenerfassung zu initiieren und anschließend den Fortschritt im Bauprozess zu identifizieren.

Abstract

The construction industry has undergone a transformation through digitalization, resulting in new business models and innovative solutions. These include the digital execution of construction projects based on a Building Information Model (BIM) and the use of modern data acquisition technologies. Nevertheless, manual, and isolated data acquisition during operational project execution remains common. Since this process is time-consuming and prone to human error, there is a significant need to develop methods for (semi-)autonomous data acquisition using a schedule-based BIM (4D-BIM). Utilizing standardized information for data acquisition, particularly for model-based construction progress monitoring, offers substantial advantages in increasing the efficiency of construction sites.

This thesis is dedicated to the development of a contribution for event-driven and drone-based data acquisition and construction progress monitoring based on 4D-BIM in bridge construction, using the principles of Lean.

As a foundation for this development, a potential analysis of existing data acquisition technologies has been initially conducted. This analysis includes a utility value analysis and an empirical study to identify which technology has the greatest potential for automated data acquisition. Although drones with laser scanning have gained acceptance in the market, they do not show sufficient market penetration. In contrast, photogrammetric drones are much more widespread and enjoy significantly greater popularity in the studied application area.

Building on this, a process-oriented initiation and planning of data acquisition based on 4D-BIM has been triggered, with the linked process geometry simplified to so-called "critical surfaces". A synthetic study, focusing on flight parameters for data acquisition (distance, overlap and speed) and evaluation parameters for construction progress monitoring, provides recommendations. Among other things, it is recommended to set the distance to the critical surface to less than 20 meters and to operate the drone at a speed of no more than one meter per second. A lean construction progress control is implemented by applying the RANSAC algorithm to the acquired process-oriented point cloud to measure and report progress on the construction site, integrating the results into the 4D-BIM.

In conclusion of the thesis, the developed method is confirmed through two case studies. In the validation, the second case study was tested not only with synthetic data but also through a real aerial survey. Despite the challenges and deviations caused by strong gusts, progress monitoring was achieved under real conditions through the developed methodology and drone-based data acquisition. The progress was reported within the tolerance threshold of one day.

The results showed that the method is suitable and practical, successfully initiating process-oriented data acquisition and subsequently identifying progress in the construction process.

Definitionen

Im Rahmen dieser Arbeit werden folgende Definition verwendet:

BIM bezeichnet das Bauwerksinformationsmodell, abweichend von der gängigen Bezeichnung *Building Information Modeling*.

Datenerfassung bezeichnet die Erfassung von geometrischen und räumlichen Daten der Baustelle.

Drohne bezeichnet zusammenfassend unbemannte Fluggeräte.

Effizient bezeichnet die Fähigkeit, eine bestimmte Aufgabe oder ein Ziel mit dem Einsatz minimaler Ressourcen zu erreichen, wobei Zeit, Kosten und Aufwand optimiert werden. Es sollen die bestmöglichen Ergebnisse mit den verfügbaren Ressourcen erzielt werden.

Schlank bezeichnet die Reduktion von Verschwendung und unnötigen Prozessschritten, um die Produktivität zu steigern und den Wertzuwachs zu maximieren. Prozessschritte werden dabei vereinfacht, ohne dabei Qualität oder Leistung einzubüßen und es findet eine Konzentration auf das Wesentliche statt (vgl. *Erlach - 2020*). Der Unterschied zu Effizient besteht darin, dass Effizienz den Fokus darauflegt, vorhandene Prozesse und Ressourcen so zu optimieren, dass mit minimalem Aufwand maximale Ergebnisse erzielt werden, während schlank darauf abzielt, überflüssige Prozesse und Ressourcen zu eliminieren, um die Wertschöpfungskette zu straffen und zu verbessern.

Schlanke Baufortschrittskontrolle bezeichnet eine ereignisorientierte und bedarfsorientierte Datenerfassung, die auf Grundlage eines 4D-BIM initiiert wird. Durch die Simplifizierung wird eine terminliche Fortschrittskontrolle auf Grundlage einer vorgangsbezogenen Punktwolke ermöglicht, um gezielt relevante Informationen in den Prozess zu integrieren.

Simplifizierung bezeichnet die Vereinfachung eines Vorgangs im 4D-BIM zu einer oder mehreren kritischen Flächen. Bei der vorgangsbezogenen Simplifizierung werden für den jeweiligen Vorgang bzw. die jeweilige Aktivität Details vernachlässigt, um die Komplexität des 4D-BIM deutlich zu reduzieren und aussagekräftige Informationen zu nutzen.

In dieser Arbeit wird aufgrund der Genderneutralität die Partizipialform (z. B. der/die Anwendende) bevorzugt. Sollte diese nicht verfügbar sein, wird die Paarform (z. B. Ingenieurin und Ingenieur) ohne zusätzliche Zeichen wie Schrägstrich, Unterstrich, Sternchen oder Doppelpunkt verwendet und im letzten Schritt wird auf die Ersatzform (z. B. Bauherrschaft) zurückgegriffen.

Eine in dieser Dissertation verwendete Software (*Metashape - 2023* des Herstellers Agisoft) wurde in Russland entwickelt. Aufgrund der aktuellen geopolitischen Lage und der schwerwiegenden humanitären und politischen Konsequenzen der Ereignisse in der Ukraine distanziere ich mich ausdrücklich von jeglichen politischen Handlungen und Positionen, die mit Russland oder der dortigen Regierung in Verbindung stehen. Die Verwendung dieser Software erfolgt ausschließlich aus wissenschaftlichen und technischen Gründen und stellt keine politische Unterstützung oder Befürwortung dar.

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Großbuchstaben

A	Abstand des Sensors zum erfassten Objekt
AW	Abstand der Wegpunkte
AE	Aufprallenergie der Drohne
A_{GSD}	Größe der betrachteten Fläche
BK	Gesamtanzahl der Bewertungskriterien
BT_i	Normgerechte Toleranz des Bauteils des verknüpften Vorgangs
$BP_{e;b;a;p}$	Einzelbewertung der befragten Personen
$\overline{BP}_{e;b;a}$	Durchschnittswert der Bewertungen der befragten Personen
$\widetilde{BP}_{e;b;a}$	Glättung der Bewertung der befragten Personen
$\widehat{BP}_{e;b;a}$	Spreizung der Bewertung der befragten Personen
$\widetilde{BP}_{e;b;a}$	Gleichsetzung der Teil-Nutzwerte der befragten Personen
B_w	Horizontale Auflösung des Sensors (Bildweite)
D_i	Beliebiges Dreieck der kritischen Fläche
N_{RS}	Normalenvektor der rekonstruierten Fläche
$ER_{e;a;p}$	Einzelrangfolge pro befragter Person je Erfassungstechnologie je AWF
N_{CS}	Normalenvektor der kritischen Fläche
GET_j	Genauigkeit der Erfassungstechnologie
$GN_{e;a}$	Gesamtnutzen nach dem Durchschnittsverfahren je Erfassungstechnologie je AWF
${GN_{e;a}}^{S1}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Gleichsetzung der wichtigsten Bewertungskriterien
${GN_{e;a}}^{S2}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Gleichsetzung der wichtigsten Bewertungen
${GN_{e;a}}^{S3}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Glättung von Ausreißern der wichtigsten Bewertungskriterien
${GN_{e;a}}^{S4}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Glättung von Ausreißer der wichtigsten Bewertungen
${GN_{e;a}}^{S5}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Spreizung der wichtigsten Bewertungskriterien
${GN_{e;a}}^{S6}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Spreizung der wichtigsten Bewertungen
GSD	Bodenauflösung (engl. *Ground Sampling Distance*)
F_L	Breite der Fotografie
I	Intervall der Fotografien

Ist-GSD	Tatsächliche Bodenauflösung
O	Überlappung der Fotografien (engl. *overlapping*)
M	Masse der Drohne
PM	Vorgangsbezogene Punktmenge
PW	Vorgangsbezogene Punktwolke
$\text{R}_{\text{e;a}}$	Endrangfolge je Erfassungstechnologie je AWF
R	Radius
SMV	Schnittmengenverhältnis aus $\text{SEVE}_{\text{i,Anfang,j}}$ und $\text{SEVE}_{\text{i,Ende,j}}$
$\text{SE}_{\text{i,Anfang}}$	Menge an sichtbaren Elementen am Anfangsdatum i
$\text{SE}_{\text{i,Ende}}$	Menge an sichtbaren Elementen am Enddatum i
$\text{SEVE}_{\text{i,Anfang;j}}$	Schnittmenge der verknüpften Elemente VE_{j} des Vorgangs V_{j} sowie der sichtbaren Elemente am Anfangsdatum i $\text{SE}_{\text{i,Anfang}}$
$\text{SEVE}_{\text{i,Ende;j}}$	Schnittmenge der verknüpften Elemente VE_{j} des Vorgangs V_{j} sowie der sichtbaren Elemente am Enddatum i $\text{SE}_{\text{i,Ende}}$
S_{w}	Sensorweite
TW_{ij}	Toleranzwert
VE_{j}	Verknüpfte Elemente des Vorgangs V_{j}
VOI_{i}	Interessensvolumen für das Dreieck D_{i}
V_{j}	Vorgänge des Terminplans

Lateinische Kleinbuchstaben

a	Anwendungsfall
b	Bewertungskriterium
e	Erfassungstechnologie
f	Brennweite (engl. *focal length*)
g	Erdbeschleunigung
$\bar{\text{g}}_{\text{b;a}}$	Durchschnittswert der Gewichtungsfaktoren jedes Kriterium der befragten Personen für jeden AWF
$\ddot{\text{g}}_{\text{b;a}}$	Reziproke Gewichtung
$\tilde{\text{g}}_{\text{b;a}}$	Gleichsetzung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien
$\breve{\text{g}}_{\text{e;a}}$	Glättung der Gewichtsfaktoren der Kriterien
$\hat{\text{g}}_{\text{e;a}}$	Spreizung der Gewichtsfaktoren der Kriterien
$\text{g}_{\text{p;b;a}}$	Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien jeder einzelnen befragten Personen für jeden AWF
h	Flughöhe bzw. Absturzhöhe der Drohne
k	Anzahl der Nachbarn
n	Gesamtanzahl der befragten Personen

n_i	Normalenvektor für das Dreieck D_i
v	Geschwindigkeit der Drohne

Griechische Buchstaben

Φ	Winkel zwischen zwei Normalenvektoren

Abkürzungen

4D-BIM	Bauzeitliches Bauwerksinformationsmodell
AFP	Geflogene Flugroute (engl. *as-flown flight path*)
ANN	*Approximate Nearest Neighbor*-Algorithmus
API	Programmierschnittstelle (engl. *Application Programming Interface*)
AWF	BIM-Anwendungsfall
BAB	Bundesautobahn
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BDVI	Bund der öffentlich bestellten Vermessungsingenieure
BIM	Bauwerksinformationsmodell
BIngK	Bundesingenieurkammer
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
Brep	Grenzdarstellung (engl. *Boundary Representation*)
CS	Kritische Fläche (engl. *critical surface*)
CSG	Konstruktive Volumenkörpergeometrie (engl. *Constructive Solid Geometry*)
CSS	Kaskadierendes Stilblatt (engl. *Cascading Style Sheet*)
CSV	Durch Komma getrennte Werte (engl. *Comma separated values*)
DACH	Deutschland, Österreich, Schweiz
DBDA	Drohnenbasierte Datenerfassung (engl. *drone based data acquisition*)
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung
DJI	*Da-Jiang Innovations Science and Technology*
DVW	Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement e.V.
EDRODACON	Ereignisbasierte, bedarfsorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung in der Bauausführung (engl. *event-based, demand-oriented and drone-based data acquisition during construction*)
EDV	Elektronische Datenverarbeitung
EN	Europäische Norm für Internationale Organisation für Standardisierung
EU	Europäischen Union
FC	Expandierte Flugroute zur Kollisionsprüfung (engl. *flight corridor*)

FP	Flugroute der ermittelten Wegpunkte (engl. *idealized flight path*)
GA	Genetischer Algorithmus (engl. *genetic algorithm*)
GNSS	Satellitennavigationssysteme (engl. *Global Navigation Satellite System)*
GSD	*Bodenauflösung (*engl. *Ground Sampling Distance*)
HTML	*Hypertext Markup Language*
ID	Identifikator
IFC	*Industry Foundation Classes*
ISO	Internationale Organisation für Normung (engl. *International Organization for Standardization*)
JSON	*JavaScript Object Notation*
KVP	Kontinuierlicher Verbesserungsprozess
LBA	Luftfahrt Bundesamt
LiDAR	Laserscanning (engl. *Light detection and ranging*)
LO4D	Detaillierungsgrad des "Detailterminplans" des 4D-BIM (engl. *Level of 4D*)
LOADA	Grad der Datenerfassungsautomatisierung (engl. *Level of automation of data acquisition*)
LOIN	Informationsbedarfstiefe (engl. *level of information need*)
LuftVG	Luftverkehrsgesetz
LuftVO	Luftverkehrsordnung
MVS	*Multi View Stereo Dense Matching*-Algorithmus
NWA	Nutzwertanalyse
OVG	Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation
P4S	Scanerfassungsplanung (engl. *Planning for Scanning*)
PCA	*Principal Component Analysis*-Algorithmus
PDCA	Planen (engl. *Plan*), Durchführen (engl. *Do*), Überprüfen (engl. *Check*), Handeln (engl. *Act*)
PLY	*Polygon File Format*
PPK	Nachträgliche Bearbeitung der Kinematik (engl. *post processed kinematic*)
QR-Code	Schnellreaktionscode (engl. *Quick Response Code*)
RANSAC	*Random sample consensus*-Algorithmus
RFID	Radiofrequenz-Identifikation (engl. *Radio-frequency identification*)
ROS	Roboterbetriebssystem (engl. *Robot Operating System*)
RS	Rekonstruierte Fläche (engl. *reconstructed surface*)
RTK	Echtzeit-Kinematik (engl. *real time kinematic*)
SfM	Struktur aus Bewegung (engl. *Structure from Motion*)-Algorithmus
sic	So wurde es geschrieben (lat. *sic erat scriptum*)
SIFT	*Scale Invariant Feature Transform*-Algorithmus

SLAM	Gleichzeitige Lokalisierung und Kartierung (engl. *Simultaneous Localization and Mapping*)
SVM	*Support Vector Machines*-Algorithmus
TLS	Terrestrischer Laserscanner
TSP	*Traveling Salesman Problem*-Algorithmus
UAS	Unbemannte Luftfahrtsysteme (engl. *Unmanned Aerial Systems*)
UG	Untersuchungsgegenstand
UGV	Unbemannte bodengestütze Fahrzeuge (engl. *Unmanned Ground Vehicle*
USA	Vereinigte Staaten von Amerika engl. *United States of America*)
UWB	Ultrabreitbandkommunikation (engl. *Ultra-wideband communication*)
VDGS	Verein Drohnenbetrieb Geomatik Schweiz
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
VOI	Interessensvolumen (engl. *Volume of Interest*)
W&F	Wayss & Freytag Ingenieurbau AG
WP	Wegpunkte der zu erfassenden kritischen Fläche (engl. *drone waypoints*)

1 Einleitung

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Digitalisierung hat die Bauindustrie durch innovative Lösungen und neue Geschäftsmodelle revolutioniert. Ein entscheidendes Instrument dieser Transformation ist die digitale Projektabwicklung, die auf einem Bauwerksinformationsmodell (BIM) des Vorhabens basiert (*Borrmann et al. - 2021a*). Dies bietet zahlreiche Vorteile, wie bspw. die Verbesserung der Terminsicherheit durch Verwendung eines bauzeitlichen BIM (4D-BIM) zur terminlichen Fortschrittskontrolle. Die jüngste Forderung des "Masterplans BIM im Bundesfernstraßenbau" (*BMDV - 2021*) aus dem Jahre 2021 treibt die digitale Projektabwicklung im Infrastrukturbau weiter voran.

Bauprojekte werden zunehmend komplexer, sei es aufgrund ihrer Größe, der Integration verschiedener Fachdisziplinen oder der Notwendigkeit, ökologische (*Glock et al. - 2022*, *Glock et al. - 2023*) und gesetzliche Anforderungen zu erfüllen. Eine präzise Erfassung und Verarbeitung konsistenter Informationen ist entscheidend und nimmt während der Ausführungsphase eine zunehmend zentrale Rolle ein. Obwohl immer mehr Informationen aus einem BIM auf die Baustelle gelangen, ist ihr Wert begrenzt, wenn sie nicht die aktuellen Gegebenheiten vor Ort widerspiegeln.

Abb. 1.1 zeigt beispielhaft den Informationsverlust im Lebenszyklus eines BIM, in Bezug auf die Bauausführung. Die Erzeugung, Bereitstellung und Nutzung von einheitlichen Informationen ist bereits in der Entwicklungs- und Planungsphase möglich und kann eng mit dem BIM verkettet sein. Im Gegensatz dazu erfolgt die Erfassung und Verarbeitung von Daten während der Phase der Bauausführung nach wie vor hauptsächlich auf eine manuelle, aufwendige und fehleranfällige Weise. Auch die Nutzung von einheitlichen Informationen ist in der Betriebs- und Erhaltungsphase (*Tschickardt - 2024*) nicht weit verbreitet.

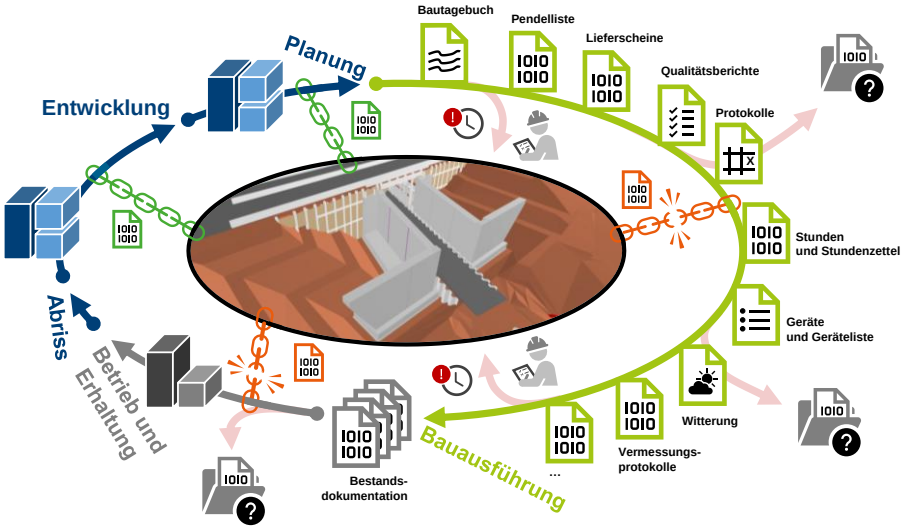


Abb. 1.1: Informationsverlust im Lebenszyklus eines BIM, in Bezug auf die Bauausführung

Während der Durchführung eines Bauprojekts können unvorhergesehene Verzögerungen dazu führen, dass die geplante Bauablaufplanung nicht eingehalten wird. Zudem können ineffiziente Baufortschrittskontrollen zu Störungen sowohl im Termin- als auch im Kostenplan führen (*Abreu et al. - 2023*). Es ist entscheidend, solche Abweichungen frühzeitig zu erkennen, um entsprechende Gegenmaßnahmen ergreifen zu können. Eine Umfrage unter operativen Bauleitenden (*Ailland - 2013*) ergab, dass es in 65 % der Fälle eine Woche dauert, um manuell erfasste Daten zu verarbeiten und nur 23 % der Befragten führen ihre Bautagebücher täglich. Diese Verzögerungen erschweren die Erstellung eines zeitnahen digitalen Abbilds der Baustelle. Die Erfassung von Informationen auf der Baustelle nimmt erhebliche Zeit in Anspruch, um sie effektiv zur Projektkontrolle nutzen zu können. In Großbritannien, den USA und Ländern im asiatisch-pazifischen Raum gaben mehr als die Hälfte der teilnehmenden Personen einer Umfrage von *Sawhney und Knight - 2023* an, dass BIM in den letzten sechs Jahren in weniger als der Hälfte aller Bauprojekte zur Verbesserung der Baufortschrittskontrolle sowie der Sicherheit und Gesundheit der auf dem Bau tätigen Personen beigetragen hat. Forschungsansätze zur modellbasierten Baufortschrittskontrolle wie bspw. von *Hamledari et al. - 2021* regen die Verwendung photogrammetrischer Methoden und/oder Laserscanning mittels Drohne sowie die Auswertung der erforderlichen Informationen während der Ausführungsphase zur automatisierten Datenerfassung an.

In den letzten Jahren hat der Einsatz von Drohnen in Verbindung mit modernen Erfassungsmethoden einen signifikanten Wandel in der Bauindustrie bewirkt. Mit hochentwickelten Erfassungstechnologien ausgestattete Drohnen ermöglichen eine präzise und hochauflösende Datenerfassung aus der Luft, was die Überwachung des Baufortschritts verbessern kann. Dies trägt zur Effizienzsteigerung und zur Erhöhung der Sicherheit bei, indem erleichterter Zugang zu schwer zugänglichen Bereichen geboten wird und das Risiko bei physischen Begehungen minimiert wird (*Gorski - 2022*). Nach *BDLI - 2023* gab es im Jahr 2023 in Deutschland etwa 359.000 privat und rund 56.400 kommerziell genutzte Drohnen. Eine Studie (*BDLI et al. - 2023*) prognostiziert, dass die Anzahl kommerziell betriebener Drohnen in Deutschland bis 2030 auf 80.000 ansteigen wird, was einem Zuwachs von 43 % entspricht. Des Weiteren hat die Einführung der Drohnenverordnung der Europäischen Union (EU) (*EU - 2019*) seit dem 31.12.2020 die Zertifizierung von Drohnenpilotinnen und -piloten deutlich erhöht, was auf ein wachsendes Interesse an Drohneneinsätzen in verschiedenen Anwendungsbereichen hinweist. Abb. 1.2 zeigt aktuelle Statistiken des Luftfahrt Bundesamt (LBA) (*LBA - 2023a*) bezüglich der bestandenen Prüfungen in Deutschland in der offenen Kategorie für den Zeitraum vom 15.04.2022 (Startpunkt der Erfassung) bis zum 15.04.2024.

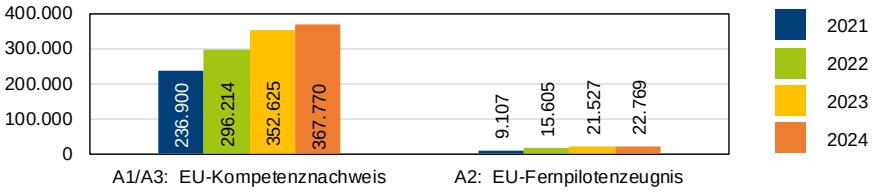


Abb. 1.2: Statistik zu registrierten Betreibende von Drohnen sowie bestandenen Prüfungen in der offenen Kategorie, Darstellung in Anlehnung an *LBA - 2023a*

Die Qualität und Abdeckung der erfassten Daten für eine modellbasierte Baufortschrittskontrolle sind entscheidende Aspekte (*Tang und Alaswad - 2012*; *Biswas - 2019*). Diese Aspekte hängen hauptsächlich von der Erfahrung der mit der Datenerfassung betrauten Person ab. Die Planung einer drohnengestützten Datenerfassung ist bisher mit beträchtlichem Arbeitsaufwand, großer Fehleranfälligkeit und Ineffizienz verbunden und wird oft vernachlässigt (*Zhang et al. - 2016*). Vermessungsingenieurinnen und -ingenieure müssen manuell Informationen aus herkömmlichen Zeichnungen oder unzureichenden geometrischen Modellen extrahieren, um relevante Bauteile innerhalb eines Bauwerks zu identifizieren und einen Datenerfassungsplan zu erstellen. Dies führt häufig zu einer Minderung der Datenqualität, was zu einer Über- oder Untererfassung von Daten und insgesamt zu ineffizienten Prozessen führt (*Biswas - 2019*). Eine präzise Planung der Datenerfassung und die Validierung dieser Daten sind daher unerlässlich, um sicherzustellen, dass relevante Baustellenbereiche angemessen erfasst werden und die Daten korrekt verarbeitet werden können.

1.2 Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, einen Beitrag zur Entwicklung einer ereignisorientierten und drohnenbasierten Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle im Brückenbau zu leisten, basierend auf einem 4D-BIM. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Untersuchung der Initiierung einer ereignisorientierten Datenerfassung für spezifische Vorgänge und Aktivitäten der operativen Projektabwicklung, um gezielt geometrische Informationen zu erfassen. Anschließend soll untersucht werden, wie eine Umsetzung einer schlanken Baufortschrittskontrolle unter Verwendung eines 4D-BIM und basierend auf den erfassten Informationen erfolgen kann. Um dieses Ziel zu erreichen, soll in dieser Arbeit ebenfalls untersucht werden, welche Erfassungstechnologie das größte Potenzial hierfür im Brückenbau aufweist.

Die Entwicklung wird in einem praxisorientierten Kontext erfolgen, wobei ausschließlich marktverfügbare Technologien genutzt werden sollen. Die Anwendung und Validierung der Forschungsergebnisse in der Praxis werden die Relevanz und Akzeptanz der Ergebnisse in der praktischen Umsetzung in der Bauindustrie gewährleisten. Darüber hinaus wird durch die Nutzung bewährter Praktiken die Anwendbarkeit der Forschungsergebnisse in der Praxis sichergestellt werden. Die Verwendung bereits existierender Lösungen wird eine schnellere Übertragung der Forschungsergebnisse in die Bauindustrie ermöglichen, was die Effizienz und Wirksamkeit des entwickelten Ansatzes steigern wird.

1.3 Vorgehensweise und Aufbau

Zur Erreichung der zuvor definierten Zielsetzung wird die nachfolgend beschriebene und in Abb. 1.3. dargestellte Vorgehensweise gewählt.

Kapitel 2 legt den aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik dar. Hierbei werden Grundlagen zu BIM im Bauwesen, der Datenerfassung sowie zu Lean Construction erläutert. Des Weiteren werden aktuelle Forschungsansätze im Zusammenhang mit der Planung der Datenerfassung und der modellbasierten Baufortschrittskontrolle vorgestellt. Abschließend werden der Forschungsbedarf sowie der Beitrag dieser Arbeit in diesem Kontext aufgezeigt.

In Kapitel 3 widmet sich die Arbeit der Potenzialanalyse von Erfassungstechnologien. Diese Analyse ist in zwei Abschnitte unterteilt, darunter eine anwendungsfallbezogene Nutzwertanalyse (NWA) und eine empirische Studie zum Einsatz von Drohnen. Dabei wird sowohl die angewandte Methodik zur Durchführung der Analysen als auch die relevanten Randbedingungen detailliert dokumentiert, um das Gütekriterium der Verfahrensdokumentation zu wahren. Die Ergebnisse dieser Analysen werden präsentiert und der abschließende Erkenntnisgewinn der Potenzialanalyse wird dargestellt.

Kapitel 4 führt die vorgangsbezogene Initiierung und Planung der Datenerfassung auf Basis des eingeführten Fachmodells der drohnenbasierten Datenerfassung und eines 4D-BIM ein. Dies beinhaltet die Festlegung von Detaillierungsgraden eines 4D-BIM auf Detailebene sowie die Berücksichtigung geometrischer Änderungen von Vorgängen und die Simplifizierung der Vorgangsgeometrie auf kritische Flächen. Zusätzlich werden in einer synthetischen Studie die Parameter für die photogrammetrische Baufortschrittskontrolle evaluiert und Empfehlungen dazu ausgesprochen. Anschließend erfolgt eine schlanke Baufortschrittskontrolle durch den Abgleich der erfassten Daten und die Meldung des Fortschritts in das 4D-BIM. Die entwickelten grundlegenden Arbeitsabläufe und Funktionen der Methodik werden in einer Softwareintegration zusammengefasst, die die Planung der Datenerfassung mit Drohnen und die Rückmeldung der erfassten Daten in das 4D-BIM ermöglicht. Diese Softwareintegration integriert die zuvor beschriebene Methodik und erleichtert die Umsetzung der Prozesse in der Praxis.

In Kapitel 5 erfolgt die Erprobung und Validierung der entwickelten Methodik anhand von zwei Fallstudien. Dabei werden die Schritte zur vorgangsbezogenen Initiierung der Datenerfassung sowie die Durchführung der Datenerfassung sowohl mithilfe virtueller als auch eine reale Befliegung erprobt und validiert.

Kapitel 6 enthält eine Zusammenfassung der angewandten Methoden und der erzielten Ergebnisse. Neben den wichtigsten Erkenntnissen wird der wissenschaftliche Beitrag dieser Arbeit aufgezeigt. Weiterhin wird ein Ausblick gegeben, der zukünftige Forschungsfelder, die sich aus den Ergebnissen dieser Arbeit ableiten lassen, aufzeigt.

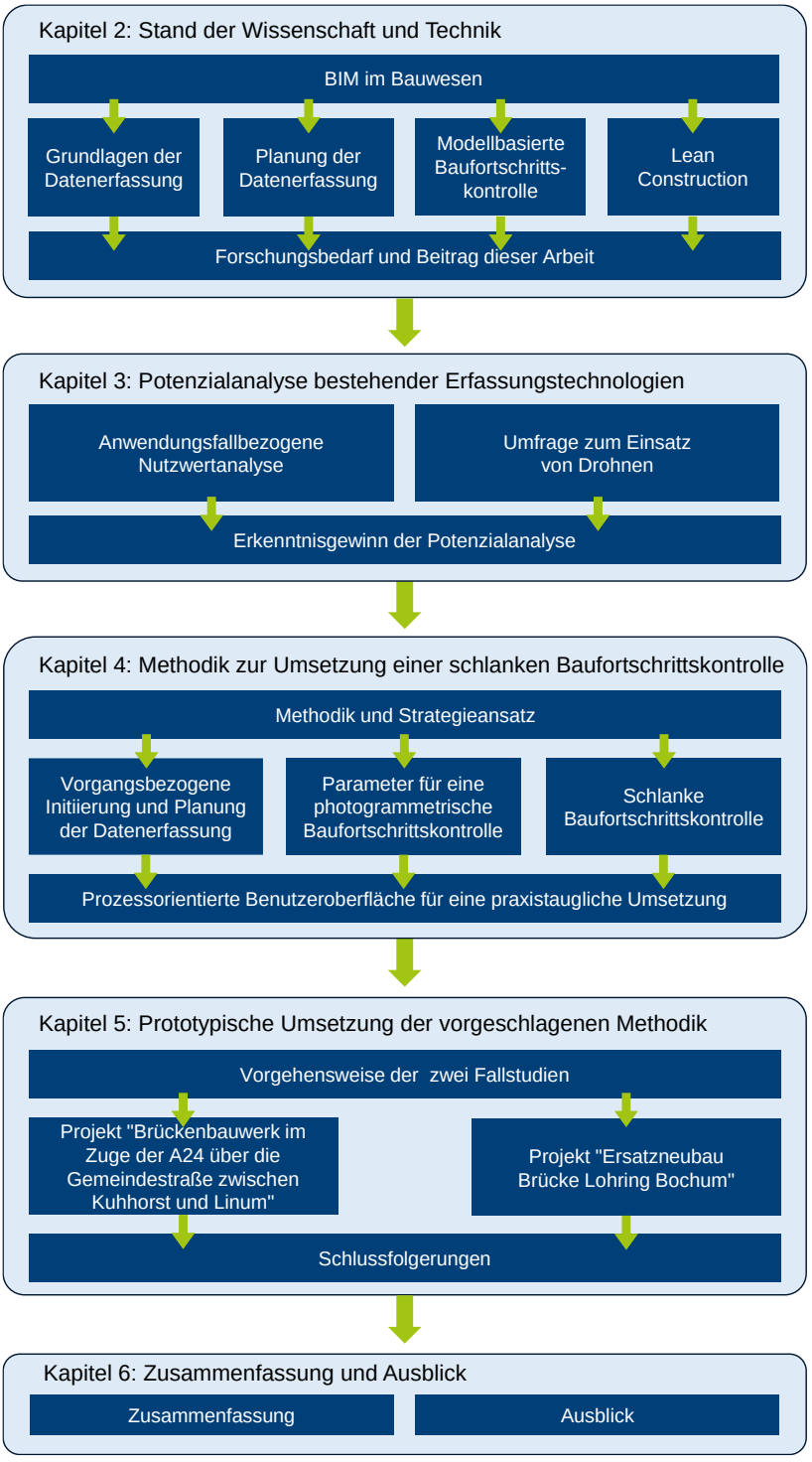


Abb. 1.3: Aufbau der Arbeit

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Die vorliegende Arbeit behandelt eine praxisgeeignete Methodik zur Umsetzung einer ereignisbasierten und drohnenbasierten Datenerfassung in der Bauausführung zur Baufortschrittskontrolle im Brückenbau. Dieses Kapitel stellt den Stand der Wissenschaft und Technik vor.

Zunächst werden in Abschnitt 2.1 die Grundlagen von BIM im Bauwesen vorgestellt. Hierbei werden Einführung, geometrische Repräsentationen von BIM, klassifizierte Bauteile mit deren Merkmalen, der Datenaustausch zwischen BIM sowie die modellbasierte Terminplanung erläutert. Ebenso werden in Abschnitt 2.2 die Erfassungstechnologien und -plattformen wie bspw. Photogrammetrie, Laserscanning (engl. *Light detection and ranging*, "LiDAR") und Drohnen erläutert, die Bausteine der vorgestellten Methodik sind. Abschnitt 2.3 geht anschließend auf aktuelle Forschungsansätze für die Planung der Datenerfassung ein. In Abschnitt 2.4 werden Ansätze vorgestellt, die eine automatisierte und modellbasierte Baufortschrittskontrolle ermöglichen. Abschnitt 2.5 erläutert die Grundlagen von Lean Construction, insbesondere die im Rahmen der Methodik verwendeten Lean Prinzipien. Schlussendlich wird in Abschnitt 2.6 der Forschungsbedarf herausgestellt, welcher in den Kapiteln 3 und 4 behandelt wird. Abb. 2.1 zeigt eine Übersicht der Gliederung dieses Kapitels.

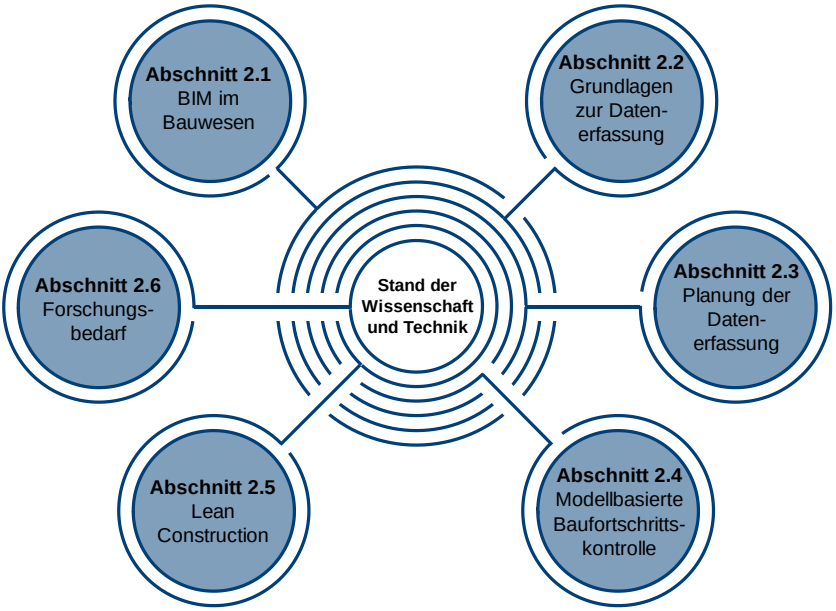


Abb. 2.1: Aufbau des Kapitels

2.1 BIM im Bauwesen

2.1.1 Einführung und Begriffsdefinition von BIM

Durch den BIM-Leitfaden (*Egger et al. - 2013*) und den Stufenplan "Digitales Planen und Bauen" des BMDV (*BMDV - 2015*) wurden Vorgaben für die digitale Abwicklung von Bauprojekten in Deutschland veröffentlicht. Der Begriff "*Building Information Modeling*" wird gemäß dem Stufenplan wie folgt definiert:

> "*Building Information Modeling* bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik, mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden."
>
> (*BMDV - 2015*)

Abweichend zur gängigen Bezeichnung steht im Rahmen dieser Arbeit die Abkürzung "BIM" für den Begriff "Bauwerksinformationsmodell" (vgl. Abschnitt 1.1). Für das BMDV stellt das BIM eines Bauwerkes die Grundlage zur Erfassung und Verwaltung von relevanten Informationen und Daten dar und wird für die weitere Bearbeitung zwischen den Beteiligten ausgetauscht und übergeben. Der Grundgedanke der digitalen Methodik der Projektabwicklung ist es, alle Projektbeteiligten von der Bauherrschaft bis zu den Betreibenden über eine Schnittstelle miteinander zu verbinden. Ein BIM bildet deshalb die Grundlage einer transparenten und kooperativen Arbeitsumgebung und bildet den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, vom Entwurf über die Planung, den Bau und Betrieb bis hin zum Um-/Rückbau virtuell ab (*Borrmann et al. - 2021a*).

Am 12.10.2021 wurde der "Masterplan BIM im Bundesfernstraßenbau" veröffentlicht (*BMDV - 2021*), der auf dem Stufenplan "Digitales Planen und Bauen" basiert und die digitale Methodik der Projektabwicklung zum Regelbetrieb führen soll. Der Masterplan sieht zu Beginn des Regelprozesses die Bereitstellung einer bundeseinheitlichen Standardisierung zur umfassenden Anwendung der Methodik in Projekten des Bundesfernstraßenbaus vor. Hierzu gehören BIM-Anwendungsfälle (AWF), welche die zu erbringenden Leistungen im Kontext der jeweiligen Zielstellung beschreiben und bereits in den verschiedenen Phasen sukzessive evaluiert und erprobt werden (*BMDV - 2021*). Das Ziel einer großflächigen Implementierung sollte der "*big open* BIM" Ansatz (*Borrmann et al. - 2021a*) sein, da hier aufgrund eines unabhängigen Datenformats verschiedene Softwareprodukte eingesetzt werden können und dies eine konsequente modellbasierte Kommunikation zwischen allen Beteiligten über alle Phasen im Lebenszyklus eines Bauwerks fördert.

Neben geometrischen Informationen wie Abmessungen können in einem BIM weitere semantische Informationen wie Materialkennwerte enthalten sein. Werden Informationen des Terminplans mit dem BIM verknüpft, spricht man von einem 4D-BIM (*Borrmann et al. - 2021*).

2.1.2 Offener Datenaustausch mittels IFC

Die Interoperabilität der Daten muss für den Einsatz der digitalen Methodik der Projektabwicklung stets gegeben sein. Mit einer Nutzung des herstellerneutralen und offenen Datenformats IFC (*Industry Foundation Classes*) wird das Ziel verfolgt, den digitalen Informationsaustausch der Bauwerksdaten zwischen den am Bau beteiligten Personen und den verschiedenen eingesetzten Softwareprodukten ohne Verluste und so effizient wie möglich durchzuführen. IFC ist ein standardisiertes Datenformat bzw. Datenschema (*buildingSMART - 2023*), das den herstellerneutralen Austausch von BIM ermöglicht. Das Format kann ein BIM in seiner Gesamtheit einschließlich aller geometrischen und semantischen Informationen (*Borrmann et al. - 2021b*) erfassen. Das IFC-Format wird seit dem Jahr 1997 kontinuierlich weiterentwickelt und durch *DIN EN ISO 16739-1* zum Standard erklärt. Einer der Vorteile des IFC-Formats ist, dass die Definition des Schemas offen zugänglich ist, was das Format auch nach vielen Jahren noch neutral und lesbar macht. Dies ist besonders in Anbetracht der langen Lebensdauer eines Bauwerks wichtig.

2.1.3 Geometrische Repräsentationen von BIM

Es gibt zwei verschiedene Verfahren für die Darstellung der geometrischen Repräsentation bzw. der mathematischen Beschreibung von Körpern eines BIM: Die expliziten Verfahren beschreiben ein Objekt über seine Oberfläche. Dazu zählt das Randdarstellungsverfahren (engl. *Boundary Representation,* "Brep") und die triangulierte bzw. vermaschte Oberflächenbeschreibung (engl. *tessellated mesh*). Die impliziten Verfahren beschreiben ein festes Objekt durch Aufzeichnen einer Abfolge von Konstruktionsschritten. Zu den impliziten Verfahren (*Borrmann und Berkhahn - 2021*) gehören das Extrusions- und Rotationsverfahren und das *Constructive Solid Geometry* (CSG)-Verfahren.

Explizite Verfahren

Bei dem *Brep* wird eine Hierarchie von Begrenzungselementen aufgebaut. Diese Hierarchie besteht aus den Elementen Körper, Fläche, Kante und Eckpunkte. Hierbei wird jedes Element über die berandeten Elemente der nächsttieferen Ebene beschrieben, das heißt der Körper wird über seine Flächen, jede einzelne Fläche wird über die umgebenden Kanten und diese Kanten wiederum werden über die Eckpunkte definiert. In der Regel werden diese Informationen in einer indexierten Liste gespeichert, wobei der Körper auf die Indizes der Flächen, die Flächen auf die Indizes der Kanten und die Kanten auf die Indizes der Knoten verweisen. Schließlich werden die Knoten zusammen mit ihren Koordinaten gespeichert. *Tessellated mesh* ist eine vereinfachte Version der *Brep*, bei dem die Oberfläche eines Körpers durch ein Netz von Polygonen dargestellt wird. Gekrümmte Flächen lassen sich nicht präzise beschreiben, können aber durch eine Verfeinerung des Polygonnetzes angenähert werden. In der Regel werden die Koordinaten der Eckpunkte in einer indexierten Liste, dem sogenannten *Indexed Face Set*, gespeichert. Zur Definition der Dreiecke wird schließlich auf die Indizes der Punktliste verwiesen (*Borrmann und Berkhahn - 2021*).

Implizite Verfahren

Die Grundlage des Extrusions- und Rotationsverfahrens besteht darin, ein zweidimensionales Profil entlang eines vorgegebenen Pfades zu extrudieren, der einen dreidimensionalen Körper bildet. Wenn das Profil entlang einer geraden Linie verschoben wird, spricht man von *Extrusion*. Wenn das Profil entlang eines gebogenen Pfads bewegt wird, handelt es sich um das *Sweep*-Verfahren. *Rotation* bezeichnet das Verfahren, bei dem das Profil um eine Achse gedreht wird. CSG beschreibt ein Verfahren, bei dem eine Form durch die Kombination vordefinierter primitiver Formen (Primitive) mit booleschen Operationen erstellt wird. Das ursprüngliche CSG-Verfahren ist heute nur noch selten im Einsatz, da der Zwang zur Nutzung von Primitivkörpern in der Regel sehr einschränkend ist. Die Idee der booleschen Operationen wurde jedoch in Modellierungssoftware integriert und um die Fähigkeit erweitert, beliebige, vom Anwendenden erstellte Formen als Operanden zu verwenden (*Borrmann und Berkhahn - 2021*).

2.1.4 Modellbasierte Terminplanung

Alle Informationen in einem BIM werden in verschiedenen sogenannten "Informationsdomänen" (*Borrmann et al. - 2021*) verwaltet. Jede Informationsdomäne eines BIM enthält beliebig viele Elemente und domänenspezifische Objekte. Grundlage für die entwickelte Methodik der vorliegenden Arbeit ist ein 4D-BIM und folglich sind folgende zwei Informationsdomänen relevant:

- Das BIM ist in der Informationsdomäne "*geometry*" angesiedelt. Die Strukturen und Informationen des BIM sollten in Übereinstimmung mit den Vorgaben im BIM-Abwicklungsplan (BAP) festgelegt werden.
- Der Terminplan ist in der Informationsdomäne "*activities*" verortet und wird mit speziellen Programmen wie bspw. Microsoft Project erstellt. Bei der Erstellung wird programmbedingt der Terminplan automatisiert mit bestimmten Informationen angereichert, z.B. Start- und Enddatum. Projektspezifische Merkmale können manuell hinzugefügt werden.

Nachfolgend werden die Grundlagen der Modellierung eines 4D-BIM erläutert und auf den Detaillierungsgrad eines 4D-BIM eingegangen.

Modellierung eines 4D-BIM

Ein 4D-BIM entsteht durch die Verknüpfung zwischen einem BIM der Informationsdomäne "*geometry*" und einem Terminplan der Informationsdomäne "*activities*". Das BIM kann grundsätzlichen aus einem oder mehreren Fachmodellen bestehen. Die Modellierung der einzelnen Fachmodelle sollte gemäß dem gewünschten Detaillierungsgrad und dem BAP erfolgen. Die Informationsbedarfstiefe (engl. *level of information need*, "LOIN") nach *DIN EN ISO 19650-1* definiert den Umfang und die Granularität der auszutauschenden Informationen, einschließlich des Detaillierungsgrades der Geometrie. Für eine Planung der Datenerfassung und zur Überprüfung, ob ausreichend geometrischer Raum vorhanden ist, kann es hilfreich sein die Umgebungsgeometrie oder sogenannte "Störgeometrie" wie bspw. die Baustelleneinrichtungen, in das 4D-BIM zu integrieren.

Es gibt verschiedene Methoden, um Vorgänge eines Terminplans mit dem BIM zu verknüpfen (*Tulke - 2010*): Die manuelle und regelbasierte Verknüpfung. Bei dem

manuellen Vorgehen wird zunächst das jeweilige Objekt ausgewählt und einem entsprechenden Vorgang zugeordnet. Das manuelle Vorgehen ist einfach umzusetzen, bei weniger detaillierten BIM problemlos durchführbar und erfordert wenig Vorbereitung und Fachwissen. Es kann allerdings zeitaufwändig sein und zu einem fehlerhaften bzw. unvollständigen Bauablauf führen, insbesondere bei großen BIM mit vielen Modellelementen. Die regelbasierte Verknüpfung wird mithilfe von individuell festgelegten Suchregeln und Filtern realisiert. Sie kann sowohl starr (*Tschickardt et al. - 2018*) als auch flexibel (*Tschickardt et al. - 2024*) gestaltet werden und setzt bestimmte Merkmale im Terminplan und BIM voraus, um eine eindeutige Zuordnung zu ermöglichen. Die regelbasierte Methode bietet den Vorteil, dass Verknüpfungen automatisiert im Rahmen der Fortschreibung hergestellt werden können und Diskrepanzen bei Planungsänderungen schnell erkannt werden können. Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung eines 4D-BIM ist die Ableitung des Terminplans aus dem BIM mittels Aufwandswerten und Prozessbausteinen (*Hanff und Melzner - 2016*), um bspw. eine modellbasierte Taktplanung (*Becker und Tschickardt - 2023*) zu generieren.

Unabhängig von der gewählten Methode zur Verknüpfung von BIM und Terminplan kann ein einzelner Vorgang, wie in Abb. 2.2 gezeigt, mit einem oder mehreren Modellelementen verknüpft werden. Gleichzeitig ist es möglich, dass ein Modellelement ebenfalls mit einem oder mehreren Vorgängen verknüpft wird, wobei die Beziehung in diesem Fall eine 1:n oder m:1-Beziehung darstellt. Mit diesem Hintergrund bedarf es einer eindeutigen Identifikation der Modellelemente oder Fläche, die für eine Baufortschrittskontrolle herangezogen werden sollen.

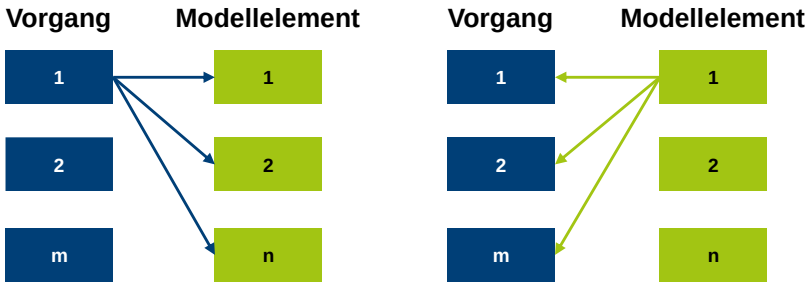


Abb. 2.2: Schematische Darstellung der Zuordnung zwischen Vorgang und Modellelement

Die Zuordnung der Modellelemente zu Vorgängen kann im Datenformat IFC abgebildet werden, was die Interoperabilität zwischen verschiedenen Softwareprodukten und den Austausch von Daten erleichtert. In Abb. 2.3 werden die hierarchischen Beziehungen zwischen Entitäten im IFC-Format mit der Version 4.3.1.0 dargestellt, die sowohl geometrische als auch terminplanbezogene Informationen abbilden. Der Terminplanvorgang ist in *IfcTask* abgebildet, wodurch das Attribut *TaskTime* Auskunft über Soll-Start- und -Enddatum, Kritikalität, Ist-Start- und -Enddatum sowie den Fertigstellungsgrad eines Vorgangs liefert. Das Modellelement ist in *IfcElement* und schließlich im Subtyp *IfcBuiltElement* modelliert. Jedes Objekt in der IFC-Struktur besitzt Attribute wie bspw. *GlobalId*, *OwnerHistory*, *ObjectType*, *ObjectPlacement* und *Representation*. Eine kritische Auseinandersetzung zur Verwendung des IFC-Formats im Rahmen der entwickelten Methodik erfolgt in Abschnitt 4.2.3.1.

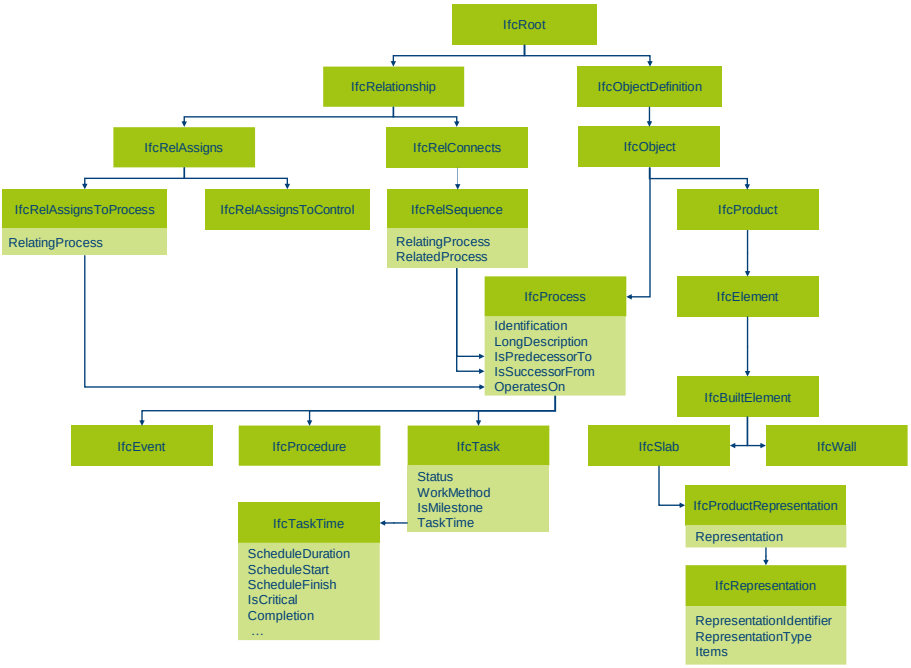


Abb. 2.3: Hierarchische Beziehung zwischen Entitäten im IFC-Format, Darstellung in Anlehnung an *buildingSMART - 2023*

Eine weitere Zuordnung von Vorgängen und Modellelementen kann in einer 4D-Software wie bspw. DESITE MD Pro (*thinkproject - 2023*) erfolgen.

Detaillierungsgrad der Terminplanung

Die Planung von Terminen während der operativen Projektabwicklung ist ein dynamischer Prozess, weshalb es oft schwierig ist, klare Grenzen zwischen den verschiedenen Phasen zu ziehen. Die Erstellung von Terminplänen erfolgt typischerweise nach dem "*bottom-up*"-Prinzip (vom Detail zum Groben) (*Kochendörfer et al. - 2018*). Im Rahmen dieser Arbeit ist eine Terminkontrolle auf Ebene von Tagesleistungen geplant.

Kochendörfer et al. - 2018 unterscheiden bei dem Detaillierungsgrad der Terminplanung zwischen Rahmen-, General-, Steuerungs- und Detailterminplänen und definieren Letztere als eine "detaillierte Verfeinerung einzelner Bauteile", was mit dem Detaillierungsgrad der Zielsetzung der Arbeit übereinstimmt. Der Detaillierungsgrad eines 4D-BIM wird durch die Detaillierung des BIM und der Terminplanung sowie einer sogenannten Visualisierungskonfiguration vorgegeben. Obwohl bereits Forschungsansätze existieren, die sich mit dem Detaillierungsgrad von 4D-BIM beschäftigen (*Nechyporchuk und Baskova - 2021*) oder Leitfäden zur Definition des Detaillierungsgrads (*Guevremont und Hammad - 2020*) vorstellen, existiert noch keine Definition für eine modellbasierte Baufortschrittskontrolle und Steuerung des Bauvorhabens. Die Entwicklung eines solchen Standards ist jedoch von Bedeutung, um die Potenziale des 4D-BIM vollständig ausschöpfen zu können und die Bauindustrie in Richtung einer optimierten und transparenten Projektumsetzung zu lenken.

2.2 Grundlagen der Datenerfassung

2.2.1 Erfassungstechnologien und -plattformen

Für die vermessungstechnische Geometrieerfassung werden in der aktuellen Praxis verschiedene Verfahren bei der Bauwerksvermessung eingesetzt, die sich gemäß *Blankenbach - 2021* in Handaufmaß, in geodätische Methoden (z. B. mit einem Theodolit oder Tachymeter), Photogrammetrie und LiDAR einteilen lassen. Das Handaufmaß und geodätische Methoden werden als manuelle Methoden klassifiziert und im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Unberücksichtigt bleiben im Rahmen dieser Arbeit aufgrund der Schwerpunktsetzung auf eine drohnenbasierte Lösung für die optisch visuelle Baufortschrittskontrolle außerdem Auto-ID Technologien wie bspw. RFID (engl. *Radio-frequency identification*), QR- (engl. *Quick Response*)/Barcode und UWB (engl. *ultra-wideband communication*), die laut *Kopsida et al. - 2015*, *Omar und Nehdi - 2018* und *Moselhi et al. - 2020* ebenfalls für eine Baufortschrittskontrolle in Betracht gezogen werden können.

Unabhängig von den Erfassungstechnologien ist eine präzise Georeferenzierung und Registrierung der erfassten dreidimensionalen Daten notwendig, um eine effiziente Weiterverarbeitung sicherstellen zu können. Gemäß *Donath et al. - 2008* können bspw. folgende Verfahren angewendet werden:

- Geodätische Vermessung: Es werden Zielobjekte (engl. *targets* oder *ground control points*) in Form von retroreflektierenden Folienzeichen oder Passkugeln mit einem Tachymeter vermessen und in der Datenerfassung als Bezugspunkte genutzt.
- Geodätische Positionierung: Hierbei erfolgt die Einmessung des Standorts des Instruments mithilfe von Satellitennavigationssystemen (engl. *Global Navigation Satellite System*, "GNSS"). Es können auch Methoden wie Echtzeit-Kinematik (engl. *real time kinematik*, "RTK") oder die nachträgliche Bearbeitung der Kinematik (engl. *post processed kinematik*, "PPK") zur Verbesserung der Genauigkeit eingesetzt werden (*Bauer - 2003*).
- Datenregistrierung: Ein Überlappungsbereich der erfassten Daten ist erforderlich und eine grobe Vorregistrierung erfolgt, um anschließend eine Feinregistrierung mithilfe eines iterativen Algorithmus (*Iterative Closest Point*) (*Chen und Medioni - 1991; Besl - 1992*) durchzuführen. Dieser Algorithmus ermittelt im Überlappungsbereich der erfassten Daten (bspw. Fotografien) die Übereinstimmung von Punkten.

Photogrammetrie

Seit Mitte des 19. Jahrhunderts hat der Architekt Meydenbauer photogrammetrische Verfahren vorangetrieben (*Albertz - 2002*). Bei der Photogrammetrie wird die Geometrie der Objekte aufgrund von Fotografien rekonstruiert. Nach *Donath et al. - 2008* wird unterschieden in terrestrische Photogrammetrie und mobile Photogrammetrie (Aerophotogrammetrie).

In der Photogrammetrie wird ein Verfahren namens *Structure from Motion* (SfM) sowie *Multi-View-Stereo-Dense-Matching* (MVS) verwendet, um einen Bildband und Punktwolke zu erstellen. Dieser Algorithmus berechnet die Kameraorientierung und

Pixelkoordinaten für zeitversetzte oder überlappende Fotografien. Jeder Pixel wird monoskopisch in zwei oder mehreren Fotografien vermessen und mithilfe der Orientierungsdaten werden die dreidimensionalen Koordinaten des Punktes abgeleitet (*Blankenbach - 2021*). Vorausgesetzt es sind ausreichend viele Pass- und Verknüpfungspunkte vorhanden, ist die Verwendung verschiedener Aufnahmegeräte möglich (*Donath et al. - 2008*). SfM wird insbesondere bei der Aerophotogrammetrie angewendet (*Blankenbach - 2021*).

Nach *Gonçalves - 2023* umfasst der Prozess zur Rekonstruktion einer photogrammetrischen Punktwolke folgende Schritte, die in Abb. 2.4 schematisch dargestellt sind.

1. Merkmalserkennung: In jeder Fotografie werden mittels SIFT-Algorithmus *(Scale Invariant Feature Transform*-Algorithmus) Pixel identifiziert, die auch als Merkmale, sogenannte *Key Points*, bezeichnet werden. Die Anzahl der *Key Points* hängt von Textur und Auflösung der Erfassung ab.
2. Merkmalsabgleich: Die *Key Points* werden in verschiedenen Fotografien durch einen ANN-Algorithmus (*Approximate Nearest Neighbor*-Algorithmus) abgeglichen. Übereinstimmende Punkte werden gefiltert und als *Tie Points* (Verknüpfungspunkte) bezeichnet.
3. Rekonstruktion der spärlichen Punktwolke: Die *Tie Points* werden verwendet, um mittels einer iterativen Bündelblockausgleichung die Geometrie der Szene zu rekonstruieren. Dies beinhaltet die Schätzung der externen Orientierungs- und Kameraparameter, um die Lage der Fotografien im Koordinatensystem zu beschreiben. Endprodukt ist eine spärliche Punktwolke (engl. *sparse point cloud*).
4. Georeferenzierung: Werden ausreichend Zielobjekte verwendet und in den Fotografien markiert, können diese in die Bündelblockausgleichung einbezogen werden. Dadurch lässt sich die spärliche Punktwolke im gewählten Koordinatensystem skalieren und georeferenzieren. Es besteht auch die Möglichkeit, zusätzliche Verfahren in Betracht zu ziehen.
5. Rekonstruktion der dichten Punktwolke: Durch Anwendung des MVS-Algorithmus wird die spärliche Punktwolke verdichtet, um eine dichte Punktwolke (engl. *dense point cloud*) zu generieren.

In einer Software zur Rekonstruktion von photogrammetrischen Punktwolken wie bspw. *Metashape - 2023* des Herstellers Agisoft sind diese Algorithmen fest implementiert.

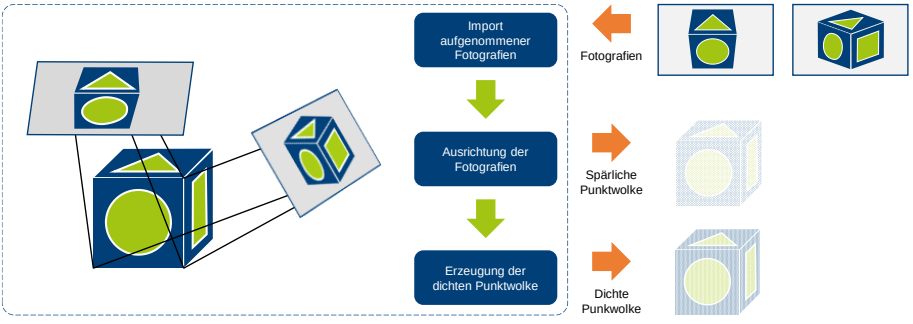


Abb. 2.4: Schematische Darstellung des Rekonstruktionsprozesses

Nach *Koutsoudis et al. - 2015* sind auffällige Merkmale auf der Oberfläche des zu erfassenden Objekts unerlässlich, um eine Rekonstruktion von Punktwolken durchzuführen. Oberflächen mit ausgeprägten morphologischen Merkmalen und häufigen Farbänderungen eignen sich besonders gut, da die Algorithmen diese Merkmale zuverlässig erkennen können. Spiegelnde Oberflächen stellen jedoch eine große Herausforderung dar, da Algorithmen Schwierigkeiten bei der Identifikation von identischen Merkmalen haben und somit die Rekonstruktion sogar unmöglich sein kann. In solchen Fällen ist der Einsatz von Linsenfiltern ratsam, um Lichtreflexionen und abstrakte Streueffekte zu minimieren. Bei der Aufnahme von Oberflächen ohne erkennbare Struktur besteht das Risiko einer fehlerhaften Bildausrichtung oder der Erfassung stark verrauschter Daten. Um eine erfolgreiche Rekonstruktion sicherzustellen, sollten bspw. die folgenden Kriterien nach *Koutsoudis et al. - 2015* bei der Aufnahme von Fotografien berücksichtigt werden:

1. Vermeidung von glänzenden und transparenten Oberflächen sowie überbelichteten Aufnahmen. Idealerweise werden glänzende Objekte bei bewölktem Himmel aufgenommen.
2. Bewegungsunschärfe vermeiden.
3. Sicherstellen einer Überlappung bei Fotografien von mindestens 60 %.
4. Das zu erfassende Objekt sollte sich vorzugsweise in der Mitte der Fotografie befinden und mit mindestens drei Fotografien erfasst werden.

Die *Ground Sampling Distance* (GSD), auch Bodenauflösung genannt, beschreibt die Fläche auf dem Boden oder einem Objekt, die von einem einzelnen Pixel in der Fotografie erfasst wird. Abb. 2.5 zeigt eine schematische Darstellung der GSD.

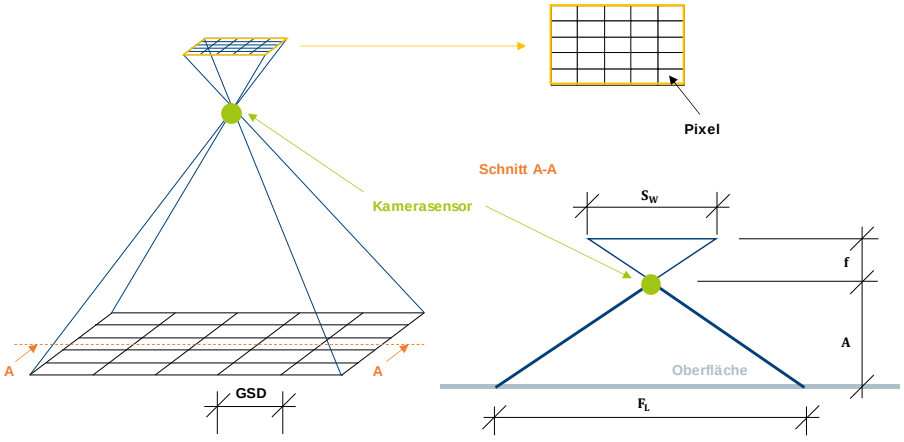


Abb. 2.5: Schematische Darstellung der GSD, Darstellung in Anlehnung an *Collazo et al. - 2020*

Durch Anwendung des Strahlensatzes lässt sich Strecke F_L berechnen, die durch die Fotografie erfasst wird. Die Strecke lässt sich durch eine Multiplikation der Bodenauflösung mit der Bildweite substituieren. Für jeden Pixel können sowohl eine horizontale als auch eine vertikale GSD berechnet werden. Da ein Pixel vereinfacht als quadratisch betrachtet wird, ist die größere der beiden GSD entscheidend. Aufgrund der Tatsache, dass die Sensorweite und die horizontale Auflösung des Sensors in der Regel

größer sind als die Sensorhöhe und die vertikale Auflösung des Sensors, wird die GSD in vielen Studien (*Höhle - 2013; Seifert et al - 2019; Balamuralidhar et al. - 2021*) mithilfe der Gleichung (2.1) ermittelt:

$$\mathrm{GSD} = \frac{\mathrm{A} * \mathrm{S_w}}{\mathrm{f} * \mathrm{B_w}} \tag{2.1}$$

mit GSD Bodenauflösung [cm/px].

A Abstand des Sensors zum erfassten Objekt [cm].

$\mathrm{S_w}$ Sensorweite [mm].

f Brennweite [mm].

$\mathrm{B_w}$ Horizontale Auflösung des Sensors (Bildweite) [px].

Eine Herleitung ist in Anhang A zu finden. Gleichung (2.1) stellt lediglich eine Annäherung dar und weitere Faktoren können berücksichtigt werden, wie bspw. Verzerrungen aufgrund der Linsenoptik oder atmosphärische Effekte. Aus der Gleichung geht hervor, dass die GSD proportional zum Abstand des Sensors zum erfassten Objekt ist. Das bedeutet, je größer der Abstand, desto größer wird die Fläche, die von einem Pixel erfasst wird und folglich nimmt die Genauigkeit der Aufnahme ab. Es sei darauf hingewiesen, dass der spezielle Fall einer schrägen Kameraneigung im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt wird, jedoch in den Werken von *Höhle - 2013* und *Zhang et al. - 2022* näher erläutert wird.

Laserscanning

Seit den 1960er Jahren wird die Entfernungsmessung mittels Laser im Bereich der Raumfahrt eingesetzt (*Bufton - 1989*). LiDAR ist ein optisches Messverfahren zur Ortung und Messung der Entfernung von Objekten im Raum. Das System ähnelt dem Radarverfahren. Der Unterschied besteht allerdings darin, dass anstelle von Mikrowellen beim LiDAR Ultraviolett-, Infrarot- oder Strahlen aus dem Bereich des sichtbaren Lichts verwendet werden (*Gotzig und Geduld - 2015*). Die Objekte werden kontinuierlich mit einem Laserstrahl abgetastet.

Grundsätzlich kann beim Laserscanning unterschieden werden in das terrestrische Laserscanning und das mobile Laserscanning. Der Begriff "terrestrisch" beschreibt jene Methoden, die sich unter anderem auf den Planeten Erde beziehen (lat. *terra*). Das Instrument erfasst an einem Standort die Horizontal- und Vertikalwinkel sowie die Distanz zum Objektpunkt. Dieser Vorgang verläuft automatisch in definierten Winkelschritten. Bei einem Messvorgang mittels Laserscanning entsteht eine Punktwolke mit bis zu mehreren Millionen Punkten, wobei die Punktdichte je nach Auftreffwinkel des Laserstrahls und der eingestellten Messdichte variiert. Eine Punktwolke kann in der Regel neben den Koordinaten (X, Y, Z) für jeden Punkt der Punktwolke noch den Farbwert und die Intensität enthalten, falls zu den Koordinatenmessungen noch Fotografien erfasst worden sind, die auf die Punkte projiziert werden (*Donath et al. - 2008*). Die Punktdichte eines Laserscans beschreibt nach *Aryan et al. - 2021* die minimale Objektgröße, die aus den Punktwolken extrahiert werden kann. Die vertikale Winkelauflösung eines Laserscanners wird durch das vertikale Sichtfeld und die Anzahl der

Kanäle des Sensors bestimmt. Im Gegensatz dazu hängt die horizontale Winkelauflösung nicht von dem horizontalen Sichtfeld ab, sondern ist mit der Messrate des Sensors verknüpft. In Produktdatenblättern wird die horizontale Winkelauflösung in der Regel als Bereich angegeben, wobei eine niedrigere Auflösung auf eine langsamere Messrate und eine höhere Auflösung auf eine schnellere Messrate hinweist.

Plattformen

Neben einer terrestrischen Datenerfassung können Sensoren ebenfalls auf beweglichen Plattformen montiert sein. Im Zuge der Digitalisierung kommen vermehrt Drohnen bspw. zur Aufnahme von Bauwerkszuständen zum Einsatz. Eine Drohne ist ein autonomes Fluggerät ohne eine Person an Bord, das aus der Ferne gesteuert werden kann. Gemäß *Debus und Mellenthin Filardo - 2021* ist eine Drohne ein Bestandteil eines unbemannten Luftfahrtsystems (engl. *Unmanned Aerial System*, "UAS"), zu dem alle notwendigen Komponenten gehören. Diese umfassen in der Regel folgende Elemente: eine Drohne, eine bodenstehende Person, ein Flugcontroller und ein Kommunikationssystem zwischen dem Flugcontroller und der Drohne. Des Weiteren kann ein UAS mit einem Sensor zur Datenerfassung ausgestattet werden. UAS können mit unterschiedlichen Graden der Autonomie geflogen werden, entweder manuell über die Fernsteuerung durch eine menschliche Bedienung, über die Steuerung durch einen Computer oder völlig autonom, wofür Wegpunkte in einem globalen Koordinatensystem erforderlich sind. Multikopter eignen sich besonders gut für den Einsatz im Bauwesen, da sie die Fähigkeit haben, langsam und stabil vertikal zu fliegen und an einem Ort zu schweben. Dazu bieten sie durch ihre geringe Größe eine hohe Manövrierfähigkeit. Andere Arten von unbemannten bodengestützen Fahrzeugen (engl. *Unmanned Ground Vehicle*, "UGV") oder Geräten wie bspw. der Robodog (*Torres und Pfitzner - 2023*) werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da diese in Infrastrukturprojekten aufgrund ihrer begrenzten Reichweite und Zugänglichkeit nur sehr eingeschränkt einsetzbar sind.

2.2.2 Eignung von Erfassungstechnologien

In Tab. 2.1 werden Studien sowie verschiedene Kriterien in alphabetischer Reihenfolge aufgeführt wie Aufwand, Einsatzbereich, Entfernung, Genauigkeit, Kosten, Automatisierung der Datenerfassung (engl. *Level of automation of data acquisition*, “LOADA") oder Gebrauchstauglichkeit, die zur Bewertung der Erfassungstechnologien verwendet wurden. Bisher wurde keine umfassende Studie durchgeführt, die alle Kriterien für die Datenerfassung mit einer Unterteilung in verschiedene AWF umfasst und eine objektive Bewertung der Erfassungstechnologien bietet. Obwohl in Einzelfällen ausgewählte Experteninnen und Experten für Bewertungen herangezogen wurden, sind diese Studien nicht so umfangreich wie Untersuchungen mit einem analytischen Ansatz wie der NWA (*Kühnapfel - 2021*). Im Gegensatz dazu wird oft nur eine theoretische Einschätzung der Erfassungstechnologien im Bauwesen vorgenommen, ohne ihre tatsächliche Anwendung in der Praxis zu berücksichtigen. In den durchgeführten Studien wurden jeweils verschiedene Erfassungstechnologien wie Auto-ID-Technologien, TLS, Photogrammetrie, erweiterte EDV-Methoden wie E-Mail oder Spracherfassung, sowie Handkameras, Krankameras und einer Drohne mit Photogrammetrie analysiert. Diese Erfassungstechnologien sind bereits in unterschiedlichem Maße während der Bauphase in der Bauindustrie implementiert worden.

Nach den Ergebnissen der Verfassenden, die die verschiedenen Technologien beleuchten, wird deutlich, dass die Auswahl einer Erfassungstechnologie, die zu einem bestimmten Projekt oder einem bestimmten AWF passt, von größter Bedeutung ist, da keine der verfügbaren Methoden alle Kriterien zufriedenstellend erreicht.

Tab. 2.1: Auflistung relevanter Studien zu Erfassungstechnologien und deren Einsatzfähigkeit im Bauwesen und Bewertungskriterien (*Tschickardt et al. - 2023a*)

Verfassende	AWF	Aufwand	Einsatzbereiche	Entfernung	Genauigkeit	Kosten	LOADA	Gebrauchstauglichkeit
Kopsida et al. - 2015	Allgemeiner Einsatz	X			X	X	X	X
Omar und Nehdi - 2016	Baufortschrittskontrolle	X		X	X	X	X	X
Reja et al. - 2022	Allgemeiner Einsatz	X	X	X	X	X	X	X
Tuttas et al. - 2016	Baufortschrittskontrolle	X					X	X
Wang et al. - 2020	Allgemeiner Einsatz			X	X	X		
Wu et al. - 2021	Allgemeiner Einsatz			X	X	X		
Xue et al. - 2021	Allgemeiner Einsatz				X	X		X

2.2.3 Aktuelle Gesetzeslage in Deutschland

Ergänzend zur EU-Drohnenverordnung (*EU - 2019*), die in Abschnitt 1.1 vorgestellt und auf nationaler Ebene als "Gesetz zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24.05.2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb der unbemannten Luftfahrt" (*Bundestag - 2021*) umgesetzt wurde, sind auch die Luftverkehrsordnung (*LuftVO - 2015*) sowie das Luftverkehrsgesetz (*LuftVG - 2023*) in Deutschland zur aktuellen Gesetzeslage zu erwähnen. Gemäß *EU - 2019* dürfen Drohnen eine maximale Flughöhe von 120 m über dem Grund erreichen. In dem Hinblick auf bestimmte geografische Gebiete kann es hier noch zu weiteren Einschränkungen kommen. Die Luftverkehrsordnung (*LuftVO - 2015*) definiert in § 21h (*Regelungen für den Betrieb von unbemannten Fluggeräten in geografischen Gebieten nach der Durchführungsverordnung (EU) 2019/947*) Abstände für kritische Infrastrukturen sowie Naturschutzgebiete, Wohngrundstücke und andere geografische Gebiete. In Absatz 3 Nr. 5 dieser Regelung ist festgelegt, dass es erlaubt ist, sich kritischen Infrastrukturen wie bspw. Bundesautobahnen zu nähern. Dabei muss jedoch die Höhe der Drohne über dem Boden stets geringer sein als der seitliche Abstand zur Infrastruktur, wobei dieser Abstand stets mehr als 10 m betragen muss. Des Weiteren dürfen Drohnen, die sich in der offenen Betriebskategorie und der Unterkategorie A2 befinden, in der Regel bis zu

30 m an unbeteiligte Personen heranfliegen. Im Langsamflugmodus ist es erlaubt, sich unbeteiligten Personen bis auf 5 m zu nähern (*EU - 2019*). Der Langsamflugmodus wurde gemäß einem Erlass des Luftfahrt-Bundesamts (*LBA - 2022*) auf eine Geschwindigkeit von 3 m/s begrenzt. Eine Begründung für diese Begrenzung konnte auch auf Rückfrage beim LBA nicht gegeben werden. In der Unterkategorie A3 muss ein horizontaler Sicherheitsabstand von mindestens 150 m eingehalten werden. In der speziellen Betriebskategorie C4 ist es erforderlich, eine Betriebsgenehmigung und eine Betriebserklärung vorzuweisen. Für zulassungspflichtige Drohnen sind darüber hinaus eine Zulassung, ein Betreiberzeugnis und gegebenenfalls eine Fernpilotenlizenz erforderlich. In Anhang B ist eine Übersicht über Gesetzesanforderungen je nach Betriebskategorie und Drohnenklasse zur Übersicht dargestellt.

2.3 Planung der Datenerfassung

Eine manuelle Datenerfassung und Flugsteuerung durch eine Drohnenpilotinnen oder -piloten führen laut *Zhang et al. - 2016* zu keiner optimalen Befliegung und Datenerfassung. Dabei leiden im Vergleich zu einer manuell geplanten Erfassung die Daten in Bezug auf ihre Genauigkeit und den Abdeckungsgrad. *Biswas et al. - 2015* sind ebenfalls der Ansicht, dass bei einer manuellen Datenerfassung, die aufgrund von Zeichnungen oder lediglich mit geometrischen Modellen geplant wurde, die erfassten Daten hinsichtlich Präzision und Dichte nicht ausreichend, unvollständig oder mehr als notwendig sein können, was zu einer unnötig großen Datenmenge führt. Eine Automatisierung der drohnenbasierten Datenerfassung verschafft Abhilfe, da eine ausreichende Abdeckung durch die erfassten Daten, Sensorbeschränkungen, Drohnenbewegung sowie Zeit- und Kosteneffizienz berücksichtigt werden können. Die Einführung des Begriffs *Planning for Scanning* (P4S) durch *Turkan et al. - 2012* unterstreicht die Notwendigkeit, sämtliche relevanten Objekte mit ausreichender Abdeckung zu erfassen. *Aryan et al. - 2021* teilen ebenfalls die Ansicht, dass eine wirksame und effiziente Datenerfassung mittels LiDAR durch ein P4S erfolgen kann. Dies lässt sich auf die Photogrammetrie übertragen, da auch in diesem Bereich eine sorgfältige Planung der Datenerfassung von entscheidender Bedeutung ist.

In Tab. 2.2 ist eine Übersicht der für diese Arbeit relevanten Forschungsarbeiten zur Flugplanung und Wegpunktermittlung aufgelistet. Die Tabelle enthält Informationen zu den Verfassenden der Arbeiten, gibt Auskunft über den verwendeten Eingangstyp (geometrisches Modell oder IFC), sowie den genutzten Sensor und beschreibt den Anwendungsbereich der jeweiligen Flugplanung. Die Anwendungsbereiche erstrecken sich von Inspektionen bis zur Ausführung von Bauprojekten.

Tab. 2.2: Auflistung von Forschungsarbeiten zur Planung von Datenerfassungen

Verfassende	Eingang	Sensor	Anwendung
Bolourian und Hammad - 2020	geometrisches Modell	LiDAR	Inspektion
Freimuth und König - 2019	geometrisches Modell	Kamera	Inspektion
Morgenthal et al. - 2019	geometrisches Modell	Kamera	Inspektion
Debus und Rodehorst - 2021b	geometrisches Modell	Kamera	Inspektion
Hamledari et al. - 2021	IFC	Kamera	Ausführung
Ibrahim und Golparvar-Fard - 2019	geometrisches Modell	Kamera	Ausführung
Song et al. - 2020	geometrisches Modell	Kamera	Inspektion

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden die Forschungsarbeiten im Detail erläutert. Forschungslücken und der Beitrag dieser Arbeit werden in Abschnitt 2.6 behandelt.

Bolourian und Hammad - 2020 präsentieren in ihrer Arbeit neben ihrem eigenen Ansatz (*Bolourian et al. - 2017*) einen umfassenden Überblick über drohnenbasierte Ansätze zur Flugplanung. Hierbei fällt auf, dass die meisten dieser Ansätze bereits auf ein geometrisches Modell zurückgreifen, jedoch bisher kein Ansatz ein BIM mit seinen vollständigen semantischen Informationen nutzt. Die Generierung der Wegpunkte erfolgt zudem überwiegend manuell, vereinzelt durch Einsatz der Problemlösungsmethode der "nächstbesten Ansicht" (engl. *next best view*) (vgl. *Scott et al. - 2003; Reed et al. - 1997*) oder des "Museumswächters" (engl. *art gallery problem*) (vgl. *Chvátal - 1975; O'Rurke - 1987*). Bei der Generierung der Flugroute kommen Suchalgorithmen wie der A*-Algorithmus (*Hat et al. - 1968*), der genetische Algorithmus (engl. *genetic algorithm*, "GA"), der *Rapidly-exploring random tree* oder der Ameisenalgorithmus (*Fidanova - 2021*) zum Einsatz. Der Ansatz von *Bolourian und Hammad - 2020* baut auf der Arbeit von *Albahri und Hammad - 2017* auf, bei der die Positionierung von Überwachungskameras auf Grundlage eines geometrischen Modells erfolgte. Dabei wurden die visuellen Kameraperspektiven simuliert, die Oberfläche in Zellen unterteilt, diesen Zellen Wichtigkeitswerte zugewiesen, eine Sichtbarkeitsanalyse durchgeführt und schließlich die Abdeckungsbereiche der Kameras berechnet. Abb. 2.6 zeigt die Generierung der Wegpunkte auf der Unterseite eines Brückenbauwerks basierend auf dem Ansatz von *Bolourian und Hammad - 2020* anhand von Wichtigkeitswerten. Die Abschnitte werden in kritische Bereiche unterteilt, wobei die potenzielle Existenz von Rissen oder anderen Oberflächenfehlern berücksichtigt wird. Die Wegpunkte werden manuell auf Grundlage dieser Einteilung festgelegt.

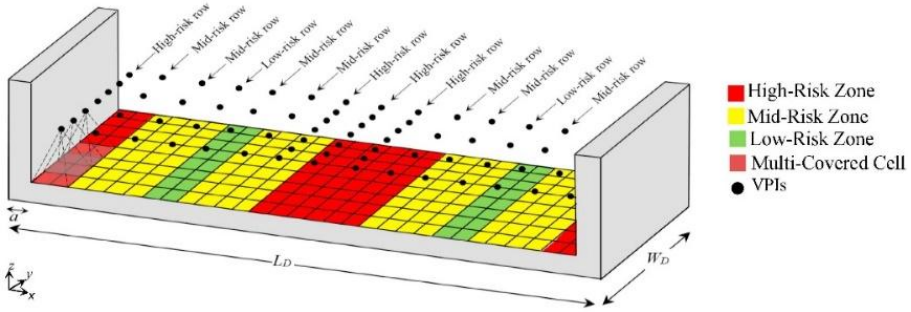


Abb. 2.6: Verteilung der Wegpunkte auf Grundlage der Kritikalität des Bauwerks (*Bolourian und Hammad - 2020*)

Freimuth et al. - 2017 stellen zunächst ein Konzept vor, das auf der Generierung von Begrenzungsvolumina basiert und einen zusätzlichen Sicherheitsabstand zu diesen berücksichtigt. Relevante Bauteile werden manuell selektiert, um einen Wegpunkt zu generieren. *Freimuth und König - 2019* haben diesen Ansatz weiterentwickelt, indem sie die Flugplanung nicht mehr anhand der Begrenzungsvolumina der Bauteile, sondern mithilfe der Generierung eines Navigationsvolumens durchführen. Dies wurde vorgenommen, da die ursprüngliche Methode bei konkaven Bauteilen zu großen

Ungenauigkeiten führte. Das Navigationsvolumen wird als eine Menge von *Voxel* dargestellt, bei denen keine Kollisionen mit relevanten Geometrien aus dem BIM auftreten. Ein Graph wird erzeugt, der die Beziehungen zwischen den *Voxel* darstellt, wobei jeder Übergang zwischen den Knoten eine mögliche Bewegung der Drohne von einem Wegpunkt zum entsprechenden Wegpunkt eines benachbarten *Voxel* darstellt. Ein *Voxel* entspricht in einem 2D-Bild einem Pixel. Eine *Voxel* Datenstruktur kann als dreidimensionales Gitter betrachtet werden, wobei der Raum über alle Achsen gleich verteilt und in einzelne *Voxel* gegliedert wird (*Kaufman - 1993*). Im nächsten Schritt wird durch Einsatz des A*-Algorithmus (*Hat et al. - 1968*) und der Problemlösungsmethode des "Handlungsreisenden" (engl. *Traveling Salesman Problem*, "TSP") (*Grötschel - 2015*) der kürzeste Pfad aller Wegpunkt in begrenzter Flugzeit berechnet. Während des Fluges löst die eingebaute Kamera in vorberechneten Intervallen programmgesteuert aus, um Fotografien aufzunehmen.

In einem Konzept zur automatisierten Brückeninspektion von Bestandsbauwerken (*Morgenthal et al. - 2019*) werden Wegpunkte ebenfalls mit einem festgelegten Abstand zum Bauwerk und einem auf der Bauwerkshülle liegenden Raster ermittelt. Als Grundlage dient ein geometrisches Modell oder eine initiale manuelle Befliegung, welche in ein Polygonnetz transformiert wurde. Die Blickrichtungen der Kamera werden berechnet, in dem für jeden Wegpunkt der entsprechende Punkt auf dem Bauwerk bzw. Polygonnetz gefunden wird. Die Planung der Flugroute wird durch alle ermittelten Wegpunkte als TSP gelöst. Darüber hinaus erweitern sie den Ansatz, so dass die Brückeninspektion auf Grundlage verschiedener Interessensbereiche erfolgt (*Debus und Rodehorst - 2021b*). Die Zuweisung eines bestimmten Interessensbereichs für Teile des Bauwerks kann auf vielen Faktoren beruhen, wie z. B. Wissen über das Bauwerk. Für jeden definierten Interessensbereich werden Wegpunkte berechnet, die ausreichend abdecken, während die Anzahl der Fotografien auf ein Minimum reduziert wird. Für die Berechnung wird das zugrunde liegende geometrische Modell als Polygonnetz des Bauwerks dargestellt.

Hamledari et al. - 2021 stellen einen Ansatz vor, der auf dem Modell von *Lin et al. - 2013* basiert. Das IFC-Format wird verwendet, um sowohl geometrische als auch semantische Informationen wie der IFC-Entität *IfcTask* mittels der Python Bibliothek *IfcOpenShell* (*Krijnen - 2023*) zu extrahieren, um eine Pfadplanung zu generieren. Im Ansatz von *Lin et al. - 2013* bleibt jedoch unbeachtet, dass Drohnen in der Lage sind, Hindernisse zu überfliegen. Dieser Aspekt wird im Ansatz von *Xu et al. - 2017* berücksichtigt, der den navigierbaren Raum im Innenbereich eines Gebäudes identifiziert. Im Ansatz von *Hamledari et al. - 2021* werden die Vorgänge und die verknüpften Elemente, bei denen eine Erfassung notwendig ist, manuell gefiltert und selektiert. Anschließend werden die Bauteile im frei navigierbaren Raum des Grundrisses dargestellt, um eine Reihe von Wegpunkten zu generieren, die eine vollständige Abdeckung der identifizierten Elemente gewährleisten und die Anforderungen der Bilderkennung und der Algorithmen zur Modellaktualisierung erfüllen. Im Anschluss berechnet der Dijkstra-Algorithmus (*Dijkstra - 1959*) die kürzeste Entfernung der Erfassungspositionen und der Ameisenalgorithmus (*Fidanova - 2021*) entwirft eine Flugplanung, welche die Flugdauer minimiert und gleichzeitig eine Erfassung an jeder Position ermöglicht.

Die Ansätze *Ibrahim und Golparvar-Fard - 2019* und *Ibrahim et al. - 2019* präsentieren zwei wesentliche Vorgehensweisen zur automatischen Datenerfassung. Der erste

Ansatz konzentriert sich auf Innenräume und nutzt LiDAR auf einem UGV. Dieser Ansatz basiert auf einem geometrischen Modell, um einen zweidimensionalen Lageplan zu erstellen. Die Platzierung der Wegpunkte erfolgt manuell, bevorzugt in der Mitte jedes Raumes mit Bauteilen in der Herstellung. Im zweiten Ansatz liegt der Fokus auf der Datenerfassung im Außenbereich mit Hilfe von Drohnen und Photogrammetrie. Hier werden Standardvorlagen für die Flugplanung generiert, die anschließend visuell bewertet werden.

In *Song et al. - 2020* erfolgt zuerst die Übersetzung des geometrischen Modells in eine Referenz-Punktwolke, die die Oberfläche des BIM durch gleichmäßig verteilte Punkte darstellt. Anschließend wird für jeden *Voxel*, der aus der Referenz-Punktwolke abgeleitet wurde, gekennzeichnet, ob er frei oder belegt ist. Die belegten *Voxel* werden als die abzudeckenden und zu erfassenden Ziele betrachtet, während die freien *Voxel* als potenzielle Wegpunkte dienen. Die freien *Voxel* mit maximaler Abdeckung werden mithilfe eines Greedy-Algorithmus identifiziert und zur Liste der Wegpunkte hinzugefügt. Die Bestimmung der optimalen Flugroute erfolgt anschließend durch die Anwendung von TSP und GA.

2.4 Modellbasierte Baufortschrittskontrolle

Die automatisierte Erkennung von Objekten in Punktwolken wird bereits seit *Bosché und Haas - 2008* sehr umfangreich untersucht. *Arman und Aggarwal - 1993* schlagen zur Objekterkennung die "*Lokalisierung eines gewünschten Objektes in einer Umgebung und Bestimmung seiner exakten Position und Ausrichtung*" vor. Als Analogie zur Objekterkennung und Rekonstruktion mittels Punktwolken (engl. *Scan-to-BIM*) bezeichnen *Bosché et al. - 2013* den geometrischen Abgleich zwischen erfasster Punktwolke und geometrischem Modell der Soll-Planung als "*Scan-vs-BIM*". Ansätze des *Scan-to-BIM* können nach *Turkan et al. - 2014* zwar Objekte erkennen, benötigen allerdings weitere Informationen zur Rekonstruktion, um einzelne Objekte mit ähnlicher Form eindeutig zu identifizieren, bspw. Material und Textur. Dagegen ermöglichen Ansätze der Methode *Scan-vs-BIM* eine direkte Identifizierung der erkannten Objekte, da sich jedes erkannte Objekt auf ein einzelnes, eindeutig platziertes Objekt innerhalb des BIM bezieht. Beim *Scan-vs-BIM* ist eine Grundvoraussetzung, dass die erfasste Punktwolke im gleichen Koordinatensystem wie das BIM registriert ist.

In Tab. 2.3 ist eine Übersicht von für diese Arbeit relevanten Forschungsarbeiten zur modellbasierten Baufortschrittskontrolle mittels photogrammetrischen sowie LiDAR erzeugten Punktwolken dargestellt. Neben Angaben zu den Verfassenden sind Informationen zum verwendeten Verfahren, zur Art des Abgleichs und zur Plattform aufgeführt. Es existieren verschiedene Methoden für die modellbasierte Baufortschrittskontrolle. Einige dieser Methoden verwenden Algorithmen, die zu *Computer Vision* gehören und können sehr komplex sein, wobei sie häufig auf *Machine Learning* Methoden angewiesen sind. Andere Algorithmen sind hingegen weniger komplex, setzen auf analytische Verfahren und können leichter implementiert werden. Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden die Forschungsarbeiten im Detail erläutert. Forschungslücken und der Beitrag dieser Arbeit werden in Abschnitt 2.6 behandelt.

Tab. 2.3: Auflistung von Forschungsarbeiten zur modellbasierten Baufortschrittskontrolle

Verfassende	Verfahren	Abgleich	Plattform
Bosché et al. - 2013	Punktabgleich	Punkte	Terrestrisch
Turkan et al. - 2013	Punktabgleich	Punkte	Automobil
Pučko et al. - 2018	Bildverarbeitung	Fläche	Bauhelm
Zhang und Arditi - 2013	Volumen	Punkte	Terrestrisch
Tran und Khoshelham - 2019	Flächenabgleich	Fläche	Synthetisch
Maalek et al. - 2019	Bildverarbeitung	Fläche	Terrestrisch
Kim et al. - 2013	*Computer Vision*	Farbwert	Terrestrisch
Hamledari et al. - 2021	*Computer Vision*	Fotografien	Drohne
Tuttas - 2017	*Computer Vision*	Fotografien	Kran
Ibrahim und Golparvar-Fard - 2019	*Computer Vision*	*Voxel*	Handkamera

Analytische Algorithmen

Bosché spielt eine entscheidende Rolle in zahlreichen Ansätzen, die als Grundlage für den Abgleich von Punktwolken dienen. In ihrer ersten Arbeit gleichen *Bosché und Haas - 2008* eine erfasste Punktwolke mit einer synthetisch erzeugten Punktwolke ab, welche aus einem geometrischen Modell abgeleitet wird. Die synthetischen Punkte stellen projizierte Punkte auf der Oberfläche des geometrischen Modells dar, die auf Grundlage des Standortes des Laserscanners generiert wurden. Ein Punkt der erfassten Punktwolke gilt als erkannt, wenn die Differenz zum korrespondierenden Punkt in der synthetischen Punktwolke geringer als ein vorher festgelegter Grenzwert ist. Der Abgleich mit einem Objekt erfolgt über eine Mindestanzahl von erkannten Punkten. *Bosché - 2010* baut hierauf auf und filtert zudem einen Teil der erfassten Punktwolke heraus, der keinem Objekt zugeordnet werden konnte, um Punkte zu identifizieren, die zu Verdeckungen gehören. Das Ergebnis ist, dass jedem Objekt eine entsprechende verdeckte (engl. *occluded*) Punktwolke zugeordnet werden kann.

Erste Ansätze zur modellbasierten Baufortschrittskontrolle werden in *Turkan et al. - 2012* veröffentlicht, die ein BIM mit zeitlichem Bezug verwenden. Nach der Objekterkennung wird der Baufortschritt für jeden Vorgang im Terminplan manuell aktualisiert. Der Baufortschritt wird zum Zeitpunkt des Erfassungsdatums (engl. *ScanDate*) auf der Grundlage der Ergebnisse der Objekterkennung berechnet. Der Ansatz schätzt in einem ersten Schritt den Fortschritt nur für die laufenden Vorgängen, d. h. solche mit geplanten Startterminen vor dem *ScanDate* und geplanten Endterminen nachdem *ScanDate*. Das bedeutet, dass alle Objekte, die ein Fertigstellungsdatum vor dem *ScanDate* besitzen, als gebaut angesehen werden, und solche die ein Startdatum nach dem *ScanDate* besitzen, als noch nicht gebaut. Für jeden laufenden Vorgang vergleicht der Algorithmus die Anzahl der erkannten Objekte mit der Anzahl der zu erwartenden Objekte. In *Turkan et al. - 2012* wird keine Aussage getroffen, wie die Rückmeldung der Vorgänge in den Terminplan im Detail erfolgt. Eine Erweiterung dieses Verfahrens ist in *Bosché et al. - 2013* und *Turkan et al. - 2014* zu finden. Neben gebauten Bauteilen werden ebenfalls auch sekundäre und temporäre Objekte (bspw. Bewehrung und Schalung) detektiert. Die Elemente werden erkannt, wenn Sie sich innerhalb, auf oder unterhalb der Bauteiloberfläche eines im Rahmen eines Grenzwertes erfassten Punktes befinden. Schalungsstützen werden erkannt, wenn Punkte innerhalb eines gekennzeichneten Bereichs einen Grenzwert an Punkten

übersteigen. *Bosché et al. - 2014* integrieren hierauf aufbauend einen auf *Hough-Transformation*-basierenden Ansatz (*Hough - 1959*) zur Erkennung von kreisförmigen Querschnitten, die regelmäßig bei der technischen Gebäudeausrüstung vorkommen. Das vom Verkehrsministerium von Oregon, USA initiierte Forschungsvorhaben mit der Förderungsnummer SPR 811 "*Project Progress Tracking Using Lidar And 4D Information Models*" untersuchte die Baufortschrittskontrolle im Brückenbau. Das Konzept nutzt die bisher veröffentlichten Ansätze, gleicht die erfasste mit der transformierten Punktwolke des geometrischen Modells ab, um den Fertigstellungsgrad der Elemente mittels konvexer Hülle aller segmentierten Punkte eines Bauteils zu berechnen. *Turkan et al. - 2019* veröffentlichten die Ergebnisse ebenfalls in *Puri und Turkan - 2020*. Auch dieser Ansatz beruht auf dem Punktabgleich wie zuvor in *Bosché - 2010; Turkan et al. - 2014* verwendet.

In ihrem Ansatz führen *Rebolj et al. - 2017* sogenannte Bauteilklassen ein, um die Elemente nach ihren Größenabmessungen zu kategorisieren. Die Bauteile werden durch eine kontinuierliche Datenerfassung mittels Kamera-bestückten Bauhelmen aufgenommen. Die Oberflächen des geometrischen Modells werden als planare Flächen projiziert sowie gerastert und Bauteile als erkannt gemeldet, wenn die erfassten und auf die nächstliegende Fläche projizierten Punkte eine Rasterzelle belegen. Der Ansatz wird in *Pučko et al. - 2018* weiterentwickelt und es wird definiert, dass ein Bauteil als erkannt gilt, sobald ein Drittel der Oberfläche erfasst wurde. Es wird darauf hingewiesen, dass die Bauhelme zusätzlich mit einem Positionierungssystem und einem Kommunikationssystem ausgestattet werden sollten. Es wird jedoch nicht erläutert, wie die damit erfassten Informationen in den Terminplan integriert werden.

Zhang und Arditi - 2013 verwenden ebenfalls einen Abgleich von erfassten Punkten zur Baufortschrittkontrolle. Die Bauteile werden erkannt, indem das Verhältnis der Anzahl der erfassten Punkte des Bauteils, welche innerhalb eines verkleinerten Volumens des Bauteils und dem Volumen des Bauteils überprüft wird. Der Ansatz wurde in *Zhang und Arditi - 2020* um weitere geometrische Primitiven ergänzt und auf einer realen Baustelle getestet. *Tran und Khoshelham - 2019* projizieren in ihrem Ansatz die erfassten Punkte orthogonal auf die nächstliegende Oberfläche des Bauteils, um eine planare Form der erfassten Punkte mittels Delauney-Triangulation (*Delaunay - 1934*) zu konstruieren. Die Vollständigkeit der Oberfläche wird durch die Bestimmung der Bauteiloberfläche und der abgedeckten Delaunay-Triangulation ermittelt, die zuvor mit einem Grenzwert zwischen zwei Punkten definiert wurde.

Maalek et al. - 2019 verfolgen das Ziel, die Eckpunkte der Bauteile anhand von erkannten geometrischen Primitiven, wie bspw. Ebenen, aus den erfassten Punktwolken zu bestimmen. Nach *Maalek et al. - 2018* gibt es in der Regel drei gängige Methoden, die für diese Aufgabe verwendet werden können. Die Hough-Transformation (*Hough - 1959*) ist ein Verfahren, das es ermöglicht, gerade Linien oder ebene Flächen in Punktwolken zu identifizieren. Die Hauptkomponentenanalyse (engl. *Principal Component Analysis*, "PCA") (*Dunteman - 1989*) ist ein Verfahren, das verwendet wird, um die Hauptachsen der Verteilung von Punkten in einem Raum zu finden. In diesem Kontext kann die PCA dazu verwendet werden, um die Orientierung von ebenen Flächen zu bestimmen. Der RANSAC-Algorithmus (engl. *random sample consensus,* "RANSAC") (*Fischler und Bolles - 1981; Schnabel et al. - 2007*) ist ein Verfahren zur Schätzung einer Primitiven innerhalb einer Reihe von Messwerten mit Ausreißern und

groben Fehlern. In Abschnitt 4.4.1.3 erfolgt eine detaillierte Beschreibung des Algorithmus. *Maalek et al. - 2019* bevorzugen in ihrem Ansatz die Verwendung der PCA anstelle der Hough-Transformation, da letztere für die Klassifizierung von Flächen sehr rechenintensiv ist und die Klassifizierungsergebnisse durch das Vorhandensein von Ausreißern erheblich beeinflusst werden (*Lari und Habib - 2014*). *Vo et al. - 2015* betonen, dass die Effektivität des RANSAC-Algorithmus stark von Faktoren wie der Punktdichte, der Genauigkeit der Punkte und dem Rauschen abhängig ist. Sie argumentieren, dass der RANSAC-Algorithmus möglicherweise weniger geeignet für große Datensätze ist, ohne dies jedoch näher zu spezifizieren. Der RANSAC-Algorithmus kann auch zur Generierung eines *As-Built*-Modells verwendet werden (*Oerter und Tschickardt - 2025*).

Abb. 2.7 veranschaulicht die Segmentierung von Bauteilflächen in einer Punktwolke, die mithilfe von TLS erstellt wurden. Nach der Klassifizierung der Punkte zu ebenen Flächen werden diese Punkte, auf die sich schneidenden Linien projiziert und die Eckpunkte werden identifiziert. In *Maalek et al. - 2019* werden zusätzlich die erkannten Flächen der Bauteile für die Baufortschrittskontrolle der gesamten Baustelle herangezogen. Der Abgleich zwischen Ist-Zustand und geometrischem Modell wird mit einem Grenzwert durchgeführt, um erwartete Bautoleranzen zu berücksichtigen.

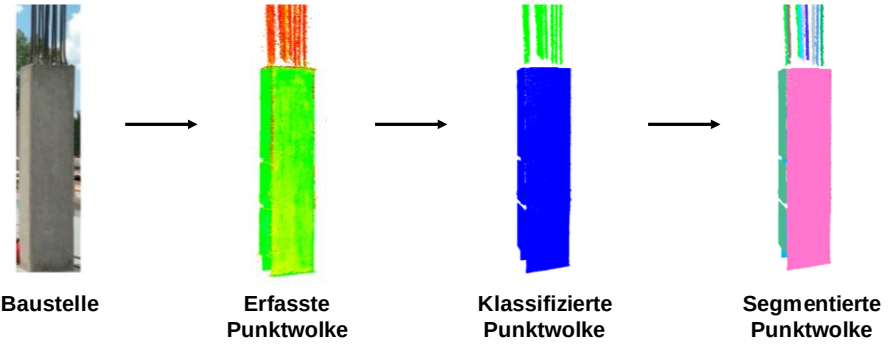


Abb. 2.7: Erkennung von Bauteilflächen aus einer Punktwolke, Darstellung in Anlehnung an *Maalek et al. - 2019*

Computer Vision

Kim et al. - 2013 klassifizieren und filtern Betonbauteile wie Decken, Wände oder Stützen über den Farbwert, die Farbsättigung und den Hellwert mittels *Support Vector Machines* (SVM). Bei der Klassifikation wird zwischen linearen Objekten (z. B. Stützen und Balken), flächigen Objekten (z. B. Wände und Decken) und anderen Objekten unterschieden. Ein Bauteil gilt als bestätigt, wenn die Klassifikation des Bauteils mit dem Bauteil des geometrischen Modells übereinstimmt. *Son et al. - 2017* adaptieren diesen Ansatz in ihrer Arbeit. Die Baufortschrittskontrolle wird in die Terminplanungssoftware übertragen, wodurch die Start- und Endtermine aktualisiert werden können. Dieser Ansatz beinhaltet die Neu-Berechnung des tatsächlichen Fortschritts jedes einzelnen Vorgangs auf Grundlage des kritischen Pfades und berücksichtigt die logischen Beziehungen und Abhängigkeiten zwischen den Vorgängen. Abschließend wird ein neuer Terminplan erzeugt, der erneut in die 4D-Software importiert werden kann.

Hamledari et al. - 2021, wie bereits in Abschnitt 2.3 dargelegt, schließt seine Planung der Datenerfassung mit einer Baufortschrittskontrolle ab. In dem Ansatz wird eine Drohne mit Photogrammetrie in Verbindung mit *Computer Vision* Methoden verwendet. Ebenso wird im Ansatz das IFC-Format verwendet, wobei Terminplaninformationen wie *IfcTask* und *IfcScheduleTimeControl* genutzt werden. Im Rahmen ihrer Arbeit werden standardisierte Merkmale des IFC-Schemas aktualisiert und projektspezifische Merkmale hinzugefügt, um den Baufortschritt zu visualisieren. Der Fortschritt auf der Baustelle wird aktualisiert, sobald Bauteile auf den aufgenommenen Fotografien erkannt werden.

Das Forschungsprojekt "*Entwicklung eines automatisierten Verfahrens zur Baufortschrittskontrolle auf Basis der Integration von Punktwolkeninterpretation und 4D Bauwerksmodellierung*" mit der Projektnummer 220340609 (STI 545/6-1 und BO 3575/4-1) der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) untersuchte in der Zeit von 2012 bis 2018 die Überwachung des Baufortschritts im Hochbau. Das entwickelte Verfahren verwendet photogrammetrische Punktwolken, die mittels Drohnen, einer Handkamera oder einer kranmontierten Kamera erfasst worden sind, und *Computer Vision*. Der Abgleich erfolgt zwischen den erfassten Punktwolkendaten und einem BIM in Kombination mit einer graphbasierten Darstellung der zugehörigen Bauprozesse. Die Ergebnisse wurden in *Tuttas - 2017*, *Braun - 2020* und *Braun et al. - 2021* veröffentlicht.

Im Kontext der Baufortschrittskontrolle unterteilen *Ibrahim und Golparvar-Fard - 2019* analog zu *Lee et al. - 2019* die Punktwolke in *Voxel*, wobei jeder belegte *Voxel* als Fortschritt markiert wird.

2.5 Lean Construction

Lean Construction ist eine Philosophie, die ihre Ursprünge in den Lean Prinzipien von Taiichi Ohno (*Ohno - 1982*) hat, die ursprünglich für die Automobilindustrie entwickelt wurden. Die Lean Construction Philosophie wurde für das Bauwesen weiterentwickelt, um eine kontinuierliche Verbesserung, eine Minderung der Verschwendung, ein effizienteres Projekt- und Lieferkettenmanagement sowie eine bessere Kommunikation auf der Baustelle und im Team zu fördern (*Saieg et al. - 2018*). Dieser Ansatz verfolgt das Ziel, das gesamte Bauprojekt und seine Teilprozesse sowohl in der Planung als auch in der Ausführung kontinuierlich zu optimieren. Um dieses Ziel zu erreichen, ist ein transparentes und zugängliches Daten- und Informationsmanagement von entscheidender Bedeutung. Nur durch eine solche Dateninfrastruktur lassen sich strukturierte Prozesse auf der Baustelle gewährleisten.

2.5.1 Prinzipien der Lean Methodik

Die derzeitigen Abläufe und Rahmenbedingungen in der Bauwirtschaft führen häufig zu Termin- und Kostenüberschreitungen sowie zu Baumängeln, die nur mit großem Aufwand beseitigt werden können. Dies geschieht selbst bei gut organisierten Projekten und trotz großer Anstrengungen des Projektteams. Der Hauptgrund dafür ist der traditionell lineare Planungsprozess (*Spieth et al. - 2016*). Durch Lean Construction können diese Schwächen der konventionellen Arbeitsmethodik jedoch überwunden

werden. Lean Construction umfasst nach *VDI 2870-1* und *VDI 2870-2* des Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) folgende Gestaltungsprinzipien:

- Vermeidung von Verschwendung,
- kontinuierliche Verbesserung,
- Standardisierung,
- Null-Fehler-Prinzip,
- Fließprinzip,
- Pull-Prinzip,
- Mitarbeiterorientierung,
- zielorientierte Führung und
- visuelles Management.

Für eine praxisgeeignete Methodik einer ereignisorientierten und drohnenbasierten Datenerfassung sind das Pull-Prinzip und die kontinuierliche Verbesserung von entscheidender Bedeutung. Diese Gestaltungsprinzipien werden nachfolgend vorgestellt.

2.5.2 Pull-Prinzip

Bei dem sogenannten Push-Prinzip wird der Produktionsprozess aufgrund von prognostizierten Annahmen und Schätzungen initiiert (*Liker - 2013*). Dabei wird das Produkt durch alle Produktionsstufen geschoben und entweder am Ende übergeben oder bis zum Übergabezeitpunkt zwischengelagert (*Weber - 2014*). Ein erheblicher Aspekt dieses Vorgehens besteht darin, dass in der Regel hohe Bestände oder Daten entlang des Produktionsprozesses gehalten werden müssen, um auf Störungen und Änderungen im Bedarf reagieren zu können. Dies führt zu längeren Durchlaufzeiten (*Dombrowski und Mielke - 2015*). Bei dem sogenannten Pull-Prinzip wird bedarfsorientiert der Produktionsprozess mit einer Bestellung initiiert, sodass die Produktion kundenorientiert erfolgt (*Weber - 2014*). Die Produktion ist so aufgebaut, sodass jeder Produktionsschritt jeweils den vorgelagerten Schritt der Produktion anstößt. Durch diese Vorgehensweise entsteht ein Nachfragesog. Die Bestellung bzw. Bedarfsinformation wird von Produktionsschritt zu Produktionsschritt antiparallel zum Materialfluss weitergegeben, siehe Abb. 2.8 (*Günther und Tempelmeier - 2009*).

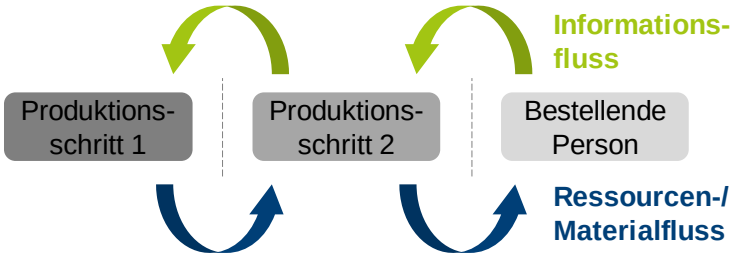


Abb. 2.8: Pull-Prinzip mit Informations- sowie Ressourcen- und Materialfluss, Darstellung in Anlehnung an *Günther und Tempelmeier - 2009; Dickmann - 2015*

Durch das Pull-Prinzip wird sichergestellt, dass die Produkte nur bei einem vorliegenden Bedarf produziert werden, da die Produktion ausschließlich kundenorientiert angestoßen wird. Der Grundgedanke des Pull-Prinzips ist, dass Ressourcen und Material

zeitgenau in den Prozess gezogen werden und dadurch die produzierende Menge nicht durch Annahmen und Schätzungen des Produzierenden bestimmt, sondern unmittelbar von der Bestellung abhängig gemacht werden (*Dickmann - 2015*). Ziel des Prinzips sind somit bedarfsgerechte Bereitstellung und Einsatz von Ressourcen (*Dombrowski und Mielke - 2015*).

2.5.3 Kontinuierliche Verbesserung

Nach *VDI 2870-1* und *VDI 2870-2* ist ein Kerngedanke einer exzellenten Bauabwicklung das Streben nach Perfektion, das sich in einer stetigen "Veränderung zum Besseren" äußert und im Gestaltungsprinzip "Kontinuierlicher Verbesserungsprozess" (KVP) verankert ist (*VDI 2870-1*). Die stetige Verbesserung ist ebenfalls unter dem Begriff Kaizen (jap. *kai* = ändern; jap. *zen* = das Gute) bekannt (*Imai - 1997*). Der KVP ist in viele Regelungen und Standards eingeflossen, bspw. auch in den Bereich des Qualitäts- (ISO 9001) und Umweltmanagements (ISO 14001) der Internationalen Organisation für Normung (engl. *International Organization for Standardization*, "ISO") (*Gastl - 2005*). Zu dem Gestaltungsprinzip KVP gehört neben weiteren Methoden insbesondere der iterative Regelkreis zur Problemlösung, auch bekannt als PDCA-Zyklus (*Deming - 1982*). Deming war der Ansicht, dass jede Tätigkeit und jeder Vorgang als Prozess zu betrachten sind, welcher sukzessive und kontinuierlich optimiert werden kann.

Abb. 2.9 zeigt den PDCA-Zyklus, der für die erfolgreiche Umsetzung der KVP genutzt werden kann. Die Vorgehensweise einer kontinuierlichen iterativen Verbesserung gemäß *VDI 2870-2* sieht wie folgt aus:

1. Planen (engl. *Plan*): Eine Planung zur Verbesserung der betrachteten Prozesse oder Aufgaben wird entworfen. Diese Planung umfasst das Erkennen des Verbesserungspotenzials, die Analyse der Problemursachen, die Konzeption und Festlegung eines Zielzustands sowie die Erstellung eines entsprechenden Aktionsplans zur Erreichung des Ziels.
2. Durchführen (engl. *Do*): Die Umsetzung der geplanten Aktivitäten und eine Ermittlung von Zwischenergebnissen führen zur Realisierung der geplanten Prozesse.
3. Überprüfen (engl. *Check*): In der Ergebniskontrolle wird anhand von Kennzahlen überprüft und dokumentiert, welche Ergebnisse mit den geplanten Aktivitäten und den geplanten Veränderungen einzelner Prozesse im Vergleich zur Ausgangssituation erreicht wurden.
4. Handeln (engl. *Act*): Zuletzt werden die Aktivitäten zusammengefasst, Ergebnisse visualisiert und überprüft und bei Bedarf wird der PDCA neu initiiert.

Die KVP wird zudem durch eine Standardisierung des Prozesses (Keil) abgesichert. Diese besteht aus Verfahren, die eine vorläufige *Best-Practice* Vorgehensweise beschreiben und nur solange gültig sind, bis eine bessere Lösung gefunden wird (*Dombrowski und Mielke - 2015*).

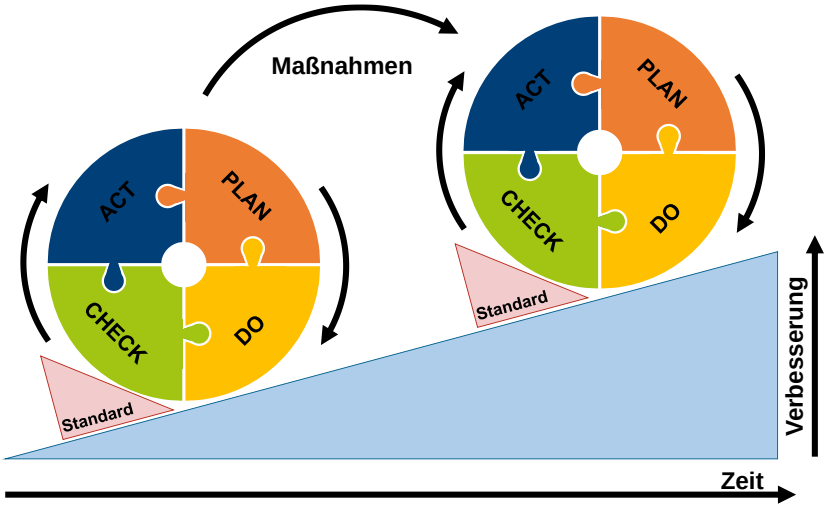


Abb. 2.9: PDCA-Zyklus, Darstellung in Anlehnung an *Spieth et al. - 2016*

2.6 Forschungsbedarf und Beitrag dieser Arbeit

Basierend auf einer Literaturrecherche zu abgeschlossenen und laufenden Forschungsprojekten wird deutlich, dass eine Datenerfassung unter Verwendung eines 4D-BIM eine effiziente Methode zur Unterstützung der operativen Projektabwicklung sein kann.

Forschungsbedarf

Im Rahmen der vorhandenen Studien zur Auswahl von Erfassungstechnologien und -plattformen werden diese anhand verschiedener Kriterien schwerpunktmäßig auf subjektiver Basis (*Reja et al. - 2022*) und nur vereinzelt in Bezug auf spezifische AWF (*Omar und Nehdi - 2016*) bewertet.

Die vorhandenen Methoden zur Planung der Datenerfassung basieren auf Ansätzen die entweder ein geometrisches Modell (*Freimuth und König - 2018*, *Morgenthal et al. - 2019* und *Bolourian und Hammad - 2020*) oder eine abgeleitete Punktwolke des Modells verwenden und das Potenzial eines 4D-BIM in der Bauausführung außer Acht lassen. *Hamledari et al. - 2021* nutzen zwar bereits ein 4D-BIM im IFC-Format, jedoch vernachlässigen die bisherigen Ansätze insbesondere Rückbauprozesse wie die Demontage. Keine der Studien verwendet ein tagesaktuelles 4D-BIM, dass die Baustelle widerspiegelt, um die notwendige Datenerfassung basierend auf den Vorgängen und Aktivitäten im Terminplan und den verknüpften Modellelementen zu bestimmen.

Eine modellbasierte Baufortschrittskontrolle erfolgt in den untersuchten Ansätzen für die gesamte Baustelle mithilfe stationärer (*Maalek et al. - 2019*, *Kim et al. - 2013*) oder beweglicher Sensoren (*Hamledari et al. - 2021*, *Puri und Turkan - 2020*), wodurch eine unverhältnismäßige große Datenmengen erzeugt wird. Neben analytischen Algorithmen, wie bspw. dem RANSAC-Algorithmus, bei dem Erfahrungswerte oder Handlungsempfehlungen hinsichtlich der Auswertung fehlen, kommen auch *Computer*

Vision Methoden (*Braun et al. - 2021*) aus dem Bereich des *Machine Learning* zum Einsatz. Diese Methoden erfordern anspruchsvolle Hardware und komplexe Algorithmen, die zunächst einem intensiven Training unterzogen werden müssen.

Beitrag der Arbeit

Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf der Anwendung von Methoden von Lean Construction im Rahmen einer drohnenbasierten Datenerfassung und schlanken Baufortschrittskontrolle. Die Nutzung eines tagesaktuellen 4D-BIM sowie die Einbeziehung von Rückbauprozessen ermöglicht eine ganzheitlichere Betrachtung und effektivere Steuerung des operativen Tagesgeschäfts der Baustelle.

Der Grundgedanke einer vorgangsbezogenen Initiierung und der Anwendung des Pull-Prinzips besteht darin, dass Informationen zeitgenau in den Prozess einbezogen werden. Dadurch wird die Datenerfassung nicht durch Annahmen oder Schätzungen der erfassenden Person geplant, sondern unmittelbar aus dem 4D-BIM und den nachgelagerten Anforderungen angestoßen und durchgeführt. Dies löst einen Nachfragesog nach Informationen der sequenziellen Baufortschrittskontrolle aus. Des Weiteren werden diese Informationen durch eine Simplifizierung der Vorgangsgeometrie der verknüpften Modellelemente bereitgestellt. Darüber hinaus ermöglicht die Anwendung des PDCA-Zyklus eine kontinuierliche Verbesserung der Planung der Datenerfassung. Im Rahmen dieser Arbeit wird durch die Anwendung des Pull-Prinzips ausgehend aus dem 4D-BIM und der Simplifizierung diese Vorgehensweise als schlanke Baufortschrittskontrolle definiert, da sie die Reduktion von Verschwendung (unnötige Daten) und unnötigen Prozessschritten (Planung einer qualitätsgesicherten Datenerfassung mittels PDCA) ermöglicht. Es ergeben sich folgenden Beiträge der Arbeit:

- In Kapitel 3 wird zunächst eine Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien durchgeführt, um die Technologie im Brückenbau zu identifizieren, die das größte Potenzial für eine automatisierte Datenerfassung bietet. Die Potenzialanalyse beinhaltet eine umfassende Analyse und objektive Bewertung von Entscheidungskriterien sowie eine Priorisierung, die sich auf konkrete AWF bezieht.

- In Kapitel 4 erfolgt die Entwicklung eines Beitrags für eine vorgangsbezogenen Initiierung einer drohnengestützten Datenerfassung und einer schlanken Baufortschrittskontrolle auf Grundlage des 4D-BIM. Die Informationen, insbesondere die Vorgangsgeometrie von drohnenerfassbaren Vorgängen aus dem tagesaktuellen 4D-BIM, werden auf kritische Flächen simplifiziert, die für die terminliche Fortschrittskontrolle relevant sind. Dies ermöglicht eine Minimierung überflüssiger Daten und unnötiger Prozessschritte der Baufortschrittskontrolle. Des Weiteren werden Empfehlungen zur Auswertung mittels RANSAC-Algorithmus gegeben. Darüber hinaus erfolgt eine Softwareintegration, um eine prozessorientierte und praxisgerechten Umsetzung sicherstellen zu können.

3 Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien

Eine automatisierte Datenerfassung kann die Aufnahme von Informationen während der Bauausführung erheblich erleichtern. Es fehlen bisher Standards und Empfehlungen für die Auswahl einer geeigneten Erfassungstechnologie, die den größtmöglichen Nutzen erzielt. Dieses Kapitel zielt darauf ab, das Potenzial bestehender Erfassungstechnologien zu analysieren und zu identifizieren. In Abb. 3.1 ist die Struktur des Kapitels der Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien dargestellt.

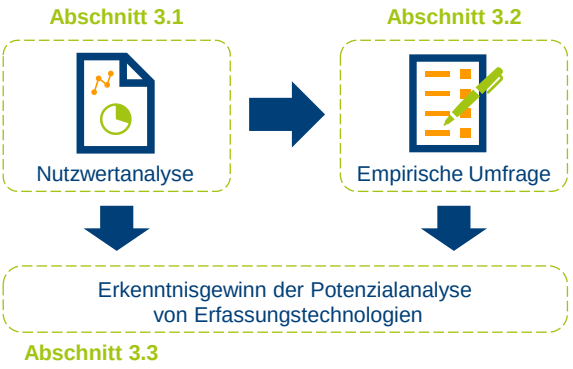


Abb. 3.1: Aufbau des Kapitels

Im ersten Schritt werden ausgewählte Erfassungstechnologien durch eine anwendungsfallbezogene NWA in Abschnitt 3.1 bewertet. Folgende Forschungsfrage wurde formuliert:

> Welche Erfassungstechnologie eignet sich zur automatisierten Erfassung im Brückenbau bezogen auf verschiedene Anwendungsfälle?

Im Rahmen der NWA werden verschiedene AWF untersucht, um eine mögliche Relevanz aufzuzeigen. In einem weiteren Schritt erfolgt in Abschnitt 3.2 eine empirische Umfrage, um den aktuellen Einsatz von Drohnen im Bauwesen zu erfassen. Des Weiteren sollen Erfahrungen von Vermessungsingenieurinnen und -ingenieuren und die weitere zukünftige Entwicklung des Einsatzes von Drohnen ergründet werden. Folgende Forschungsfrage wurde formuliert:

> Wie werden Drohnen gegenwärtig eingesetzt und welche Erfahrungen haben Anwendende?

Der Erkenntnisgewinn der Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien wird in Abschnitt 3.3 zusammengefasst und fließt in die weitere Arbeit ein.

3.1 Anwendungsfallbezogene Nutzwertanalyse

Eine NWA stellt eine qualitative Analysemethode dar, die für komplexe Entscheidungen herangezogen werden kann. Der große Vorteil einer NWA besteht darin, dass trotz hoher Anzahl an Bewertungskriterien eine direkte Vergleichbarkeit der Entscheidungsalternativen ermöglicht wird und sich eine Tendenz zeigt. In der Anwendung einer NWA stellt sich die Herausforderung einen Konsens zu finden besonders deutlich dar, wenn mehrere Entscheidungsträger oder befragte Personen unterschiedliche

Präferenzen haben (*Kühnapfel - 2021*). Diese Arbeit löst diese Herausforderung durch eine durchschnittliche Gewichtung der Bewertungskriterien und der Personenbewertung. In *Tschickardt et al. - 2023a* wurden die Ergebnisse der NWA veröffentlicht.

3.1.1 Methodik und Randbedingungen

Methodik

In der Literatur gibt es unterschiedliche Herangehensweisen für die Durchführung einer NWA. Bei den einzelnen Verfahren können sechs (*Nollau und Bucher - 2004*), sieben (*Nagel - 1990; Tauberger - 2008; Hanusch - 2010*), elf (*Westermann - 2021*) oder sogar 14 Prozessschritte (*Büssow - 2004*) zum Einsatz kommen, wobei sich die einzelnen Verfahren oft nur in der Wortwahl unterscheiden. In Abb. 3.2 wird der Prozess zur Durchführung der NWA dargestellt, der auf die Zielsetzung im Rahmen dieser Arbeit angepasst wurde und in den aufgeführten Abschnitten ausführlich beschrieben wird.

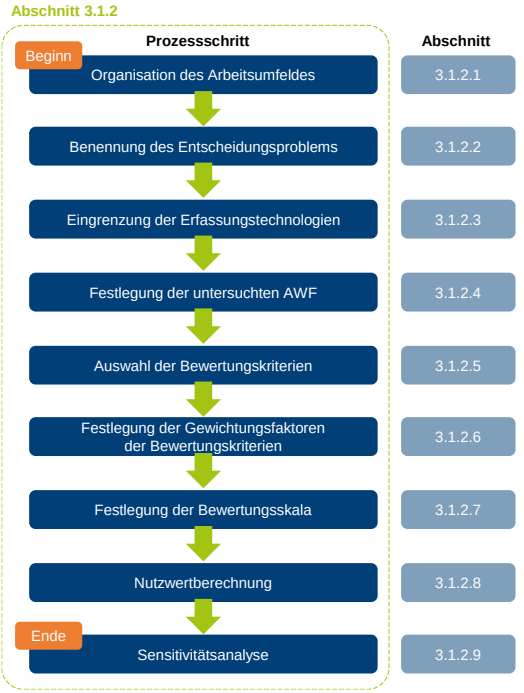


Abb. 3.2: Prozess zur Durchführung der NWA im Rahmen dieser Arbeit

Randbedingungen

Zu den Randbedingungen zählen unter anderem die gezielte Selektion von Personen aus dem Bauunternehmenssektor, welche den Prozessbaustein "Bauen" innerhalb der "Wertschöpfungskette Bau" (vgl. *Lichtblau - 2008*) repräsentieren. Ferner beinhalten die Randbedingungen die Auswahl von AWF während der Bauphase sowie eine Auswahl an Erfassungstechnologien. Schließlich sind auch die Bewertungskriterien zu erwähnen, welche auf bestehenden Ansätzen (vgl. Abschnitt 2.2.2) basieren und möglicherweise erweitert werden können.

3.1.2 Durchführung der anwendungsfallbezogenen NWA

3.1.2.1 Organisation des Arbeitsumfeldes

Die NWA wurde mit Personen im Bereich der Digitalisierung mit mehrjähriger Berufserfahrung innerhalb der Bauindustrie und insbesondere bauausführenden Unternehmenden im deutsch- und international-tätigen Raum durchgeführt. Es wurden 18 Personen befragt, die verschiedene Positionen in den jeweiligen Unternehmen innehaben. Zusätzlich sind diese Personen in verschiedenen nationalen Arbeitskreisen aktiv, die darauf abzielen, die BIM-basierte Arbeitsmethodik zu fördern und insbesondere die notwendigen Standards für eine branchenweiten Implementierung der digitalen Projektabwicklung zu entwickeln. Die Datenerhebung mittels Fragebogen (siehe Anhang C) fand zwischen dem 12.11.2022 und dem 15.02.2023 statt. Nach der Datenerhebung wurden die Antworten der Personen auf Plausibilität überprüft, um eventuelle Unstimmigkeiten vor der Auswertung zu bereinigen.

3.1.2.2 Benennung des Entscheidungsproblems

Im Kontext dieser Arbeit ermöglicht die durchgeführte NWA die Ermittlung einer prägnanten Wertgröße zur Bewertung des Nutzens von Erfassungstechnologien, ohne dabei Transparenz einzubüßen. Dies resultiert in einer Priorisierung, welche Erfassungstechnologien, insbesondere in Bezug auf spezifische AWF, den höchsten Nutzwert im Brückenbau aufweisen. Das Entscheidungsproblem wurde eingangs als Forschungsfrage formuliert.

3.1.2.3 Eingrenzung der Erfassungstechnologien

Im Kontext einer NWA wird das Entscheidungsproblem bezüglich bestimmter Erfassungstechnologien, den sogenannten Alternativen, behandelt. Wie von *Kühnapfel - 2021* vorgeschlagen, sollte eine "Null-Alternative" in die Bewertung einer NWA einbezogen werden, um den aktuellen Ist-Zustand darzustellen. Dies ist essenziell, da es möglich ist, dass keiner der neuen Ansätze einen höheren Nutzwert aufweist als der gegenwärtige Zustand. Innerhalb der vorliegenden NWA wurde jedoch keine Null-Alternative identifiziert, da sämtliche berücksichtigte Entscheidungsalternativen bereits in unterschiedlichen Ausprägungen während der Bauphase Anwendung finden.

Es werden folgenden Erfassungstechnologien betrachtet, die in der Baubranche üblich sind, da sie für einen automatisierten Ansatz geeignet sein können:

- **Photogrammetrie Krankamera**
  Kranmontierte Kameras haben das Ziel, Fotografien von der gesamten Baustelle aufzunehmen, da mit Baustellenkränen in der Regel das ganze Gebiet der Baustelle erreicht wird. Bereiche, die durch erfolgte Bautätigkeiten verdeckt sind, können nicht erfasst werden.
- **Photogrammetrie Handkamera**
  Mit einer Handkamera können Fotografien aufgenommen werden. Um ein möglichst detailreiches Abbild der Baustelle zu erstellen, ist es ratsam, die Fotografien in einer annähernden Stereogeometrie aufzunehmen und sicherzustellen, dass sie sich ausreichend überlappen.

- **Photogrammetrie Drohne**
  Durch die Erfassung von Luftaufnahmen mittels Drohnen lassen sich mit Hilfe von Photogrammetrie Punktwolken realisieren. Wie nachfolgend beschrieben wird es keine konkrete Empfehlung für einen bestimmten Sensor formuliert, der an einer Drohne angebracht werden kann.
- **LiDAR Stativ**
  Mit einem terrestrischen Laserscanner wird eine Punktwolke erfasst. Es wird keine Unterscheidung hinsichtlich der Bauart oder der Distanzmessung getroffen.
- **LiDAR Drohne**
  Aus der Luft lassen sich LiDAR Punktwolken erfassen. Ähnlich wie bei dem Ansatz der Technologie Photogrammetrie mit einer Drohne wird wie nachfolgend beschrieben kein bestimmter Sensor explizit empfohlen.
- **Mobile Mapping System**
  Ein "Mobile Mapping System" besteht in der Regel aus einer Kombination aus verschiedenen Sensoren. Die Sensoren werden auf einem Fahrzeug wie bspw. einem Automobil oder beweglichen Trolley montiert und erlauben es, während der Fahrt des Fahrzeuges eine Erfassung durchzuführen. Auch bei dieser Erfassungstechnologie erfolgt keine Differenzierung hinsichtlich der Sensoren.

Die Berücksichtigung eines geeigneten Sensors kann beträchtliche finanzielle Unterschiede mit sich bringen. Dennoch wurde dieser Aspekt quantitativ nicht in Betracht gezogen, da das Hauptziel der NWA darin besteht, eine allgemeine Neigung und Tendenz zur Erfassungstechnologie herauszufiltern.

3.1.2.4 Festlegung der untersuchten AWF

In der BIM-Methodik haben sich AWF etabliert, die jeweils ein BIM-Ziel erreichen sollen (*Borrmann et al. - 2021*). Im Rahmen der durchgeführten NWA wurden AWF gemäß *BMDV - 2021* betrachtet, die in der Phase der Bauausführung liegen und bei denen Informationen auf der Baustelle generiert werden. Neben der erwähnten Schwerpunktsetzung in Abschnitt 2.2 auf eine Baufortschrittskontrolle, wird im Rahmen der NWA untersucht, ob eine Priorisierung der Erfassungstechnologien für unterschiedliche AWF erfolgen kann. Nachfolgend sind die AWF in Bezug auf eine mögliche automatisierte Datenerfassung erläutert und die Auswahl für die NWA begründet:

- **AWF 140 - Baufortschrittskontrolle**
  Dieser AWF basiert auf dem "AWF 120 - Terminplanung der Ausführung", der das 4D-BIM für den Bauablauf darstellt und als Grundlage für die terminliche Baufortschrittskontrolle im Projekt-Controlling verwendet werden kann (*BMDV - 2021*). Mit Hilfe einer automatisierten Erfassung kann der Wie-gebaut-Zustand der Baustelle in fest definierten Intervallen oder Zeitpunkten autonom erfasst und mit dem Wie-geplant-Zustand abgeglichen werden. Durch diesen Abgleich können Abweichungen frühzeitig identifiziert und verzögerte Leistungen bzw. Aktivitäten ermittelt werden.

- **AWF 160 - Abrechnung von Bauleistungen**
  Das BIM wird bei diesem AWF zur regelmäßigen Dokumentation und zur Plausibilisierung von Bauleistungen sowie zur Abschlagsrechnung genutzt (*BMDV - 2021*). Dabei bildet der ermittelte Baufortschritt durch AWF 140 die Grundlage. Eine modellbasierte Abrechnung kann sowohl von Zwischenzuständen als auch dem Endzustand erfolgen. Durch eine automatisierte Erfassung können spezifische Zustände mit hoher Genauigkeit erfasst werden, sodass eine exakte Abrechnung der erbrachten Leistungen möglich ist. Zudem ist eine Plausibilisierung der in Rechnung gestellten Bauleistungen anhand des hinterlegten Baufortschritts auf Grundlage der automatisierten Erfassung möglich.
- **AWF 170 - Abnahme- und Mängelmanagement**
  Bei diesem AWF wird das BIM zur Verortung und Dokumentation von Ausführungsmängeln und deren Nachverfolgung zur Behebung sowie für weitere zu klärende Punkte genutzt (*BMDV - 2021*). Die Dokumentation von Ausführungsmängeln kann anhand einer automatisierten Erfassung erfolgen. Eine georeferenzierte Verortung eines Mangels lässt sich somit im BIM ermöglichen oder das Abnahmeprotokoll erweitern.
- **AWF 190 - Projekt- und Bauwerksdokumentation**
  Nach Abschluss der Bauphase soll ein Wie-gebaut-BIM als "digitale Bauwerksakte" erstellt werden, das detaillierte Informationen zur Bauausführung enthält (*BMDV - 2021*). Das Wie-gebaut-BIM ist lediglich so detailliert, wie es mit Informationen angereichert wurde. Eine automatisierte Erfassung von Zwischenzuständen während der Bauausführung und des Endzustands ermöglicht die Erstellung eines Abbildes der gesamten ausgeführten Tätigkeiten zum Abschluss der Bauphase.

3.1.2.5 Auswahl der Bewertungskriterien

Bewertungskriterien sollen den Nutzen der Alternative im Rahmen der NWA bzw. die Qualität im Rahmen der Bewertung hinreichend beschreiben. Für die Bewertung von Erfassungstechnologien müssen somit Kriterien festgelegt werden, die für eine erfolgreiche Erfassung im Brückenbau von Bedeutung sind. Die Definition der Bewertungskriterien für die durchgeführte NWA erfolgte auf Grundlage bestehender Untersuchungen und Forschungen (*Omar und Nehdi - 2016; Wang et al. - 2020; Wu et al. - 2021; Xue et al. - 2021; Reja et al. - 2022*) und wurde nicht um zusätzliche Kriterien erweitert, jedoch umfassend und objektiv betrachtet. Es wurden weder Ausschlusskriterien noch Kriteriengruppen definiert. Im Unterschied zu bisherigen Untersuchungen legt die NWA den Schwerpunkt auf die Bewertungskriterien für verschiedene AWF. Eine detaillierte Erklärung wird im Folgenden in alphabetischer Reihenfolge gegeben:

- **Aufwand**
  Der Aufwand stellt ein relevantes Kriterium für die Evaluierung der ökonomischen Effizienz einer Technologie dar. In diesem Zusammenhang werden sowohl der Zeitbedarf für die eigentliche Datenerfassung als auch die nachfolgende Verarbeitungszeit berücksichtigt.

- **Einsatzbereiche**
  Anhand des Einsatzbereichs lässt sich die Eignung einer Technologie für die Datenerfassung im Kontext des Brückenbaus ermitteln. Es existieren Erfassungstechnologien, die hauptsächlich für die Innenraumerfassung geeignet sind und weniger für den Außenbereich oder die für spezifische Bauwerksteile gänzlich ungeeignet sind.
- **Entfernung**
  Die Entfernung stellt bei der Erfassung einen erheblichen Faktor dar, da bei zu großer Distanz zum Bauteil die erfassten Punkte unscharf werden oder das Objekt nicht erfasst werden kann. Dennoch kann eine größere Distanz bei verschiedenen AWF von Nutzen sein, etwa wenn eine umfassende Geländeerfassung notwendig ist und eine detaillierte Aufnahme aus der Nähe zu aufwendig wäre.
- **Genauigkeit**
  Abhängig von spezifischen Anforderungen kann die Genauigkeit der erfassten Geometrie von großer Bedeutung sein, um den aktuellen Zustand des betreffenden Bauwerks oder Bauteils ausreichend genau ermitteln zu können. Eine höhere Genauigkeit ermöglicht eine detailliertere Abbildung des tatsächlichen Bauzustands vor Ort.
- **Kosten**
  Die Kosten für die Beschaffung und Wartung der jeweiligen Erfassungstechnologien werden in Betracht gezogen, um die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Technologieeinsatzes zu bewerten. Jedoch muss die mögliche zukünftige Kostenentwicklung aufgrund technologischer Fortschritte berücksichtigt werden. Die Ermittlung der aktuellen Kosten gestaltet sich komplex, da viele Hersteller nur begrenzte Transparenz in Bezug auf ihre Produktpreise aufweisen.
- **Level of automation of data acquisition**
  Der Grad der Automatisierung der Datenerfassung, eingeführt in dieser Arbeit als "LOADA", stellt einen bedeutenden Gesichtspunkt innerhalb des Erfassungsprozesses dar. Eine automatisierte Datenerfassung trägt maßgeblich zur Förderung der Digitalisierung im Bauwesen bei und gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die Automatisierung vermag menschliche Arbeitskräfte von repetitiven und risikoreichen Tätigkeiten zu entlasten, wodurch die Sicherheit im Baubereich gesteigert wird. Darüber hinaus können durch die Automatisierung Arbeitsaufwand reduziert und Kosten optimiert werden.
- **Gebrauchstauglichkeit**
  Die Gebrauchstauglichkeit umfasst sämtliche Aspekte, die bei der Datenerfassung mittels der jeweiligen Technologie berücksichtigt werden müssen. Hierzu zählt beispielsweise die Handhabung der Soft- und Hardware. Auch Faktoren wie Anforderungen an die Witterungsbedingungen und mögliche Unterbrechungen der Baustellenarbeiten werden in Betracht gezogen.

Die Kriterien werden qualitativ bewertet, da spezifische Erfassungstechnologien und Sensoren fehlen, um Kosten und Eigenschaften quantitativ zu messen. Angesichts der raschen technologischen Entwicklung erscheint eine qualitative Bewertung im Rahmen der NWA angemessener.

3.1.2.6 Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien

Der zentrale Analyseschritt bei der Erstellung der NWA ist die Gewichtung der zuvor festgelegten Bewertungskriterien. Die Gewichtungsfaktoren geben die Wichtigkeit der einzelnen Bewertungskriterien an. Zur Definition der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien wurde das individuelle Verfahren bzw. die direkte Intervallskalierung in Kombination mit der rankingbasierten Zuweisung nach *Kühnapfel - 2021* gewählt. Das individuelle Verfahren ist nur anwendbar, wenn die befragten Personen ein verlässliches Urteil über die relative Bedeutung der jeweiligen Kriterien treffen können. Dies ist gegeben, wenn eine begrenzte Anzahl an Kriterien, Expertise und keine Eigeninteressen der befragten Personen vorhanden sind. Bei dem Verfahren nimmt jede befragte Person die Gewichtung der Bewertungskriterien individuell und isoliert vor. Durch diese Vorgehensweise sind die befragten Personen unbeeinflusst voneinander. Aufgrund der Kombination mit der rankingbasierten Zuweisung sortieren die befragten Personen bei der Bewertung die Kriterien mit einer aufsteigenden Reihenfolge (1 = wichtigstes Kriterium und 7 = am wenigsten wichtigstes Kriterium). Es entsteht somit eine Rangordnung. Tab. 3.1 zeigt ein Beispiel einer rangbasierten Zuweisung der Bewertungskriterien der befragten Person Nr. 18 für a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle.

Tab. 3.1: Beispiel einer rangbasierten Zuweisung der Bewertungskriterien der befragten Person Nr. 18 für den AWF 140 – Baufortschrittskontrolle

Bewertungskriterium		**Rangbasierte Zuweisung**
1.1	Aufwand	$g_{18;1.1;140} = 4$
1.2	Einsatzbereiche	$g_{18;12;140} = 6$
1.3	Entfernung	$g_{18;1.3;140} = 2$
1.4	Genauigkeit	$g_{18;1.4;140} = 3$
1.5	Kosten	$g_{18;1.5;140} = 7$
1.6	LOADA	$g_{18;1.6;140} = 1$
1.7	Gebrauchstauglichkeit	$g_{18;1.7;140} = 5$

Gleichung (3.1) definiert zur weiteren Auswertung den Durchschnittswert der Gewichtsfaktoren jedes einzelnen Bewertungskriteriums aller Personen pro AWF.

$$\bar{g}_{b;a} = \frac{1}{n}\sum_{\substack{p=1 \\ b=1}}^{\substack{n \\ BK}} g_{p;b;a} \tag{3.1}$$

mit $\bar{g}_{b;a}$ Durchschnittswert der Gewichtungsfaktoren jedes Kriteriums b aller befragten Personen für jeden AWF a.

$g_{p;b;a}$ Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien b jeder einzelnen befragten Personen p für jeden AWF a.

n Gesamtanzahl der befragten Personen p.

BK Gesamtanzahl der Bewertungskriterien b.

Aufgrund einer anschließenden Umkehrung des Durchschnittswerts führt der beste Rang auch zur höchsten Bewertung. In Tab. 3.3 unter Abschnitt 3.1.2.8 ist ein Beispiel und Auszug zur Berechnung des Durchschnittswertes des Gewichtungsfaktor $\bar{g}_{b;a}$ durch die Einzelbewertungen der befragten Personen $g_{p;b;a}$ eines Kriteriums dargestellt. Zudem muss für die Gültigkeit der Wertefunktion die Bedingung erfüllt sein, dass die Summe aller Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien 100 % beträgt.

3.1.2.7 Festlegung der Bewertungsskala

Eine Bewertung der Bewertungskriterien und der Erfassungstechnologien erfolgt, nachdem die Bewertungskriterien ausgewählt und gewichtet worden sind. Im Rahmen der NWA wurde eine Ordinalskala zur Bewertung der Erfassungstechnologien auf Grundlage der Bewertungskriterien gewählt, da diese die Anforderungen der Praktikabilität, Repräsentativität und Universalität erfüllt (*Kühnapfel - 2021*). Durch die Verwendung der Ordinalskala kann jedoch eine gewisse Unschärfe entstehen, da die Transformation in quantitative Werte eine Scheingenauigkeit bietet, die nach *Kühnapfel - 2021* jedoch hingenommen werden kann. Abb. 3.3 zeigt das Bewertungsschema als Bewertungsvorschrift bzw. Interpretationshilfe, um Klarheit bei der Bewertung durch die befragten Personen zu schaffen.

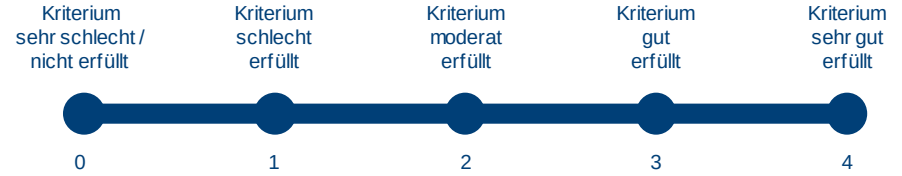


Abb. 3.3: Bewertungsskala der anwendungsfallbasierten NWA

Die Bewertung der Bewertungskriterien und Erfassungstechnologien erfolgte durch das individuelle Verfahren, wobei jede Person die Bewertung unabhängig voneinander durchführt. Diese Vorgehensweise gewährleistet eine Entemotionalisierung durch Fragmentierung, was dazu beiträgt, dass die Ergebnisse die Anforderung der Objektivität erfüllen. Im Anschluss wird der Durchschnittswert der Bewertung $\overline{BP}_{e;b;a}$ mit Gleichung (3.2) der Erfassungstechnologie e des jeweiligen Kriteriums b zugeordnet je AWF a gebildet.

$$\overline{BP}_{e;b;a} = \frac{1}{n} \sum_{p=1}^{n} BP_{e;b;a;p} \tag{3.2}$$

mit $\overline{BP}_{e;b;a}$ Durchschnittliche Bewertung der befragten Personen der Erfassungstechnologie e des jeweiligen Kriteriums b zugeordnet je AWF a.

$BP_{e;b;a;p}$ Einzelbewertung der befragten Personen p jedes Kriteriums b für jede Erfassungstechnologie e und jeden AWF a.

n Gesamtanzahl der befragten Personen p.

Tab. 3.2 zeigt ein Beispiel der Bewertung $\mathrm{BP}_{e;b;140;18}$ für Person Nr. 18 der Erfassungstechnologien Photogrammetrie Krankamera und LiDAR Drohne anhand der verschiedenen Bewertungskriterien b für a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle.

Tab. 3.2: Beispiel einer Bewertung der befragten Person Nr. 18 anhand der Bewertungskriterien für den AWF 140 – Baufortschrittskontrolle für zwei Erfassungstechnologien

Bewertungskriterium \ **Erfassungstechnologie**		**Photogrammetrie Krankamera**	**LiDAR Drohne**
1.1	Aufwand	$\mathrm{BP}_{e;1.1;140;18} = 1$	$\mathrm{BP}_{e;1.1;140;18} = 4$
1.2	Einsatzbereiche	$\mathrm{BP}_{e;1.2;140;18} = 0$	$\mathrm{BP}_{e;1.2;140;18} = 4$
1.3	Entfernung	$\mathrm{BP}_{e;1.3;140;18} = 1$	$\mathrm{BP}_{e;1.3;140;18} = 3$
1.4	Genauigkeit	$\mathrm{BP}_{e;1.4;140;18} = 1$	$\mathrm{BP}_{e;1.4;140;18} = 3$
1.5	Kosten	$\mathrm{BP}_{e;1.5;140;18} = 1$	$\mathrm{BP}_{e;1.5;140;18} = 4$
1.6	LOADA	$\mathrm{BP}_{e;1.6;140;18} = 2$	$\mathrm{BP}_{e;1.6;140;18} = 4$
1.7	Gebrauchstauglichkeit	$\mathrm{BP}_{e;1.7;140;18} = 1$	$\mathrm{BP}_{e;1.7;140;18} = 4$

In Tab. 3.3 ist ein Beispiel und Auszug zur Berechnung von $\overline{\mathrm{BP}}_{e;b;a}$ dargestellt.

3.1.2.8 Nutzwertberechnung

Die Grundlage einer NWA bildet nach *Eisenführ et al. - 2010* eine additive multiattributive Wertefunktion. Man spricht von einem additiven Verfahren, da im letzten Schritt alle Teilnutzwerte addiert werden. In einer NWA gibt es das Durchschnitts- und Rangordnungsverfahren, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden und nachfolgend anhand eines Beispiels beschrieben werden.

Berechnung der Nutzwerte nach dem Durchschnittsverfahren

Bei Anwendung des Durchschnittsverfahrens wird der Durchschnitt der personenspezifischen Nutzwerte berechnet (*Kühnapfel - 2021; Hanusch - 2010*) . Die NWA ermittelt einen Gesamtwert für jede Alternative bzw. Erfassungstechnologie aus der gewichteten Summe der Wertungen pro Bewertungskriterium. Gleichung (3.3) stellt die Berechnung der Nutzwerte nach dem Durchschnittsverfahren dar. Bevor der Gesamtnutzen ermittelt wird, erfolgt zunächst die Berechnung der reziproken Gewichtung und der durchschnittlichen Bewertung der befragten Personen für die Erfassungstechnologie e des Bewertungskriteriums b für den AWF a. Das Ergebnis ist eine kriteriale Wertung pro Bewertungskriterium. Eine anschließende Addition der Teilnutzwerte führt zum Gesamtnutzwert pro Erfassungstechnologie pro AWF.

$$\mathrm{GN}_{e;a} = \sum_{b=1}^{BK} \ddot{g}_{b;a} * \overline{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{3.3}$$

mit $\mathrm{GN}_{e;a}$ Gesamtnutzen nach dem Durchschnittsverfahren je Erfassungstechnologie e je AWF a.

BK Anzahl der Bewertungskriterien b.

$\ddot{g}_{b;a}$ reziproke Gewichtung des Bewertungskriterien b je AWF a.

In Tab. 3.3 sind die Einzelbewertungen des Bewertungskriterium sowie Einzelbewertungen der Erfassungstechnologie e = LiDAR Drohne des Bewertungskriteriums b = 1.1 (Aufwand) für a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle als Beispiel und Auszug dargestellt. In der zweiten Spalte sind die Bewertungen des Bewertungskriteriums je befragter Person $g_{p;b;a}$ sowie der Durchschnittswert $\bar{g}_{b;a}$ nach Gleichung (3.1) zu sehen. Ebenfalls dargestellt ist die reziproke Gewichtung $\ddot{g}_{b;a}$ des Bewertungskriterien sowie die prozentuale Gewichtung. In der dritten Spalte ist die Einzelbewertung der Erfassungstechnologie des Bewertungskriteriums je befragter Person $BP_{e;b;a;p}$ sowie der durchschnittlichen Bewertung $\overline{BP}_{e;b;a}$ der Gleichung (3.2) zu sehen.

Tab. 3.3: Beispiel und Auszug einer Bewertung des Kriteriums des Bewertungskriterium sowie Einzelbewertungen der Erfassungstechnologie

Befragte Person	**Bewertung des Bewertungskriterium**	**Einzelbewertung der Erfassungstechnologie**
01	$g_{01;1.1;140} = 2$	$BP_{e;1.1;140;01} = 2$
02	$g_{02;1.1;140} = 2$	$BP_{e;1.1;140;02} = 2$
…	…	…
17	$g_{17;1.1;140} = 2$	$BP_{e;1.1;140;17} = 4$
18	$g_{18;1.1;140} = 4$	$BP_{e;1.1;140;18} = 4$
	$\sum g_{1.1;140} = 47$	$\sum BP_{e;1.1;140} = 46$
	$\bar{g}_{1.1;140} = 2{,}61$	$\overline{BP}_{e;1.1;140} = 2{,}56$
	$\ddot{g}_{1.1;140} = 5{,}39$	
	$\ddot{g}_{1.1;140}\,[\%] = 19{,}2\%$	

In Tab. 3.4 ist ein Beispiel für die Berechnung des Gesamtnutzen aller befragten Personen für AWF a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle und der Erfassungstechnologie e = -LiDAR Drohne aufgeführt. Für jedes Bewertungskriterium b ergibt sich auf Grundlage der reziproken Gewichtung $\ddot{g}_{b;a}$ sowie der durchschnittlichen Bewertung der befragten Personen $\overline{BP}_{e;b;a}$ ein Teilnutzwert. Nach anschließender Addition der Teilnutzwerte ergibt sich ein Gesamtnutzen der Erfassungstechnologie für den AWF. Die Gültigkeit der Wertefunktion ist erfüllt. Eine Sortierung der Gesamtnutzen ergibt schlussendlich eine Rangfolge für das Entscheidungsproblem.

Tab. 3.4: Beispiel für die Berechnung des Gesamtnutzens aller befragten Personen

Bewertungskriterium		**Gewichtung**	**Bewertung**	**Teilnutzwert**
1.1	Aufwand	$\ddot{g}_{1.1;140} = 19{,}2\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.1;140} = 2{,}56$	0,49
1.2	Einsatzbereiche	$\ddot{g}_{1.2;140} = 14{,}5\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.2;140} = 2{,}39$	0,35
1.3	Entfernung	$\ddot{g}_{1.3;140} = 12{,}1\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.3;140} = 3{,}22$	0,39
1.4	Genauigkeit	$\ddot{g}_{1.4;140} = 11{,}3\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.4;140} = 3{,}22$	0,36
1.5	Kosten	$\ddot{g}_{1.5;140} = 11{,}1\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.5;140} = 2{,}06$	0,23
1.6	LOADA	$\ddot{g}_{1.6;140} = 16{,}7\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.6;140} = 2{,}44$	0,41
1.7	Gebrauchstauglichkeit	$\ddot{g}_{1.7;140} = 15{,}1\ \%$	$\overline{BP}_{e;1.7;140} = 2{,}44$	0,37
		$\sum \ddot{g}_{140} = 100\ \%$		$\sum GN_{140;e} = 2{,}60$

Berechnung der Nutzwerte nach dem Rangordnungsverfahren

Bei einer Berechnung der Nutzwerte nach dem Rangordnungsverfahren wird zunächst für jede befragte Person die individuelle Reihenfolge der Erfassungstechnologien berechnet. Nach anschließender Addition der einzelnen Rangfolgen der befragten Personen ergibt sich eine Endrangfolge. Die Vorgehensweise ist in Gleichung (3.4) dargestellt.

$$R_{e;a} = \sum_{p=1}^{n} ER_{e;a;p} \tag{3.4}$$

mit $R_{e;a}$ Endrangfolge je Erfassungstechnologie e je AWF a.

$ER_{e;a;p}$ Einzelrangfolge pro befragter Person p je Erfassungstechnologie e je AWF a.

Zur Visualisierung wird die Rangordnung mit einer abgestuften Farbskala (Tab. 3.5) über alle Ränge der NWA bzw. Varianten der Sensitivitätsanalysen, mit der Farbe Orange für einen hohen Rang bzw. niedrigen Nutzwert und Farbe Gelb für einen niedrigen Rang bzw. hohen Nutzwert im Rahmen dieser Arbeit dargestellt.

Tab. 3.5: Farbskala der Rangordnung für die NWA und die Sensitivitätsanalysen

Farbskala \ **Rangordnung**	1	2	3	4	5	6

In Tab. 3.6 ist ein Beispiel und Auszug einer Einzelrangfolge aller befragten Person der durchgeführten NWA für je Erfassungstechnologie e und für a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle aufgeführt. Am Ende der Tabelle ist ebenfalls die Summe sowie die Endrangfolge dargestellt. Die vollständige Tabelle ist in Anhang C aufgeführt.

Tab. 3.6: Beispiel und Auszug einer Endrangfolge der befragten Personen für den AWF 140 – Baufortschrittskontrolle

Befragte Person	**Photogrammetrie Krankamera**	**Photogrammetrie Handkamera**	**Photogrammetrie Drohne**	**LiDAR Stativ**	**LiDAR Drohne**	**Mobile Mapping Systeme**
01: $ER_{e;140;01}$	5	2	1	4	3	6
02: $ER_{e;140;02}$	6	1	5	3	4	2
…	…	…	…	…	…	…
17: $ER_{e;140;17}$	6	3	3	1	2	5
18: $ER_{e;140;18}$	6	5	2	4	1	3
$\sum ER_{e;140}$	**65**	**65**	**56**	**62**	**51**	**76**
Endrangfolge $R_{e,140}$	5	5	2	3	1	6

3.1.2.9 Sensitivitätsanalyse

Nach *Kühnapfel - 2021* und *Hüsselmann et al. - 2020* zeigt eine Sensitivitäts- oder Sensibilitätsanalyse, wie robust die Ergebnisse einer NWA sind, d.h. wie sich die Stabilität der Ergebnisse bei Veränderungen von einzelnen Inputparametern (Gewichtung der Bewertungskriterien und der Bewertung) verhält. Die Ergebnisse einer Sensitivitätsanalyse fallen tendenziell konsensual aus, also einem arithmetischen Mittel zustreben. Geringe Unterschiede zwischen Alternativen sind nicht untypisch, da grundsätzlich extreme Bewertungen meist vermieden werden. Das Ergebnis ist dennoch belastbarer als das, welches aus einer Gruppendiskussion resultieren würde, die von einer dominierenden Person während der Besprechung geprägt wäre. Im Rahmen der NWA werden folgende Varianten von Sensitivitätsanalysen berücksichtigt, die mit Beispielen in Anhang C beschrieben werden:

- eine Gleichsetzung von Bewertungskriterien sowie von Bewertungen der befragten Personen,
- eine Glättung von Ausreißern bei den Bewertungskriterien sowie Bewertungen der befragten Personen und
- eine Spreizung der wichtigsten Bewertungskriterien sowie Bewertungen der befragten Personen.

3.1.3 Ergebnisse

3.1.3.1 Aussage über die Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien

In der NWA wurde analysiert, dass die befragten Personen zu den Bewertungskriterien unterschiedliche Prioritäten haben. Abb. 3.4 zeigt in a) die Verteilung als Kastengrafik (engl. *Box-Whisker-Plot*) in einer Ordinalskala mit Mittelpunktmarkierung (X), Median- (Strich), oberem und unterem Quartil- (Balkenränder) und Extremwerten (oberer und unterer Schweif (engl. *Whisker*)) sowie in b) einer prozentualen Verteilung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien für die durchgeführte NWA für den AWF 140 - Baufortschrittskontrolle. Die Kriterien "Aufwand" und "LOADA" haben die höchsten Gewichtungen mit 19,2 % und 16,7 %. Diese Werte deuten darauf hin, dass die befragten Personen die Reduzierung des damit verbundenen Aufwands als entscheidend für die Baufortschrittskontrolle betrachten. Gleichzeitig zeigt die hohe Gewichtung von "LOADA" das Bewusstsein der Befragten für die Notwendigkeit automatisierter Erfassungstechnologien auf, was ihr erhebliches Potenzial zur Effizienzsteigerung und Prozessoptimierung unterstreicht. Die Kriterien "Einsatzbereiche," "Gebrauchstauglichkeit" und "Entfernung" liegen im Mittelfeld und haben Gewichtungen zwischen 12,1 % und 15,1 %. Die befragten Personen betrachten das Kriterium "Genauigkeit" mit einer Gewichtung von 11,3 % als weniger entscheidend für die Baufortschrittskontrolle. Die niedrige Gewichtung von 11,1 % für das Kriterium "Kosten" zeigt, dass die befragten Personen trotz der üblichen Berücksichtigung von Kosten in Entscheidungsprozessen im Bauwesen, weniger Gewicht auf dieses Kriterium legen. Diese Tendenz könnte auf die Annahme zurückzuführen sein, dass die Kosten durch die fortlaufende Entwicklung von Technologie sinken werden, was ihre Bedeutung mindert.

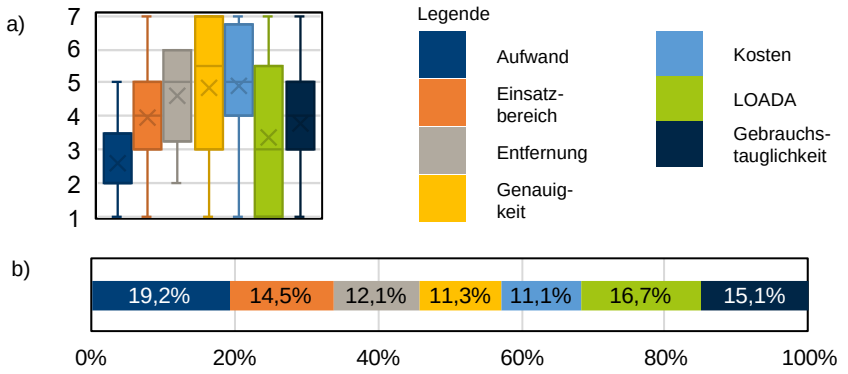


Abb. 3.4: In a) Verteilung und in b) prozentuale Verteilung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien für den AWF 140 - Baufortschrittskontrolle

Die Ergebnisse der weiteren AWF im Rahmen der durchgeführten NWA sind in Anhang C zu finden. Die Gewichtungen der Bewertungskriterien zeigen nur minimale Unterschiede zwischen den AWF. Betrachtet man das Gesamtranking der Kriterien aller AWF, so zeigen die prozentualen Gewichtungen von "LOADA" und "Aufwand" eine klare Tendenz zu deren Wichtigkeit.

3.1.3.2 Nutzwerte der Erfassungstechnologien

In der NWA wurde analysiert, dass die Ergebnisse der Erfassungstechnologien in Bezug auf die verschiedenen AWF nur geringfügig variieren. In Abb. 3.5 sind die Nutzwerte des Durchschnittsverfahrens sowie Endrangfolgen für die Erfassungstechnologien der vier untersuchten AWF aufgeführt. In Bezug auf das Rangordnungsverfahren ergibt sich im Vergleich zum Durchschnittsverfahren keine Abweichung in den Rangpositionen (siehe Anhang C).

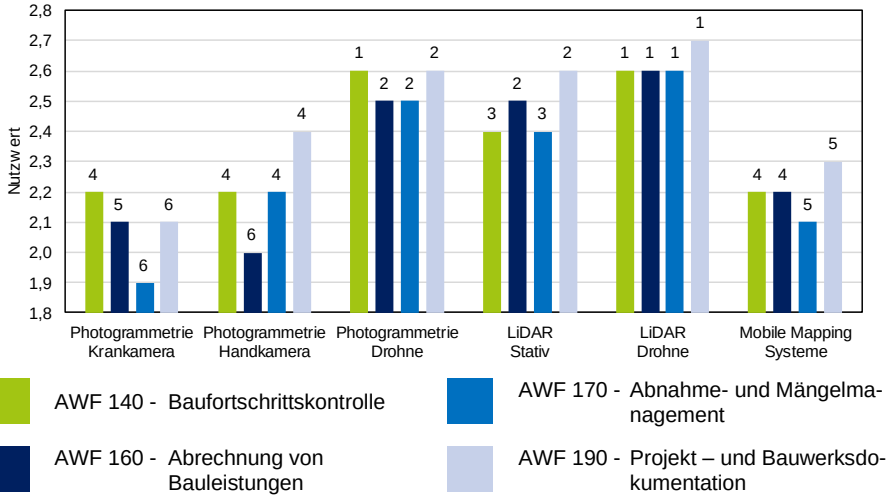


Abb. 3.5: Nutzwerte des Durchschnittsverfahrens mit Endrangfolge der NWA

Es lässt sich festhalten, dass die befragten Personen eine hohe Einsatzmöglichkeit sowohl für die Technologie LiDAR Drohne, die sich in allen vier AWF auf dem ersten Rang der NWA befindet, als auch die Technologie Photogrammetrie Drohne sehen. Photogrammetrie Krankamera wurde durchschnittlich am niedrigsten bewertet und erscheint somit als die am wenigsten geeignete Methode zur Erfassung. Auffällig ist der recht groß wirkende Unterschied in Bezug auf Photogrammetrie Krankamera zwischen AWF 140 und AWF 170 bzw. Photogrammetrie Handkamera zwischen AWF 160 und AWF 190. Bei genauerer Betrachtung zeigt sich jedoch, dass die Nutzwerte insgesamt um maximal 0,4 Nutzwertpunkte voneinander abweichen.

Es bleibt zu erwähnen, dass die NWA ausschließlich qualitative Bewertungskriterien verwendet hat. Dabei wurde bewusst auf die Berücksichtigung quantitativer Aspekte verzichtet, da das Hauptziel der NWA darin besteht, eine allgemeine Neigung und Tendenz von Erfassungstechnologie herauszufiltern.

3.1.3.3 Sensitivitätsanalyse als Aussage zur Robustheit

Die Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Ergebnisse der NWA robust sind. Zusammenfassend (siehe Anhang C) lässt sich feststellen, dass der Einsatz von LiDAR Drohnen in allen Varianten der Analyse den ersten Rang erreicht und den höchsten Nutzwert aufweist, wodurch sie als führende Technologie gilt. Photogrammetrie Drohnen erreichen teilweise den ersten und ansonsten den zweiten Rang.

3.1.4 Schlussbetrachtung

Die NWA hat Nutzwerte für Erfassungstechnologien ermittelt und liefert somit eine Priorisierung der Erfassungstechnologien für das beschriebene Entscheidungsproblem sowie die Bewertungskriterien. Abschließend gilt es die Qualität der NWA einzuschätzen. Die Objektivität ist gewährleistet, da die NWA bei allen befragten Personen einheitlich durchgeführt und das Verfahren transparent dokumentiert wurde, wodurch die Reproduzierbarkeit des Bewertungsverfahrens sichergestellt wird. Die Sensitivitätsanalysen zeigen in den durchgeführten Varianten keine Abweichung zur NWA. Die Ergebnisse sind somit als robust einzustufen. Die Zuverlässigkeit bzw. Stabilität der NWA ist zu hinterfragen, da die untersuchte Stichprobe von 18 befragten Personen lediglich eine begrenzte Schnittmenge im Prozessbaustein "Bauen" der "Wertschöpfungskette Bau" (*Lichtblau - 2008*) aufweist. Trotz dieser Limitation bleibt die Validität gewahrt, da durch die NWA eine aussagekräftige Priorisierung im Rahmen des Entscheidungsproblems vorgenommen wurde. Der Erkenntnisgewinn der Potenzialanalyse wird in Abschnitt 3.3 aufgezeigt.

3.2 Empirische Studie zum Einsatz von Drohnen

Basierend auf den Erkenntnissen der durchgeführten NWA in Abschnitt 3.1 wird in diesem Abschnitt mithilfe einer empirischen Studie der aktuelle Einsatz von Drohnen erfasst. Des Weiteren werden Erfahrungen von Vermessungsingenieurinnen und -ingenieuren sowie Vorteile, Herausforderungen und die zukünftige Entwicklung des Einsatzes von Drohnen untersucht.

3.2.1 Methodik und Randbedingungen

Methodik

Bei der vorliegenden empirischen Studie handelt es sich um eine nicht-experimentelle Umfrageforschung, in Form einer Querschnittsstudie aufgrund einmaliger Datenerhebung. Die Methodik umfasst eine schriftliche Befragung und ergänzt die Analyse durch Zählmethoden der deskriptiven Statistik (*Bortz und Döring - 2006*). Eine Strukturierung des Fragebogens ist essenziell, da nachträgliche Anpassungen nicht möglich sind. Die schriftliche Befragung beinhaltet Fragen sowohl im offenen als auch im geschlossenen Format. Zusätzlich sind Mischformen enthalten, die vordefinierte Antwortkategorien aufweisen und eine zusätzliche offene Option wie bspw. "Sonstiges" umfassen. Die vordefinierten Antwortkategorien sind mit einer Ratingskala versehen, die zeiteffizient ist, einer Neutralposition entgegenwirkt und die Validität erhöht (*Steiner und Benesch - 2018*). In Abb. 3.6 wird der Prozess zur Durchführung der empirischen Studie dargestellt und in den aufgeführten Abschnitten ausführlich beschrieben.

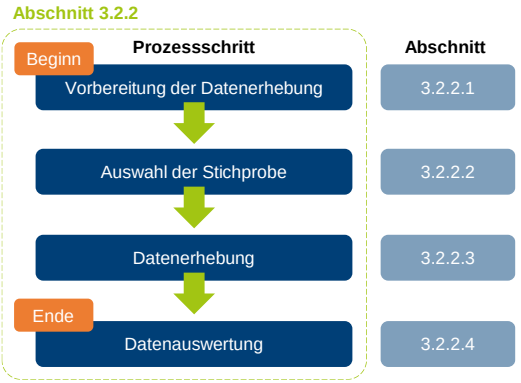


Abb. 3.6: Prozess zur Durchführung der empirischen Studie im Rahmen dieser Arbeit

Randbedingungen

Die vorliegende empirische Studie wurde unter Berücksichtigung von Randbedingungen durchgeführt. Hier zählen die einmalige Datenerhebung als Querschnittstudie, die Anzahl der teilnehmenden Personen, eine selektive Teilnahmebereitschaft und die begrenzte Erfahrung der befragten Personen in Bezug auf Fachfragen. Die Beschränkung der Datenerhebung auf einen spezifischen Zeitpunkt erschwert die Erfassung von Veränderungen oder Entwicklungen im Verlauf der Zeit. Die Studie bildet nur eine Momentaufnahme ab. Die Stichprobengröße und die selektive Teilnahmebereitschaft

können die Repräsentativität der Ergebnisse beeinträchtigen und zu Verzerrungen führen, da bestimmte Ansichten möglicherweise überrepräsentiert sind. Die Ergebnisse sind möglicherweise nicht auf die Baubranche übertragbar. Die begrenzte Erfahrung der teilnehmenden Personen in Bezug auf das Thema könnte deren Fähigkeit beeinträchtigen, die Fragen vollständig zu erfassen oder qualifizierte Antworten zu geben, was sich negativ auf die Datenqualität und die Ergebnisgültigkeit auswirken könnte. Insgesamt können diese Faktoren die Aussagekraft und die Allgemeingültigkeit der Studienergebnisse beeinflussen und müssen bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden.

3.2.2 Durchführung der empirischen Studie zum Einsatz von Drohnen

3.2.2.1 Vorbereitung der Datenerhebung

Das eingesetzte Datenerhebungsinstrument der empirischen Studie besteht aus einem zweiseitigen Fragebogen. Der Fragebogen richtet sich speziell an Vermessungsingenieurinnen und -ingenieure, um den aktuellen Einsatz von Drohnen im Bauwesen zu eruieren und um Erfahrungen, Vorteile, Herausforderungen und die zukünftige Entwicklung des Einsatzes von Drohnen zu untersuchen. Der Fragebogen enthält eine Datenschutzerklärung, um einen konformen Umgang mit persönlichen Daten sowie deren Schutz zu gewährleisten, selbst wenn die empirische Studie anonym durchgeführt wird. Der Fragebogen ist in Anhang D dargestellt.

3.2.2.2 Auswahl der Stichprobe

An der Studie nahmen 423 Personen teil, die im Bereich Vermessungswesen aus der DACH-Region (Deutschland, Österreich, Schweiz) tätig sind. Die empirische Studie wurde durch *Newsletter* und Hinweise auf den Webseiten verschiedener Verbände wie dem Bund der öffentlich bestellten Vermessungsingenieure (BDVI), der Bundesingenieurkammer (BIngK), dem Verband Deutscher Vermessungsingenieure (VDV), der Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformatik und Landmanagement e.V. (DVW), der Österreichische Gesellschaft für Vermessung und Geoinformation (OVG) sowie dem Verein Drohnenbetrieb Geomatik Schweiz (VDGS) verbreitet. Zusätzlich wurden individuelle Anschreiben an 2199 Personen versendet, die in den Gelben Seiten der DACH-Region verzeichnet waren und im Bereich Vermessungswesen tätig sind, um sicherzustellen, dass eine breite und repräsentative Stichprobe erreicht wird.

3.2.2.3 Datenerhebung

Die Datenerhebung fand online über die Software Microsoft Forms, Version 2023 zwischen dem 27.07.2023 und dem 19.09.2023 statt. Etwa zwei Wochen vor Ende des Erhebungszeitraums erfolgte erneut eine persönliche Kontaktaufnahme durch individuelle Anschreiben, um auf die empirische Studie hinzuweisen und zur Teilnahme zu motivieren. Nach der Datenerhebung wurden die Antworten der Personen und Verzweigungen der Fragen auf Plausibilität überprüft, um eventuelle Unstimmigkeiten vor der Auswertung zu bereinigen.

3.2.2.4 Datenauswertung

Die empirischen Daten der Studie wurden in quantitativer Weise analysiert, wozu die Software Microsoft Excel, Version 2023 verwendet wurde. Die quantitative Datenanalyse wurde mittels deskriptiver statistischer Verfahren durchgeführt, um die Daten bspw. mit Balkendiagrammen darzustellen und zusammenzufassen.

3.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der empirischen Studie präsentiert. In Anhang D sind die Ergebnisse vollständig dokumentiert.

3.2.3.1 Ergebnisse zu Fragen zur Demografie

Von den insgesamt 423 teilnehmenden Personen sind 10,2 % weiblich und 86,1 % männlich. 0,2 % haben sich als divers kategorisiert und 3,5 % haben keine Angabe zu ihrem Geschlecht gemacht. Die Altersverteilung erstreckte sich von 18 bis über 65 Jahren. In dieser Spanne waren die Altersgruppen von 45 bis 54 Jahren mit einem Anteil von 25,8 % sowie die Altersgruppe von 55 bis 64 Jahren mit 30,7 % am stärksten vertreten. Eine bedeutende Mehrheit von 69,7 % der Befragten kann auf eine Berufserfahrung von mehr als 15 Jahren im Vermessungswesen zurückblicken. Hingegen wiesen lediglich 0,2 % weniger als 1 Jahr Erfahrung auf, während 4,3 % keine Angaben zu ihrer Erfahrung machten. Die Arbeitgeberverteilung zeigte eine Prädominanz von 40,9 % im Segment der öffentlich bestellten Vermessungsingenieure, gefolgt von 37,1 % in Vermessungsbüros und 13,2 % in Ingenieurbüros. Lediglich 1,9 % sind ausführenden Unternehmen zugeordnet. In Bezug auf die akademische Qualifikation der Befragten ergab sich, dass 30,0 % einen Master-Abschluss besitzen. Weiterhin wiesen 7,3 % einen Bachelor-Abschluss auf und 3,1 % konnten einen Doktorgrad vorweisen. Daneben waren auch andere akademische Grade und Ausbildungswege vertreten. Hinsichtlich der geografischen Verteilung ergab sich, dass 78,3 % der Befragten in Deutschland ansässig waren, während jeweils 10,9 % in Österreich und in der Schweiz verortet waren. 61,7 % der Befragten waren in Unternehmen mit weniger als 10 Mitarbeitern tätig. Im Gegensatz dazu waren 3,1 % in Unternehmen beschäftigt, die mehr als 500 Mitarbeiter beschäftigen.

3.2.3.2 Ergebnisse zum Einsatz und Erfahrungen von Drohnen

Nutzung von und Erfahrungen mit Drohnen

In der empirischen Studie gaben 43 % der Befragten (182 Personen) an, eine vorausgegangene Erfahrung im Einsatz von Drohnen zu Vermessungszwecken zu haben. Abb. 3.7 zeigt die Häufigkeit der Verwendung von Drohnen im Berufsalltag. Lediglich 2,2 % nutzen Drohnen auf täglicher Basis, während 28,0 % wöchentlich und 25,3 % monatlich in Anspruch nehmen. Die Mehrheit (34,6 %) nutzt die Drohnentechnologie, unabhängig vom Sensor, seltener.

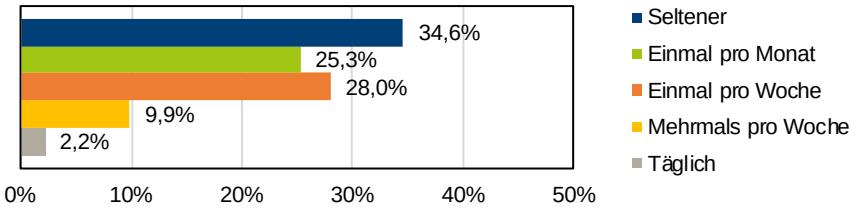


Abb. 3.7: Häufigkeit von Drohnen im Berufsalltag (n = 182)

Die Präferenz liegt überwiegend (73,1 %) bei der Verwendung einer Photogrammetrie Drohne. 2,7 % haben Erfahrungen ausschließlich mit einer LiDAR Drohne und 24,2 % haben bereits beide Erfassungstechnologien eingesetzt. Dies sind 49 von 423 Personen, die bereits Erfahrung mit einer LiDAR Drohne haben. Ein vergleichbares Muster zeigt sich in den Unternehmensbeständen, wo 74,2 % eine Photogrammetrie Drohne vorhalten und nur 2,2 % eine LiDAR Drohne besitzen. 12,6 % besitzen beide Erfassungstechnologien, während 13,2 % keine von beiden Erfassungstechnologien vorhalten. Die Personen, die eine LiDAR Drohne vorhalten, besitzen ebenfalls auch eine Photogrammetrie Drohne. Innerhalb der 12,6 %-Gruppe der Befragten entfallen 9,9 % auf den deutschen Raum, 2,2 % auf den österreichischen Raum und die verbleibenden 0,5 % können der Länderkategorie Schweiz zugeordnet werden.

Die Befliegung erfolgt unabhängig von der angewandten Erfassungstechnologie, bei 34,6 % mittels vorab geplanter Flugrouten für eine horizontale Erfassung in Nadir-Ausrichtung automatisiert bevorzugt. Ein Anteil von 24,1 % zeigt Präferenzen für die Nutzung vorgeplanter Flugrouten, die eine horizontale Erfassung unter Verwendung bspw. einer 45° geneigten Kamera einschließen, um spezifische Höheninformationen zu erheben. Eine manuelle Erfassung (13,1 %) sowie die Kombination beider Ansätze (20,1 %) werden ebenfalls von einer Teilgruppe genutzt.

Einsatz einer LiDAR Drohnen und deren Bewertung

Bei denjenigen Befragten, die bereits Erfahrung mit einer LiDAR Drohne haben, zeigt sich, dass davon 32,7 % die Technologie überwiegend gelegentlich nutzen, während 40,8 % angeben, dass ihre Nutzung selten erfolgt. Abb. 3.8 zeigt die Vorteile beim Einsatz einer LiDAR Drohne im Vergleich zu einer Photogrammetrie Drohne. Es kristallisiert sich insbesondere die präzisere Erfassung komplexer Geländeformen als signifikanter Pluspunkt heraus. Die Steigerung der Datenpräzision, eine effizientere Datenerfassung, verkürzte Verarbeitungszeiten sowie die Fähigkeit zur Durchdringung von Vegetation wurden allesamt mit einem Anteil zwischen 16,7 % bis 17,6 % genannt.

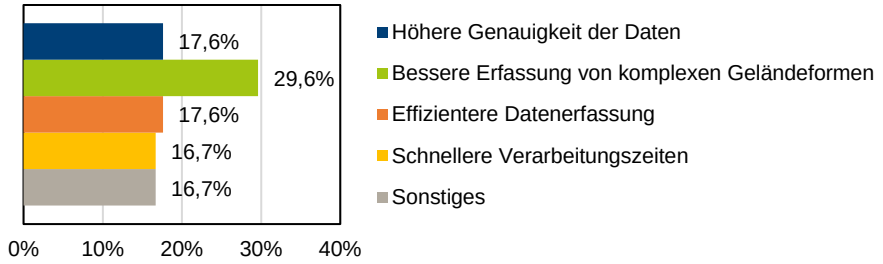


Abb. 3.8: Vorteile beim Einsatz einer LiDAR Drohne im Vergleich zu einer Photogrammetrie Drohne (n = 49)

Die Verwendung von LiDAR Drohnen erstreckt sich über eine breite Palette von Anwendungsfeldern. Primär wurden Geländemodellierung, Volumenberechnung sowie Straßenplanung und -vermessung als Anwendungsgebiete genannt. Lediglich eine Minderheit von 7,1 % setzt eine LiDAR Drohne zur Bauüberwachung ein. Die Herausforderungen, die beim Einsatz einer LiDAR Drohne auftreten, sind primär die vergleichsweisen hohen Anschaffungskosten mit 41,7 % sowie die anspruchsvolle Datenauswertung mit 23,8 %.

Investition und Empfehlungen

Hinsichtlich der finanziellen Aspekte zeigt sich, dass 34,8 % der befragten Personen, die eine LiDAR Drohne einsetzen, Investitionen im Bereich von 50.000 Euro bis 150.000 Euro für die notwendige Hardware und Schulungsmaßnahmen getätigt haben. Eine weitere Gruppe von 21,7 % bewegt sich über dieser Spanne (>150.000 Euro) und 17,4 % darunter (im Bereich zwischen 25.000 Euro und 50.000 Euro). Etwa 8,7 % haben Investitionen zwischen 10.000 Euro und 25.000 Euro getätigt, während 13,0 % der Befragten mehr als 250.000 Euro aufgebracht haben.

Abb. 3.9 zeigt die Weiterempfehlung einer LiDAR Drohne. Von den befragten Personen, die über Erfahrungen mit einer LiDAR Drohne verfügen, äußerten 53,1 % eine ausgesprochen starke bis eher positive Neigung zur Weiterempfehlung. 40,8 % zeigten sich neutral in dieser Hinsicht, während lediglich eine Minderheit von 6,1 % eher negative bis dezidiert ablehnende Empfehlungen aussprach.

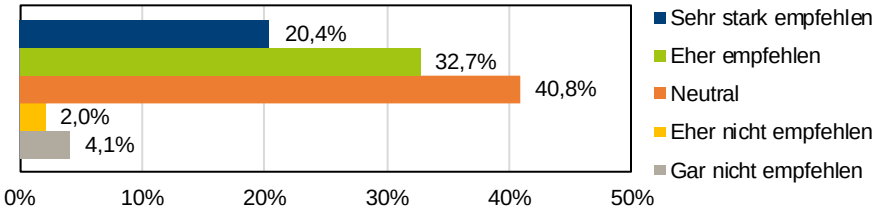


Abb. 3.9: Empfehlung der Verwendung einer LiDAR Drohne (n = 49)

In der empirischen Studie favorisieren 32,7 % den Einsatz einer LiDAR Drohne, während 49,0 % keine explizite Präferenz äußerten. Des Weiteren gaben 18,4 % an, entweder eine Photogrammetrie Drohne oder sogar eine bemannte Befliegung zu bevorzugen.

Zukunftsaussichten und Optimierungen

Die zukünftige Entwicklung des Einsatzes von LiDAR Drohnen im Bereich des Vermessungswesens wird von 84,6 % der Teilnehmenden als moderat bis stark zunehmend eingeschätzt, während 12,6 % keinerlei Veränderung antizipieren. Eine moderate bis starke Abnahme dieser Entwicklung wird von lediglich 2,7 % der Teilnehmenden erwartet.

In der empirischen Studie äußerten 31,3 % ihre Ansichten (57 von 182 Personen, die Erfahrungen im Einsatz von Drohnen haben) zu gewünschten technologischen Fortschritten zur Verbesserung des Einsatzes einer LiDAR Drohne im Vermessungswesen. Innerhalb dieser Gruppe wurden verschiedene Schwerpunkte identifiziert. Die Bildung der Kategorien Hardware, Regulierung, Software, Datenverarbeitung, Gebrauchstauglichkeit und Kosten erfolgte induktiv und ist in Abb. 3.10 dargestellt.

- Hardware: 48,6 % betonten die Signifikanz von Verbesserungen in der Hardware. Die angestrebten technologischen Fortschritte umfassen die Entwicklung von kompakteren und leichteren Sensoren im Hinblick auf die C2-Klasse mit einem maximalen Abfluggewicht von weniger als 4 kg sowie die Erhöhung der Sensorpräzision. Gleichwertige Systeme gibt es aktuell in der C3-Klasse. Des Weiteren wurde eine Erweiterung der Reichweite für LiDAR und Grünlicht-LiDAR, eine gesteigerte Anzahl registrierter Echos und die Verringerung von Rauschen genannt. Zusätzlich wurden Verbesserungen bei inertialen Messeinheiten und eine Ausdehnung der Flugdauer als wünschenswert genannt.
- Regulierung: 16,2 % sprachen die Notwendigkeit einer Anpassung der gesetzlichen Regulierung an. Hier wurden Drohnen mit EU-Zertifizierung sowie eine Vereinfachung der gesetzlichen Vorgaben für Drohnen mit einem Maximalabfluggewicht von 15 bis 25 kg genannt. Hintergrund ist, dass aktuell auch mit einer geforderten Risikobewertung im Rahmen der speziellen Kategorie keine Befliegung mit hochwertigen Sensoren in besiedelten Gebieten möglich ist.
- Software: Weitere 16,2 % betonten die Relevanz von Weiterentwicklungen von Softwareprodukten. Hierzu zählt die Forderung nach schnelleren Softwarelösungen, die effizienter mit Punktwolken und geografischen Koordinaten umgehen können. Ebenfalls wurde die Idee einer hybriden Bündelblockausgleichung für LiDAR und Photogrammetrie genannt.
- Kosten: 10,8 % nannten eine Kostenreduktion und eine "*finanzierbare Drohnen*" [sic] als wünschenswerte Entwicklung, um die Technologie besser zugänglich zu machen.
- Datenverarbeitung: 5,4 % sprachen von einer optimierten Datenauswertung, der Möglichkeit der Sensorfusion (z. B. LiDAR, Multispektral), Vorhandensein von SLAM-Algorithmen für eine automatisierte Kartierung und der Option, LiDAR-Daten mit Fotografien aus der Luft zu kombinieren.
- Gebrauchstauglichkeit: 2,7 % wünschten sich ein "*einfacher werden in der Handhabung*" [sic], d.h. eine verbesserte Gebrauchstauglichkeit der Technologie. Hier wurde ebenfalls "*eine Verringerung der Komplexität*" oder "*sodass nur die Daten erfasst werden, die für die Erfüllung des Auftrages sinnvoll sind*"

[sic] erwähnt. Eine ereignisorientierte Datenerfassung kann den letzten Punkt unterstützen, indem sie sicherstellt, dass nur relevante Daten erfasst werden.

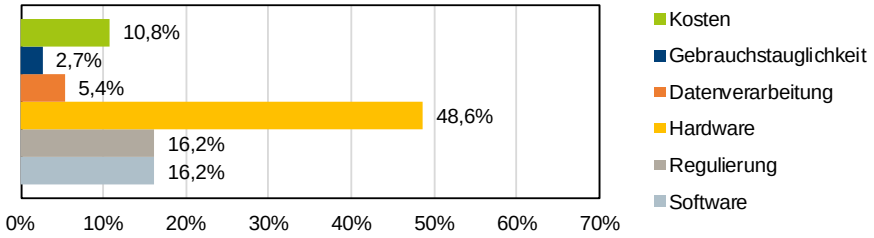


Abb. 3.10: Kategorien für zukünftigen Entwicklungen einer LiDAR Drohne (n = 57)

28 von 182 Personen (15,0 %), die Erfahrungen im Einsatz von Drohnen haben, teilten zusätzliche Anmerkungen mit. 44,8 % betonten erneut regulatorische Aspekte, darunter die Forderung nach allgemeinen rechtlichen Genehmigungen für gewerbliche Drohnenflüge. Besonders problematisch wurden Flugverbotszonen in bebauten Gebieten, eingeschränkte Flugbereiche entlang von Verkehrs- oder Bahnanlagen und in Wohngegenden sowie der Einsatz von Drohnen in der Nähe von Flughäfen angesehen. Finanzielle Aspekte wurden von 13,8 % hervorgehoben, wobei die Rentabilität einer LiDAR Drohne in Frage gestellt wurde. 24,1 % erwähnten, dass Vermessungsarbeiten von Nachunternehmern als externe Dienstleistungen übernommen werden, wohingegen 6,9 % auf das gesteigerte Geschäftspotenzial nach der Einführung einer LiDAR Drohne hingewiesen haben. Weitere 6,9 % betonen die Bedeutung der Gebrauchstauglichkeit und führten an, dass die Extraktion von Informationen aus Punktwolken zu kompliziert sei. Ein weiteres Anliegen bestand darin, dass LiDAR Drohnen trotz ihrer Vorteile in dicht bewachsenen Gebieten oft eine zu hohe Detailgenauigkeit aufweisen. Schlussendlich wurde von 3,4 % auch das Fehlen etablierter Software-Workflows sowie erforderliche Nachbearbeitungsschritte für LiDAR-Daten diskutiert.

3.2.4 Schlussbetrachtung

Es zeigt sich ein hohes Potenzial für die Anwendung von Drohnen, insbesondere angesichts steigender Zahlen von registrierten Betreibenden und bestandenen Prüfungen in Deutschland (vgl. Abb. 1.2). Obwohl die Anwendung einer LiDAR Drohne existiert, ist sie nicht weit verbreitet. Im Vergleich dazu ist die Nutzung einer Photogrammetrie Drohne weitaus gängiger, was darauf hinweist, dass diese Technologie momentan die Branche maßgeblich beeinflusst. Abschließend gilt es, die Qualität der empirischen Studie einzuschätzen. Es wurden gezielte Maßnahmen ergriffen, um potenzieller Einflüsse wie bspw. der begrenzten Motivation der teilnehmenden Personen und einer eingeschränkten Verbreitung der empirischen Studie zu minimieren. Die Verwendung von geschlossenen Fragen im Erhebungsinstrument, die Begrenzung der Dauer und die Einbindung von Verbänden zur Verbreitung trugen zur Steigerung der Objektivität bei. Da vergleichbare Studien bisher fehlen, bleibt jedoch unklar, wie sich die Ergebnisse möglicherweise von anderen Studien unterscheiden könnten. Der Erkenntnisgewinn der Potenzialanalyse wird in Abschnitt 3.3 aufgezeigt.

3.3 Erkenntnisgewinn

Die NWA zielte darauf ab, Erfassungstechnologien im Brückenbau zu evaluieren und eine favorisierte Technologie für die automatisierte Datenerfassung basierend auf verschiedenen AWF festzulegen. Die Ergebnisse zeigen, dass LiDAR- und Photogrammetrie Drohnen das größte Potenzial für eine automatisierte Datenerfassung haben. Die Reduzierung des Aufwands bei der Datenerfassung wird als entscheidend betrachtet und die hohe Gewichtung des Kriteriums "LOADA" zeigt das Bewusstsein und Notwendigkeit für automatisierte Erfassungstechnologien. In der NWA gab es keine signifikanten Unterschiede in der Bewertung der Technologien basierend auf verschiedenen AWF, was darauf hinweist, dass spezifische AWF eine begrenzte oder keine determinierende Rolle bei der Auswahl der Technologie spielen.

Die empirische Studie verfolgte das Ziel, den gegenwärtigen Einsatz von Drohnen zu erfassen und die Erfahrungen sowie die Vor- und Nachteile im Zusammenhang mit ihrer Nutzung zu untersuchen. Darüber hinaus sollte die zukünftige Entwicklung im Kontext der Drohnennutzung analysiert werden. Obwohl LiDAR Drohnen auf dem Markt eine gewisse Akzeptanz gefunden haben, verzeichnen sie keine ausreichende Marktdurchdringung. Im Gegensatz dazu sind Photogrammetrie Drohnen weitaus verbreiteter und erfreuen sich im untersuchten Anwendungsbereich deutlich größerer Beliebtheit. Dies ist auf ihre Kosteneffizienz zurückzuführen und darauf, dass sie, insbesondere in Verbindung mit RTK, eine hervorragende Präzision für diesen speziellen Anwendungsbereich liefern. Dennoch weisen LiDAR Drohnen zahlreiche Vorteile auf, wie bspw. die Fähigkeit zur Vegetationsdurchdringung und die schnelle Generierung von Punktwolken. Allerdings gehen diese Vorteile oft mit höheren Investitionskosten einher.

Gestützt auf die Ergebnisse der Potenzialanalyse von Erfassungstechnologien fokussiert sich die vorliegende Arbeit auf die Verwendung einer Photogrammetrie Drohnen als Erfassungstechnologie und ihre Anwendung im Kontext der Baufortschrittskontrolle.

4 Methodik zur Umsetzung einer schlanken Baufortschrittskontrolle

In diesem Kapitel wird eine Methodik zur Umsetzung einer ereignisbasierten Datenerfassung und schlanken Baufortschrittskontrolle entwickelt. Als Grundlage der Methodik ist der schematische Informationsbereitstellungszyklus der Baustelle mit Informationsbestellung sowie -bereitstellung in Abb. 4.1 dargestellt. Während der Bauphase wird der Informationsbedarf durch bestimmte Ereignisse ausgelöst, wie bspw. Aktivitäten aus dem Terminplan oder spezifische Anforderungen. Um diesen Informationsbedarf zu decken, wird eine schlanke und semantische Informationsbereitstellung auf der Baustelle angestrebt, die durch den Einsatz von Drohnen zur Datenerfassung unterstützt wird. Dabei ist das 4D-BIM integraler Bestandteil. Die Informationsanforderung folgt einem ereignisbasierten und bedarfsorientierten Ansatz, ähnlich dem Pull-Prinzip der Lean Methodik und basiert auf den von einer photogrammetrischen Drohnen aufgenommenen Daten. Eine sorgfältige Planung der Datenerfassung unter Anwendung des PDCA-Zyklus (vgl. Abschnitt 2.5.3) gewährleistet die gewünschte Datenqualität. Eine Integration der Ist-Daten in das 4D-BIM zur Kontrolle des Baufortschritts wird als Informationsbereitstellung betrachtet. Das vorgestellte Konzept wird als ereignisbasierte, bedarfsorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung in der Bauausführung (engl. *event-based, demand-oriented and drone-based data acquisition during construction,* "EDRODACON") bezeichnet.

Abb. 4.1: Schematischer Informationsbereitstellungszyklus der Baustelle mit Informationsbestellung sowie -bereitstellung als Grundlage der Methodik

Zunächst werden in Abschnitt 4.1 die Methodik und der Strategieansatz vorgestellt. Anschließend erfolgt in Abschnitt 4.2 die Entwicklung einer vorgangsbezogenen Initiierung und Planung der Datenerfassung auf Grundlage des 4D-BIM. Parameter für eine photogrammetrische Baufortschrittskontrolle werden in Abschnitt 4.3 untersucht. In Abschnitt 4.4 wird eine schlanke Baufortschrittskontrolle mittels der erfassten Daten entwickelt. Abschnitt 4.5 bündelt diese Punkte in einer Softwareintegration der prozessorientierten und praxisgerechten Umsetzung im 4D-BIM.

4.1 Methodik und Strategieansatz

Die Forschungsmethodik umfasst zunächst eine vorgangsbezogene Initiierung und Planung der Datenerfassung. Der Grundgedanke einer vorgangsbezogenen Initiierung und der Anwendung des Pull-Prinzips ist, dass Informationen zeitgenau in den Prozess einbezogen werden und dadurch die Datenerfassung nicht durch Annahmen oder Schätzungen der erfassenden Person geplant werden, sondern unmittelbar aus dem 4D-BIM und den nachgelagerten Anforderungen angestoßen werden. Das Ziel dieser Vorgehensweise ist die bedarfsgerechte Bereitstellung von Informationen für den AWF. Hervorzuheben ist hier die Simplifizierung der Vorgangsgeometrie zur sogenannten kritischen Fläche auf Grundlage des tagesaktuellen 4D-BIM.

Im Rahmen der vorgangsbezogenen Initiierung werden Detaillierungsgrade eines 4D-BIM, die geometrische Änderung von Vorgängen und die Simplifizierung der Vorgangsgeometrie als Aspekte behandelt. Im nächsten Schritt erfolgt die Evaluation und Empfehlung von Parametern für die photogrammetrische Datenerfassung und die Baufortschrittskontrolle. Dies geschieht durch eine synthetische Studie. Die untersuchten Flugparameter für die Datenerfassung umfassen den Abstand zur kritischen Fläche, die Überlappung der Aufnahmen in Vorwärtsrichtung und die Geschwindigkeit der Drohne. In Bezug auf die Baufortschrittskontrolle werden Parameter des RANSAC-Algorithmus untersucht, wie die Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitive, die Abweichung des Einfallswinkels und die Auflösung der Stichprobenpunkte.

Abschließend wird auf Grundlage der zuvor simplifizierten Vorgangsgeometrie und der kritischen Fläche die Datenerfassung in Form einer Punktwolke zu einer vorgangsbezogenen Punktmenge gefiltert. Durch Generierung des Interessensvolumens mittels Toleranzwert und Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf die gefilterte Punktmenge erfolgt die schlanke Baufortschrittskontrolle und die Integration der Information in das 4D-BIM.

4.1.1 Festlegungen

Im Rahmen der Arbeit werden zur Eingrenzung der betrachteten Problemstellung die nachfolgenden prozessualen und technischen Festlegungen getroffen, die bei weiterführenden Untersuchungen und einer Einführung des vorgestellten Ansatzes in der Praxis berücksichtigt werden sollten.

Prozess

Die Anwendung der Methodik erfordert zunächst die Etablierung einer digitalen und modellbasierten Arbeitsweise im Projekt. Darüber hinaus ist es notwendig, tagesaktuelle Informationen über den Bauprozess für das 4D-BIM bereitzustellen. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Annahme getroffen, dass jeder Vorgang oder jede sichtbare Aktivität auf planare Flächen simplifiziert werden kann, da während der Produktion auf der Baustelle überwiegend planare Bauteile hergestellt werden. Diese Annahme erschwert die Erfassung von Tätigkeiten wie den Einbau von Bewehrungen, die aufgrund der mangelnden Genauigkeit der drohnenbasierten und photogrammetrischen Datenerfassung jedoch ausgeschlossen werden. Dies begründet sich damit, dass die Tätigkeit des Bewehrens in der Regel aus einer Vielzahl von Bewehrungseisen besteht, die meist kleine Durchmesser aufweisen und mit kleinen Abständen angeordnet sind. In

Anbetracht der Bodenauflösung der Photogrammetrie, die linear zum Abstand abnimmt, lassen sich diese mit einer drohnenbasierten Datenerfassung und großen Abständen nicht mit ausreichender Präzision erfassen. Des Weiteren ist zu erwähnen, dass Wegpunkte der Flugroute und somit die Blickrichtung der photogrammetrischen Drohne stets senkrecht zur kritischen Fläche stehen, um mögliche Bildverzerrungen zu vermeiden und die Berechnungen zu vereinfachen.

Um die Methodik erfolgreich einzusetzen, ist ein kontinuierlicher Informationsfluss erforderlich, der durch einen strukturierten Prozess gewährleistet wird. Dieser Prozess wird durch die in Abschnitt 4.5 beschriebene Softwareintegration unterstützt. Die Baufortschrittskontrolle erfolgt auf Grundlage einer detaillierten Terminplanung und bietet eine umfassende Darstellung auf der Ebene von (Halb-)Tagesleistungen. Dabei werden abgeschlossene Arbeitsvorgänge in Intervallen von einer Woche erfasst, und es wird darauf geachtet, dass Arbeitsvorgänge nicht länger als eine Woche dauern. Die Methodik wird anhand eines Beispiels aus dem Infrastrukturbau und insbesondere dem Betonbrückenbau veranschaulicht. Sie ist jedoch nicht ausschließlich auf diese Bereiche beschränkt, sondern kann durch Anpassungen auch in anderen Anwendungsfeldern eingesetzt werden.

Technik

Es wird mit großen Datenmengen gearbeitet, da bei der Datenerfassung in Form einer Punktwolke erhebliche Datenmengen generiert werden. Für die Erstellung der vorgangsbezogenen Punktwolke der Fallstudie 2 in Abschnitt 5.3 wurden bspw. insgesamt 212 Fotografien mit einer Gesamtgröße von 750 MB verwendet. Die resultierende Punktwolke für den spezifischen Vorgang hat eine Größe von 1,99 GB.

Zusätzlich werden aerodynamische Aspekte wie Wind oder Regen sowie andere Ungenauigkeiten wie GNSS-Toleranzen in der Datenerfassung nicht berücksichtigt. Ansätze wie die Bereitstellung der Flugroute in einem für Drohnen lesbaren Datenformat sind mit dem beschriebenen Konzept vereinbar und werden als gegeben vorausgesetzt. Das 4D-BIM wird in der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2. der Firma thinkproject (*thinkproject - 2023*) verwaltet. Die Nutzung des in Abschnitt 4.1.2 eingeführten Fachmodells ist zwingend erforderlich.

4.1.2 Einführung des Fachmodells "Drohnenbasierte Datenerfassung"

Im Rahmen dieser Arbeit wird das Fachmodell "Drohnenbasierte Datenerfassung" (engl. *drone based data acquisition,* "DBDA") eingeführt. Das Fachmodell wird während der Planung der Datenerfassung in der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2 (*thinkproject - 2023*) automatisiert erzeugt und vorgehalten. Das Fachmodell setzt sich aus verschiedenen Informationscontainern zusammen, darunter die zu erfassende kritische Fläche (engl. *drone-acquirable critical surfaces,* "CS") gemäß Abschnitt 4.2.3, die ermittelten Wegpunkte der zu erfassenden kritische Fläche (engl. *drone waypoints,* "WP") und die Flugroute der ermittelten Wegpunkte (engl. *idealized flight path*, "FP") gemäß Abschnitt 4.2.4, der Flugkorridor zur Kollisionsprüfung (engl. *flight corridor*, "FC") sowie die geflogene Flugroute (engl. *as-flown flight path*, "AFP").

Die Modellierung bzw. die Generierung der kritischen Fläche, Wegpunkte und der idealisierten Flugroute als geometrische Objekte im 4D-BIM erleichtert nicht nur die

Überwachung des Datenerfassungsprozesses, sondern bietet auch den Vorteil einer umfassenden Dokumentation. Darüber hinaus dienen diese Inhalte als Grundlage für weitere Analysen und Planungen. Semantische Informationen werden analog zum Fachmodell in der Merkmalgruppe DBDA für das geometrische Modell sowie für den Terminplan eingeführt. Eine Bereitstellung des Fachmodells im IFC-Format ist möglich. Die Struktur des Fachmodells sowie die Merkmale der Merkmalgruppen für die Informationsdomänen "*geometry*" und "*activities*" sind in Anhang E aufgeführt.

4.2 Vorgangsbezogene Initiierung und Planung der Datenerfassung auf Grundlage des 4D-BIM

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine photogrammetrische Datenerfassung speziell für die Baufortschrittskontrolle mithilfe von Drohnen entwickelt, um den konkreten Informationsbedarf der terminlichen Baufortschrittskontrolle zu erfüllen. Abschnitt 4.2 behandelt die Initiierung und Planung der drohnenbasierten Datenerfassung auf Grundlage des 4D-BIM. Hierbei gilt es festzustellen, welche Vorgänge und Aktivitäten durch den Einsatz von Drohnen erfasst werden können, um die Informationsanforderungen zu erfüllen. In Abb. 4.2 ist das Entscheidungsdiagramm für die Identifizierung von Vorgängen dargestellt, die mithilfe von Drohnen erfasst werden können.

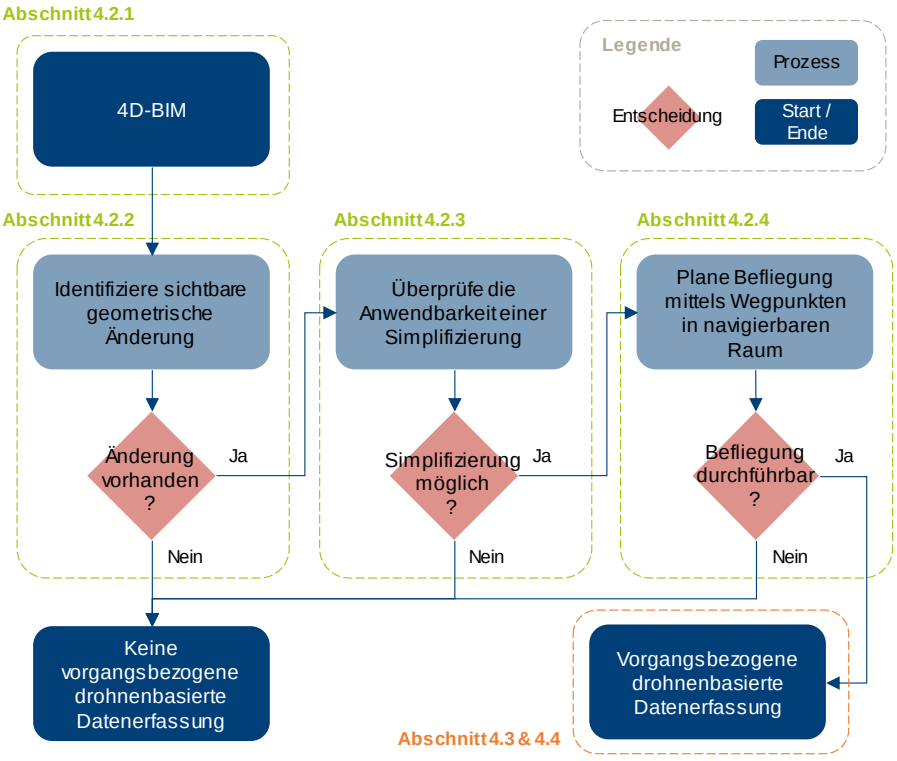


Abb. 4.2: Entscheidungsdiagramm für die Identifikation von drohnenerfassbaren Vorgängen

Ausgangslage ist ein tagesaktuelles 4D-BIM. In Abschnitt 4.2.1 werden Detaillierungsgrade auf Ebene von (Halb-)Tagesleistungen für ein 4D-BIM eingeführt.

Abschnitt 4.2.2 beschreibt die geometrische Änderung eines Vorgangs. Anschließend wird in Abschnitt 4.2.3 zunächst eine kritische Untersuchung des IFC-Formats durchgeführt, um im weiteren Schritt die Simplifizierung der Vorgangsgeometrie zur kritischen Fläche sowie eine Datenübertragung mittels JSON-Format (*JavaScript Object Notation*) zu beschreiben. Abschließend erfolgt in Abschnitt 4.2.4 die Festlegung einer Suchzeit und des Zeitpunkts der Befliegung, die Planung der Datenerfassung anhand der kritischen Fläche, eine Diskussion über den navigierbaren Raum für die vorgangsbezogene Erfassung sowie die kontinuierliche Verbesserung der Datenerfassung im Rahmen des PDCA-Zyklus.

4.2.1 Detaillierungsgrad eines 4D-BIM

Der Detaillierungsgrad eines 4D-BIM hat eine entscheidende Bedeutung für die schlanke Baufortschrittskontrolle. Die terminliche Baufortschrittskontrolle wird auf der Ebene von (Halb-)Tagesleistungen durchgeführt. Dies ist nur möglich, wenn diese spezifische Detailstufe auch im 4D-BIM integriert ist. Neben dem Detaillierungsgrad der Terminplanung spielt die Visualisierungskonfiguration bei dem Detaillierungsgrad des 4D-BIM eine entscheidende Rolle. Diese Visualisierungskonfigurationen können mit einer Software zur 4D-Modellierung erstellt werden.

Es besteht die Möglichkeit durch Visualisierungskonfiguration (*Tschickardt et al. - 2018*) eine unterschiedliche Detaillierungstiefe des 4D-BIM zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit werden für den Detaillierungsgrad "Detailterminplan" zwei Visualisierungskonfigurationen des 4D-BIM (engl. *Level of 4D*, "LO4D") eingeführt und sind in Tab. 4.1 dargestellt. Im Fall von LO4D 1 wird die Visualisierung mithilfe von Primär- und Sekundär-Modellelementen durchgeführt, während bei LO4D 2 die Visualisierung ausschließlich durch Primär-Modellelemente erfolgt.

Tab. 4.1: Detaillierungsgrade eines 4D-BIM im Rahmen dieser Arbeit

LO4D	Beschreibung der Visualisierungskonfiguration	Detaillierung
1	Visualisierung durch Primär- und Sekundär-Modellelemente	Hoch
2	Visualisierung durch Primär-Modellelemente	Niedrig

Die Visualisierungskonfigurationen werden nachfolgend am Beispiel des Herstellungsprozesses eines Betonbauteils beschrieben. Das Betonbauteil stellt bei LO4D 1 das primäre Bauteil bzw. Modellelement dar, das durch die Bautätigkeit hergestellt werden soll. Schalung und Bewehrung, die zum Errichten des Betonbauteils notwendig sind, sind als sekundäre Modellelemente zu betrachten, da diese nach der Bautätigkeit nicht mehr sichtbar sind bzw. teilweise wieder rückgebaut werden. Der Detaillierungsgrad LO4D 1 ist als "hoch" zu klassifizieren, da Sekundär-Modellelemente wie bspw. Schalung und Bewehrung als Modellelemente im 4D-BIM enthalten sind.

Tab. 4.2 zeigt die Visualisierungskonfiguration für LO4D 1 am Beispiel des Herstellungsprozess eines Betonbauteils. Die Vorgänge "Schalung stellen", "Bewehrung einbauen" und "Beton einbauen" werden jeweils an den verknüpften Modellelementen der Schalung, Bewehrung sowie des Betonbauteils mit der Visualisierungskonfiguration "Herstellen" visualisiert. Der Vorgang "Schalung ausbauen" wird an den rückzubauenden Schalungselementen mit der Visualisierungskonfiguration "Rückbauen"

visualisiert. Der Vorgang "Beton nachbehandeln" wird wiederum am primären Modellelement des Betonbauteils mit der Visualisierungskonfiguration "Nachbehandeln" visualisiert.

Tab. 4.2: Visualisierungskonfiguration für LO4D 1 an einem Beispielvorgang

Name des Vorgangs	Visualisierung	Objekt	Farbe
Sammelvorgang "Herstellung eines Betonbauteils"			
Schalung stellen	Herstellen	Sekundär	Türkis
Bewehrung einbauen	Herstellen	Sekundär	Türkis
Beton einbauen	Herstellen	Primär	Türkis
Schalung ausbauen	Rückbauen	Sekundär	Lavendel
Beton nachbehandeln	Nachbehandeln	Primär	Orange

Das Betonbauteil stellt bei LO4D 2 ebenfalls das primäre Bauteil dar, das durch die Bautätigkeit hergestellt werden soll. Der Detaillierungsgrad bezieht sich ausschließlich auf das primäre Modellelement und enthält keine geometrischen Objekte zu Schalung und Bewehrung, die für den Bau des Betonbauteils erforderlich sind. Daher wird der Detaillierungsgrad als "niedrig" eingestuft. Tab. 4.3 zeigt die Visualisierungskonfiguration für LO4D 2 am Beispiel des Herstellungsprozesses eines Betonbauteils. Die Vorgänge "Schalung stellen", "Bewehrung einbauen", "Beton einbauen", "Schalung ausbauen" und "Beton nachbehandeln" werden am primären Modellelement des Betonbauteils mit den Visualisierungskonfigurationen "Einschalen", "Bewehren", "Betonieren", "Ausschalen" und "Nachbehandeln" visualisiert.

Tab. 4.3: Visualisierungskonfiguration für LO4D 2 an einem Beispielvorgang

Name des Vorgangs	Visualisierung	Objekt	Farbe
Sammelvorgang "Herstellung eines Betonbauteils"			
Schalung stellen	Einschalen	Primär	Gelb
Bewehrung einbauen	Bewehren	Primär	Gelbgrün
Beton einbauen	Betonieren	Primär	Gold
Schalung ausbauen	Ausschalen	Primär	Grasgrün
Beton nachbehandeln	Nachbehandeln	Primär	Orange

Die im Rahmen dieser Arbeit eingeführten Visualisierungskonfigurationen werden in Kapitel 5 (vgl. Abb. 5.3 und Abb. 5.10) aufgegriffen, um jeweils für beide Detaillierungsgrade des 4D-BIM eine schlanke Baufortschrittskontrolle aufzuzeigen.

4.2.2 Geometrische Änderung eines Vorgangs

Das Ergebnis einer geometrischen Datenerfassung sind räumliche Informationen, die in Form einer Punktwolke vorliegen können. Diese Punktwolke enthält eine große Anzahl von Punkten, die jeweils durch X-, Y- und Z-Koordinaten definiert sind. Räumliche Informationen ermöglichen es, geometrische Änderungen auf der Baustelle zu erkennen. In dieser Arbeit werden sie anstelle von Farbinformationen verwendet, um Änderungen im Bauprozess zu identifizieren. Dies ermöglicht einen allgemeingültigen und skalierbaren Ansatz, der auf verschiedenen Baustellen und Szenarien für weitere Erfassungstechnologien angewendet werden kann.

Aufgrund der räumlichen Informationen und der geometrischen Änderung eines Vorgangs können somit drohnenerfassbare Vorgänge identifiziert werden. Das Heranziehen einer vorhandenen Verknüpfung im 4D-BIM zwischen einem Vorgang und einem Modellelement ist jedoch nicht ausreichend, da unter Umständen dieser Vorgang keine geometrische Änderung im Bauprozess verursacht. Als Beispiel kann die Fertigstellung von Betonarbeiten genannt werden. Der Vorgang "Beton nachbehandeln" ist zwar mit dem entsprechenden Modellelement, dass das Betonvolumen repräsentiert, verknüpft, führt jedoch zu keiner erfassbaren geometrischen Änderung im 4D-BIM und auf der Baustelle. Das bedeutet, dass keine Änderung in der Datenerfassung hinsichtlich der räumlichen Informationen sichtbar ist.

Eine direkte Identifikation einer geometrischen Änderung ist im IFC-Format nur bedingt möglich. Über die Entität *IfcTask* (siehe Abb. 2.3) können die zugeordneten Modellelemente identifiziert und deren geometrische und semantische Informationen abgeleitet werden. Start- und Enddatum sowie die Dauer des Vorgangs definieren, in welchem Zeitraum das zugeordnete Modellelement in dem Bauvorhaben "durchgeführt" werden soll. Die Information, ob es sich um einen Herstellungs- oder Rückbauprozess handelt, kann schließlich in dem Merkmal *Name*, bspw. "Beton einbauen", oder einem weiteren projektspezifischen Merkmal hinterlegt werden. Die Identifikation geometrischer Änderungen mittels IFC-Formats ist somit grundsätzlich möglich. In der operativen Projektabwicklung setzt sich ein 4D-BIM jedoch meist aus einer Vielzahl spezifischer Teilmodelle von Gewerken zusammen, die in einer Software zusammengeführt werden und das Projekt-BIM darstellen. Daher kann das reine IFC-Format nicht zur Identifikation geometrischer Änderungen verwendet werden. Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt die Identifikation einer geometrische Änderung eines Vorgangs in der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2. (*thinkproject - 2023*), welche in der operativen Projektabwicklung eingesetzt werden kann, um ein 4D-BIM aus verschiedenen Gewerke spezifischer Teilmodellen zusammenzusetzen.

In Abb. 4.3 ist das Entscheidungsdiagramm zur Identifikation einer geometrischen Änderung im 4D-BIM mit Legende dargestellt und wird nachfolgend beschrieben. Ein Beispiel zur Identifikation der geometrischen Änderung ist in Anhang E aufgeführt.

Ausgangslage ist ein 4D-BIM das aus einer Anzahl von Vorgängen besteht und mit einer Anzahl an Modellelementen verknüpft ist. Die Menge $SE_{i,Anfang}$ definiert die Menge an sichtbaren Elementen am Anfang von Tag i und Menge $SE_{i,Ende}$ definiert die Menge an sichtbaren Elementen am Ende von Tag i im 4D-BIM. Die verknüpften Elemente des Vorgangs V_j, die durch verschiedene Arten der Verknüpfung (vgl. Abschnitt 2.1.4) dem Vorgang zugeordnet werden können, sind in der Menge VE_j definiert und stellen den Vorgang geometrisch dar. Um die geometrische Änderung eindeutig dem verursachenden Vorgang zuzuordnen, muss nun jeweils die Schnittmenge zwischen diesen Mengen gebildet werden.

Die Schnittmenge $SEVE_{i,Anfang;j}$ enthält die Elemente, die sowohl in $SE_{i,Anfang}$ (sichtbare Elemente am Anfang von Tag i) als auch in VE_j (verknüpfte Elemente des Vorgangs) enthalten sind und ist in Gleichung (4.1) dargestellt.

$$\mathrm{SEVE_{i,Anfang;j}} = \{x | (x \in \mathrm{SE_{i,Anfang}}) \wedge (x \in \mathrm{VE_j})\} \tag{4.1}$$

In diesem Kontext repräsentiert x ein spezifisches geometrisches oder bauliches Element, das in den verschiedenen Mengen enthalten sein kann. Die Schnittmenge $SEVE_{i,Ende;j}$ enthält die Elemente, die sowohl in $SE_{i,Ende}$ (sichtbare Elemente am Anfang von Tag i) als auch in VE_j (verknüpfte Elemente des Vorgangs) enthalten sind und ist in Gleichung (4.2) dargestellt.

$$\mathrm{SEVE_{i,Ende;j}} = \{x | (x \in \mathrm{SE_{i,Ende}}) \Lambda (x \in \mathrm{VE_j})\} \tag{4.2}$$

mit $\mathrm{SEVE_{i,Anfang;j}}$ Schnittmenge der verknüpften Elemente $\mathrm{VE_j}$ des Vorgangs $\mathrm{V_j}$ sowie der sichtbaren Elemente am Anfangsdatum i $\mathrm{SE_{i,Anfang}}$.

$\mathrm{SEVE_{i,Ende;j}}$ Schnittmenge der verknüpften Elemente $\mathrm{VE_j}$ des Vorgangs $\mathrm{V_j}$ sowie der sichtbaren Elemente am Enddatum i $\mathrm{SE_{i,Ende}}$.

$\mathrm{SE_{i,Anfang}}$ Menge an sichtbaren Elementen am Anfang von Tag i.

$\mathrm{SE_{i,Ende}}$ Menge an sichtbaren Elementen am Ende von Tag i.

Die Bildung des Schnittmengenverhältnisses SMV, wie in Gleichung (4.3) definiert, gibt Aufschluss darüber, ob die verknüpften Modellelementen der Menge VE_j entfernt oder hinzugefügt werden oder ob keine geometrische Änderung für den Vorgang V_j stattgefunden hat.

$$\mathrm{SMV} = \frac{\mathrm{SEVE_{i,Anfang,j}}}{\mathrm{SEVE_{i,Ende,j}}} \tag{4.3}$$

mit SMV Schnittmengenverhältnis aus $\mathrm{SEVE_{i,Anfang,j}}$ und $\mathrm{SEVE_{i,Ende,j}}$.

Ein SMV größer als 1 bedeutet, dass die Menge der sichtbaren und verknüpften Elemente am Anfang von Tag i größer ist als die am Ende desselben Tages. Dies deutet darauf hin, dass bestimmte Elemente entfernt wurden, was als Rückbau interpretiert wird. Ein SMV von 1 zeigt an, dass die Anzahl der sichtbaren und verknüpften Elemente sowohl zu Beginn als auch am Ende des Tages i identisch ist, was darauf hinweist, dass keine geometrische Änderung stattgefunden hat. Ein SMV kleiner als 1 signalisiert, dass die Menge der sichtbaren und verknüpften Elemente am Ende des Tages i größer ist als zu Beginn des Tages i. Dies bedeutet, dass zusätzliche Elemente hinzugefügt wurden, was als Herstellen interpretiert wird. Entsprechend der geometrischen Änderung wird am Ende des Entscheidungsdiagramms das Merkmal "DBDA:GeometricChange" mit dem Datentyp xs:string und den Merkmalwerten "Herstellen" bzw. "Rückbau" am entsprechenden Vorgang V_j erzeugt. Falls keine geometrische Änderung detektiert wurde, bleibt das Merkmal für Vorgang V_j leer.

Das Entscheidungsdiagramm zur Identifikation einer geometrischen Änderung im 4D-BIM wird für jeden einzelnen Vorgang durchlaufen und ist als Schleife über den gesamten Terminplan anzusehen. Jeder Vorgang wird isoliert betrachtet, wodurch Kollisionen oder Überschneidungen von Vorgängen bei der Definition der geometrischen Änderung ausgeschlossen werden können. Voraussetzung hierfür ist jedoch, dass das 4D-BIM auf einem logischen Bauablauf basiert und standardisierte Konfigurationen (siehe Anhang E) verwendet wurden.

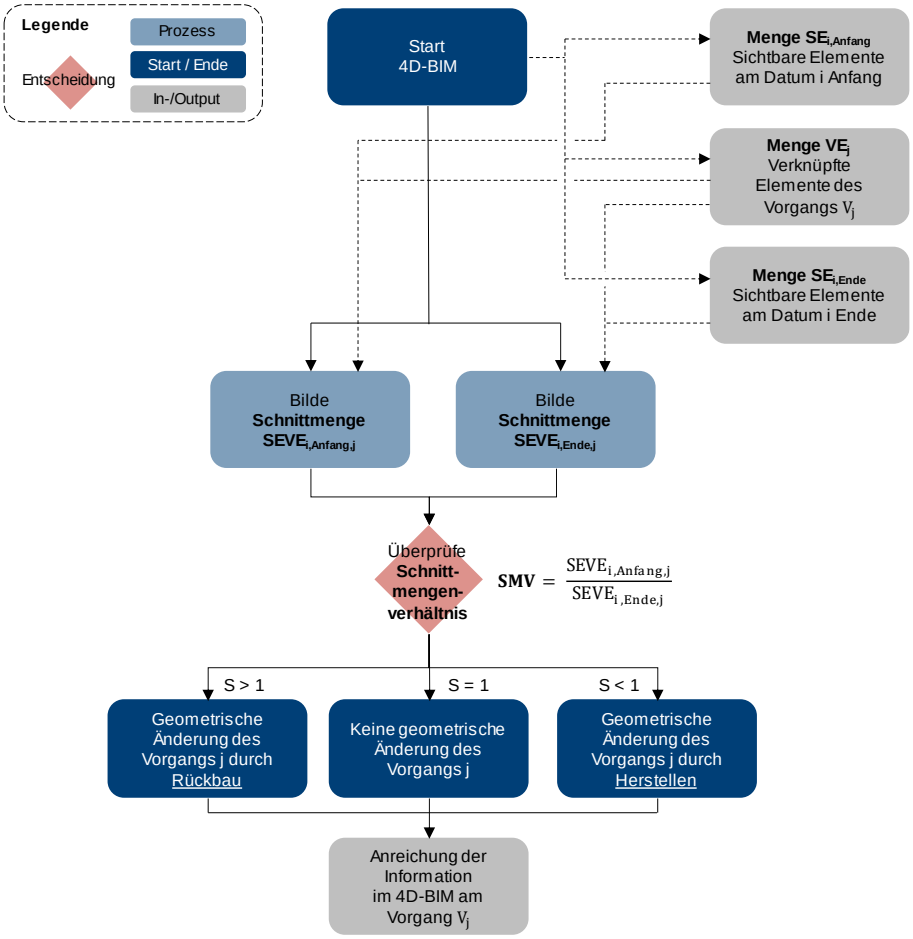


Abb. 4.3: Entscheidungsdiagramm zur Identifikation einer geometrischen Änderung im 4D-BIM

Die Vorgehensweise zur Definition der geometrischen Änderung reduziert die Visualisierungskonfiguration des 4D-BIM auf die maßgebliche geometrische Änderung des entsprechenden Vorgangs. Dies erfolgt unabhängig von der Bezeichnung der Visualisierungskonfiguration und auf Grundlage der Plausibilität des 4D-BIM.

Die geometrische Änderung wird nachfolgend am Beispiel des Herstellungsprozess eines Betonbauteils für LO4D 1 sowie LO4D 2 demonstriert.

Tab. 4.4 zeigt die geometrische Änderung in LO4D 1 am Beispiel des Sammelvorgangs "Herstellung eines Betonbauteils". Die Vorgänge "Schalung stellen", "Bewehrung einbauen" und "Beton einbauen" erzeugen die geometrische Änderung "Herstellen", der Vorgang "Schalung ausbauen" erzeugt die geometrische Änderung "Rückbau" und der Vorgang "Beton nachbehandeln" erzeugt keine geometrische Änderung.

Tab. 4.4: Geometrische Änderung für LO4D 1 an einem Beispielvorgang

Name des Vorgangs	Visualisierung	Objekt	Geometrische Änderung
Sammelvorgang "Herstellung eines Betonbauteils"			
Schalung stellen	Herstellen	Sekundär	Herstellen
Bewehrung einbauen	Herstellen	Sekundär	Herstellen
Beton einbauen	Herstellen	Primär	Herstellen
Schalung ausbauen	Rückbauen	Sekundär	Rückbau
Beton nachbehandeln	Nachbehandeln	Primär	

Tab. 4.5 zeigt die geometrische Änderung in LO4D 2 am Beispiel des Sammelvorgangs "Herstellung eines Betonbauteils" analog zu LO4D 1. Die Vorgänge "Schalung stellen", "Bewehrung einbauen" und "Beton einbauen" erzeugen die geometrische Änderung "Herstellen", der Vorgang "Schalung ausbauen" erzeugt die geometrische Änderung "Rückbau" und der Vorgang "Beton nachbehandeln" erzeugt keine geometrische Änderung.

Tab. 4.5: Geometrische Änderung für LO4D 2 an einem Beispielvorgang

Name des Vorgangs	Visualisierung	Objekt	Geometrische Änderung
Sammelvorgang "Herstellung eines Betonbauteils"			
Schalung stellen	Einschalen	Primär	Herstellen
Bewehrung einbauen	Bewehren	Primär	Herstellen
Beton einbauen	Betonieren	Primär	Herstellen
Schalung ausbauen	Ausschalen	Primär	Rückbau
Beton nachbehandeln	Nachbehandeln	Primär	

Wie einleitend in Abschnitt 4.2.1 beschrieben, erfolgt die Visualisierung bei LO4D 1 mithilfe von Primär- und Sekundär-Modellelementen, während bei LO4D 2 die Visualisierung ausschließlich durch Primär-Modellelemente erfolgt. Die Definition der geometrische Änderung kann für beide Detaillierungsgrade herangezogen werden.

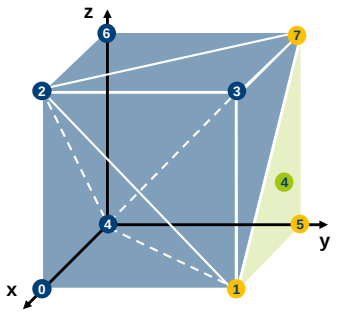
4.2.3 Simplifizierung der Vorgangsgeometrie

4.2.3.1 Ableitung der Geometrie mittels IFC-Formats

Wie bereits in Abschnitt 2.1.2 beschrieben, kann die geometrische Repräsentation eines Objektes mit einem *Tessellated Mesh* dargestellt werden. In der Regel werden die Koordinaten der Eckpunkte in einer geordneten und indexierten Liste, dem sogenannten *Indexed Face Set*, gespeichert (*Wavefront - 1989*), die wiederum von einer indexierten Liste der Dreiecke abgerufen wird.

Abb. 4.4 stellt in a) die Oberfläche und Triangulation sowie die dazugehörigen Eckpunkte am Beispiel eines Einheitswürfels dar. Hervorgehoben ist ein Dreieck eines Einheitswürfels mit dem Index 4 und in b) die dazugehörigen Eckpunkte K, L und M sowie in c) deren X, Y- und Z-Koordinaten.

a)



b)

Dreiecke

Index	K	L	M
0	0	1	2
1	1	3	2
2	2	3	7
3	2	7	6
4	1	5	7
5	1	7	3
6	6	7	4
7	7	5	4
8	0	4	1
9	1	4	5
10	2	4	6
11	0	2	4

c)

Eckpunkte

Index	X	Y	Z
0	1,00	0,00	0,00
1	1,00	1,00	0,00
2	1,00	0,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00
4	0,00	0,00	0,00
5	0,00	1,00	0,00
6	0,00	0,00	1,00
7	0,00	1,00	1,00

Abb. 4.4: Darstellung einer Oberfläche und Triangulation sowie die dazugehörigen Eckpunkte am Beispiel eines Einheitswürfel

Neben weiteren Datenformaten (bspw. *.OBJ oder *.DAE) eignet sich das IFC-Format sehr gut für einen offenen und herstellerneutralen Datenaustausch und besteht aus zahlreichen Klassen und Entitäten (*buildingSMART - 2023*). Im IFC-Format repräsentiert die Entität *IfcShapeRepresentation* die geometrische Darstellung eines Modellelements. Das Merkmal *RepresentationIdentifier* dieser Entität dient dazu, den Typ der verwendeten Repräsentation für das Modellelement zu definieren. Eine übliche Repräsentation eines Modellelements ist *Body*, die die physische Form und das Volumen des Modellelements definiert oder approximiert. Die Geometrie des Modellelements kann hierbei auf *Brep* basieren. Die Repräsentation *Surface* im IFC-Format beschreibt hingegen die äußere Oberfläche des Modellelements. Eine solche Repräsentation kann zur Definition thermischer Grenzen verwendet werden, die idealisiert auf der Mittelachse eines Objektes liegen. Weitere mögliche Darstellungstypen sind bspw. *Axis*, *Box*, *CoG* (*Center of Gravity*) oder *Reference* im IFC-Format (*buildingSMART - 2023*).

Das Merkmal *RepresentationType* der Entität *IfcShapeRepresentation* wird verwendet, um die Modellierung zu spezifizieren, die für die jeweilige Repräsentation des Modellelements verwendet wird. Als Beispiele für den *RepresentationType* ist unter anderem *Tessellation* zu nennen, der die IFC-Entitäten *IfcTriangulatedFaceSet*, *IfcCartesianPointList3D*, *IfcIndexedColourMap*, *IfcColourRgbList* verwendet und nur vermaschte Repräsentationen von Oberflächen zulässt. Der *RepresentationType SurfaceModel* zieht die IFC-Entitäten *IfcFaceBasedSurfaceModel*, *IfcConnectedFaceSet*, *IfcFace*, *IfcFaceOuterBound*, *IfcPolyLoop* und *IfcCartesianPoint* heran und ermöglicht neben einer vermaschten Repräsentation auch eine flächen- bzw. hüllenbasierte Repräsentation einer Oberfläche. Der *RepresentationType Brep* bezieht sich auf ebene Flächen, die durch die IFC-Entitäten *IfcFacetedBrep*, *IfcClosedShell*, *IfcFace*, *IfcFaceOuterBound*, *IfcPolyLoop* und *IfcCartesianPoint* repräsentiert werden. *IfcAdvancedBrep* ermöglicht im Vergleich zu *IfcFacetedBrep* auch die Modellierung von Körpern mit gekrümmten Kanten und Oberflächen (*buildingSMART - 2023*). Ein korrekt erstelltes Modell mit dem *RepresentationType Brep* hat Flächennormalen, die aus dem Körper heraus zeigen. Eine Flächennormale ergibt sich ausschließlich aus den aufeinander folgenden Orientierungen der *IfcEdges* und *IfcOrientedEdges*, die die Fläche begrenzen. Wenn alle Kanten der Fläche in entgegen dem Uhrzeigersinn verlaufender Richtung und entsprechender Kantenorientierung verbunden sind, zeigt die Fläche nach außen. Das Merkmal *SameSense* der Entität

IfcFaceSurface gibt an, ob die Richtung der Normalen mit der Richtung der topologischen Normalen zur Fläche übereinstimmt oder ihr entgegengesetzt ist (*buildingSMART - 2023*).

Abb. 4.5 zeigt einen Ausschnitt der IFC-Datenstruktur am Beispiel des Einheitswürfels der *RepresentationIdentifier Body* und *RepresentationType Brep* mit den IFC-Entitäten *IfcFace*, *IfcFaceOuterBound*, *IfcPolyLoop* und *IfcCartesianPoint* sowie Werte für die IFC-Entität *IfcPolyLoop*. Mittels der kartesischen Koordinaten der Entitäten *IfcPolyLoop* und *IfcCartesianPoint*, die einen Punkt durch Koordinaten in einem orthogonalen, rechtsdrehenden kartesischen Koordinatensystem definieren, können Rückschlüsse zur Fläche gezogen werden.

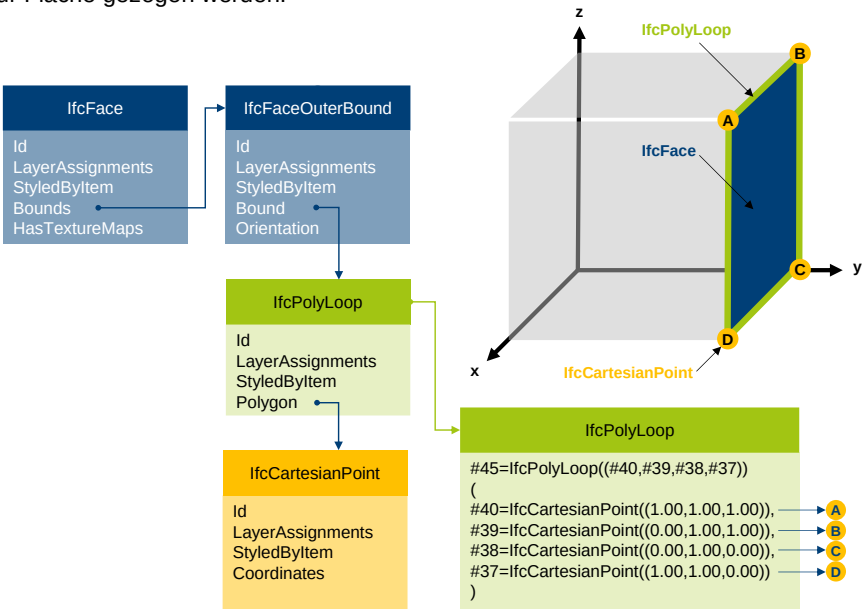


Abb. 4.5: Ausschnitt der IFC-Datenstruktur am Beispiel des Einheitswürfels

Die Ausrichtung der Fläche eines Modellelements kann anhand der kartesischen Koordinaten und der Ebenengleichung bestimmt werden, um festzustellen, ob es sich um eine vertikale oder horizontale Fläche handelt. Eine Spezifizierung bei horizontalen Flächen kann anhand der Koordinaten erfolgen. So liegt bspw. die Aufstandsfläche eines Bauteils meist tiefer als die Oberseite. Bei Prozessen wie dem Betoneinbau ist dies von untergeordneter Bedeutung, da sie aufgrund geometrischer Bedingungen oder Verdeckungen nicht immer erfasst werden können. Bei vertikalen Flächen ist es jedoch oft nicht möglich, allein anhand der kartesischen Koordinaten der Eckpunkte festzustellen, ob es sich um die gewünschte Fläche des Modellelements handelt. So besteht bspw. das Schalungselement Frami Xlife (Abmessungen: 0,90 x 1,20 m) des Herstellers DOKA aus etwa 40 vertikalen Flächen. Die Ausrichtung des Elements kann nicht allein anhand der Koordinaten der Eckpunkte oder der Normalenvektoren ausreichend definiert werden, um die relevante Vorgangsgeometrie festzulegen. Aus diesem Grund ist es nicht möglich festzustellen, welche der Flächen des Schalungselements als relevant einzustufen sind und wo sich diese Flächen befinden (Innenseite, Außenseite, Vorderseite oder Rückseite).

Durch die Entität *IfcIndexedColourMap*, eine Unterart von *IfcPresentationItem*, können Farbinformationen einzelnen Flächen zugeordnet werden. Es ist denkbar, dass die Person, die das Modell erstellt, einer spezifischen Fläche eine definierte Farbe zuweist, um diese als drohnenerfassbar zu klassifizieren. Möglicherweise ist diese Person ausschließlich für ihr Gewerk spezifisches Fachmodell verantwortlich und die eingefärbte Fläche aufgrund des Bauablaufs im föderierten 4D-BIM nicht sichtbar ist. Eine präzise und fehlerfreie Ableitung der Vorgangsgeometrie durch das IFC-Format oder andere Formate ist somit nicht möglich, insbesondere wenn es darum geht, spezifische Oberflächen der verknüpften Bauteile von Vorgängen einzubeziehen, die sich aus dem Bauablauf ergeben.

4.2.3.2 Simplifizierung der Vorgangsgeometrie zur kritischen Fläche

Aus den soeben dargelegten Gründen ist es unerlässlich, dass das operative Baustellenteam die zu erfassenden Flächen anhand des Baufortschritts im 4D-BIM eigenständig identifiziert. Das Team der operativen Arbeitsvorbereitung wählt nach ingenieurtechnischem Ermessen die zu erfassenden Flächen der Vorgänge aus und selektiert diese für die Simplifizierung der Bauteiloberfläche. Durch die Simplifizierung werden sowohl das 4D-BIM als auch der erfasste Vorgang deutlich schlanker gestaltet, wobei ausschließlich die erforderlichen Informationen verwendet werden, die für die terminliche Fortschrittskontrolle unerlässlich sind. Die Simplifizierung stellt einen manuellen Prozess dar, der im Zuge der operativen Arbeitsvorbereitung zu erfolgen hat. Der Ansatz der Simplifizierung wird durch die Annahme (vgl. Abschnitt 4.1) begünstigt, dass jeder Vorgang oder jede sichtbare Aktivität auf planare Flächen simplifiziert werden kann, da während der Produktion auf der Baustelle überwiegend planare Bauteile hergestellt werden.

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Simplifizierung von Vorgängen auf kritische Flächen verknüpfter Bauteile mittels unterschiedlicher Varianten entwickelt. Tab. 4.6 stellt die Varianten der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie auf kritische Flächen und die daraus resultierende Baufortschrittskontrolle vor.

Tab. 4.6: Varianten der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie auf kritische Flächen und die daraus resultierende Baufortschrittskontrolle

Variante	Beschreibung	Kritische Fläche	Bauteil	Baufortschritts-kontrolle
1	Ein Vorgang wird auf eine Fläche (1) eines verknüpften Bauteils (1) simplifiziert.	1	1	Eine Fläche muss in der Datenerfassung rekonstruiert und abgeglichen werden.
2	Ein Vorgang wird auf mehrere Flächen (f) eines verknüpften Bauteils (1) simplifiziert.	f	1	Alle Flächen (f) müssen in der Datenerfassung rekonstruiert und abgeglichen werden.
3	Ein Vorgang wird auf eine Fläche (1) von mehreren verknüpften Bauteilen (b) simplifiziert.	1	b	Eine Fläche muss in der Datenerfassung rekonstruiert und abgeglichen werden.
4	Ein Vorgang wird auf mehrere Flächen (f) von mehreren verknüpften Bauteilen (b) simplifiziert.	f	b	Alle Flächen (f) müssen in der Datenerfassung rekonstruiert und abgeglichen werden.

Je nach Variante können eine oder mehrere verknüpfte Flächen eines oder mehrerer Bauteile zur Simplifizierung herangezogen werden, die anschließend in den Punktwolken rekonstruiert und abgeglichen werden müssen. In Variante 1 und 2 werden Vorgänge auf eine oder mehrere kritische Flächen von einem Bauteil simplifiziert. Ein Beispiel hierfür ist der Vorgang "Aushub" oder "Einbau des Erdbaus" bei der Widerlagerwand im Brückenbau. Variante 3 und 4 simplifizieren einen Vorgang ebenfalls auf eine oder mehrere Flächen, jedoch von mehreren verknüpften Bauteilen. Der Vorgang "Schalung einbauen" bei Betonbauteilen ist ein Beispiel, bei dem Detailmodellelemente (Schalungstafeln, Klemmen, Spanner und Schienen etc.) mit dem Vorgang verknüpft werden.

Bei der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie wird die ausgewählte Bauteiloberfläche gemäß den Abmessungen des Bauteils herangezogen. Die anschließende Baufortschrittskontrolle und der verwendete RANSAC-Algorithmus können Formtypen wie eine Ebene, Kugel und Zylinder rekonstruieren. Abschnitt 4.4.1.3 konzentriert sich hierbei auf den Formtyp einer Ebene. Der RANSAC-Algorithmus (*Schnabel et al. - 2007*) ist für Formtypen effizient, die durch eine kleine Anzahl von Punkten eindeutig definiert sind. Der Algorithmus zielt darauf ab, die Form durch zahlreiche zufällige Stichprobenpunkte zu erkennen. Durch eine zusätzliche Implementierung einer eigenen Klasse innerhalb des Algorithmus können zusätzliche Formtypen rekonstruiert werden. Diese Klasse muss in der Lage sein, eine Form aus einer begrenzten Anzahl von vorgegebenen Stichprobenpunkten zu konstruieren, die quadratische Entfernung zwischen einem Abfragepunkt und der Form zu berechnen sowie die Normalabweichung zwischen einem Abfragepunkt und der Normalen zur Form am nächstgelegenen Punkt der Abfrage zu ermitteln. Bei gekrümmten Bauteilen bedeutet dies, dass ein erheblicher Aufwand bei der Entwicklung erforderlich ist, um aus der Stichprobenmenge der Datenerfassung eine Vielzahl von Parameterkombinationen zu rekonstruieren, um die gekrümmte Bauteiloberfläche zu erhalten.

Im Rahmen der Methodik wird eine weitere Abstraktion der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie auf kritische Flächen eingeführt, um die Dateneffizienz und Komplexität bei der Baufortschrittskontrolle weiter zu verschlanken. Diese Abstraktion beinhaltet die Harmonisierung von Öffnungen, siehe Abb. 4.6 a), und komplexen Formen einer Ebene, siehe Abb. 4.6 b). Durch die Verwendung einer solchen Abstraktion wird die Komplexität reduziert, da die Fläche aus weniger Dreiecken besteht, was zu einer geringeren Vermaschung führt, siehe Abb. 4.6 c). Dies erleichtert die Rekonstruktion der kritischen Fläche aus der Datenerfassung.

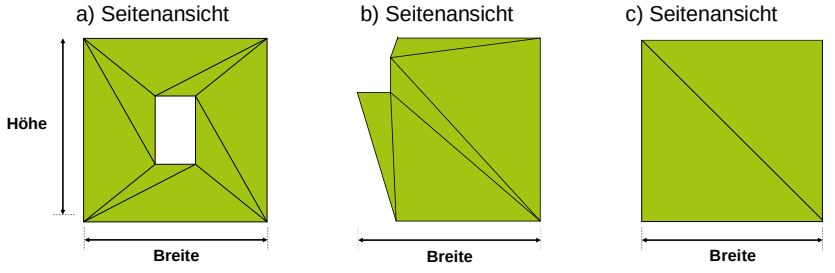


Abb. 4.6: Beispiel der weiteren Abstraktion zur Simplifizierung der Vorgangsgeometrie

Bei der Abstraktion wird eine Koordinatentransformation angewendet, um die Ebene definieren zu können. Zunächst wird die längste Punktverbindung zwischen zwei Punkten der kritischen Fläche identifiziert. Dazu wird eine Liste aller Verbindungen zwischen den Punkten erstellt und deren Länge berechnet. Die längste Verbindung wird als Basis für die Berechnung der Normalenvektoren und Richtungsachsen verwendet. Dabei wird angenommen, dass alle Punkte auf einer Ebene liegen, wobei drei zufällige Punkte der kritischen Fläche ausgewählt werden, um den senkrecht zur Ebene stehenden Normalenvektor zu berechnen. Anschließend werden Richtungsachsen der längsten Punktverbindung berechnet und normalisiert. Schließlich werden die Richtungsvektoren aller Punkte berechnet, indem der Stützvektor von seiner Position (Startpunkt der längsten Punktverbindung) zu einem Punkt aufgeteilt und normalisiert wird. Die Informationen werden gespeichert und können schließlich zur Bildung der Vorgangsgeometrie herangezogen werden.

Nach der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie und Definition einer kritischen Fläche können diese Informationen über die Geometrie für die weitere Planung der Datenerfassung sowie die anschließende schlanke Baufortschrittskontrolle (siehe Abschnitt 4.2.4) verwendet werden.

4.2.4 Planung der Datenerfassung

4.2.4.1 Suchzeit und Zeitpunkt zur Festlegung der Befliegung

In der Terminplanung eines Bauprojektes ist jeder Vorgang von Bedeutung, aber nicht alle haben die gleiche kritische Relevanz. Entscheidende Vorgänge werden auf dem sogenannten "kritischen Pfad" identifiziert. Dieser Pfad besteht aus einer Abfolge miteinander verknüpfter Vorgänge, bei denen die Gesamtreservezeit Null ist. Die Gesamtreservezeit repräsentiert die zeitliche Flexibilität, die für Vorgänge zur Verfügung steht, bevor sie den Endtermin des Projekts beeinflussen. Wenn sich einer dieser Vorgänge verzögert, hat dies eine Verzögerung auf das gesamte Projekt zur Folge. Dies kann erhebliche finanzielle Auswirkungen haben, da Zeit und Ressourcen kostspielig sind.

Suchzeit

Im Rahmen der Methodik wird eine "Suchzeit" eingeführt, die den Zeitraum für die drohnenbasierte Datenerfassung festlegt. Diese Suchzeit bestimmt, wann die Befliegung einer kritischen Fläche und die Suche nach dieser Fläche stattfinden. Eine Toleranzschwelle wird festgelegt, die für die Baufortschrittskontrolle akzeptiert wird. Bei einer Toleranzschwelle von einem Tag kann bspw. ein Vorgang, der abends fertiggestellt sein sollte, unter Umständen erst am nächsten Tag erfasst werden. Die Toleranzschwelle repräsentiert die akzeptierte Verzögerung, ohne die Präzision der Baufortschrittskontrolle zu beeinträchtigen. Die Toleranzgrenze sollte dem Grad der Detailgenauigkeit der Terminplanung entsprechen, weshalb empfohlen wird, sie auf einen Tag in Bezug auf die Ebene der (Halb-)Tagesleistungen festzulegen. Die Suchzeit beträgt die doppelte Toleranzschwelle, um genügend Zeit für die Identifizierung und Reaktion auf mögliche Verzögerungen zu gewährleisten. Diese Vorgehensweise sorgt dafür, dass die Baufortschrittskontrolle die Terminplanung präzise abbildet und rechtzeitig auf Abweichungen reagieren kann.

Abb. 4.7 veranschaulicht die zeitliche Darstellung der Suchzeit zur Festlegung der Befliegung am Beispiel von zwei Vorgängen mit einer Ende-Anfangs-Folge. Die Suchzeit beginnt eine halbe Toleranzschwelle vor dem Ende des Vorgangs i und endet eine halbe Toleranzschwelle nach dem Ende des Vorgangs i. Wenn die kritische Fläche vor dem Ende des Vorgangs i gefunden wird, befindet sich der Vorgang im Termin, andernfalls gerät er in Verzug. Es wird vorausgesetzt, dass der Vorgang i+1 erst starten kann, nachdem der Vorgang i abgeschlossen ist. Zum Beispiel kann der Vorgang "Schalung entfernen" erst nach Abschluss des Vorgangs "Beton einbauen" und einer angemessenen Aushärtezeit des Betons beginnen.

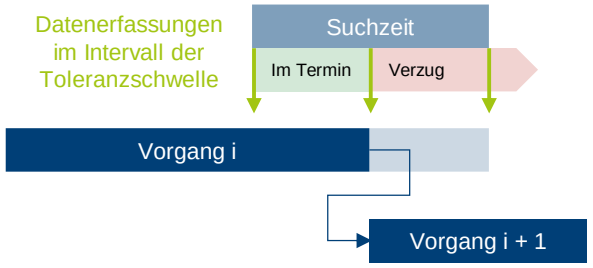


Abb. 4.7: Zeitliche Darstellung der Suchzeit zur Festlegung der Befliegung

Zeitpunkt

Zusätzlich ist der Zeitpunkt für die Datenerfassung zu spezifizieren. Das 4D-BIM bietet trotz einer möglichen kurzzyklischen Informationsrückführung ein statisches Abbild eines jeden Arbeitstages. Es kann nur begrenzt zwischenzeitliche Zustände und Materialbewegungen sowie deren Logistik abbilden. Es ist möglich, Hebebewegungen von Materialien mithilfe von Turmdrehkränen darzustellen. Aufgrund potenzieller Veränderungen während eines Arbeitstages kann jedoch nicht garantiert werden, dass der genaue Zeitpunkt dieser Bewegungen vorhergesagt werden kann.

Tab. 4.7 stellt die Vor- und Nachteile für eine Datenerfassung außerhalb und während der Arbeitszeit zusammen. Die Datenerfassung außerhalb der Arbeitszeiten minimiert die Störungen im Bauprozess, da sie die operative Projektabwicklung wenig bis gar nicht beeinträchtigt und Sicherheitsrisiken reduziert. Für eine Datenerfassung während der Arbeitszeit ist eine sorgfältige Abstimmung mit dem Betrieb der Baustelle entscheidend, um Konflikte zu vermeiden und einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Die Qualität der photogrammetrischen Datenerfassung hängt stark von den Lichtverhältnissen ab. Die Wahl eines Zeitpunkts für die Datenerfassung außerhalb der Arbeitszeiten bringt somit sowohl in den Winter- als auch Sommermonaten spezifische Herausforderungen mit sich. Wintermonate sind anfällig für Wettereinflüsse wie Nebel oder Schneefall. Selbst bei tiefstehender Sonne während des Sonnenaufgangs oder -untergangs können Herausforderungen auftreten. Andererseits kann die Datenerfassung während der Arbeitszeit in den Sommermonaten von ungünstigen Lichtverhältnissen beeinträchtigt werden, insbesondere in den frühen Morgen- oder späten Nachmittagsstunden. Das grelle Sonnenlicht in diesen Zeiträumen kann Schatten werfen, Reflexionen erzeugen und die Erfassung von Details erschweren oder sogar die Rekonstruktion beeinträchtigen. Die Genauigkeit kann außerhalb der Arbeitszeiten potenziell erhöht werden, da geringere Abstände zur kritischen Fläche bessere

Fotografien ermöglichen. Zusätzlich kann die Drohne mit einer Lichtquelle ausgestattet werden, um die Flächen auch bei Dunkelheit gleichmäßig und korrekt auszuleuchten und zu belichten. Dadurch können Probleme mit Verschattungen oder dunkleren Ecken vermieden werden. Andererseits kann der Zeitdruck während der Arbeitszeit die Genauigkeit beeinträchtigen. Eine Datenerfassung während der Arbeitszeit kann kosteneffizienter sein, da keine zusätzlichen Ausgaben für Überstunden oder spezielle Genehmigungen anfallen. Die Entscheidung zwischen diesen Faktoren sollte in Abhängigkeit von den Projektzielen getroffen werden. Eine sorgfältige Planung ist von entscheidender Bedeutung, um solche Situationen zu vermeiden und sicherzustellen, dass die bestmöglichen Bedingungen der Datenerfassung erreicht werden.

Tab. 4.7: Vor- und Nachteile für eine Datenerfassung außerhalb und während der Arbeitszeit

Aspekt	Außerhalb der Arbeitszeit	Während der Arbeitszeit
Störungen im Bauprozess	Nicht vorhanden	Störung sowie Sicherheitsrisiken
Qualität	Anfällig für Wetter und Lichtverhältnisse	
Genauigkeit	Potenziell höher aufgrund von geringeren Abständen	Beeinträchtigung aufgrund von Zeitdruck oder Unzugänglichkeit
Kosten	Zusätzliche Kosten für Überstunden oder Genehmigungen möglich	Keine zusätzlichen Kosten

4.2.4.2 Wegpunkte und Flugroute auf Grundlage der kritischen Fläche

Bei der Berechnung der Wegpunkte im Rahmen der Methodik wird die Annahme getroffen, dass der Neigungswinkel der Drohnenkamera stets senkrecht zur kritischen Fläche steht. Die Entscheidung, bei der Berechnung der Wegpunkte auf eine senkrecht stehende Kameraneigung zu setzen, obwohl schräge Kameraneigungen in der durchgeführten empirischen Studie als gängige Methode (vgl. Abschnitt 3.2.3) der Erfassung im Drohneneinsatz genannt werden, hat mehrere Gründe. Der Ansatz wurde gewählt, um potenzielle Bildverzerrungen zu vermeiden, wie von *Höhle - 2013* und *Zhang et al. - 2022* untersucht. Die Verwendung einer schrägen Kameraneigung kann eine vollständige und gleichmäßige Abdeckung des zu erfassenden Gebiets erschweren. Eine senkrechte Ausrichtung der Kamera gewährleistet eine bessere Bildqualität der Fläche und erleichtert die Berechnungen von Wegpunkten für Drohnenmissionen und verringert die Fehleranfälligkeit. Die Wegpunkte werden entlang eines Labyrinth-Pfads platziert, der als Flugroute für die Datenerfassung dient, da dieser am besten der Geometrie der kritischen Fläche entspricht (*Ebrahimi et al. - 2021*).

Abb. 4.8 veranschaulicht beispielhaft eine Flugroute über einer kritischen Fläche und zeigt die Vorwärts- und Seitenüberlappungen sowie 12 Wegpunkte. Der Drohnenflug beginnt an einer beliebigen Ecke der kritischen Fläche und endet in der gegenüberliegenden Ecke. Die Auswahl des Startpunkts erfolgt bei der Berechnung zufällig und hat keinen Einfluss auf den Erfassungsvorgang. Darüber hinaus wird die Vorwärtsrichtung immer entlang der längeren Kante der kritischen Fläche definiert, während die Seitenrichtung parallel zur kürzeren Kante verläuft. Die Definition der Wegpunkte für eine kritische Fläche erfolgte unter Anleitung im Rahmen der Betreuung der Masterarbeit in *Lermen und Tschickardt - 2023* und basiert auf einer detaillierten Berechnungsgrundlage.

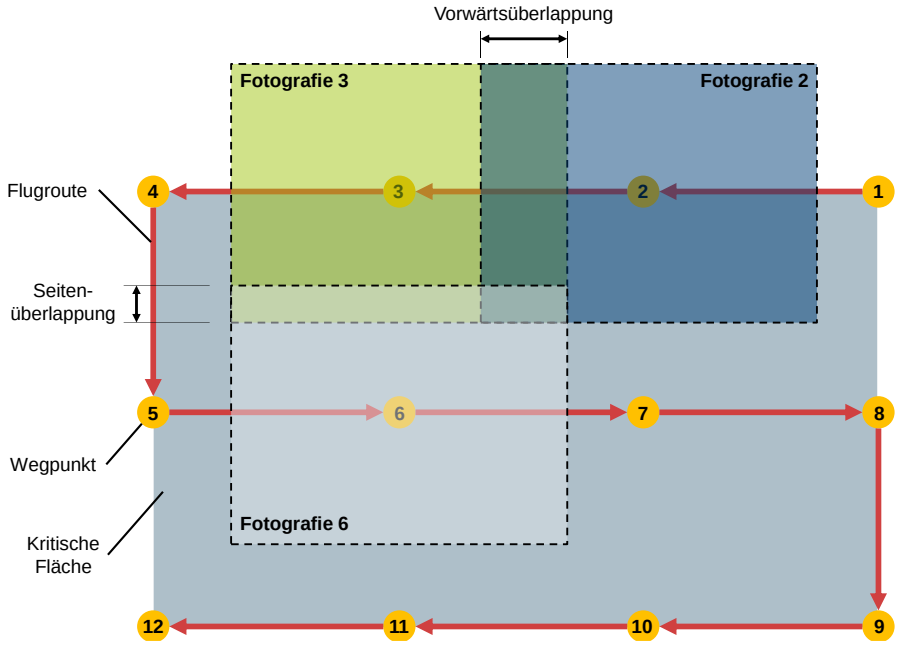


Abb. 4.8: Beispielhafte Darstellung der Flugroute einer kritischen Fläche

Zunächst werden die Parameter der Flugroute festgelegt, gefolgt von der Berechnung der GSD sowie der Länge und Breite der Fotografien auf der kritischen Fläche. Die Abstände zwischen den Wegpunkten in Vorwärts- und Seitenrichtung werden ebenso berechnet wie die Intervalle der Fotografien in diesen Richtungen. Abschließend erfolgt die Anpassung des Intervalls entsprechend der verwendeten Kamera und Drohne. Diese Anpassung ist unerlässlich, um ein konsistentes Intervall sicherzustellen, da während der Befliegung in der Regel keine Änderungen daran vorgenommen werden können. Außerdem verfügen verschiedene Drohnen über herstellerspezifische Intervallmöglichkeiten. Zum Beispiel bietet die DJI Mini 3 Pro Drohne des Herstellers DJI Intervalle von 2, 3, 5, 7, 10, 15, 20, 30 und 60 s an (*DJI - 2022*). Bei der Anpassung des Intervalls wird dieses sowohl in Vorwärts- als auch in Seitenrichtung an die verfügbaren Intervalle der Drohne angeglichen. Das festzulegende Intervall für die Drohne entspricht der kleineren der beiden Richtungen und dem nächstniedrigeren verfügbaren Intervall. Aus diesem Abgleich und der Wahl eines einheitlichen Intervalls werden abschließend die Abstände der Wegpunkte sowie Überlappungen neu berechnet. Diese Schritte gewährleisten eine schlanke Datenerfassung und optimale Abdeckung der kritischen Fläche während der Befliegung.

Die Wegpunkte sowie die Segmente der Flugroute werden, wie bereits in Abschnitt 4.2.4.5 beschrieben, in der entwickelten JSON-Struktur gespeichert, siehe Abb. 4.9, Zeile 23 bis 32.

4.2.4.3 Navigierbarer Raum für die vorgangsbezogene Erfassung

Ein zentraler Aspekt bei der Planung der Datenerfassung besteht darin, Kollisionen mit den zu erfassenden kritischen Flächen sowie eventuell vorhandenen Hindernissen auf

der Baustelle zu vermeiden. Dies können temporäre Baumaßnahmen, feste Baugeräte und andere Hindernisse sein. Hierfür ist es notwendig, einen sogenannten "navigierbaren Raum" zu definieren, innerhalb dessen sich die Drohne frei bewegen kann. Der navigierbare Raum kann mithilfe des 4D-BIM festgelegt werden und stellt somit eine statische Abbildung des dreidimensionalen Raums dar, die zu dem Zeitpunkt der Festlegung navigierbar ist. Innerhalb des festgelegten navigierbaren Raums kann die Drohne uneingeschränkt operieren und die Datenerfassung an den zuvor definierten Wegpunkten durchführen, um die kritische Fläche für die Baufortschrittskontrolle zu erfassen.

Der navigierbare Raum wird im Rahmen der Methodik visuell und manuell von der operativen Arbeitsvorbereitung definiert und geprüft. Der Verfasser dieser Arbeit ist der Ansicht, dass es nicht notwendig ist, wie in bisherigen Arbeiten (vgl. Abschnitt 2.3 und 2.4) ein geometrisches Modell zuerst in Datenstrukturen wie *Voxel* oder *Octree* (*Brewer - 2017*) zu konvertieren und komplexe Algorithmen wie den A*-Algorithmus (*Hat et al. - 1968*), den Dijkstra-Algorithmus (*Dijkstra - 1959*), den TSP (*Grötschel - 2015*) oder den Ameisenalgorithmus (*Fidanova - 2021*) im dreidimensionalen Raum einzusetzen, um die kürzeste Flugroute und die optimale Befliegung innerhalb des navigierbaren Raums zu ermitteln. Dies beruht auf der Anwendung der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie. Durch diese Vorgehensweise kann der navigierbare Raum bereits von der operativen Arbeitsvorbereitung während der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie überprüft werden. Dies bietet den entscheidenden Vorteil, potenzielle statische Verdeckungen in Bezug auf Bauverfahren und Kollisionen im navigierbaren Raum zu umgehen, ohne komplexe Algorithmen einsetzen zu müssen. Ein weiterer Grund ist die vorgangsbezogene Datenerfassung, bei der ausschließlich gezielte Vorgänge erfasst werden und davon abgesehen wird, die gesamte Baustelle zu erfassen. Dies profitiert von menschlicher Expertise und Erfahrung in der operativen Arbeitsvorbereitung, was eine hohe Genauigkeit gewährleistet, besonders in komplexen Umgebungen oder Bauphasen, die möglicherweise nicht vollständig im 4D-BIM erfasst sind. Dieser Ansatz bietet eine flexible und kosteneffektive Lösung für die Planung der Datenerfassung, die es ermöglicht, die Befliegung sicher und effizient in komplexen Umgebungen durchzuführen.

Es bleibt zu erwähnen, dass dennoch die Möglichkeit und möglicherweise die Notwendigkeit besteht, die oben genannten Algorithmen anzuwenden. Im Falle von Großprojekten mit einer Vielzahl an parallellaufenden Aktivitäten kann die Flugplanung entsprechend optimiert werden.

4.2.4.4 Kontinuierliche Verbesserung der Datenerfassung

Die Planung der Wegpunkte und Flugroute stellt zunächst eine initiale Wie-geplant Befliegung dar. Die Verwendung einer Simulation vor einer realen Drohnenbefliegung bietet mehrere Vorteile. Sie ermöglicht die frühzeitige Identifikation und Bewertung potenzieller Risiken und Probleme, ohne tatsächlich Ressourcen oder Ausrüstung einzusetzen, was Unfälle und kostspielige Fehler vermeiden hilft. Darüber hinaus können verschiedene Flugrouten und -parameter in der Simulation getestet werden, was Zeit und Ressourcen spart und sicherstellt, dass die Ziele der Datenerfassung erreicht werden. Zusätzlich ermöglicht eine Simulation eine gründliche Überprüfung der erzeugten

Daten, bevor die eigentliche Datenerfassung beginnt, um sicherzustellen, dass die geforderten Anforderungen erfüllt werden.

Im Rahmen der Methodik erfolgt unter Anwendung des PDCA-Zyklus (vgl. Abschnitt 2.5.3) eine kontinuierliche Verbesserung der Datenerfassung. In diesem Prozess wird zunächst die geplante Befliegung in einer virtuellen Umgebung mithilfe der Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*), unter Berücksichtigung der ausgewählten Flugparameter simuliert. Das Ergebnis dieser Simulation sind Fotografien, die den Bauzustand zum Zeitpunkt der virtuellen Befliegung darstellen. Diese Fotografien werden dann in der Software Metashape, Version 2.0.2 (*Metashape - 2023*) zu einer synthetischen vorgangsbezogenen Punktwolke rekonstruiert. Die erstellte Punktwolke wird daraufhin im Hinblick auf die kritischen Flächen geometrisch gefiltert. Anschließend erfolgt eine Auswertung dieser gefilterten Punktmenge in Bezug auf die Anforderungen der Oberflächendichte durch die Anzahl der Nachbarn sowie Anwendung des RANSAC-Algorithmus. Sobald diese Kriterien erfüllt sind und die kritische Fläche erfolgreich auf Grund der virtuellen Befliegung rekonstruiert werden konnte, erfolgt die tatsächliche Befliegung. Andernfalls werden die ausgewählten Parameter so lange angepasst, bis die Anforderungen erfüllt sind. Dieser iterative Prozess gewährleistet eine optimierte Datenerfassung und trägt zur kontinuierlichen Verbesserung bei.

4.2.4.5 Datenweitergabe mittels des JSON-Formates

Das JSON-Format (*ECMA - 2013*) ist ein weit verbreitetes Format zum Datenaustausch zwischen verschiedenen Systemen und unabhängig von Programmiersprachen. Für die Datenweitergabe wurde die in Abb. 4.9 gezeigte Datenstruktur entwickelt. In a) ist die Datenstruktur der JSON-Datei dargestellt, während in b) als Beispiel ein Einheitswürfel mit farblicher Kennzeichnung der kritischen Fläche der Bauteiloberfläche zur Weitergabe der Informationen gezeigt wird. Die Datenstruktur zeigt neben dem Datum der Datenerfassung (engl. *AcquisitionDate*), die Uhrzeit (engl. *AcquisitionTime*), die zu erfassenden Oberflächen (engl. *Faces*), den verknüpften Vorgang (engl. *LinkedTaskID*), die ID des Ursprungsobjekt (engl. *OriginObjectID*), die Kodierung des Ursprungsobjekts (engl. *OriginObjectCode*), ob eine Abstraktion (engl. *Abstraction*) durchgeführt wurde, die Größenangabe der simplifizierten Fläche (engl. *SurfaceOfInterest*), die Größenangabe der abstrahierten Fläche (engl. *SurfaceAbstraction*), die ID der kritischen Fläche (engl. *SurfaceIfInterstID*) sowie die Vermaschung (engl. *Triangles*) und deren globale Koordinaten (engl. *Vertices*). Des Weiteren sind in b) die Wegpunkte als Beispiel von "001" bis "009" (engl. *Waypoints*) sowie die Flugroute mit "01_001,01_002" (engl. *FlighPath*) dargestellt. Die Datenweitergabe dieser Informationen kann an eine Drohne mit einem offenen Betriebssystem erfolgen.

a)

Zeile	Code
1	{
2	"AcquisitionDate": "YYYY-MM-DD",
3	"AcquisitionTime": "HH:MM",
4	"Faces": {
5	"1": {
6	"LinkedTaskID": "",
7	"OriginObjectID": "",
8	"OriginObjectCode": "",
9	"Abstraction": true/false,
10	"SurfaceOfInterest": "",
11	"SurfaceAbstraction": "",
12	"SurfaceOfInterestId": "",
13	"Triangles": [
14	[A, B, D],
15	[B, C, D],
16	],
17	"Vertices": [
18	[X_{VA}, Y_{VA}, Z_{VA}],
19	[X_{VB}, Y_{VB}, Z_{VB}],
20	[X_{VC}, Y_{VC}, Z_{VC}],
21	[X_{VD}, Y_{VD}, Z_{VD}]
22	],
23	"Waypoints": {
24	"001":
25	[X_{W001}, Y_{W001}, Z_{W001}],
26	"002":
27	[X_{W002}, Y_{W002}, Z_{W002}],
28	},
29	"FlightPath": [
30	["01_001", "01_002"]
31	]
32	}
33	}
34	}

b)

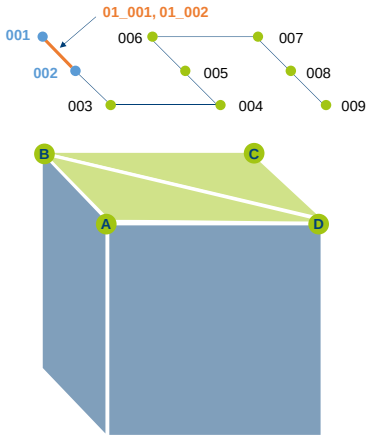


Abb. 4.9: Beispiel der Datenstruktur der JSON-Datei in a) am Einheitswürfels mit farblicher Kennzeichnung der kritischen Fläche der Bauteiloberfläche in b)

4.3 Parameter für eine photogrammetrische Baufortschrittskontrolle

Dieser Abschnitt untersucht Flugparameter einer Datenerfassung und Parameter des RANSAC-Algorithmus für eine schlanke Baufortschrittskontrolle in einer empirischen Studie in Form einer synthetischen virtuellen Befliegung. Eine Studie von Flugparametern wurde unter Anleitung im Rahmen der Betreuung der Masterarbeit in *Lermen und Tschickardt - 2023* anhand einer realen historischen Burgmauer durchgeführt, wobei die Abstände der Drohne zur Burgmauer im Bereich von 5 bis 30 m variierten. Dabei wurde eine Vorwärtsüberlappung von 90 % und eine Seitwärtsüberlappung von 70 % umgesetzt. Die reale Studie in der physischen Welt bestätigt die Ergebnisse der synthetischen Befliegung aus Abschnitt 4.3.3.

4.3.1 Methodik und Randbedingungen

Methodik

In der empirischen Studie werden synthetische Daten herangezogen, um verschiedene Parameter zu testen. Die synthetischen Daten werden mit einer virtuellen Befliegung in der Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*) und einer anschließenden Rekonstruktion zu einer Punktwolke in der Software Metashape, Version 2.0.2 (*Metashape - 2023*) erzeugt. Im Anschluss erfolgen statistische Analysen, um die Beziehungen zwischen den verschiedenen Variablen zu untersuchen. Die Entscheidung für synthetische Daten ermöglicht es, komplexe Szenarien zu simulieren und Parameter zu überprüfen, ohne auf reale Datenquellen zurückgreifen zu müssen. In der physischen Welt erschweren Wettereinflüsse wie Wind oder Beleuchtungsfaktoren wie Verschattungen durch Wolken die Sicherstellung einer homogenen Studie für Datenerfassungen mit verschiedenen Flugparametern.

In Abb. 4.10 wird der Prozess zur Durchführung der synthetischen Befliegung dargestellt und in den aufgeführten Abschnitten ausführlich beschrieben.

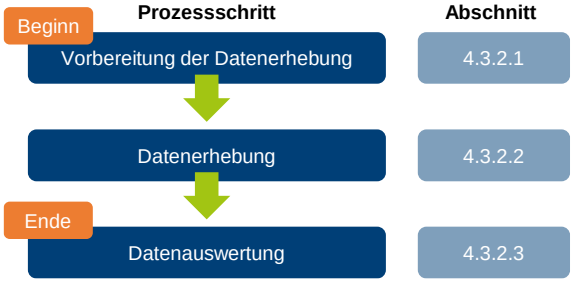


Abb. 4.10: Prozess zur Durchführung der synthetischen Befliegung im Rahmen dieser Arbeit

Randbedingungen

Die Definition der Flugparameter für die Datenerfassung ist durch eine wesentliche Einschränkung gekennzeichnet. Der Abstand zwischen der kritischen Fläche und der Kamera beträgt maximal 120 m, entsprechend den Vorschriften der EU-Drohnenverordnung. Der Mindestabstand von 5 m wurde festgelegt, um die gesetzlichen Anforderungen an den Abstand zu unbeteiligten Personen im Langsamflugmodus einzuhalten, insbesondere bei Einsätzen von Drohnen auf Baustellen, auf denen sich Personen befinden. Bisherige Forschungsarbeiten (*Seifert et al - 2019; Jiménez et al. - 2021*) haben die spezifischen Anforderungen und Gegebenheiten der Baubranche oft vernachlässigt und sich stattdessen auf Bereiche wie Vegetation oder höhere Geschwindigkeit und Flughöhen konzentriert. Auf der Baustelle sind zur Minimierung von Unfallrisiken meist geringere Entfernungen und reduzierte Geschwindigkeiten der Drohne notwendig.

Die photogrammetrische Rekonstruktion hängt stark von der Beschaffenheit der Oberfläche der kritischen Fläche ab. Bei der Festlegung der Flugparameter wurde insbesondere auf Betonbauteile und deren Textur eingegangen. Die Textur für das Material Beton wurde von *Tuytel - 2023* bezogen und ist frei zugänglich.

Externe Umwelteinflüsse wie Wind, Niederschlag, GNSS-Ungenauigkeiten und Bildrauschen wurden in den durchgeführten Simulationen nicht berücksichtigt. Dies erfolgte aufgrund der Inhomogenität, mit der diese Einflüsse auftreten. Der Fokus der Untersuchung lag auf einer initialen Analyse und Empfehlung sowie der Entwicklung des Versuchsaufbau im Kontext der Baubranche. Ebenfalls wurde die Bewegungsunschärfe nicht berücksichtigt, da sie in der Regel durch eine zu lange Belichtungszeit verursacht wird. Die Entscheidung, diese nicht zu berücksichtigen, basiert auf der Annahme, dass eine für die Datenerfassung angemessene Verschlusszeit von der Kamera automatisiert verwendet wird. Darüber hinaus wird angenommen, dass die gewählte niedrige Geschwindigkeit der Drohne in Verbindung mit Standard-Verschlusszeiten keine Bewegungsunschärfe verursacht.

4.3.2 Durchführung der synthetischen Befliegung

4.3.2.1 Vorbereitung der Datenerhebung

Es werden folgende Flugparameter in der synthetischen Befliegung untersucht:

- der Abstand zur kritischen Fläche,
- die Überlappung der Fotografien in Vorwärtsrichtung und
- die Geschwindigkeit der Drohne.

Für die Datenerhebung wird die Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*) verwendet. Die Software dient zur Texturierung der kritischen Fläche und zur Erzeugung der synthetischen Fotografien während der virtuellen Befliegung. Abb. 4.11 zeigt den Versuchsaufbau mit Seitenansichten in der Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*) mit Darstellung der Zielobjekte zur Georeferenzierung der synthetischen Aufnahmen, der kritischen Fläche mit Betontextur (*Tuytel - 2023*), der Flugroute als Bezier-Kurve und einer virtuellen Kamera als Erfassungssensor.

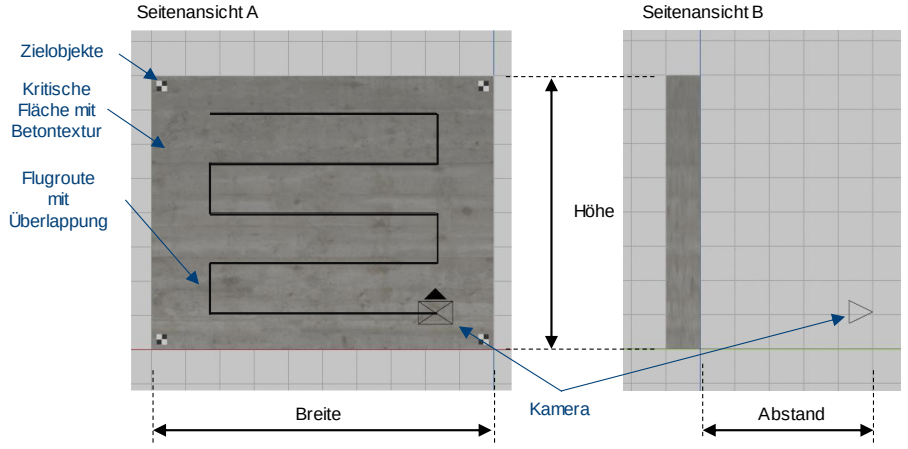


Abb. 4.11: Versuchsaufbau aus Seitenansichten (Bildschirmaufnahme *Blender - 2023*)

In Tab. 4.8. sind die Untersuchungsszenarien mit den Flugparameter aufgelistet, deren Wertebereiche im Anschluss näher beschrieben werden. Die Parameter Abstand und

Vorwärtsüberlappung werden variiert, während die anderen Parameter konstant gehalten werden. Dadurch wird eine konsistente Versuchsaufstellung sichergestellt, sodass verschiedene Parameter getrennt getestet und präzise Ergebnisse erzielt werden können.

Tab. 4.8: Untersuchungsszenarien der synthetischen Befliegung

Flugparameter / **Untersuchungsszenario**	**Abstand [m]**	**Vorwärtsüberlappung [%]**	**Seitenüberlappung [%]**
Abstand zur kritischen Fläche	Variabel (5 bis 120)	70	70
Überlappung der Fotografien	20	Variabel (45 bis 97)	70

Das erste Szenario betrifft den Abstand zur kritischen Fläche, der mit einem Abstand von 5 m und in 10 m-Schritten von 10 bis 120 m untersucht wurde. Die Vorwärts- und Seitenüberlappung beträgt jeweils 70 %. Das Intervall der Fotografien wurde als variabel festgelegt, da die zuvor genannten Flugparameter als Standardwerte verwendet werden und diese durch ein variables Intervall sichergestellt werden.

Das zweite Szenario widmet sich der Vorwärtsüberlappung (vgl. Abb. 4.8). In diesem Fall wurde mit einem Abstand von 20 m zur kritischen Fläche untersucht. Diese Distanz wurde gewählt, da die Ergebnisse des ersten Untersuchungsszenarien (vgl. Abb. 4.18) zeigen, dass ab diesem Abstand im Durchschnitt 99,29 % der Punkte der Punktwolke berücksichtigt werden. In der zweiten Untersuchung wurden Vorwärtsüberlappungen zwischen 45 % und 97% betrachtet. Dies wurde durch die Erzeugung einer unterschiedlichen Anzahl von Fotografien entlang der Flugroute umgesetzt. Die Generierung der synthetischen Fotografien und die anschließende Rekonstruktion zur Punktwolke erfolgte durch Verwendung von 2 Fotografien pro Flugroute (45 %), 3 Fotografien pro Flugroute (73 %), 6 Fotografien pro Flugroute (89 %), 12 Fotografien pro Flugroute (95 %) sowie 17 Fotografien pro Flugroute (97 %). Die Seitenüberlappung blieb konstant bei 70 %, um sicherzustellen, dass keine beidseitigen Auswirkungen auf die Qualität der Punktwolken entstehen. Das Intervall wurde ebenfalls flexibel gestaltet, um die festgelegten Vorwärtsüberlappungsraten bei dem gegebenen Abstand sicherzustellen.

In beiden Szenarien wurde die Geschwindigkeit der Drohne konstant auf 0,5 m/s festgelegt. Diese Entscheidung basiert auf der zu Beginn erwähnten Annahme, dass bei geringen Geschwindigkeiten und angemessener Verschlusszeit keine Bewegungsunschärfe auftritt. Ein weiterer Grund ist die Gewährleistung der Sicherheit von Personen auf der Baustelle durch eine niedrige Geschwindigkeit. In dieser Arbeit wurde die Geschwindigkeit der Drohne (Abschnitt 4.3.3.1, Abb. 4.16) anhand des Verhältnisses zwischen Vorwärtsüberlappung und dem Intervall der Fotografien analysiert sowie die bei einem Aufprall erzeugte Energie (Abschnitt 4.3.3.1, Abb. 4.17) betrachtet, anstatt verschiedene virtuelle Befliegungen durchzuführen. Variable Geschwindigkeiten würden lediglich dazu führen, dass Fotografien bei konstanten Verschlusszeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden, abhängig vom Abstand der Wegpunkte innerhalb eines festgelegten Intervalls, was wiederum zu einer höheren Vorwärtsüberlappung führt.

4.3.2.2 Datenerhebung

Bei der Datenerhebung werden zunächst Wegpunkte ermittelt und die virtuelle Befliegung entlang des vordefinierten Flugpfades vorgenommen. Im nächsten Schritt werden aus den Fotografien der virtuellen Befliegungen Punktwolken rekonstruiert, die im Rahmen dieser Arbeit als "Parameterpunktwolken" bezeichnet werden. Die Rekonstruktion erfolgt anhand der Vorgehensweise (vgl. Abschnitt 2.2.1, Abb. 2.4) mithilfe der Software Metashape, Version 2.0.2 (*Metashape - 2023*) mit folgenden Einstellungen:

- die Qualität der Fotografien wurde auf "*High*" eingestellt, um die Originalqualität der Fotografien zu erhalten,
- das Limit für *Key Points* wurde auf 0 gesetzt, um alle verfügbaren *Key Points* zu erfassen,
- das Limit für *Tie Points* wurde auf 0 gesetzt, um alle verfügbaren *Tie Points* zu erfassen und
- die Qualität der generierten Parameterpunktwolken wurde auf "*Ultra High*" festgelegt, um die Originalqualität der Punktwolke zu erhalten.

Die Parameterpunktwolken wurden anschließend im LAZ- und E57-Format exportiert und für die Datenauswertung zur Verfügung gestellt.

4.3.2.3 Datenauswertung der Flugparameter

Im Rahmen der Datenauswertung erfolgt zunächst eine Filterung der Parameterpunktwolken durch Generierung eines Interessensvolumen in der Software CloudCompare, Version 2.12.4 (Kyiv) (*CloudCompare - 2023*) mit einem Toleranzwert von 25 cm (vgl. Abschnitt 4.4.1.2). Während des Filterprozesses werden somit Ausreißer nicht berücksichtigt, wodurch eine Auswertung ausschließlich für die kritische Fläche ermöglicht wird. Das Verfahren bei der Datenauswertung für die Flugparameter ist in Tab. 4.9 dargestellt. Die Oberflächendichte durch die Anzahl der Nachbarn wird nachfolgend erläutert.

Tab. 4.9: Auswertungen der Flugparameter und Untersuchungsziel

Auswertung	Parameter	Untersuchungsziel
1	Abstand zur kritischen Fläche	Anhand der Oberflächendichte, die auf der Anzahl der Nachbarn basiert, wird der Versuchsaufbau validiert.
2	Überlappung der Fotografien in Vorwärtsrichtung	Anhand der Oberflächendichte wird ein Einfluss auf die Punktwolkendichte untersucht.
3	Geschwindigkeit der Drohne	Anhand des Verhältnisses zwischen Vorwärtsüberlappung und Intervall der Fotografien wird die Geschwindigkeit untersucht. Des Weiteren wird bei einem Aufprall erzeugte Energie betrachtet, um Sicherheitsaspekte zu berücksichtigen.

Oberflächendichte durch die Anzahl der Nachbarn

Die Auswertung der Parameterpunktwolken hinsichtlich ihrer Oberflächendichte zielt darauf ab, die Übereinstimmung zwischen der tatsächlichen Bodenauflösung (Ist-GSD) der Parameterpunktwolken und der theoretisch erwarteten Bodenauflösung (Soll-GSD) gemäß Gleichung (2.1) zu ermitteln. Wenn dies der Fall ist, ermöglicht der

Versuchsaufbau die Erhebung präziser Untersuchungsdaten. Zusätzlich wurde untersucht, ob der in der Untersuchung identifizierte lineare Zusammenhang zwischen der GSD und dem Abstand zum Bauteil in den erzeugten Punktwolken bestätigt werden kann.

Abb. 4.12 visualisiert eine beispielhafte Darstellung eines Punktwolkenausschnittes mit einer beliebigen Anzahl an Punkten sowie die Anzahl der Nachbarn innerhalb eines bestimmten Radius R eines Kreises für eine betrachtetet Fläche zur Ermittlung der Ist-GSD.

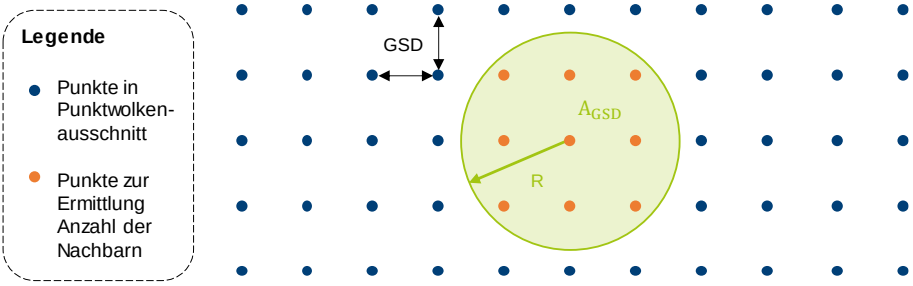


Abb. 4.12: Beispielhafte Darstellung eines Punktwolkenausschnitts

Die Oberflächendichte der Ist-GSD eines Punktes wird anhand der Anzahl der Nachbarn innerhalb eines festgelegten Radius für die gesamte Punktwolke ermittelt und mithilfe von Gleichung (4.4) berechnet (*CloudCompare - 2023*):

$$\text{Ist-GSD} = \sqrt{\frac{A_{GSD}}{k}} \tag{4.4}$$

mit Ist-GSD Tatsächliche Bodenauflösung [cm/px].

A_{GSD} Größe der betrachteten Fläche [cm²].

k Anzahl der Nachbarn [-].

Die Anzahl der Nachbarn werden mit der Funktion "Werkzeuge → Andere → Geometrische Merkmale berechnen" in der Software CloudCompare, Version 2.12.4 (Kyiv) (*CloudCompare - 2023*) ermittelt. Der gewählte Radius sollte idealerweise klein sein, um die Genauigkeit der Berechnung zu erhöhen. Der Radius muss jedoch mindestens so groß wie die erwartete GSD sein, da andernfalls keine Nachbarn ermittelt werden können. In dieser Studie wird ein Radius von 10 cm gewählt, um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Genauigkeit und Berechnungsdauer sicherzustellen. Die Entscheidung für diesen Radius basierte darauf, dass ein kleinerer Wert die Berechnungszeiten erheblich verlängert hätte, ohne zu genaueren Ergebnissen zu führen. Nach der Berechnung wird die maximale Anzahl der Nachbarn der Punktwolke verwendet, um eine Ist-GSD zu berechnen, die repräsentativ für die Mehrheit der Punkte ist.

Aufgrund der Vorgehensweise wird keine vollständige Homogenität in der Verteilung der Punktwolke über die gesamte kritische Fläche erreicht. In Randbereichen mit einer geringeren Anzahl von Nachbarn werden durch den Wert der maximalen Anzahl von Nachbarn gezielt Punkte ausgeschlossen, da sie in Bezug auf die Ist-GSD weniger bedeutsam sind und keinen erheblichen Einfluss auf die Gesamtergebnisse haben. Im

gewählten Versuchsaufbau beträgt das Verhältnis zwischen dem Randstreifen (3,52 m²) mit einer Breite von 10 cm und der kritischen Fläche (8 m x 10 m = 80 m²) 4,4 %, was aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit als akzeptabel betrachtet wird. Dieser Ansatz stellt sicher, dass die Datenauswertung effizient und dennoch repräsentativ ist. In Anhang F ist ein Auswertungsbeispiel visualisiert.

4.3.2.4 Datenauswertung der RANSAC-Parameter

Das Verfahren zur Datenauswertung der Parameter des RANSAC-Algorithmus ist in Tab. 4.10 dargestellt und erfolgt in zwei Schritten. Es wird analysiert, welche Parameterkonfigurationen geeignet sind, um ausschließlich die kritische Fläche für eine schlanke Baufortschrittskontrolle zu rekonstruieren. Nach der Einführung des Algorithmus werden im Folgenden die Parameter des RANSAC-Algorithmus erläutert. Untersuchungen zu geeigneten Parametern des RANSAC-Algorithmus wurden im Rahmen der Studienarbeit *Winkler und Tschickardt - 2023* unter Anleitung durchgeführt, aufbereitet und ausgewertet.

Tab. 4.10: Auswertung der Parameter des RANSAC-Algorithmus und Untersuchungsziel

Auswertung	Parameter	Wert	Untersuchungsziel
1	Auflösung der Stichprobe	Soll-GSD	Anhand der Größe des *Consensus Set* im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Parameterpunktwolken werden die Berechnungsdauer und die verwendeten Stichprobenpunkte definiert.
	Abweichung des Einfallswinkels	25 Grad (Standardwert)	
	Grenzwert zur Primitiven	Toleranzwert	
	Wahrscheinlich-keit	0,01 % (Standardwert)	
2	Abweichung des Einfallswinkels	25 Grad (Standardwert)	Anhand der Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitive wird Soll-GSD < Auflösung der Stichprobe < 5 m untersucht.
	Grenzwert zur Primitiven	Toleranzwert	
	Wahrscheinlich-keit	0,01 % (Standardwert)	

Die Daten der synthetischen Befliegung werden in zwei Schritten analysiert, um die Anwendung des RANSAC-Algorithmus und die Eingangswerte zu untersuchen. Im ersten Schritt wird die Größe des *Consensus Set* im Verhältnis zur Gesamtanzahl der jeweiligen Parameterpunktwolken untersucht. Im zweiten Schritt wird die Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitive betrachtet, wobei zusätzlich die Änderung der Auflösung der Stichprobe berücksichtigt wird. Nachfolgend erfolgt eine Beschreibung der Parameter im Detail.

RANSAC-Algorithmus

Die Methodik stützt sich auf die Rekonstruktion der kritischen Fläche innerhalb der vorgangsbezogenen Punktwolke. Dieser Rekonstruktionsprozess wird mithilfe des RANSAC-Algorithmus durchgeführt. RANSAC steht für "Übereinstimmung mit einer zufälligen Stichprobe" und ist ein Algorithmus, der von *Fischler und Bolles - 1981* entwickelt wurde. Dieser Algorithmus dient zur Schätzung eines mathematischen Modells bzw. einer Primitiven innerhalb einer Reihe von Messwerten, die Ausreißer und grobe Fehler enthalten können.

Abb. 4.13 zeigt ein Beispiel einer RANSAC-Iteration einer Fläche als Draufsicht. Um die geeignetste Fläche innerhalb des Datensatzes in a) zu finden, werden zwei (zufällige) Stichprobenpunkte des Datensatzes ausgewählt, siehe b), und eine Fläche, die diese beiden Punkt verbindet wird berechnet. Anschließend werden die Distanzen aller übrig gebliebenen Punkte zur Fläche orthogonal berechnet. Ist die Distanz kleiner als ein vorher festgelegter Grenzwert, so ist dieser Punkt entsprechend nah genug an der Fläche und wird als sogenannter *Inlier* bezeichnet. Diese Teilmenge von *Inlier* wird *Consensus Set* genannt. Durch mehrere Durchläufe, wie in den Schritten c) und d) dargestellt, und unter Berücksichtigung der angegebenen Wahrscheinlichkeit wurde die Fläche mit den meisten *Inlier* im Datensatz identifiziert. Zur Schätzung einer Primitiven aus einer Punktwolke hat sich der RANSAC-Algorithmus als effektives Werkzeug erwiesen (*Schnabel et al. - 2007*).

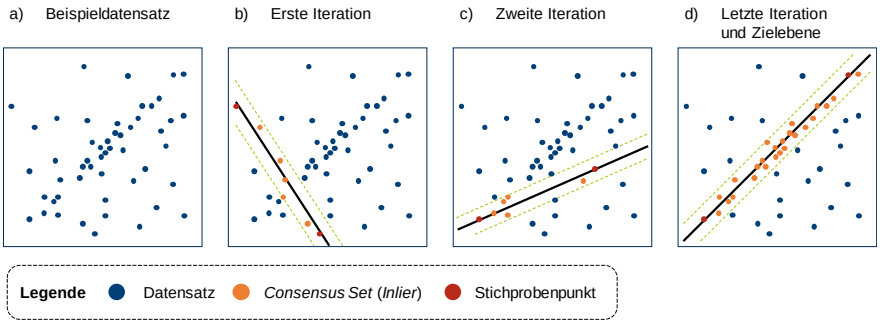


Abb. 4.13: Beispiel einer RANSAC-Iteration

Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitiven

Die Anzahl der Stichprobenpunkte aus der Punktwolke gibt an, wie viele Punkte durch den RANSAC-Algorithmus zufällig abgetastet werden sollen, um die Primitive zu rekonstruieren. Zur Rekonstruktion der primitiven Form einer Fläche sind mindestens drei Stichprobenpunkte erforderlich. Diese Anzahl entspricht bei den Parameterpunktwolken einem Anteil von mindestens 0,001 % der Gesamtanzahl der Punkte. Die Mindestanzahl wurde auf 90 % begrenzt, um die Verarbeitungszeit zu optimieren, da ein Abbruch des Algorithmus möglich ist, wenn alle Stichprobenpunkte verwendet werden. Die tatsächlich verwendete Anzahl an Stichprobenpunkten wird als *Consensus Set* beschrieben.

Auflösung der Stichprobe

Die Auflösung der Stichprobe ist ein Maß für den räumlichen Abstand zwischen benachbarten Punkten und korreliert unmittelbar mit der GSD. Die Auflösung der Stichprobe wurde im ersten Schritt zunächst mit der GSD angesetzt, die linear abhängig zum Abstand der kritischen Fläche ist. Im zweiten Schritt wurde die Auflösung mit Werten zwischen 0,15 cm/px und 5 m/px untersucht. Die Wahl von 0,1 cm/px erfolgte aufgrund der Soll-GSD von 0,15 cm/px bei einem Abstand von 5 m zur kritischen Fläche. Die gewählte Auflösung darf nicht kleiner als die GSD sein, da sonst keine Rekonstruktion möglich ist. Die maximale Auflösung der Stichprobe wird aufgrund der Breite der untersuchten Fläche auf 5 m/px festgelegt, um bei der Rekonstruktion der kritischen Fläche eine möglichst große Fläche zu erfassen.

Abweichung des Einfallswinkels

Der Parameter definiert die maximale Abweichung der Normalen jedes Punktes von der idealen Form des Normalenvektors der Primitiven und ermöglicht die Identifizierung von Ausreißern. Dadurch wird festgelegt, wie stark sich die Normalen der Punkte von der erwarteten Ausrichtung der Primitiven unterscheiden dürfen, um weiterhin als Teil dieser Primitiven betrachtet zu werden. Durch die Filterung des Interessensvolumens im Rahmen der Methodik bleiben in der vorgangsbezogenen Punktwolke hauptsächlich Punkte erhalten, deren Ausrichtung, mit der der Primitiven übereinstimmt. Bei der Untersuchung wurde der Wert von 25 Grad verwendet, was dazu führt, dass Punkte benachbarter Flächen bei der Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Grenzwert zur Primitiven

Der Parameter beschreibt den maximalen Abstand der einzelnen Punkte zu der idealen Form der Primitiven. Abb. 4.14 zeigt ein Beispiel für diesen Parameter. Dargestellt sind zwei zufällig ausgewählte Stichprobenpunkte aus der Punktmenge, das *Consensus Set*, das als *Inlier* klassifiziert wurde, sowie Ausreißer (engl. *outlier*), die als verbleibende Punkte außerhalb des Grenzwerts identifiziert wurden.

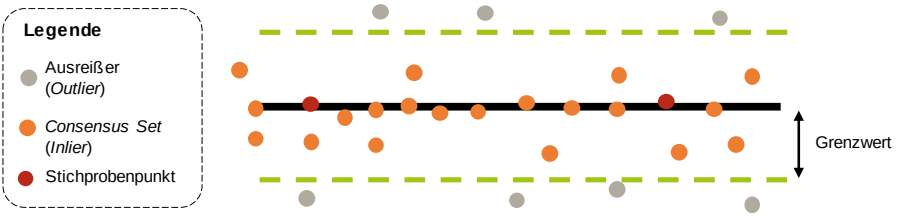


Abb. 4.14: Ausschnitt einer Punktwolke und Darstellung des Parameters "Grenzwert"

Im Rahmen der Untersuchung wurde der Grenzwert zur Primitiven auf den Toleranzwert festgelegt, der zur Generierung des Interessensvolumens (vgl. Abschnitt 4.4.1.2) erforderlich ist. Dies eliminiert die Notwendigkeit einer ausführlichen Untersuchung des Grenzwertes.

Wahrscheinlichkeit

Der Parameter "*overlooking probability*" beschreibt, wie genau der RANSAC-Algorithmus potenzielle Ausreißer erkennt und eliminiert. Bei einer niedrigeren "*overlooking probability*" erkennt der Algorithmus mit höherer Wahrscheinlichkeit auch gültige Punkte als Ausreißer. Je niedriger der Wert dieses Parameters ist, desto zuverlässiger und konservativer ist der Algorithmus bei der Identifizierung von Ausreißern. Dies führt insgesamt zu robusteren und konsistenteren Ergebnissen. Bei der Untersuchung wurde der Wert von 0,01 % verwendet, um eine robuste Erkennung der Ausreißer zu gewährleisten.

4.3.3 Ergebnisse der Parameter

4.3.3.1 Flugparameter der Datenerfassung

1. Abstand zur kritischen Fläche zur Validierung des Versuchsaufbaus

In Abb. 4.15 sind die Ergebnisse hinsichtlich des Flugparameters "Abstand zur kritischen Fläche" dargestellt. Dabei sind die prozentualen Abweichungen zwischen der gemessenen Ist-GSD und der angestrebten theoretischen Soll-GSD für Abstände von 5 bis 110 m zur kritischen Fläche mit Betontextur aufgeführt. Bei einem Abstand von 120 m war keine Rekonstruktion möglich. Dies lag daran, dass in den synthetischen Fotografien nicht genügend *Key Points* vorhanden waren, die für eine erfolgreiche Rekonstruktion erforderlich sind.

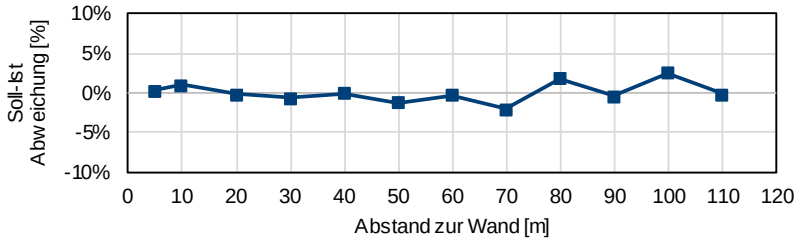


Abb. 4.15: Prozentuale Abweichung der Ist- und Soll-GSD der synthetischen Befliegung

Es treten Abweichungen von höchstens 2,48 % auf. Dies bedeutet, dass die synthetische Ist-GSD mit der theoretischen Soll-GSD übereinstimmt, wobei der Unterschied minimal ist. Die Abweichung ergibt sich aus der synthetischen Textur des Bauteils, die in der Simulation makellos ist. In der Realität weist die Oberfläche viele zusätzliche Merkmale auf, wie bspw. eine inhomogene Verdichtung beim Betoneinbau oder unregelmäßige Beleuchtung. Bei größeren Abständen nehmen die Abweichungen teilweise zu. Dennoch sind diese Abweichungen akzeptabel und haben keinen signifikanten Einfluss auf die synthetische Datenerfassung. Der Versuchsaufbau liefert zufriedenstellende Ergebnisse und die Generierung von Punktwolken durch synthetische Befliegungen kann gewährleistet werden.

2. Überlappung der Fotografien in Vorwärtsrichtung

Hinsichtlich des Flugparameters "Überlappung der Fotografien in Vorwärtsrichtung" zeigen die erzielten Ergebnisse eine Stabilität. Die Abweichungen bleiben nahezu konstant bei dem untersuchten Abstand von 20 m und einer Vorwärtsüberlappung im Bereich von 45 % bis 97 %. Sie erreichen lediglich eine maximale Abweichung von 0,17 %, wie in Anhang F aufgeführt ist. Daraus lässt sich schließen, dass die Überlappung keinen signifikanten Einfluss auf die Berechnung der Soll-GSD hat. Die Rekonstruktion verbessert sich lediglich mit zunehmender Überlappung, da eine höhere Anzahl an *Key Points* verfügbar ist. Eine eingehende Untersuchung im Hinblick auf eine optimierte Rekonstruktion war nicht Ziel der Untersuchung und wurde im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.

3. Geschwindigkeit der Drohne

Der Abstand von Wegpunkten kann mit dem Intervall der Fotografien, der Geschwindigkeit der Drohne sowie der Verschlusszeit der Kamera gemäß Gleichung (4.5) berechnet werden. Zu erwähnen ist, dass die Gleichung lediglich eine Annäherung darstellt und weitere Faktoren berücksichtigt werden können, wie bspw. die Windgeschwindigkeit, Steig- und Sinkflug, Wendungen und Kurven oder die Luftdichte, die die Leistung der Drohne beeinflusst.

$$\mathrm{AW} = \mathrm{v} * (\mathrm{I} + \mathrm{t}) \tag{4.5}$$

mit AW Abstand der Wegpunkte [m].

v Geschwindigkeit der Drohne [m/s].

I Intervall der Fotografien [s].

t Verschlusszeit der Kamera [s] mit $\mathrm{t} \ll \mathrm{I}$.

Variable Geschwindigkeiten führen jedoch lediglich dazu, dass Fotografien zu unterschiedlichen Zeitpunkten aufgenommen werden, abhängig vom Abstand der Wegpunkte innerhalb eines festgelegten Intervalls (vgl. Abschnitt 4.3.2.2). Ein konstantes Intervall zwischen den Fotografien bedeutet, dass eine erhöhte Geschwindigkeit zu größeren Abständen zwischen den an den Wegpunkten aufgenommenen Fotografien führt. Dies wiederum führt zu einer geringeren Überlappung der aufgenommenen Fotografien. Der lineare Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der Überlappung der Fotografien in Flugrichtung wird in Gleichung (4.6) dargestellt. Eine Herleitung der Gleichung ist in Anhang F zu finden.

$$\mathrm{v} = \frac{1 - \mathrm{O}}{\mathrm{I} + \mathrm{t}} * \frac{\mathrm{A} * \mathrm{S_w}}{\mathrm{f}} \tag{4.6}$$

mit O Überlappung der Fotografien [%].

A Abstand des Sensors zum erfassten Objekt [m].

$\mathrm{S_w}$ Sensorweite [mm].

f Brennweite [mm].

Abb. 4.16 veranschaulicht das Verhältnis zwischen Vorwärtsüberlappung und der Geschwindigkeit der Drohne für Intervalle von Fotografien mit einem Abstand von 20 m zur kritischen Fläche. Eine schnelle Verschlusszeit verringert die Wahrscheinlichkeit von Bewegungsunschärfe, insbesondere bei sich schnell bewegenden Drohnen. Eine Standardverschlusszeit von 1/400 (0,0025 s) wurde gewählt, um die Wahrscheinlichkeit von Bewegungsunschärfe zu minimieren. Es werden Intervalle von 2, 3, 5, 7, 10 und 15 s der Fotografien sowie Sensorgröße, Brennweite und Bildweite der verwendeten Kamera berücksichtigt, während der Abstand zur kritischen Fläche konstant bei 20 m gehalten wird. Mit einem kleineren Intervall werden mehr Fotografien während der Befliegung erfasst, was zu einer höheren Überlappung der Fotografien führt.

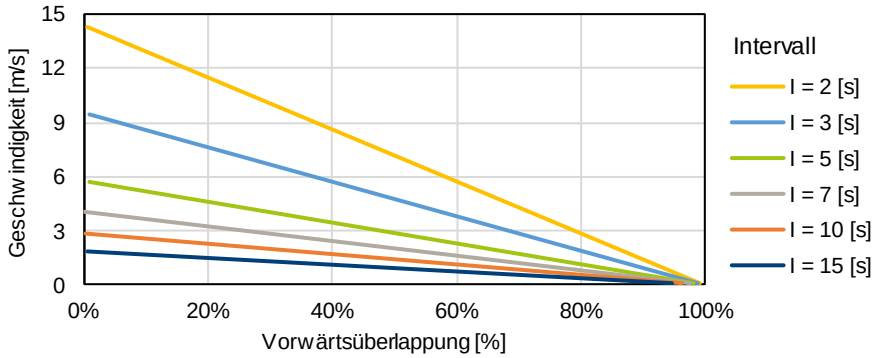


Abb. 4.16: Verhältnis zwischen Vorwärtsüberlappung und Geschwindigkeit der Drohne für verschiedene Intervalle mit einem Abstand von 20 m zur kritischen Fläche

Neben der vorliegenden Untersuchung sind auch die geltenden gesetzlichen Vorschriften zu berücksichtigen. Obwohl Drohnen gemäß EU-Drohnenverordnung mit einer Maximalgeschwindigkeit von 19 m/s operieren dürfen, ist in diesem Fall ein Sicherheitsabstand von 30 m zu unbeteiligten Personen einzuhalten (vgl. Abschnitt 2.2.2). Im Langsamflugmodus kann dieser Abstand auf maximal 5 m reduziert werden (*EU - 2019*).

Drohnenpilotinnen und -piloten tragen stets die Verantwortung, die Drohne während des gesamten Fluges in Sichtweite zu behalten (*EU - 2019*), was bei niedrigen Flughöhen keine Herausforderung darstellt. Auf Baustellen sollten sich zudem ausschließlich Personen aufhalten, die über den aktuellen Einsatz von Drohnen informiert sind und denen eine Helmpflicht auferlegt ist. Dennoch besteht weiterhin das Risiko einer Kollision mit einer Person. Aus diesem Grund wird die potenzielle Energie bei einer solchen Kollision bestimmt, um die Geschwindigkeit der Drohne zu begrenzen und so das Risiko weiter zu minimieren. Zur Bestimmung der Aufprallenergie einer im Fall befindlichen Drohne, dargestellt in Gleichung (4.7), wird die potenzielle Energie am Anfang, also in der Absturzhöhe, und die kinetische Energie, die beim Aufprall auf den Boden mit der Geschwindigkeit entsteht, berechnet. Eine Herleitung der Gleichung ist in Anhang F zu finden.

$$\mathrm{AE} = \mathrm{M} * \left(\frac{1}{2} * \mathrm{v}^2 + \mathrm{g} * \mathrm{h}\right) \tag{4.7}$$

mit

AE	Aufprallenergie [J],
M	Masse der Drohne [kg].
g	Erdbeschleunigung [m/s²].
v	Geschwindigkeit der Drohne [m/s].
h	Flughöhe bzw. Absturzhöhe der Drohne [m].

Abb. 4.17 stellt die Aufprallenergie für Drohnen der offenen Kategorie A1 mit der CE-Klassifizierung C0 (< 250 g) für Geschwindigkeiten von 1 bis 19 m/s in Bezug auf Fallhöhen von 1 m bis 25 m sowie den Helmwiderstand dar.

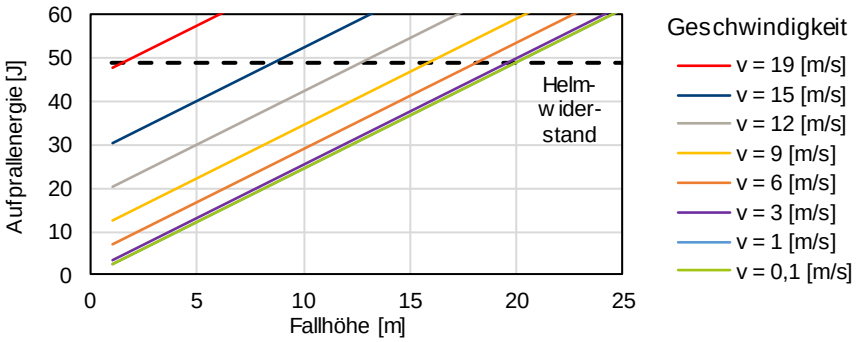


Abb. 4.17: Aufprallenergie für Drohnen der offenen Kategorie A1 mit CE-Klassifizierung C0

Industriehelme müssen eine minimale Aufprallenergie von 49 J aufnehmen können (*DIN EN 397:2013-04*). Dies ermöglicht die Begrenzung der auf den Kopf übertragenen Kraft auf höchstens 5 kN, was dazu beiträgt, Verletzungen zu verhindern. Dieser Wert dient als Referenz für die Bewertung der Aufprallenergie von Drohnen. Im Langsamflugmodus (3 m/s) wird diese Energie für die CE-Klassifizierung C1 bereits bei einer Flughöhe von 19,5 m erreicht. Drohnen mit höherem Gewicht dürfen ebenfalls über Personen fliegen, sofern eine Zulassung und entsprechende Sicherheitsvorkehrungen vorhanden sind. Ein Beispiel hierfür ist die Verwendung eines Drohnenfallschirms (*EU - 2019*), der im Falle eines Absturzes die Fallgeschwindigkeit reduziert. Dadurch sinkt die Aufprallenergie im akzeptablen Rahmen signifikant.

4.3.3.2 Parameter des RANSAC-Algorithmus zur Baufortschrittskontrolle

1. Größe des *Consensus Set* im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Parameterpunktwolken

Die Untersuchung hinsichtlich der Größe des *Consensus Set* im Verhältnis zur Gesamtanzahl der Parameterpunktwolken liefert eindeutige Ergebnisse. Abb. 4.18 zeigt die Größe des *Consensus Set* und die dazugehörige Berechnungsdauer zur Rekonstruktion für die Parameterpunktwolken. Unter Verwendung der entsprechenden Soll-GSD wurden bei einem Abstand von 5 m ungefähr 15,52 %, bei 10 m etwa 75,16 % und ab einem Abstand von 20 m im Durchschnitt 99,29 % der Stichprobenpunkte der Parameterpunktwolke herangezogen. Die Dauer für die Berechnung liegt bei 5 m bei ungefähr 85,7 s, bei 10 m bei etwa 8,32 s und ab einem Abstand von 20 m bei ungefähr 0,68 s.

Mit zunehmendem Abstand reduziert sich die Berechnungsdauer, was auf einen geringeren Rechenaufwand für die Rekonstruktion der Parameterpunktwolken hinweist. Gleichzeitig steigt die Anzahl der *Inlier* im *Consensus Set*. Dies deutet darauf hin, dass mit größerem Abstand eine größere Anzahl von Stichprobenpunkten verwendet wird, um die kritische Fläche zu rekonstruieren. Damit lassen sich bereits bei einem Abstand von 20 m zuverlässige Ergebnisse mit minimalem Zeitaufwand erzielen.

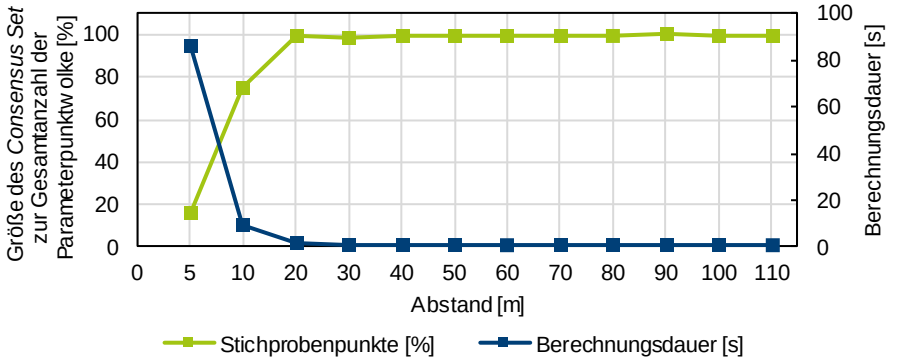


Abb. 4.18: Größe des *Consensus Set* zur Gesamtanzahl der Parameterpunktwolke und die dazugehörige Berechnungsdauer zur Rekonstruktion der Primitiven

2. Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitiven und Soll-GSD < Auflösung der Stichprobe < 5 m

Abb. 4.19 zeigt die Ergebnisse der Untersuchung zur Auflösung der Stichprobe und der Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitiven. Insbesondere wird deutlich, dass bei geringeren Abständen (5 m und 10 m) eine höhere Anzahl von Stichprobenpunkten (5 %) erforderlich ist, um ausschließlich eine Primitive rekonstruieren zu können. Im Gegensatz besteht bei größeren Abständen ab 20 m und einer Auflösung von über 0,1 m ein geringerer Bedarf an Stichprobenpunkten (0,1 %) für eine Rekonstruktion. Dies legt nahe, dass bei größeren Entfernungen weniger Detailinformationen benötigt werden, um eine präzise Rekonstruktion zu erzielen.

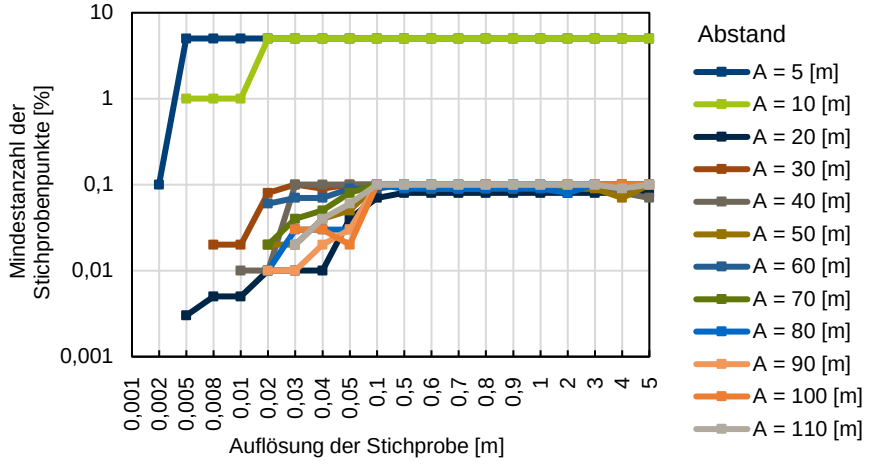


Abb. 4.19: Auflösung der Stichprobe und Mindestanzahl der Stichprobenpunkte der Primitive

4.3.4 Schlussbetrachtung

Die synthetische Befliegung beleuchtet Flugparameter der Datenerfassung sowie Parameter des RANSAC-Algorithmus für eine schlanke Baufortschrittskontrolle im Rahmen der Methodik. Die Ist-GSD sowie die Anzahl der Punkte in den synthetischen Punktwolken stimmen mit marginalen Abweichungen mit der Soll-GSD und Anzahl der

Punkte überein. Der Versuchsaufbau wurde somit validiert. Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen sind in Tab. 4.11 Empfehlungen für Flugparameter sowie die Auswertung mittels des RANSAC-Algorithmus dargestellt. Diese Empfehlungen tragen dazu bei, eine effiziente Datenerfassung und -auswertung sowie eine schlanke Baufortschrittskontrolle zu ermöglichen. Für den Parameter der Überlappung der Fotografien wird keine Empfehlung ausgesprochen, da gemäß Abschnitt 4.3.3.1 die Überlappung keinen Einfluss auf die Berechnung der Soll-GSD hat. Zwar verbessert sich die Rekonstruktion mit zunehmender Überlappung aufgrund der höheren Anzahl verfügbarer *Key Points*, jedoch lag dies außerhalb des Untersuchungsziels.

Tab. 4.11: Empfehlungen für Parameter einer photogrammetrische Baufortschrittskontrolle

<table>
<tr><th>Auswertung</th><th>Untersuchter Parameter</th><th>Empfehlung</th></tr>
<tr><td rowspan="3">Flug-parameter</td><td>Abstand zur kritischen Fläche</td><td>≤ 20 m</td></tr>
<tr><td>Überlappung der Fotografien</td><td>-</td></tr>
<tr><td>Geschwindigkeit der Drohne</td><td>≤ 1 m/s</td></tr>
<tr><td rowspan="5">RANSAC-Parameter</td><td>Mindestanzahl der Stichprobenpunkte</td><td><table><tr><th>Abstand [m]</th><th>Mindestanzahl [%]</th></tr><tr><td>≥ 20</td><td>0,1</td></tr><tr><td>< 20</td><td>5</td></tr></table></td></tr>
<tr><td>Auflösung der Stichprobe</td><td>≥ 0,1 m</td></tr>
<tr><td>Grenzwert</td><td>Toleranzwert</td></tr>
<tr><td>Einfallswinkel</td><td>25 Grad</td></tr>
<tr><td>Wahrscheinlichkeit</td><td>0,01 %</td></tr>
</table>

Im Kontext der Methodik wird aufgrund einer gezielten Datenerfassung, die sich auf spezifische Flächen konzentriert, anstatt großflächige Bereiche zu erfassen, eine einzelne Wand als repräsentative kritische Fläche herangezogen. Diese Entscheidung basiert auf der Simplifizierung der Vorgangsgeometrie, wodurch nur ausgewählte kritische Flächen erfasst werden. Diese Simplifizierung hat jedoch keinen Einfluss auf die Gültigkeit der Ergebnisse. Diese Vorgehensweise führt zu der Geschwindigkeitsbegrenzung, die eine erhöhte Anzahl von Wegpunkten und folglich eine längere Erfassungsdauer der Daten erfordert. Dies ist mit Blick auf die gezielte Erfassung jedoch akzeptabel, da gleichzeitig eine hohe Datenqualität und Sicherheitsaspekte gewährleistet werden.

Die Tatsache, dass es sich bei der untersuchten kritischen Fläche um ein Wandobjekt handelt, kann die Übertragbarkeit der Ergebnisse unter Umständen einschränken. Die virtuelle Befliegung wurde speziell mit einer Betontextur durchgeführt, was bedeutet, dass die Ergebnisse möglicherweise nicht direkt auf andere Oberflächentexturen übertragbar sind. Insbesondere müssen die potenziellen Auswirkungen bestimmter Qualitätsmerkmale oder einer unregelmäßigen Beleuchtung auf die Oberfläche der Bauteile berücksichtigt werden, da diese Faktoren die Genauigkeit der Ergebnisse beeinflussen können. Es wird empfohlen, diese Aspekte bei der Interpretation der Untersuchungsergebnisse zu berücksichtigen und ggf. weitere Studien durchzuführen, um die Robustheit der Ergebnisse zu überprüfen.

4.4 Schlanke Baufortschrittskontrolle

In diesem Abschnitt wird eine schlanke Baufortschrittskontrolle mittels einer drohnenbasierten Datenerfassung in Form einer vorgangsbezogenen Punktwolke vorgestellt. Der Einsatz von Drohnen ist keine zwingende Voraussetzung. Vorausgesetzt wird vielmehr, dass die zuvor beschriebenen Schritte der Methodik implementiert werden. Alternativ kann auch eine andere Erfassungstechnologie zur Datenerfassung für eine schlanke Baufortschrittskontrolle verwendet werden.

Im Rahmen der Methodik wird die schlanke Baufortschrittskontrolle in der Projektabwicklung der Bauausführung schematisch in Abb. 4.20 dargestellt. Die Datenerfassung wird basierend auf einem 4D-BIM (vgl. Abschnitt 4.2.4), das den Soll-Zustand der Baustelle zu einem bestimmten Zeitpunkt darstellt, ereignisbasiert und bedarfsorientiert ausgelöst. Der Soll-Zustand am Zeitpunkt ZP_i ist immer tagesaktuell und entspricht dem Zeitpunkt der Datenerfassung. Um eine schlanke Baufortschrittskontrolle zu ermöglichen, wird die Datenerfassung auf der Baustelle vorausgesetzt, wobei die Vorgangsgeometrie simplifiziert wird, Wegpunkte definiert werden und auf deren Basis eine Flugplanung erfolgt. Bei der Datenerfassung wird der Ist-Zustand der Baustelle am Zeitpunkt ZP_i erfasst, und als vorgangsbezogene Punktwolke bereitgestellt. Um die Punktwolke mit dem 4D-BIM abgleichen zu können, ist eine korrekte Georeferenzierung notwendig, die durch verschiedene Mittel wie Zielobjekte oder eine direkte Georeferenzierung (vgl. Abschnitt 2.2.1) erreicht werden kann.

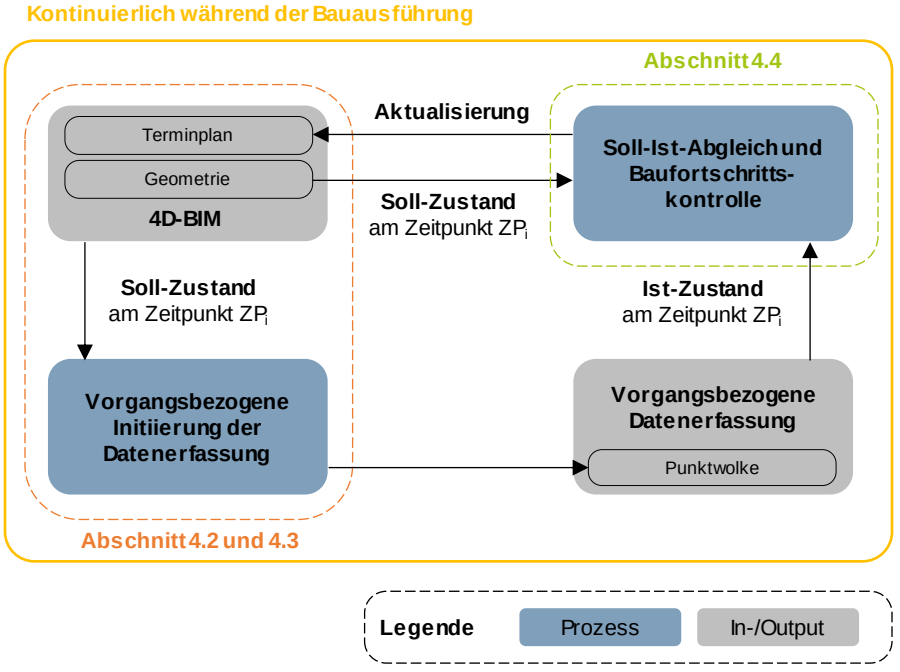


Abb. 4.20: Schematische Darstellung der schlanken Baufortschrittskontrolle

4.4.1 Abgleich der erfassten Daten

Nachfolgend wird der Abgleich der erfassten Daten zur schlanken Baufortschrittskontrolle vorgestellt, der bereits in *Tschickardt - 2023* und *Tschickardt et al. - 2023b* auszugsweise veröffentlicht wurde. Abb. 4.21 zeigt das Entscheidungsdiagramm für eine schlanke Baufortschrittskontrolle auf Grundlage der vorgangsbezogenen Datenerfassung der entwickelten Methodik und Aufbau des Abschnitts 4.4. Eine ganzheitliche und konsequente Anwendung der vorgestellten Methodik während der Bauphase ist entscheidend, um sicherzustellen, dass diese reibungslos funktioniert.

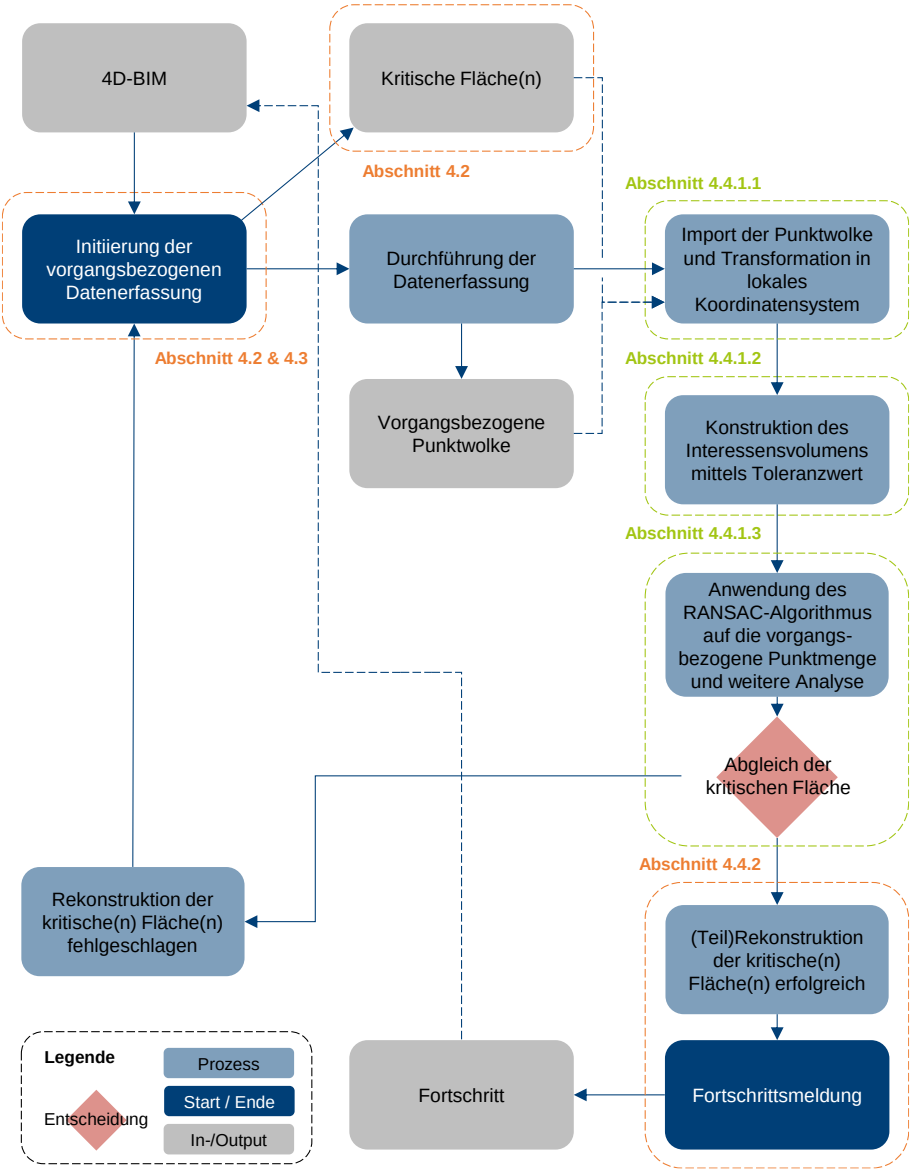


Abb. 4.21: Entscheidungsdiagramm für eine schlanke Baufortschrittskontrolle auf Grundlage der vorgangsbezogenen Datenerfassung

4.4.1.1 Import der Punktwolke und Transformation in lokales Koordinatensystem

Die vorgangsbezogene Punktwolke PW wird im Format einer Punktwolke, bspw. als *.PLY (*Polygon File Format*), bereitgestellt. Gleichung (4.8) beschreibt die vorgangsbezogene Punktwolke PW, die ein Teil des dreidimensionalen euklidischen Raums ist.

$$\mathrm{PW} \in \mathbb{R}^3 = \{(x, y, z) | \, x, y, z \in \mathbb{R}\} \tag{4.8}$$

Des Weiteren wird die kritische Fläche im JSON-Format (vgl. Abschnitt 4.2.4.5) verwendet. Es ist erforderlich, eine Transformation beider Entitäten in ein lokales Koordinatensystem durchzuführen, um eine effiziente Durchführung von Operationen sicherzustellen. Andernfalls müsste aufgrund der Georeferenzierung mit großen Koordinaten im globalen Koordinatensystem gearbeitet werden.

4.4.1.2 Konstruktion des Interessensvolumens mittels Toleranzwert

Im zweiten Schritt erfolgt die Konstruktion des Interessensvolumens (engl. *Volume of Interest*, "VOI") auf Grundlage der kritischen Fläche, was wiederum eine Filterung der vorgangsbezogenen Punktwolke PW ermöglicht. Für jedes Dreieck D_i wird zunächst basierend auf den Eckpunkten des Dreiecks der zugehörige Normalenvektor berechnet. Anschließend wird entlang dieses Normalenvektors n_i eine Extrusion mit dem Toleranzwert TW_{ji} durchgeführt. Diese Beschreibung des VOI_i wird durch Gleichung (4.9) festgelegt. Nachfolgend werden sämtliche Punkte innerhalb der VOI_i als Teil der vorgangsbezogenen Punktmenge PM_i gespeichert.

$$\mathrm{VOI_i} = \{(x, y, z) | (\forall (x, y, z) \in \mathrm{D_i} \subset \mathbb{R}^3, (x, y, z) \in \mathrm{D_i} + \mathrm{TW_{ji}} \cdot \mathrm{n_i}\} \tag{4.9}$$

mit $\mathrm{VOI_i}$ Interessensvolumen für das Dreieck D_i.

$\mathrm{D_i}$ Beliebiges Dreieck der kritischen Fläche.

$\mathrm{TW_{ij}}$ Toleranzwert.

$\mathrm{n_i}$ Normalenvektor für das Dreieck D_i.

Durch eine Iteration über alle VOI_i entsteht das gesamte VOI der vorgangsbezogenen Punktmenge PM, wie in Gleichung (4.10) dargelegt. Punkte außerhalb der VOI werden verworfen.

$$\mathrm{PM} = \bigcup \mathrm{VOI_i} \subset \mathrm{PW} \tag{4.10}$$

mit PM Vorgangsbezogene Punktmenge.

PW Vorgangsbezogene Punktwolke.

Abb. 4.22 veranschaulicht diese Vorgehensweise. Dargestellt ist das VOI_1 für das Dreieck D_1 mit der gefilterten Punktmenge PM_1.

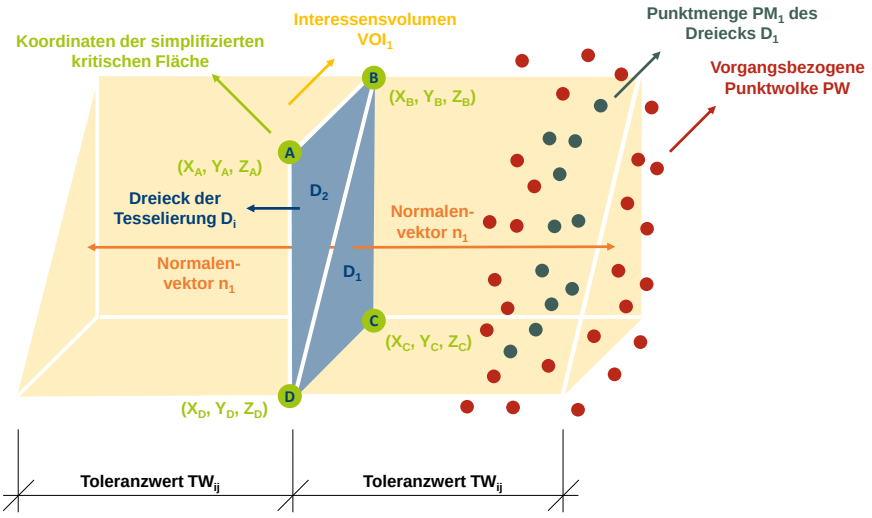


Abb. 4.22: Konstruktion des Interessensvolumens unter Verwendung des Toleranzwerts zur Filterung der vorgangsbezogenen Punktwolke)

In Abschnitt 4.4.1.3 kann auf die vorgangsbezogene Punktmenge PM anschließend der RANSAC-Algorithmus angewendet werden.

Toleranzwert

In Gleichung (4.11) ist der Toleranzwert TW_{ij} dargestellt, der von der Bauteiltoleranz, die gemäß den Ausführungstoleranzen nach *DIN EN 13760:2011-03* und den Grenzabweichungen für Maße nach *DIN 18202:2019-07* in Deutschland festgelegt werden kann, sowie von der Genauigkeit der verwendeten Erfassungstechnologie abhängt.

$$TW_{ij} = BT_i + GET_j \tag{4.11}$$

mit TW_{ij} Toleranzwert.

BT_i Toleranz des Bauteils des verknüpften Vorgangs.

GET_j Genauigkeit der Erfassungstechnologie.

Zur Generierung des Interessensvolumens wird der Grundsatz des Boxprinzips herangezogen. Das Boxprinzip gemäß den Richtlinien der Qualitätskontrolle und Messtechnik (*DIN 2769:2023-04*) überprüft die Größe von Bauteilen anhand festgelegter Toleranzbereiche. Gemäß *DIN 18202:2019-07* ist es beim Boxprinzip erforderlich, dass alle Punkte eines Bauteils innerhalb der definierten Boxen liegen. Abb. 4.23 veranschaulicht dieses Prinzip am Beispiel eines Einheitswürfels mit Nennmaß, Höchstmaß und Mindestmaß.

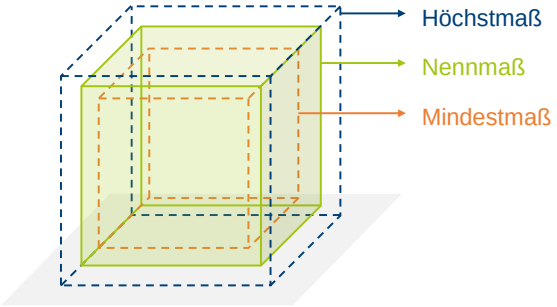


Abb. 4.23: Beispielhafte Darstellung des Boxprinzips für den Einheitswürfel mit Nennmaß, Höchstmaß und Mindestmaß, Darstellung in Anlehnung an *DIN 18202:2019-07*

DIN EN 13760:2011-03 legt Anforderungen für die Planung, Ausführung und Konformität von Betonkonstruktionen fest. *DIN 18202:2019-07* definiert Anforderungen für die zulässige Maß- und Formgenauigkeit von Bauwerken und ihren Bauteilen. In Anhang F ist ein Auszug aus den zulässigen Abweichungen für Stützen, Wände, Balken und Platten gemäß *DIN EN 13760:2011-03* sowie die Grenzabweichung für Abmessungen im Grundriss und in der Höhe nach *DIN 18202:2019-07* dargestellt. Die Ausführungstoleranzen und die Grenzabweichungen für Maße bilden die Grundlage für eine empfohlene Bauteiltoleranz BT_i von 5 cm im Rahmen der vorliegenden Arbeit.

Die Genauigkeit von Erfassungstechnologien kann je nach spezifischer Konfiguration, Kalibrierung, Abstand der Technologie zum Bauteil und Umgebungsbedingungen stark variieren. Der Hersteller DJI gibt für eine Photogrammetrie Drohne mit seinem Sensor Zenmuse P1 (*DJI - 2023a*) eine vertikale Genauigkeit von 3 cm und eine horizontale Genauigkeit von 5 cm an. Diese Werte gelten für die Datenerfassung ohne Verwendung von Zielobjekten und unter Berücksichtigung einer GSD von 3 cm. Für den LiDAR Sensor Zenmuse L2 (*DJI - 2023b*) wird vom Hersteller eine vertikale Genauigkeit von 4 cm und eine horizontalen Genauigkeit von 5 cm angegeben. Diese Angaben basieren auf Laboruntersuchungen und gelten für Befliegungen in einer Höhe von 150 m mit einer Fluggeschwindigkeit von 15 m/s. Der Sensor VUX-1UAV 22 (*Riegl - 2023*) wird mit einer Genauigkeit von 1 cm angegeben, wenn er aus einer Entfernung von 150 m eingesetzt wird. Die Genauigkeit von Erfassungstechnologien variiert, weshalb die Überprüfung aktueller technischer Datenblätter für präzise Informationen notwendig ist. Die kritische Analyse der Datenblätter ist wichtig, um die Einflussfaktoren wie Umgebungsbedingungen, Messparameter und technische Spezifikationen angemessen berücksichtigen zu können. Nur so ist es möglich, eine verlässliche Bewertung der Genauigkeit der jeweiligen Erfassungstechnologien vorzunehmen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Genauigkeit der Erfassungstechnologie GET_j von 20 cm angesetzt, obwohl dies über den aktuellen Datenblättern liegt. Eine genaue Festlegung des technologiebezogenen Toleranzwerts ist wichtig. Gleichzeitig ist es jedoch entscheidend, die Vielfalt der verfügbaren Erfassungstechnologien zu berücksichtigen und die spezifischen Anforderungen sowie Genauigkeiten für jede Technologie individuell zu bewerten.

Aus der Bauteiltoleranz BT_i und Genauigkeit der Erfassungstechnologie GET_j ergibt sich eine Toleranzwert TW_{ij} von 25 cm zur Konstruktion des Interessensvolumens.

4.4.1.3 Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf die vorgangsbezogene Punktmenge und weitere Analyse

Im nächsten Schritt wird der RANSAC-Algorithmus nach *Schnabel et al. - 2007* auf die vorgangsbezogene Punktmenge in der Software CloudCompare, Version 2.12.4 (Kyiv) (*CloudCompare - 2023*) angewendet. Abb. 4.24 stellt eine Fortsetzung von Abb. 4.22 dar und zeigt die Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf die vorgangsbezogene Punktmenge PM.

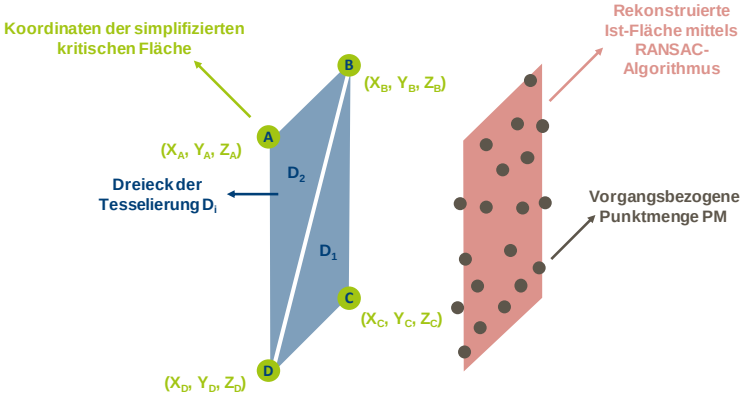


Abb. 4.24: Anwendung des RANSAC-Algorithmus auf eine gefilterte Punktmenge

Die konsekutive Fortschrittsmeldung auf Grundlage der kritischen Fläche wird durch eine Analyse der rekonstruierten Fläche in zwei aufeinanderfolgenden Schritten durchgeführt:

- Im ersten Schritt wird ein Abgleich der Richtungen der Normalenvektoren der rekonstruierten Fläche und der kritischen Fläche vorgenommen. Die Richtung der Vektoren wird über das Skalarprodukt berechnet.
- Im zweiten Schritt der Analyse erfolgt die Bestimmung des Winkels Φ zwischen diesen Vektoren. Dies in Gleichung (4.12) aus der linearen Algebra dargestellt:

$$\Phi = \cos^{-1}\left(\frac{N_{RS} \cdot N_{CS}}{|N_{RS}|\,|N_{CS}|}\right) \tag{4.12}$$

mit Φ Winkel zwischen Normalenvektoren.

N_{RS} Normalenvektor der rekonstruierten Fläche.

N_{CS} Normalenvektor der kritischen Fläche.

Aufgrund der Toleranzen für Bauteile (vgl. Anhang F) wird eine geringfügige Verdrehung bzw. Krängung/Transversalneigung der rekonstruierten Fläche von einem Winkel akzeptiert, der sich aus dem Toleranzwert und der längsten Strecke der kritischen Fläche berechnet. Sollte die Rekonstruktion der kritischen Fläche fehlschlagen, ist es nicht möglich, den Fortschritt des Vorgangs zu melden. In diesem Fall wird erneut eine vorgangsbezogene Datenerfassung während der definierten Suchzeit gemäß Abschnitt 4.2.4.1 durchgeführt. Der Abgleich dient ausschließlich zur terminlichen Fortschrittskontrolle und soll keine Maßnahmen zur Qualitätssicherung auslösen. Im Kontext der Methodik wird der Flächeninhalt, der durch die äußersten Punkte generiert

wird, nicht analysiert oder zur Bewertung des Fortschritts herangezogen. Diese zusätzliche Analyse erscheint aufgrund der Verwendung von (Halb-)Tagesleistungen als detaillierte Terminplanung nicht erforderlich oder sinnvoll. Aufgrund der festgelegten Toleranzschwelle von einem Tag sind Zwischenzustände der kritischen Fläche bzw. des Vorgangs nicht erforderlich.

4.4.2 Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM

Die Integration der erfassten Daten beruht auf der durchgeführten Fortschrittsmeldung und der erfolgreichen Rekonstruktion der kritischen Flächen. Derzeit unterstützt die Software zur 4D-Modellierung keinen Import von JSON-Dateien. Aus diesem Grund wird für die Datenintegration in das 4D-BIM das CSV-Format verwendet.

Tab. 4.12 zeigt die Struktur der Beispieldatei, die das Ergebnis des Abgleichs für eine schlanke Baufortschrittskontrolle im CSV-Format zur Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM darstellt. Diese CSV-Datei enthält Informationen zu *LinkedTaskID* (ID des verknüpften Vorgangs) und *SurfaceOfInterestID* (ID der kritischen Fläche). Die Informationen zu *AcquisitionDate* (Datum der Datenerfassung) und *AcquisitionTime* (Uhrzeit der Datenerfassung) werden durch die Datenerfassung festgelegt. Wenn ein Vorgang auf mehr als eine kritische Fläche (vgl. Tab. 4.6) simplifiziert ist, sind unter *SurfaceOfInterestID* alle IDs der kritischen Flächen aufgelistet (j +1), um den Fertigstellungsgrad des Vorgangs definieren zu können.

Tab. 4.12: Beispieldatei der Ergebnisdatei zur Integration in das 4D-BIM

LinkedTaskID	SurfaceOfInterestID	AcquisitionDate	AcquisitionTime
ID des simplifizierten Vorgangs i	ID der kritischen Fläche j	Datum der Datenerfassung	Uhrzeit der Datenerfassung
ID des simplifizierten Vorgangs i	ID der kritischen Fläche j+1	Datum der Datenerfassung	Uhrzeit der Datenerfassung

Nach der Integration der relevanten Informationen in das 4D-BIM wird der Vorgang i anhand der Merkmale *LinkedTaskID* und *SurfaceOfInterestID* eindeutig identifiziert. Im Anschluss erfolgt eine Prüfung, ob sämtliche kritischen Flächen des Vorgangs i als abgeschlossen deklariert werden können. Das Merkmal DBDA:PercentComplete (Fertigstellungsgrad) wird auf 100 % gesetzt, wenn alle kritischen Flächen innerhalb der dem Vorgang zugeordneten Punktmenge erfolgreich rekonstruiert wurden. In diesem Fall erhalten alle zugehörigen Modellelemente ihre Modellfarbe zurück. Sollte der Baufortschritt des Vorgangs i noch nicht den Fertigstellungsgrad von 100 % erreicht haben, werden die betroffenen Modellelemente in der Farbe Orange dargestellt. Dies signalisiert, dass der Vorgang erst als abgeschlossen gilt, wenn sämtliche kritischen Flächen vollständig rekonstruiert wurden. Es wird angenommen, dass die operative Arbeitsvorbereitung die Simplifizierung genommen hat, indem sie eine Auswahl der kritischen Flächen basierend auf einer identischen Priorisierung der kritischen Flächen genommen hat. Sobald der Vorgang als abgeschlossen gemeldet wird, werden die Merkmale *AcquisitionDate* und *AcquisitionTime* mit den entsprechenden Werten (siehe Anhang E) versehen. Gleichzeitig wird das Merkmal Ende-Ist mit diesem Datum aktualisiert, sodass ein tabellarischer Soll-Ist-Vergleich ermöglicht wird. Bei einer nicht erfolgreichen Rekonstruktion wird der Fertigstellungsgrad entsprechend der kritischen Flächen aktualisiert und eine erneute Datenerfassung wird initiiert.

4.5 Softwareintegration der prozessorientierten und praxisgerechten Umsetzung im 4D-BIM

In diesem Abschnitt wird die Entwicklung und Implementierung der Softwareintegration im Rahmen des 4D-BIM beschrieben. Das Hauptziel der Softwareintegration besteht darin, eine Programmierung bereitzustellen, die die in Kapitel 4 entwickelte Methodik prozessorientiert und praxisgerecht im 4D-BIM umsetzt.

Der Verfasser dieser Arbeit hat das Konzept für eine prozessorientierte und praxisgerechte Umsetzung im 4D-BIM eigenständig entwickelt und die grundlegenden Arbeitsabläufe und Funktionen erarbeitet. Die programmiertechnische Umsetzung wurde von Anne-Sophie Knappe, einer Mitarbeiterin der Wayss & Freytag Ingenieurbau AG (W&F), realisiert. Die Umsetzung erfolgte in der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2 (*thinkproject - 2023*), die eine Programmierschnittstelle in der Programmiersprache *JavaScript* bereitstellt (*DESITE API - 2023*). Diese Zusammenarbeit diente der Validierung der entwickelten Methodik und deren Implementierung in der Praxis.

Abb. 4.25 illustriert die Integration der Software mit den Prozessschritten und Abschnitten der Methodik für eine schlanke Baufortschrittskontrolle.

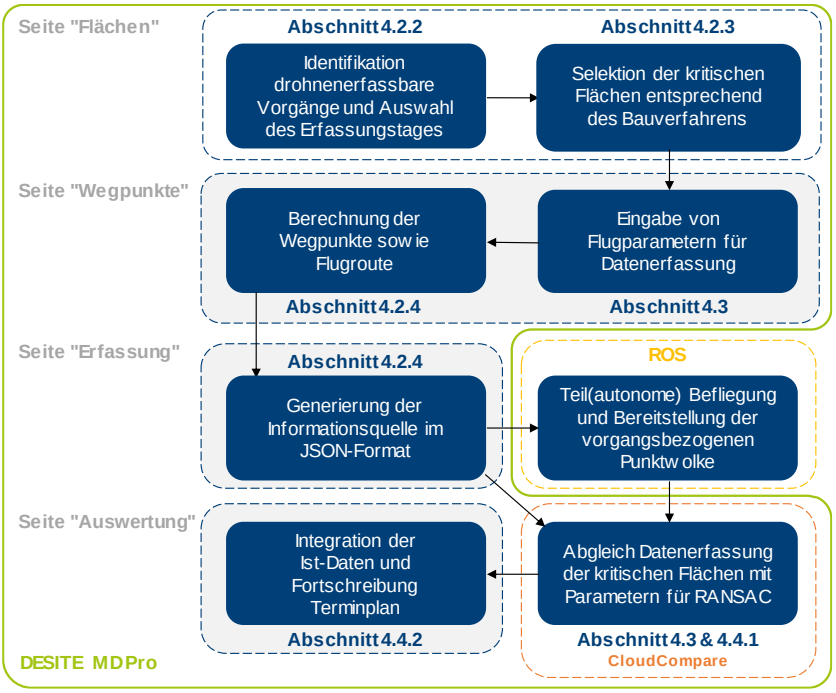
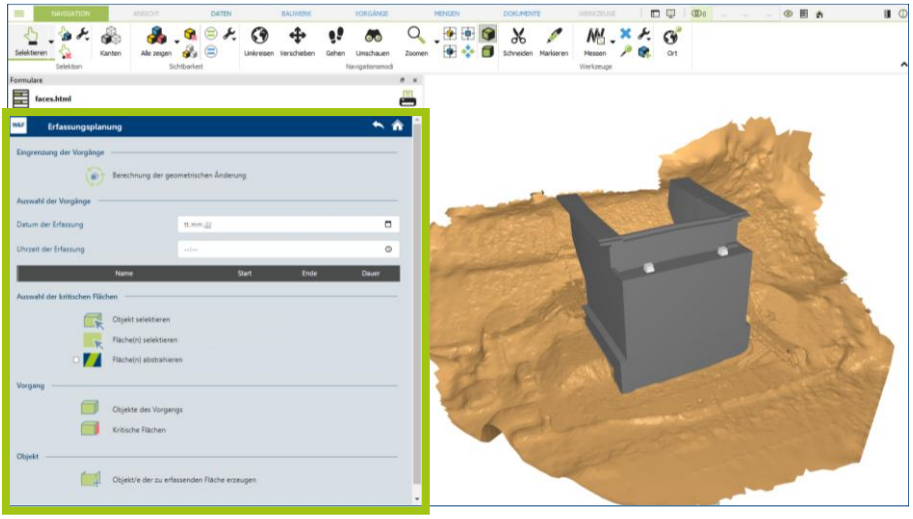


Abb. 4.25: Übersicht der Softwareintegration mit Prozessschritten und Verweis zu den Abschnitten der entwickelten Methodik einer schlanken Baufortschrittskontrolle

Innerhalb der Software DESITE MD Pro wird nicht nur *JavaScript*, sondern auch HTML (*Hypertext Markup Language*) und CSS (*Cascading Style Sheet*) verwendet, um die grafische Oberfläche, auch als "Seiten" bezeichnet, zu erstellen. In diesem Abschnitt werden die Funktionen der vier entwickelten Seiten beschrieben, die auf den in den

Abschnitten 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4 entwickelten Methoden sowie den empfohlenen Parametern aus Abschnitt 4.3 beruhen. DESITE MD Pro bietet keine Funktion zur Verarbeitung von Punktwolken an. Aus diesem Grund wird der Abgleich der Datenerfassung gemäß Abschnitt 4.4.1 mit den kritischen Flächen und Parametern des RANSAC-Algorithmus gemäß Abschnitt 4.3 mithilfe der Software CloudCompare, Version 2.12.4 (Kyiv) (*CloudCompare - 2023*) durchgeführt. Die Steuerung der Drohne und die Flugsteuerung erfolgen über das Betriebssystem der Drohne (engl. *Robot Operating System*, "ROS"). Dieser Aspekt wird in dieser Arbeit jedoch nicht näher behandelt.

Abb. 4.26 zeigt eine Bildschirmaufnahme der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2, auf der linken Seite, die die Softwareintegration für die prozessorientierte und praxisgerechte Umsetzung illustriert. Auf der rechten Seite ist das 4D-BIM der Fallstudie "Ersatzneubau Brücke Lohring Bochum" aus Abschnitt 5.3 dargestellt. Die weiteren entwickelten Seiten im Rahmen der Softwareintegration sind in Anhang G zu finden.



Softwareintegration durch prozessorientierte Oberflächen (Seiten)

Abb. 4.26: Softwareintegration (links) und 4D-BIM (rechts) in der Software DESITE MD Pro (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Auf der Seite "Flächen" (siehe Anhang G) sind mehrere Rubriken enthalten, um die Identifikation von durch Drohnen erfassbaren Vorgängen, die Festlegung des Erfassungszeitpunktes und die Generierung der kritischen Flächen durchzuführen:

- In der Rubrik "Eingrenzung der Vorgänge" wird zunächst, gemäß der im Abschnitt 4.2.2 und in Abb. 4.3 dargestellten Vorgehensweise, die geometrische Änderung im 4D-BIM berechnet. Diese Funktion wird über eine Schaltfläche am Anfang der Seite ausgeführt. Nach der Betätigung dieser Schaltfläche werden die mit Drohnen erfassbaren Vorgänge mit Informationen der Merkmalgruppe aus Anhang E angereichert.
- In der Rubrik "Auswahl der Vorgänge" wird das gewünschte Datum und die Uhrzeit für die Erfassung gemäß Abschnitt 4.2.4.1 mithilfe eines Kalenders

ausgewählt. In einer darunter befindlichen Tabelle werden alle Vorgänge für den ausgewählten Tag mit Start- und Enddatum, Dauer und einer Anzeige für geometrische Veränderungen aufgelistet. Zudem wechselt die 3D-Ansicht zur 4D-Simulation für den ausgewählten Tag.

- In der Rubrik "Auswahl der kritischen Flächen" stehen drei Schaltflächen zur Verfügung. Mit "Objekt selektieren" kann ein verknüpftes Objekt des Vorgangs ausgewählt werden. Mit "Fläche selektieren" kann die kritische Fläche mithilfe des Auswahlwerkzeugs definiert werden. Über einen Auswahlkasten besteht die Möglichkeit, die kritische Fläche gemäß Abschnitt 4.2.3.2 weiter zu abstrahieren, um die Komplexität zu verringern und die Dateneffizienz zu steigern.
- In der Rubrik "Vorgang" kann mithilfe der Schaltfläche "Objekt/e des Vorgangs" die 3D-Ansicht entsprechend auf die Objekte vergrößert werden. Mit der Schaltfläche "Kritische Flächen" können diese in der 3D-Ansicht ein- und ausgeblendet werden.
- In der Rubrik "Objekt" werden schließlich mithilfe der Schaltfläche "Objekt/e der zu erfassenden Fläche erzeugen" die geometrischen Objekte gemäß Abschnitt 4.2.3.2 und die semantischen Informationen gemäß Anhang E im Fachmodell "Drohnenbasierte Datenerfassung" erzeugt.

Die Seiten "Wegpunkte", "Erfassung" und "Auswertung" (siehe Anhang G) zeigen zu Beginn erneut das ausgewählte Datum und bieten eine übersichtliche tabellarische Auflistung der aktiven Vorgänge an diesem Datum. Dies ermöglicht eine präzise Planung der Datenerfassung. Auf der Seite "Wegpunkte" gibt es zudem zwei Abschnitte zur Planung der Wegpunkte und der Flugroute:

- In der Rubrik "Generierung der Flugroute" sind zunächst Angaben erforderlich, darunter die Art der Erfassung (LiDAR oder Photogrammetrie) sowie die Auswahl des verwendeten Sensors und der Drohne, einschließlich der Ausrichtung des Sensors. Des Weiteren müssen Flugparameter gemäß Abschnitt 4.3.3.1 wie der Abstand zur kritischen Fläche, die Geschwindigkeit der Drohne sowie die Überlappung der Fotografien in Vorwärts- und Seitwärtsrichtung eingegeben werden. Anschließend werden das Intervall der Fotografien, die GSD und der Abstand der Wegpunkte in Vorwärts- und Seitwärtsrichtung auf der Berechnungsgrundlage gemäß Abschnitt 4.2.4.1 berechnet. Nach der Überprüfung der Wegpunkte wird durch erneute Betätigung der Schaltfläche sowohl die Generierung der Wegpunkte als auch der Flugroute als geometrische Objekte im Fachmodell "Drohnenbasierte Datenerfassung" mit den semantischen Informationen gemäß Anhang E durchgeführt.
- Unter der Rubrik "Bearbeiten der Flugroute" können einzelne Wegpunkte entfernt oder manuell hinzugefügt werden. Bei dem Hinzufügen von Wegpunkten muss definiert werden, ob es sich um einen Zwischenpunkt, den Start- oder Landepunkt der Drohne handelt. Außerdem müssen Vorgänger und Nachfolger definiert werden. Eine tabellarische Auflistung der Segmente zwischen den Wegpunkten der Flugroute ermöglicht zunächst eine visuelle Überprüfung.

Auf der Seite "Erfassung" sind zwei Rubriken hinsichtlich Flugroute und Export aufgeführt:

- In der Rubrik "Gesamtflugroute" wird die Länge und die Dauer der gesamten Flugroute angezeigt. Durch Definition der Abmessungen des Querschnitts der Drohne und die anschließende Betätigung der Schaltfläche "Flugroute expandieren" wird der Querschnitt entlang der Flugroute extrudiert und als geometrisches Objekt ein Flugkorridor im Fachmodell "Drohnenbasierte Datenerfassung" mit den semantischen Informationen gemäß Anhang E erstellt. Dieser Flugkorridor kann im 4D-BIM zur automatisierten Kollisionsprüfung verwendet werden.
- In der Rubrik "Export" wird die Erfassungsplanung für ausgewählte kritische Flächen und Vorgänge gemäß Abschnitt 4.2.4.5 in die entwickelte Datenstruktur (vgl. Abb. 4.9) als JSON-Datei exportiert und dient als Informationsquelle der (teil)-autonomen Befliegung sowie anschließenden Baufortschrittskontrolle.

Die Seite "Auswertung" und die Integration der Ist-Daten setzen voraus, dass eine Datenerfassung mithilfe einer Erfassungstechnologie durchgeführt wurde und eine georeferenzierte vorgangsbezogene Punktwolke verfügbar ist. Darüber hinaus ist es erforderlich, dass die Vorgehensweise, wie in Abb. 4.21 dargestellt und in Abschnitt 4.4.1 beschrieben, umgesetzt wurde. Ebenso muss der Abgleich zwischen der vorgangsbezogenen Punktwolke und den kritischen Flächen unter Verwendung der Parameter des RANSAC-Algorithmus gemäß Abschnitt 4.3.3.2 durchgeführt worden sein. Abschließend müssen die Fortschrittsmeldungen gemäß den Vorgaben in Abschnitt 4.4.2 und Tab. 4.12 in der Ergebnisdatei vorhanden sein.

Die Seite "Auswertung" enthält zwei Rubriken zur Integration von Informationen:

- In der Rubrik "Terminplan" kann mithilfe der Schaltfläche "Ergebnis-CSV kritische Fläche auswählen" die entsprechende Datei ausgewählt und eine Importfunktion genutzt werden. Nach Import der Informationen erfolgt zunächst eine tabellarische Darstellung der CSV-Datei mit Informationen *LinkedTaskID*, *SurfaceOfInterestID*, *AcquisitionDate* und *AcquisitionTime* (vgl. Tab. 4.12). Durch einen Auswahlkasten werden die Vorgänge ausgewählt, für die die Ist-Daten und Informationen gemäß Anhang E angereichert werden sollen.
- In der Rubrik "Befliegung" besteht auch die Möglichkeit, die tatsächlich geflogene Flugroute in das Fachmodell "Drohnenbasierte Datenerfassung" mit den semantischen Informationen gemäß Anhang E zu importieren. Diese Informationen müssen von der Drohne bereitgestellt werden.

5 Umsetzung der entwickelten Methodik anhand von zwei Fallstudien

Für die prototypische Umsetzung der entwickelten Methodik zur ereignisorientierten und drohnenbasierten Datenerfassung sowie zur schlanken Baufortschrittskontrolle in der Bauausführung wurden zwei geeignete Projekte identifiziert. Diese Projekte dienen als Grundlage für die Erprobung und Validierung der Methodik:

- in Abschnitt 5.2 wird das Projekt "Brückenbauwerk im Verlauf der A24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum" behandelt und
- in Abschnitt 5.3 erfolgt die Behandlung des Projekts "Ersatzneubau der Brücke Lohring in Bochum".

Die Auswahl dieser beiden Projekte erfolgte aufgrund folgender Kriterien:

- Die Forschungsergebnisse lassen sich auf verschiedene Projekttypen und Bauwerke übertragen, sodass Erkenntnisse aus diesen Projekten auf andere Bauprojekte übertragbar sind.
- Die Bauwerke weisen eine angemessene Komplexität auf, wobei die Anzahl der Terminplanungsvorgänge überschaubar ist und der Bauablauf zur Errichtung der Bauwerke klar strukturiert und gemäß Abschnitt 4.2.1 detailliert ist.
- Es werden Vorgänge und Ereignisse mit unterschiedlichen Anforderungen an die Detaillierung der Initiierung und Durchführung der Datenerfassung eingesetzt, um ein breites Spektrum an Forschungsergebnissen zu erzielen, die auf verschiedene Projekte übertragen werden können.

Die Firma W&F war bei beiden Projekten maßgeblich an der Bauausführung beteiligt. Vor der realen Drohnenbefliegung in Abschnitt 5.3 wurden erforderliche Genehmigungen von den Grundstückseigentümern eingeholt. Die Aufnahmen dienten ausschließlich des Zwecks der Baumaßnahmen sowie der Forschung im Rahmen dieser Arbeit und wurden gemäß den Bundes- und Landesdatenschutzrichtlinien durchgeführt. Mögliche Gefahren durch die nahegelegene Infrastruktur wurden berücksichtigt. Zu Beginn des Kapitels wird in Abschnitt 5.1 die Vorgehensweise der Fallstudien erläutert. Anschließend erfolgt die Umsetzung beider Fallstudien und Schlussbetrachtung.

5.1 Vorgehensweise der zwei Fallstudien

Abb. 5.1 veranschaulicht die Vorgehensweise beider Fallstudien und ist nachfolgend beschrieben.

In den Abschnitten 5.2.1 und 5.3.1 wird der Bauablauf der Fallstudien beschrieben. Das 4D-BIM wurde in beiden Fallstudien im Rahmen der operativen Projektabwicklung vom Verfasser dieser Arbeit entwickelt und bildet die Grundlage für die Umsetzung der entwickelten Methodik. Gemäß Abschnitt 4.2.1 weist Fallstudie 1 einen LO4D 1 und LO4D 2 und Fallstudie 2 einen LO4D 2 auf.

In den Abschnitten 5.2.2 und 5.3.2 erfolgt die Umsetzung der vorgangsbezogenen Initiierung. In diesem Zusammenhang werden Vorgänge identifiziert, die gemäß Abschnitt 4.2.2 geometrische Änderungen aufweisen. Darüber hinaus werden spezifische Vorgänge für die Fallstudie präsentiert. Dies umfasst die Überprüfung der

Anwendbarkeit einer Simplifizierung sowie die Definition der kritischen Flächen gemäß Abschnitt 4.2.3.2.

In den Abschnitten 5.2.3 und 5.3.3 werden Planung und Durchführung der Datenerfassung umgesetzt. Dies beinhaltet die Berechnung der Wegpunkte und Flugroute gemäß Abschnitt 4.2.4. Die Planung, insbesondere die Festlegung des Abstands zur kritischen Fläche, erfolgt gemäß den Anforderungen an die Punktwolken und unter Berücksichtigung der Abmessungen der kritischen Fläche sowie der örtlichen Gegebenheiten im 4D-BIM. Dabei liegt der Fokus darauf, die Erfassungs- und Verarbeitungszeit grundsätzlich zu minimieren, ohne dabei die Genauigkeit der Ergebnisse zu beeinträchtigen. Das 4D-BIM wird als statische IFC-Datei exportiert und zur anschließenden Durchführung der synthetischen Datenerfassung bereitgestellt. Die IFC-Datei wurde dabei um Texturen (*Blenderkit - 2023*) für die verschiedenen Bauteile ergänzt. Die virtuelle Befliegung erfolgt mithilfe der Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*) und die reale Befliegung in Abschnitt 5.3 wurde mit der Drohne DJI Mini 3 Pro durchgeführt. Die Rekonstruktion der synthetischen sowie der realen Punktwolke erfolgte in der Software Metashape, Version 2.0.2 (*Metashape - 2023*). Die photogrammetrischen Punktwolken wurden unter Verwendung einer Fotoqualität von "*High*" erzeugt und die Rekonstruktion der Punktwolken erfolgte mit der Einstellung "*Ultra High*".

In den Abschnitten 5.2.4 und 5.3.4 werden sowohl die synthetischen Daten beider Fallstudien als auch die Daten der realen Befliegung der zweiten Fallstudie in der Software CloudCompare, Version 2.12.4 (Kyiv) (*CloudCompare - 2023*), analysiert. Die vorgangsbezogenen Punktwolken wurden initial in CloudCompare im Hinblick auf die kritischen Flächen gefiltert, wobei ein Interessensvolumen unter Verwendung eines Toleranzwerts von 25 cm (5 cm für die Bauteiltoleranz und 20 cm für die Genauigkeit der Erfassungstechnologie) generiert wurde. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der Anwendung des RANSAC-Algorithmus und den Parametern gemäß Tab. 5.1

Tab. 5.1: Parameter zur Anwendung des RANSAC-Algorithmus der Fallstudien

Parameter	**Wert**
Mindestanzahl der Stichprobenpunkte	<table><tr><td>Abstand [m]</td><td>Mindestanzahl [%]</td></tr><tr><td>< 20</td><td>10</td></tr><tr><td>≥ 20</td><td>0,1</td></tr></table>
Auflösung der Stichprobe	0,1 m
Grenzwert	Toleranzwert
Einfallswinkel	25 Grad
Wahrscheinlichkeit	0,01 %

Nach Anwendung des RANSAC-Algorithmus wurden zwischen der kritischen (Soll-)Fläche und der rekonstruierten (Ist-)Fläche folgende Abgleiche durchgeführt:

- der Vergleich der Punktmenge,
- der Vergleich der Soll-GSD (vgl. Gleichung (2.1)) und der Ist-GSD (vgl. Gleichung (4.4)) mit einem Radius von 10 cm (vgl. Abschnitt 4.3.2) und
- der Vergleich des Normalenvektors und der Winkel der Flächen.

Anschließend werden die Fortschrittsmeldungen gemäß der Beschreibung in Abschnitt 4.4.2 in das 4D-BIM integriert.

Die Umsetzung der vorgangsbezogenen Initiierung, Planung und Durchführung der Datenerfassung sowie die Fortschrittsmeldung erfolgen in der Software DESITE MD Pro, Version 3.4.2 (*thinkproject - 2023*). Dabei kam die entwickelte prozessorientierte und praxisgerechte Softwareintegration gemäß Abschnitt 4.5 zum Einsatz.

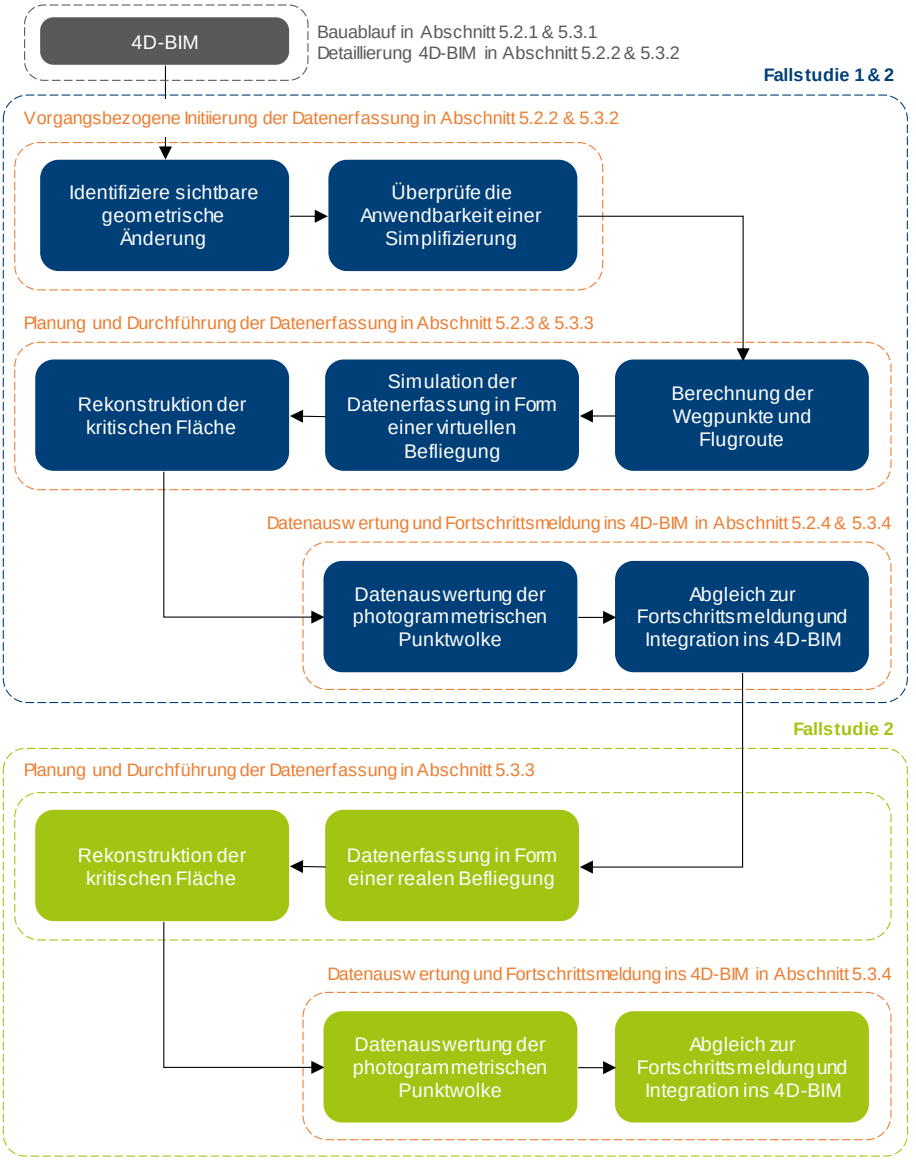


Abb. 5.1: Vorgehensweise zur Validierung der vorgeschlagenen Methodik

5.2 Projekt "Brückenbauwerk im Zuge der BAB 24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum"

Auftraggeber und Vorhabenträger für das Projekt ist die Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH, die im Auftrag der Autobahn GmbH agiert, die wiederum für das BDMV handelt. Die Havellandautobahn GmbH & Co. KG, ein Konsortium aus der Invesis GmbH und HABAU Group, hat die Planung und den Bau der Vertragsstrecke zwischen dem Autobahndreieck Pankow und der Anschlussstelle Neuruppin an W&F sowie an die HABAU Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H. als Auftragnehmer vergeben. Die Vertragsstrecke erstreckt sich über insgesamt etwa 64,2 km, von denen 58,8 km für den sechsstreifigen Ausbau der BAB 10 und 29,2 km für die grundhafte Erneuerung der BAB 24 vorgesehen waren. Die Bauzeit erstreckte sich über etwa viereinhalb Jahre, von Quartal 2/2018 bis Quartal 4/2022. Das Projekt setzt AWF von der Planungs- über die Ausführungs- bis in die Erhaltungsphase um (*Tschickardt und Knappe - 2021; Tschickardt - 2024*).

Das Brückenbauwerk, welches im Rahmen der BAB 24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum mit Unterstützung der BIM-Methodik (*Tschickardt und Krause - 2019; Tschickardt und Krause - 2024*) errichtet wird, ist ein Einfeld-Bauwerk, das aus zwei Teilbauwerken besteht. Diese Teilbauwerke weisen Überbauten im Vollplattenquerschnitt aus Stahlbeton auf, die über Betongelenke mittels U-Profil und entsprechender Gelenkbewehrung auf flach gegründeten Kastenwiderlagern ruhen. Die Bauausführung erfolgt in Ortbetonbauweise, wobei der Verkehr auf der Gemeindestraße während der Bauphase aufrechterhalten werden muss.

Abb. 5.2 zeigt eine Aufnahme des fertigen Zustands des "Brückenbauwerk im Zuge der BAB 24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum" mit Blick auf das erste Teilbauwerk.

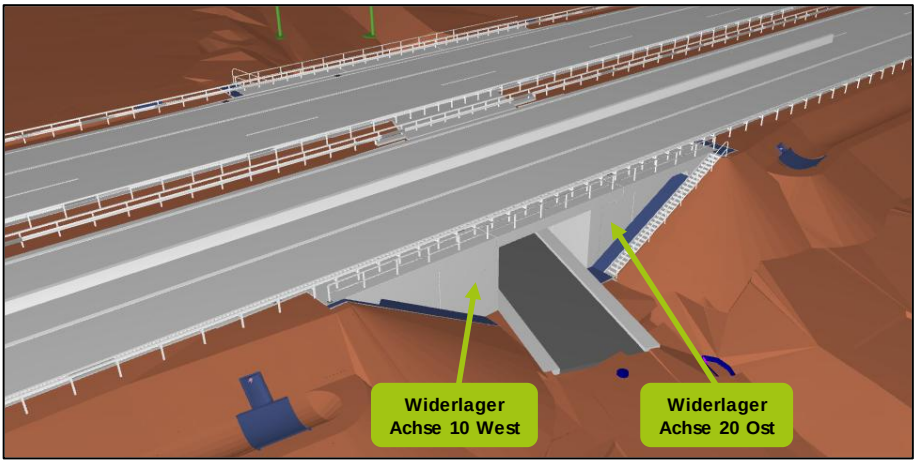


Abb. 5.2: Virtuelle Aufnahme des "Brückenbauwerks im Zuge der BAB 24 über die Gemeindestraße zwischen Kuhhorst und Linum" (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

5.2.1 Bauablauf der Fallstudie

Die Bauphase des ersten Teilbauwerks begann mit der Einrichtung der Baustelle, des Aufbaus des Turmdrehkrans, der Bereitstellung von Containern und der Sicherung des Baugeländes. Anschließend wurde die Zuwegung zur Baustelle hergestellt und die Herstellung der temporären Baubehilfsmaßnahmen zur bauzeitlichen Unterstützung des Bestandsbauwerks erfolgte, um die Anforderungen einer 4+0-Verkehrsführung zu erfüllen. Nach der Einrichtung der 4+0-Verkehrsführung auf der BAB 24 erfolgte der Abtrag des Oberbodens und des Straßenoberbaus, um Platz für die Verbauarbeiten am Mittelstreifen zur Schaffung des Mittellängsverbaus zu schaffen. Daraufhin wurde die Baugrube ausgehoben und es erfolgte der halbseitige Rückbau des Bestandsbauwerks. Nach der Herstellung der Baugrubensohle wurden die Flachgründung und die Widerlager mit Hilfsflügeln errichtet. Die Herstellung des Überbaus erfolgte unter Verwendung eines Traggerüsts. Anschließend wurden die Abdichtung, Schutzschicht, Betonfahrbahn und Kappen hergestellt. Zum Abschluss wurden kleinere Arbeiten, wie die Herstellung der Böschungstreppe, Pflasterarbeiten sowie die Montage des Geländers und weiterer Schutzeinrichtungen durchgeführt. Die Bauphase des zweiten Teilbauwerks verlief in ähnlicher Weise.

Der Detailterminplan (vgl. Abschnitt 2.1.4), der im Rahmen der Bauvorbereitung und -ausführung durch das Bauunternehmen erstellt wurde, bietet eine detaillierte Übersicht auf Tagesleistungsebene. Er enthält präzise Informationen zu einzelnen Arbeitsschritten, wie dem Aufstellen der Schalung, dem Einbau der Bewehrung, dem Schließen der Stellschalung, der Betonierung und dem Abbau der Schalung.

5.2.2 Vorgangsbezogene Initiierung der Datenerfassung

Detaillierungsgrad des 4D-BIM

In Abb. 5.3 sind die Detaillierungsgrade des 4D-BIM veranschaulicht. Für das erste Teilbauwerk stehen ausführliche Teilmodelle des Bauwerks zur Verfügung, einschließlich der Bewehrung und Schalung, die von den verantwortlichen Planern bereitgestellt wurden. Der Detaillierungsgrad des 4D-BIM für das erste Teilbauwerk entspricht einem LO4D 1, da die Visualisierung sowohl Primär- als auch Sekundär-Modellelemente umfasst. Insbesondere werden in der Abbildung die Sekundär-Modellelemente des Fundaments, wie die Bewehrung, mit der Visualisierungskonfiguration "Herstellen" dargestellt. Im Gegensatz dazu sind für das zweite Teilbauwerk nur Teilmodelle des Betonbauwerks vorhanden. Der Detaillierungsgrad des 4D-BIM für das zweite Teilbauwerk entspricht einem LO4D 2, da die Visualisierung ausschließlich auf Primär-Modellelemente beschränkt ist, die mit der Visualisierungskonfiguration "Bewehren" dargestellt werden.

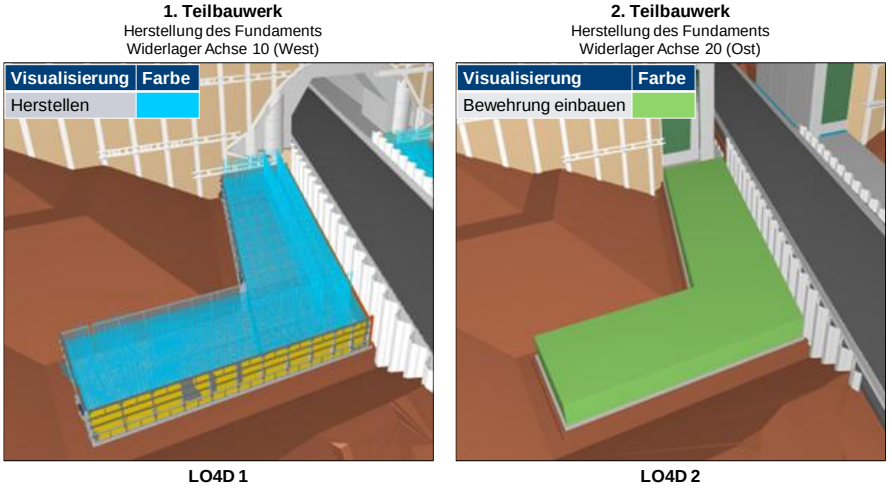


Abb. 5.3: Detaillierungsgrade des 4D-BIM der Fallstudie (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Geometrische Änderung eines Vorgangs

Der Terminplan zur Herstellung des ersten Teilbauwerks der Brücke wurde für die Analyse der geometrischen Änderungen herangezogen. Von den insgesamt 343 Vorgängen, die Verknüpfungen zu einem oder mehreren Modellelementen aufwiesen, wurden 275 Vorgänge mit einer geometrischen Änderung und dem Merkmal DBDA:GeometricChange (vgl. Tab. 4.4) sowie den Merkmalswerten (Herstellung, Rückbau) identifiziert. Dies bedeutet, dass 80% der Vorgänge im 4D-BIM durch eine vorgangsbezogene Initiierung mittels Drohnenerfassung erfasst werden können, was anschließend eine schlanke Baufortschrittskontrolle unterstützt. Nur in den Fällen, in denen Vorgänge weder mit verknüpften Modellelementen noch mit erkennbaren geometrischen Änderungen verknüpft waren, wurden keine Merkmalswerte zur geometrischen Änderung zugewiesen. Die Ergebnisse wurden durch einen visuellen Abgleich bestätigt.

Simplifizierung der Vorgangsgeometrie

Die operative Arbeitsvorbereitung trifft ihre Auswahl der kritischen Flächen für die Erfassung der Vorgänge auf der Grundlage ingenieurtechnischer Kriterien und wählt diese speziell aus, um den Vorgang zu simplifizieren. Dieses Vorgehen erfolgt grundsätzlich für jeden Vorgang, der eine geometrische Änderung aufweist. Im Hinblick auf eine prototypische Umsetzung der entwickelten ereignisorientierten und drohnenbasierten Datenerfassung sowie schlanke Baufortschrittskontrolle in der Bauausführung erfolgt die vorgangsbezogene Initiierung und Erprobung im Rahmen dieser Arbeit für vier Erfassungstage des ersten Teilbauwerks (LO4D 1). Der Detaillierungsgrad LO4D 2 wird anhand der Fallstudie 2 in Abschnitt 5.2 beleuchtet.

In Tab. 5.2 sind ausgewählte Vorgänge der Fallstudie 1 aufgeführt. Die Tabelle enthält das Erfassungsdatum, die Bezeichnung des jeweiligen Vorgangs sowie Informationen zu den kritischen Flächen im Kontext dieser Arbeit.

Tab. 5.2: Auswahl der UG der Fallstudie 1 Vorgangsbezeichnung und Informationen zu den kritischen Flächen

UG	Datum	Vorgangsbezeichnung	Kritische Fläche	
			Anzahl	Ausrichtung
1	10.06.2021	Herstellung der Baugrubensohle: • Bestandshinterfüllung zur 2. Ankerlage abtragen: • Aushub bis +37,35 m ausheben	2	Horizontal
2	14.07.2021	Herstellung der Gründung: • Herstellung des Fundaments Widerlager Achse 10 (West): • Beton einbauen	1	Horizontal
		Herstellung der Gründung: • Herstellung des Fundaments Widerlager Achse 20 (Ost): • Beton einbauen	1	Horizontal
3	02.08.2021	Herstellung des Unterbaus: • Herstellung der Widerlagerwand inkl. Flügelwände Achse 10 (West) • Schalung inkl. Fugenbänder stellen	2	Vertikal
4	27.08.2021	Herstellung des Unterbaus: • Herstellung der Widerlagerwand inkl. Flügelwände Achse 10 (West): • Schalung ausbauen sowie nachbehandeln	1	Vertikal

Die vier Untersuchungsgegenstände (UG) repräsentieren unterschiedliche Ansätze zur Simplifizierung der Vorgangsgeometrie auf kritische Flächen (vgl. Tab. 4.6) und sind nachfolgend erläutert:

- UG 1 konzentriert sich auf die Herstellung der Baugrubensohle und insbesondere auf das Abtragen oder Ausheben der Bestandshinterfüllung und umfasst somit eine Rückbauaktivität. Der Vorgang wurde auf zwei horizontale kritische Flächen simplifiziert, die in eine westliche und eine östliche Ausrichtung unterteilt sind.
- UG 2 umfasst einen Erfassungstag mit zwei separaten Erfassungen, die jeweils den Vorgang der Herstellung der Gründung und speziell die Herstellung der Fundamente der Widerlager Achsen 10 (West) und 20 (Ost) für Betoneinbau umfassen. Beide Vorgänge wurden jeweils auf eine horizontale kritische Fläche simplifiziert. Eine Besonderheit dieses UG besteht darin, dass beide Vorgänge am gleichen Tag erfasst werden sollen, was eine gemeinsame Erfassung ermöglicht.
- UG 3 bezieht sich auf den Einbau der Stellschalung zur Herstellung des Unterbaus und insbesondere auf die Herstellung der Widerlagerwand, einschließlich der Flügelwände an Achse 10 (West). Dieser Vorgang wurde aufgrund der Vielzahl der beteiligten Modellelemente (1114 Objekte) ausgewählt und auf zwei vertikale kritische Flächen simplifiziert.
- UG 4 stellt zum einen eine Rückbauaktivität dar, da die Schalungselemente der Stell- und Schließschalung entfernt werden. Zum anderen stellt der UG ebenfalls eine nicht geometrische Änderung dar, da nach dem Ausschalen die Nachbehandlung des Betons stattfindet. Dieser Vorgang wurde auf eine vertikale kritische Fläche simplifiziert.

5.2.3 Planung und Durchführung der Datenerfassung

In Tab. 5.3 sind die UG der Fallstudie 1 aufgelistet. Die Liste enthält Informationen des jeweiligen Vorgangs. Darüber hinaus werden spezifische Flugparameter der Datenerfassung aufgeführt. Unter Berücksichtigung des Intervalls der Fotografien ergaben sich aus der initialen Überlappung von 70 % die aufgeführten Werte. Des Weiteren sind Eigenschaften der virtuellen Befliegung dargestellt. Die Visualisierung der einzelnen UG mit den kritischen Flächen und der synthetischen Punktwolke sind in Anhang H zu finden.

Tab. 5.3: UG der Fallstudie 1 mit Informationen zur Planung und Durchführung der Erfassung

UG / **Eigenschaften**	**1**		**2**		**3**		**4**
Start	10.06.2021 08:00		14.07.2021 08:00		30.07.2021 08:00		27.08.2021 08:00
Ende	10.06.2021 12:00		14.07.2021 17:00		04.08.2021 17:00		27.08.2021 17:00
Dauer	0,5 Tage		1,0 Tage		4,0 Tage		1,0 Tage
Verknüpfte Objekte	6		1 und 1		1114		1325
Flugparameter							
Abstand	20 m				10 m		
Soll-GSD	0,71 cm/px				0,36 cm/px		
Vorwärts-überlappung	83 %						
Seitwärts-überlappung	77 %						
Geschwindig-keit	0,5 m/s						
Eigenschaften der virtuellen Befliegung							
Kritische Fläche(n)	2		2		2		1
Anzahl der Wegpunkte	35	30	24	15	32	20	24
Länge der Flugroute	170 m	145 m	120 m	75 m	77,5 m	47,5 m	57,5 m
Dauer der Befliegung	340 s	280 s	240 s	150 s	155 s	95 s	115 s

Der Abstand zur kritischen Fläche wurde bei UG 3 und 4 auf 10 m zur Schalungsinnenseite festgelegt, um Kollisionen mit dem nahegelegenen Mittellängsverbau der Baugrubensicherung sowie den Böschungen und Bermen der Baugrube zu verhindern. Zunächst konnten mit einem größeren Abstand (20 m) nicht alle Kollisionen bei der Planung der Wegpunkte vermieden werden. Die Kollisionen wurden durch einen PDCA-Zyklus bereinigt, um eine reibungslose Datenerfassung zu ermöglichen.

Im Rahmen der virtuellen Befliegung wurde die Suchzeit für die Festlegung der Flugroute mit einer Toleranzschwelle von einem Tag festgelegt (vgl. Abschnitt 4.2.4.1). Die Geschwindigkeit der Drohne ermöglicht eine insgesamt angemessene Flugzeit,

wodurch die Erfassung am Ende des Vorgangs in die Zeit der Mittagsruhe oder am Ende des Arbeitstages integriert werden kann.

Gemäß den Erläuterungen in Abschnitt 4.2.4.3 besteht die Möglichkeit, den navigierbaren Raum für die vorgangsbezogene Datenerfassung mithilfe anspruchsvoller Algorithmen wie dem A*-Algorithmus (*Hat et al. - 1968*) und der Verwendung eines *Voxel-Grids* oder *Octree* zu ermitteln. Bei der visuellen Analyse und Prüfung der vorliegenden Fallstudie wurde jedoch bestätigt, dass die Anwendung dieser Technologien keinen zusätzlichen Nutzen bringt.

Die Planung der Wegpunkte steht im Widerspruch zu den gesetzlichen Regularien. Abb. 5.4 veranschaulicht die gesetzlichen Regularien für UG 2 im 4D-BIM, ohne Maßstab. Neben der gewählten Flughöhe, die in diesem Fall gleichzeitig die Grenzhöhe unter Berücksichtigung des seitlichen Abstandes nach *LuftVO - 2015* für den Drohnenflug darstellt, sind auch die kritische Fläche, die Flugverbotszone, der Bereich, in dem Kollisionen mit dem Turmdrehkran auftreten könnten, und der navigierbare Raum schematisch visualisiert. Der Abstand zwischen Drohne und der kritischen Flächen wird hier beispielhaft mit 20 m dargestellt. Ein seitlicher Abstand von mehr als 10 m zur Infrastruktur wird eingehalten (*LuftVO - 2015*).

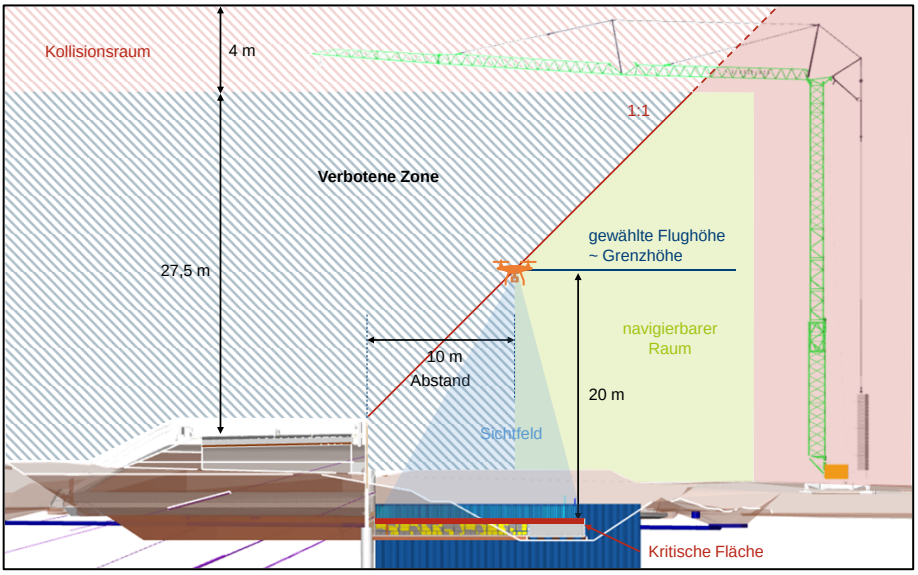


Abb. 5.4: Schematische Visualisierung der gesetzlichen Regularien für UG 2 (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Die Erstellung synthetischer Punktwolken erwies sich unter diesen Restriktionen und der Annahme der Nutzung einer Drohne der offenen Kategorie A1 mit CE-Klassifizierung C0 als nicht realisierbar. Dies resultierte aus dem eingeschränkten Sichtfeld des Sensors, das auf die zulässige maximale Flughöhe (Grenzhöhe) zurückzuführen ist, die vom Abstand zur Infrastruktur abhängt. Aufgrund dieser Einschränkungen konnte keine ausreichende Überlappung erzielt werden, die für die Rekonstruktion erforderlich wäre. Eine praktische Implementierung ist erst nach Anpassung der gesetzlichen Regularien oder unter Verwendung einer Drohne der speziellen Kategorie mit

entsprechender Zulassung und Sicherheitsvorkehrungen möglich. Für die weitere Umsetzung der entwickelten Methodik wird angenommen, dass eine zulassungspflichtige Drohne eingesetzt und die damit verbundenen angemessenen Sicherheitsvorkehrungen eingehalten werden. Aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit ist dies eine akzeptable Annahme, da die Untersuchung des seitlichen Mindestabstands nicht das zentrale Anliegen der Forschungsfrage darstellt.

Variation von UG 3

Für eine Untersuchung wurde eine Variation des UG 3 simuliert, bei der die Stellschalung ausschließlich für die Stirnwand fertiggestellt wurde, während die Flügelwand noch nicht hergestellt ist. Diese Situation soll einen Fortschritt des Bauvorgangs von 50 % darstellen. In Abb. 5.5 ist die Variation des UG in Form der synthetischen Punktwolke (ohne Filterung mittels Interessensvolumen) mit den Wegpunkten sowie den Flugrouten visualisiert. Die Stellschalung der Flügelwand wurde für den Erfassungstag entfernt. Aufgrund dieser Variation konnte in der virtuellen Befliegung nur eine kritische Fläche erfasst und anschließend in der vorgangsbezogenen Punktwolke rekonstruiert werden.

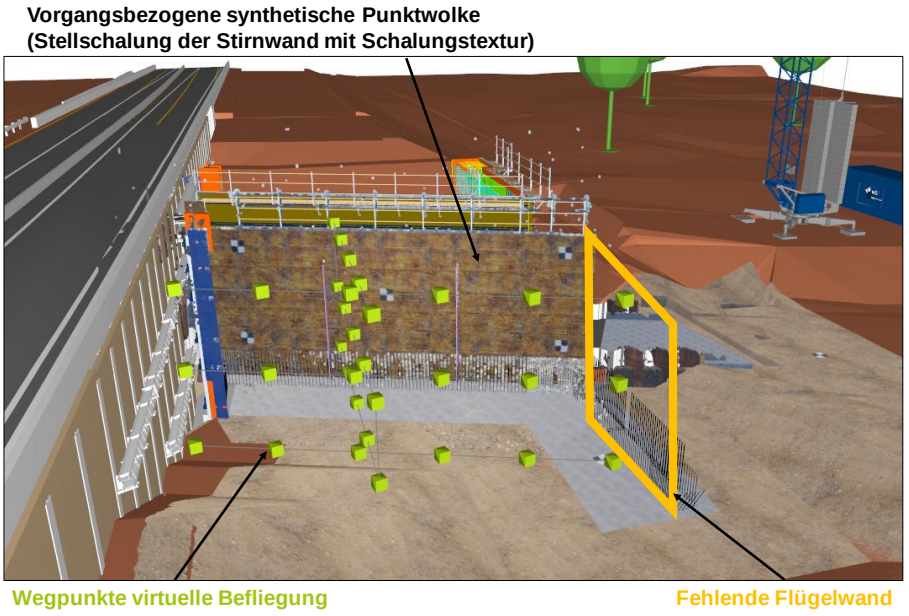


Abb. 5.5: Simulierte Variation des UG 3 (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

5.2.4 Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolke und Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM

Die Auswertung erfolgt gemäß der in Abschnitt 5.1 beschriebenen Vorgehensweise. Eine virtuelle Befliegung der UG 1 bis 4 einschließlich der Variation für UG 3 wurde durchgeführt und konnte anschließend in synthetische vorgangsbezogenen Punktwolken rekonstruiert werden. Die vorgestellte Variation des UG 3 wird im Rahmen der Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM näher betrachtet.

Auswertung der Punktmenge

In Abb. 5.6 sind die UG der Fallstudie 1 mit der Anzahl der Punkte der vorgangsbezogenen synthetischen Punktwolken (Ist) sowie der theoretischen Berechnung (Soll) dargestellt.

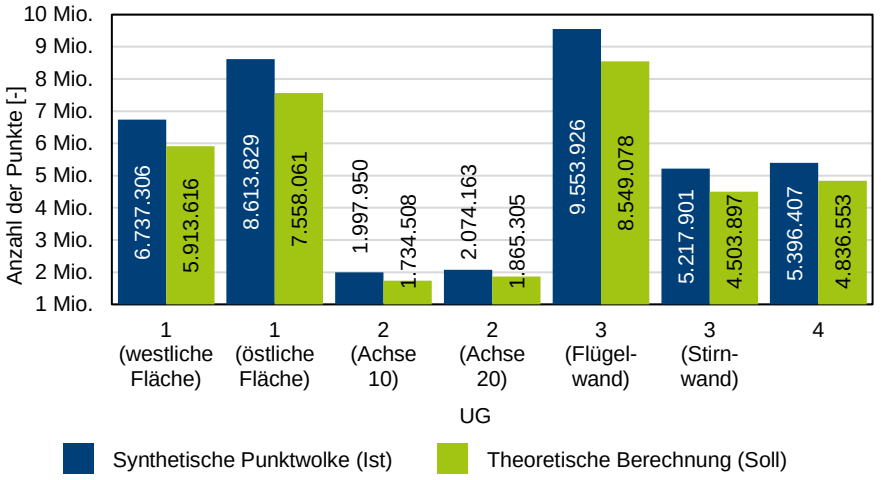


Abb. 5.6: Auswertung der synthetischen und theoretischen Anzahl der Punkte der Fallstudie 1

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Abweichungen der Baufortschrittspunkte in verschiedenen UG analysiert. Bei UG 1 zeigten sich Abweichungen von 12,23 % (westliche Fläche) und 12,26 % (östliche Fläche). Ähnliche Abweichungen wurden bei UG 2 beobachtet, wo die Abweichungen 13,19 % (Achse 10) und 10,07 % (Achse 20) betrugen. Im Fall von UG 3 wurden Abweichungen von 10,52 % (Flügelwand) und 13,68 % (Stirnwand) festgestellt. Schließlich wurde bei UG 4 eine Abweichung von 10,37 % festgestellt. Diese Daten deuten auf Unregelmäßigkeiten zwischen den synthetischen Punktwolken und den theoretischen Berechnungen hin. Die Abweichungen ergeben sich aus den synthetischen Texturen der Bauteile und Objekte, die zum Zeitpunkt der Simulation sichtbar sind. In der Simulation erscheinen Texturen zunächst makellos und homogen, was zu einer potenziellen Reduktion eindeutiger Merkmale in den Fotografien führen könnte. Jedoch verharren Bauteile und Objekte in einem statischen Zustand in der virtuellen Befliegung, wodurch sogar Texturen, wie bspw. die des Baustellenkrans, für die Rekonstruktion genutzt werden können.

Auswertung der GSD

In Abb. 5.7 sind die UG der Fallstudie 1 mit der GSD der vorgangsbezogenen synthetischen Punktwolken (Ist) sowie der theoretischen Berechnung (Soll) dargestellt. Der Abgleich der Ist-GSD und Soll-GSD zeigt, dass bei UG 1 Abweichungen von 6,08 % (westliche und östliche Fläche) festgestellt wurden. Die Abweichungen betrugen bei UG 2 6,43 % (Achse 10) und 4,52 % (Achse 20). Im Falle von UG 3 wurden Abweichungen von 5,50 % (Flügelwand) und 4,57 % (Stirnwand) ermittelt. Schließlich wurde bei UG 4 eine Abweichung von 3,68 % festgestellt. Es ist anzumerken, dass die festgestellten Abweichungen in Relation zur Anzahl der Punkte stehen.

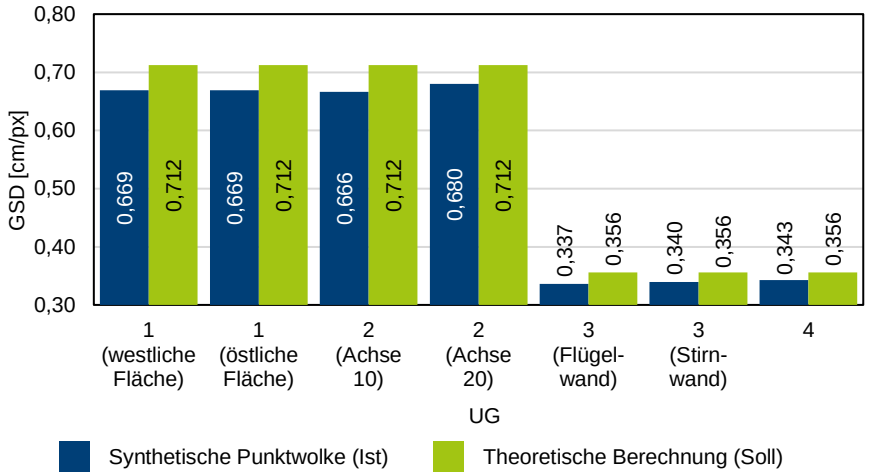


Abb. 5.7: Auswertung der synthetischen und theoretischen GSD der Fallstudie 1

Die Abweichungen bei der Anzahl der Punkte und der GSD werden auf die synthetischen Texturen und die statische Simulation der virtuellen Befliegung zurückgeführt. Im Kontext der Forschungsfrage einer schlanken Baufortschrittskontrolle werden diese Abweichungen als innerhalb des akzeptablen Toleranzbereichs betrachtet.

Auswertung Normalenvektor und Winkel

In Tab. 5.4 sind die Ergebnisse des Skalarproduktes (Richtung und Winkel) der UG zur Fortschrittsmeldung der Fallstudie 1 aufgelistet. Die Richtung des Skalarproduktes gibt an, ob der Normalenvektor der kritischen sowie der rekonstruierten Fläche in dieselbe Richtung zeigen. Dies ist bei allen UG mit marginalen Abweichungen der Fall.

Tab. 5.4: Auswertung der Normalenvektoren und Winkel in Fallstudie 1

UG		Richtung [-]	Winkel [°]	Zulässiger Winkel [°]
1	Westliche Fläche	0,999993	0,20	0,54
	Östliche Fläche	0,999974	0,41	0,69
2	Achse 10	0,999870	0,68	0,76
	Achse 20	0,999655	0,58	0,82
3	Flügelwand	0,999548	0,29	1,01
	Stirnwand	0,999781	0,75	1,21
4	-	0,999922	0,71	1,18

Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM

In der vorliegenden Untersuchung wurden die Fortschrittsmeldungen und die Integration in das 4D-BIM für alle UG, die jeweils vier Erfassungstage, fünf Vorgänge und eine zusätzliche Variation umfassten, untersucht. Tab. 5.5 zeigt die Fortschrittsmeldung für die UG in das 4D-BIM mit Informationen zur Bezeichnung, Ende, Ende Ist und Fertigstellungsgrad des Vorgangs. Bei UG 2 wurde die virtuelle Befliegung für die Vorgänge des Betoneinbaus der Fundamente der Achsen 10 (West) und 20 (Ost) genutzt.

Tab. 5.5: Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM für die UG der Fallstudie 1

UG	Vorgangsbezeichnung	Ende	Ende Ist	Fertigstellungs-grad [%]
1	Bestandshinterfüllung bis zur 2. Ankerlage auf +37,35 m abtragen	10.06.2021 12:00	10.06.2021 12:30	100
2	Beton einbauen des Fundaments der Achse 10	14.07.2021 17:00	14.07.2021 17:30	100
	Beton einbauen des Fundaments der Achse 20	14.07.2021 17:00	14.07.2021 17:30	100
3	Schalung stellen der Widerlager- und Flügelwand der Achse 10	04.08.2021 17:00	04.08.2021 17:30	100
3_V	Schalung stellen der Widerlager- und Flügelwand der Achse 10	04.08.2021 17:00	-	50
4	Schalung ausbauen sowie Nachbehandeln der Widerlager- und Flügelwand der Achse 10	27.08.2021 17:00	27.08.2021 17:30	100

Zur weiteren Validierung erfolgte ein visueller Abgleich zwischen dem Baufortschritt an den Erfassungstagen und der 4D-Simulation. Hierbei wurde der tatsächliche Fortschritt, der mittels herkömmlicher Methoden wie dem Bautagesbericht erfasst wurde, mit dem durch die virtuelle Befliegung erfassten Fortschritt verglichen. Durch die Rekonstruktion der Flächen und die Überprüfung der kritischen Flächen auf Basis der Normalenvektoren war es möglich, den Fortschritt für alle UG zu melden. Basierend auf den virtuellen Befliegungen wurden die Merkmale *AcquisitionDate* und *AcquisitionTime* als Merkmal DBDA:ActualFinish der einzelnen Vorgänge gesetzt. Darüber hinaus wurde der Fertigstellungsgrad im Merkmal DBDA:PercentComplete entsprechend der Rekonstruktion der kritischen Flächen festgelegt. In der vorliegenden Untersuchung wurde angenommen, dass eine virtuelle Befliegung um 12:30 Uhr für UG 1 und um 17:30 Uhr für UG 2, 3 und 4 durchgeführt wurde, sodass eine kurzzyklische Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM zu Beginn des nächsten Arbeitstages ermöglicht wird.

Bei der untersuchten Variation von UG 3, wie in Abb. 5.5 dargestellt (siehe 3_V), konnte anstatt zwei ausschließlich eine kritische Fläche rekonstruiert werden. Angesichts der Tatsache, dass die operative Arbeitsvorbereitung die Simplifizierung basierend auf einer identischen Priorisierung der kritischen Flächen vornahm, wird der Vorgang und somit auch der Fortschritt zu 50 % gemeldet.

Abb. 5.8 stellt die Fortschrittsmeldung der simulierten Variation des UG 3 dar. Während der Baufortschritt des Vorgangs noch nicht 100 % erreicht hat, werden die entsprechenden Modellelemente in der Farbe Orange eingefärbt. Nach Abschluss des Vorgangs erhalten sie ihre ursprüngliche Farbe.

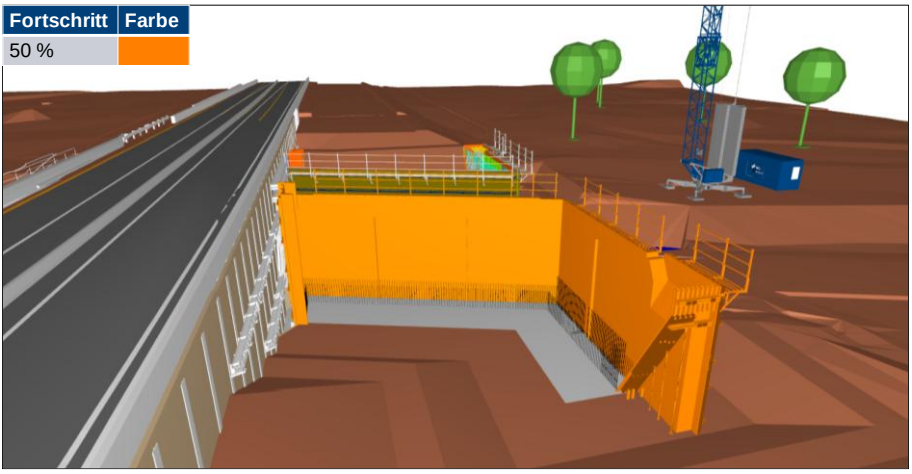


Abb. 5.8: Fortschrittsmeldung der simulierten Variation des UG 3 (Bildschirmaufnahme *think-project - 2023*)

5.3 Projekt "Ersatzneubau Brücke Lohring Bochum"

Die Stadt Bochum fungiert als Auftraggeber und Vorhabenträger für das Projekt "Ersatzneubau Brücke Lohring Bochum". Die Durchführung des Bauvorhabens liegt in der Verantwortung einer Arbeitsgemeinschaft, bestehend aus den Firmen W&F und der Zwickauer Sonderstahlbau GmbH. Das Projekt beinhaltet den Bau einer Stahlverbundbrücke mit einer Gesamtlänge von 102 m und einer Breite von knapp 15 m. Die Brücke überspannt eine Hauptstrecke der Deutschen Bahn AG mit neun Gleisen und erreicht eine Höhe von etwa 17 m. Die Bauarbeiten erstreckten sich über etwa zweieinhalb Jahre, von Quartal 4/2021 bis Quartal 1/2024. Die Brücke verbindet die Harpener Straße, verlängert den Steinring und wurde als Stahlverbundkonstruktion mit luftdicht verschweißten Hohlkästen und einer darauf liegenden Betonfahrbahnplatte geplant. Zur Verbesserung der Ästhetik und zur Verringerung der Stützweite sind V-förmige Stahlstützen als Zwischenunterstützung vorgesehen, die integral mit dem Überbau verbunden sind. Dadurch ergeben sich Stützweiten von 41,0, 20,0 und 41,0 m zwischen den Achsen 10, 20 und 30.

Abb. 5.9: Aufnahme des "Ersatzneubaus Brücke Lohring Bochum“ (*Zier - 2023*)

Abb. 5.9 zeigt eine Aufnahme des fertigen Zustands der "Ersatzneubaus Brücke Lohring Bochum" mit Blick auf das Widerlager Achse 30 sowie die V-förmigen Stahlstützen der Achse 20 am 13.10.2023. Fallstudie 2 konzentriert sich auf die Realisierung des Widerlagers in Achse 30, wobei besonderes Augenmerk auf den Ausbau der äußeren Stellschalung an der Stirnwand des Widerlagers in Achse 30 gelegt wird, da nach Fertigstellung des Vorgangs mit dem Stahlbauüberbau begonnen werden kann.

5.3.1 Bauablauf der Fallstudie

Nach den Bauvorbereitungen und der Freimachung des Baufeldes wurden Verbau- und Gründungsarbeiten in den Achsen 10, 20 und 30 durchgeführt. Nach Fertigstellung der Stützen in Achse 20 des Mittelbereichs des Stahlbaus erfolgte die Vormontage von Entwässerungsrohren und die Installation der Längsträger. Nach Verschweißung des Stahlbaus und Korrosionsschutzarbeiten wurden Betonfertigteile eingehoben, während die Widerlagerbereiche bereits hinterfüllt waren. Die restlichen Arbeiten, darunter Ortbetonergänzung, Abdichtung, Brückenausstattung und Belagsarbeiten, wurden während des laufenden Bahnbetriebs durchgeführt. Parallel dazu wurden straßenbauliche Arbeiten in den angrenzenden Bereichen durchgeführt. Der Rahmenterminplan, bereitgestellt vom Auftraggeber, dient dem Auftragnehmer als Grundlage für die Erstellung des Bauablaufs und des Bauzeitenplans. Der daraus resultierende Detailterminplan (vgl. Abschnitt 2.1.4) zur Steuerung des Bauablaufs, erstellt vom ausführenden Bauunternehmen, bietet analog zur Fallstudie 1 eine tagesgenaue Aufschlüsselung der Arbeitsabläufe.

5.3.2 Vorgangsbezogene Initiierung der Datenerfassung

Detaillierungsgrad des 4D-BIM

In Abb. 5.10 ist der Detaillierungsgrad des 4D-BIM der Fallstudie 2 veranschaulicht. Die Modellierung und Visualisierung im 4D-BIM für dieses Projekt beschränkt sich hauptsächlich auf primäre Elemente, insbesondere Betonbauteile, was zu einer begrenzten Detailtiefe führt. Diese Detaillierungsgrad entspricht einem LO4D 2.

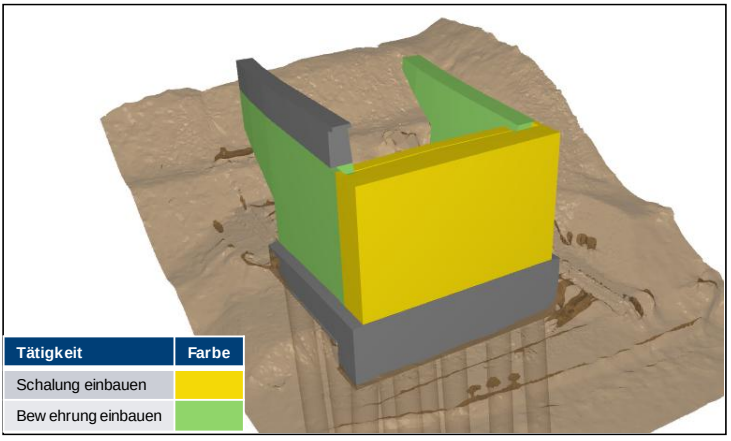


Abb. 5.10: Detaillierungsgrad des 4D-BIM der Fallstudie 2 für zwei Beispielvorgänge (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Geometrische Änderung eines Vorgangs

Ein Auszug aus dem Detailterminplan der operativen Projektabwicklung wurde für die Analyse der geometrischen Änderungen herangezogen. Der Fokus des Ausschnitts lag auf der Herstellung der Widerlagerwand der Achse 30, da das BIM ausschließlich für diesen Bereich erstellt wurde. Dieser Ausschnitt besteht aus 33 Vorgängen, die Verknüpfungen zu den primären Modellelementen aufwiesen, in 6 Sammelvorgängen gruppiert. Für 85 % der Vorgänge wurde eine geometrischen Änderung und dem Merkmal DBDA:GeometricChange sowie den Merkmalswerten (Herstellung, Rückbau) identifiziert. Mit Blick auf eine Fokussierung auf kritische und wichtige Vorgänge, deren präzise Überwachung und Kontrolle entscheidend für den Baufortschritt und die Qualitätssicherung sind, kann dies als wichtiger Schritt in einem schrittweisen Implementierungsprozess betrachtet werden.

Simplifizierung der Vorgangsgeometrie

Im Rahmen der Herstellung der Wände einschließlich Kammer- und Flügelwände der Achse 30 wurde in der vorliegenden Fallstudie der Schwerpunkt auf die Herstellung der Stirnwand gesetzt. Im Hinblick auf den Detailierungsgrad LO4D 2 liegt die Verantwortung der operativen Arbeitsvorbereitung darin, die Vorgänge des Sammelvorgangs gezielt zu erfassen. Zur Validierung der entwickelten Methodik wurde der Vorgang "Schließschalung (außen) ausbauen" der Stirnwand ausgewählt. Die Fertigstellung des Vorgangs ist entscheidend für den weiteren Baufortschritt, da im Anschluss daran die Lager hergestellt werden können und der Stahlbau fortgesetzt werden kann.

In Tab. 5.6 ist der ausgewählte Vorgang der Fallstudie 2 aufgeführt. Die Auflistung enthält das Erfassungsdatum, die Bezeichnung des Vorgangs sowie Informationen zur kritischen Fläche.

Tab. 5.6: Ausgewählter Vorgang der Fallstudie 2 mit Datum der Erfassung, Vorgangsbezeichnung und Informationen zu der kritischen Fläche

Datum	**Vorgangsbezeichnung**	**Kritische Fläche**	
		Anzahl	**Ausrichtung**

17.02.2023	Herstellung Widerlager Achse 30:
	• Herstellung Wände Widerlager, einschließlich Kammer- und Flügelwände:
	  • Herstellung Stirnwand:
	  Schließschalung (außen) ausbauen
		1	Vertikal

5.3.3 Planung und Durchführung der Datenerfassung

Der Vorgang dient als Grundlage für zwei UG, die im Rahmen der Fallstudie 2 untersucht werden:

- UG 5: Eine virtuelle Befliegung mit synthetischer Datenerfassung zur weiteren Erprobung der Methodik.
- UG 6: Eine reale Befliegung mit einer Drohne zur Erstellung einer photogrammetrischen Punktwolke zur Validierung der Methodik.

Die synthetischen Daten wurden unter Anleitung im Rahmen der Betreuung der Masterarbeit in *Lermen und Tschickardt - 2023* erstellt, während die reale Befliegung als Teil dieser Arbeit durchgeführt wurde.

Die Gleise der Deutschen Bahn AG verlaufen unmittelbar unter dem Ersatzneubau der Brücke Lohring. Aufgrund der dringenden Notwendigkeit, die gesetzlich vorgeschriebenen Sicherheitsabstände zu den Gleisen einzuhalten, wurde beschlossen, eine zusätzliche Sicherheitszone einzurichten. Zu diesem Zweck wurden folgende Flugparameter festgelegt:

- Abstand von 3 m,
- Soll-GSD von 0,11 cm/px,
- Überlappung von 70 % und
- Geschwindigkeit von 0,2 m/s.

Die Parameterstudie hat einen Minimalabstand von bis zu 5 m untersucht, wobei jedoch die Ergebnisse aufgrund des linearen Zusammenhangs extrapolierbar sind. Die niedrige Geschwindigkeit wurde gewählt, um in Bezug auf die Nähe zu den Gleisen der Deutschen Bahn AG angemessene Sicherheitsvorkehrungen zu gewährleisten. Gleichzeitig konnte dadurch immer noch eine vernünftige Flugzeit mit 169 s sichergestellt werden. Aufgrund der technischen Spezifikationen der eingesetzten Drohne (DJI Mini 3 Pro) für die reale Befliegung, bei der das kleinste einstellbare Intervall auf 2 s festgelegt war, ergab sich eine angewendete Vorwärtsüberlappung von 91 % und eine Seitenüberlappung von 88 %. Diese Überlappungen wurden erreicht, indem 212 Wegpunkte über die kritische Fläche verteilt wurden.

Die geplante Suchzeit zur schlanken Baufortschrittskontrolle wurde mit einer Toleranzschwelle von einem Tag festgelegt.

UG 5: Virtuelle Befliegung mit synthetischer Datenerfassung

Die virtuelle Befliegung erfolgte in der Software Blender, Version 4.0.2 (*Blender - 2023*). Die Texturierung der Widerlagerwand wurde so gewählt, dass sie die Optik von Beton und Schaltafeln (*Sillet - 2023*) vermitteln.

In Abb. 5.11 wird UG 5 visualisiert. In Teil a) sind der Vorgang und das verknüpfte Objekt dargestellt, sowie weitere Objekte, die den Ausbau der Schließschalung repräsentieren, wobei die kritische Fläche hervorgehoben ist. Zusätzlich sind die Wegpunkte und die Flugrouten zu sehen. In Teil b) wird der Vorgang in Form einer vorgangsbezogenen Punktwolke gezeigt, die bereits nach der kritischen Fläche gefiltert wurde.

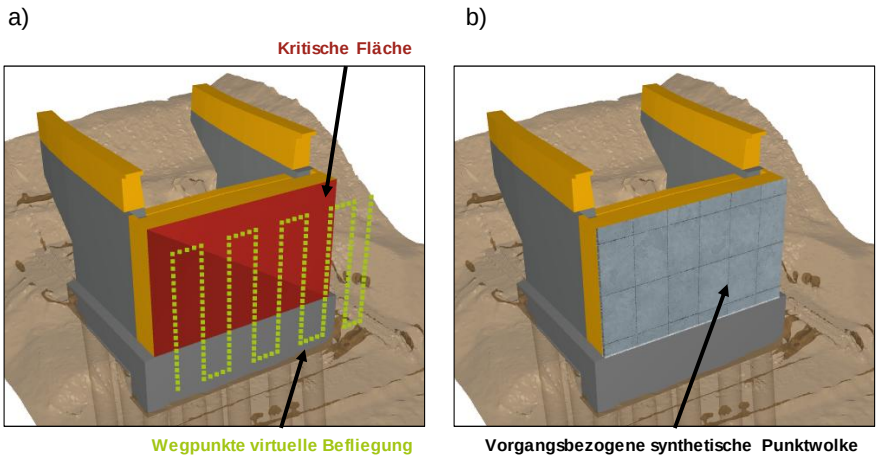


Abb. 5.11: Visualisierung des UG 5 mit Flugplanung a) und in Form der vorgangsbezogenen synthetischen Punktwolke in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

UG 6: Reale Befliegung mit photogrammetrischer Drohne

Nachdem die synthetische Befliegung die erwarteten Ergebnisse geliefert hat, sollte zur Validierung der Methodik eine reale Befliegung durchgeführt werden. Diese sollte die vorgangsbezogene Initiierung der Datenerfassung unter Berücksichtigung der Suchzeit vor dem geplanten Abschluss des Vorgangs (Freitag, den 17.02.2023 17:00 Uhr) umfassen, um eine mögliche frühzeitige Fertigstellung des Vorgangs identifizieren zu können. Aufgrund ungünstiger Wetterbedingungen konnte dies jedoch nicht erfolgen. Ebenfalls war eine reale Befliegung unmittelbar nach geplantem Abschluss des Vorgangs nicht möglich. Die reale Befliegung wurde schlussendlich am nächsten Werktag, Montag, den 20.02.2023 12:00 Uhr durchgeführt. Am Erfassungstag herrschte leicht bewölktes Wetter mit Temperaturen zwischen 5 und 8 Grad Celsius. Es gab keinen Niederschlag, jedoch traten gelegentlich Böen mit Geschwindigkeiten von bis zu 18 km/h auf, was die Datenerfassung beeinträchtigte. Die Geschwindigkeit der Drohne variierte zwischen 0,1 und 0,3 m/s, was zu Abweichungen bei den Wegpunkte führte.

Der Verfasser dieser Arbeit hat sich bewusst dafür entschieden, diesen Vorgang dennoch zu untersuchen. Zum einen ermöglicht die Betrachtung dieser Herausforderungen unter realen Bedingungen eine gründliche Untersuchung und Validierung der Methodik. Zum anderen ist die Fertigstellung dieses Vorgangs entscheidend für den weiteren Baufortschritt, insbesondere für die Herstellung der Lager sowie des Stahlbauüberbaus.

In Abb. 5.12 ist der reale Bauzustand im Projekt am Tag der Erfassung zu sehen. Neben dem Betonbauteil des Widerlagers sind in der Abbildung auch Gerüste mit Treppenaufgängen und Absturzsicherungen zu erkennen, die am Widerlager konstruktiv befestigt sind.

Abb. 5.12: Bauzustand im Projekt "Ersatzneubau Brücke Lohring Bochum" am 20.02.2024

In Abb. 5.13 wird UG 6 visualisiert. In Teil a) werden statt der geplanten Wegpunkte und Flugroute die tatsächlichen Wegpunkte und somit die Kamerapositionen der erfassten Fotografien der realen Befliegung dargestellt. In Teil b) wird die reale Befliegung in Form der photogrammetrischen Punktmenge gezeigt, die bereits nach der kritischen Fläche gefiltert wurde.

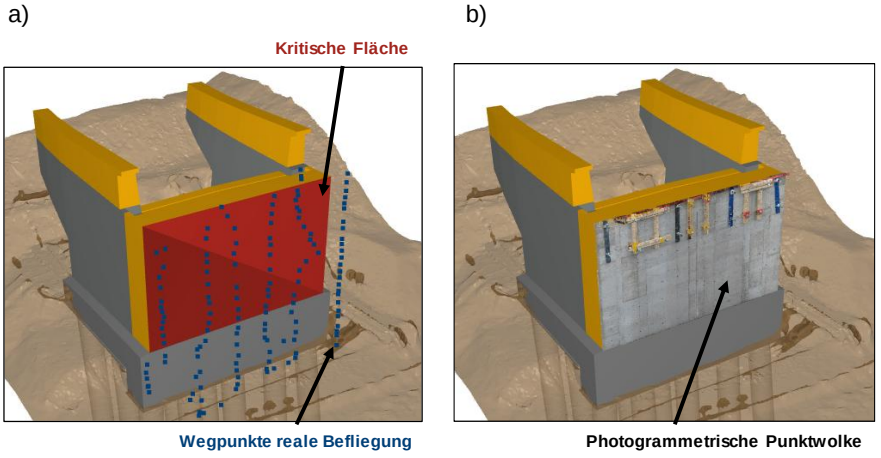


Abb. 5.13: Visualisierung des UG 6 mit der realen Befliegung im 4D-BIM in a) und in Form der photogrammetrischen Punktmenge in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

5.3.4 Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolke und Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM

Neben der spezifischen Auswertung der Punktwolke und der Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM wird zunächst ein Vergleich zwischen der virtuellen und der realen Befliegung durchgeführt.

Vergleich der virtuellen und realen Befliegung

Abb. 5.14 enthält eine Darstellung der Draufsicht mit Wegpunkten der virtuellen und der realen Befliegung. Die geflogene Flugroute weist teils starke Abweichungen von der geplanten Flugroute auf.

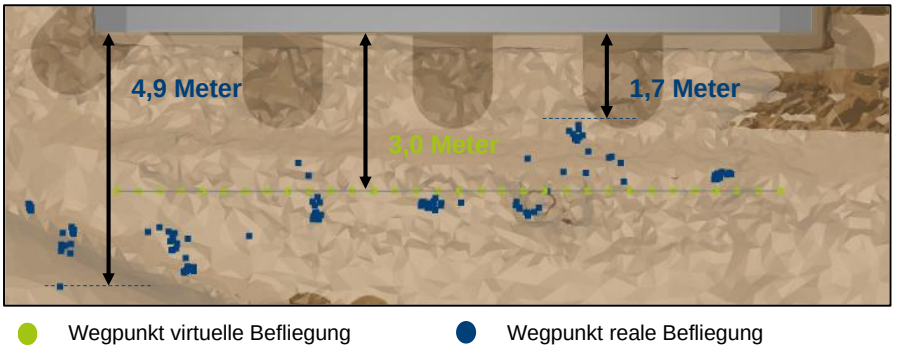


Abb. 5.14: Darstellung einer Draufsicht mit Wegpunkten der Fallstudie 2 (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Die Abweichungen resultieren hauptsächlich aus starken Böen mit Geschwindigkeiten von bis zu 18 km/h während der Befliegung, die die Position der Drohne beeinträchtigten und zu erheblichen Unterschieden bei den Wegpunkten und somit in der Seitenüberlappung führten. Die tatsächliche Überlappung weicht teilweise erheblich von der geplanten ab und erreichte in einigen Fällen nur 45 %. Ein weiterer Grund für die Abweichung der realen Flugroute war der manuelle Flugmodus der Drohne (DJI Mini 3 Pro), die keine automatisierte Befliegung entlang der geplanten Wegpunkte ermöglichte. Durch die manuelle Steuerung kam es zu Schwankungen in Geschwindigkeit, Intervall und Flugroute. Trotz dieser Herausforderungen und Abweichungen konnte eine vorgangsbezogene Punktwolke erfolgreich erfasst und die kritische Fläche rekonstruiert werden. Ursprünglich war ein Abstand von 3 m zur kritischen Fläche und zum Bauwerk vorgesehen. In der realen Befliegung ergaben sich jedoch aufgrund der Abweichungen Abstände im Bereich von 1,7 bis 4,9 m. Der Durchschnittswert aller Kamerapositionen bzw. Wegpunkte der Befliegung liegt bei 3,14 m.

Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolken

In Abb. 5.15 sind die UG der Fallstudie 2 mit der Anzahl der Punkte sowie GSD der synthetischen Punktwolken (Ist-Synt), der theoretischen Berechnung (Soll) und der realen Befliegung (Ist-Real) dargestellt. Bei UG 5 beträgt die Abweichung zwischen der synthetischen und theoretischen Anzahl an Punkten 4,24 %. Ebenso zeigt sich eine geringe Abweichung von 1,90 % der GSD. Die Abweichungen bei der Anzahl der Punkte sowie der GSD bei UG 5 sind geringfügig und entsprechen den Ergebnissen der durchgeführten Parameterstudie sowie denen der Fallstudie 1. Im Hinblick auf den geringeren Abstand zur kritischen Fläche sind die Abweichungen weniger signifikant. Bei UG 6 treten hingegen größere Abweichungen auf. Die Anzahl der Punkte zwischen der theoretischen Berechnung und der realen Punktwolke weicht um 14,32 % ab, während die GSD um 8,55 % abweicht.

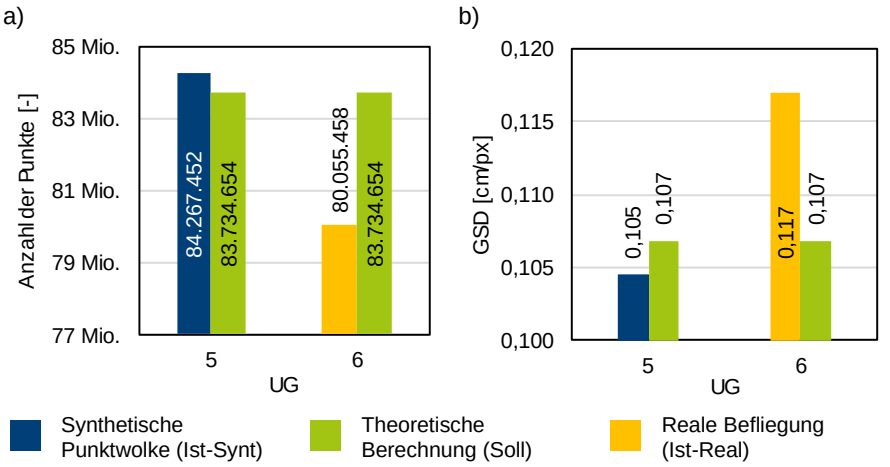


Abb. 5.15: Auswertung der vorgangsbezogenen Punktwolken der Fallstudie 2

Eine Relation zwischen der Anzahl der Punkte und der GSD ist sowohl bei UG 5 als auch bei UG 6 festzustellen. Die Abweichungen bei der Anzahl der Punkte sowie der GSD bei UG 6 sind auf die Böen zurückzuführen. Diese Winde beeinflussten nicht nur die Wegpunkte, sondern auch unmittelbar den Abstand zur kritischen Fläche, wodurch die Drohne nicht konstant auf dem geplanten Abstand von 3 m gehalten werden konnte. Die Abweichungen bei der Anzahl der Punkte und GSD lassen sich des Weiteren auf Verdeckungen durch die Absturzsicherung und deren strukturelle Befestigung an der kritischen Fläche zurückführen. Diese Verdeckungen führten zu Leerstellen in der Punktwolke, nachdem diese gemäß dem Interessensvolumen gefiltert wurde, siehe Abb. 5.16. Die Abbildung stellt die vorgangsbezogene Punktmenge des UG 6 mit Farbskala zur Auswertung der Anzahl der Nachbarn dar. Ebenfalls sind undichtere Bereiche auf der rechten Seite sichtbar, die auf die abweichende Überlappung zurückzuführen sind.

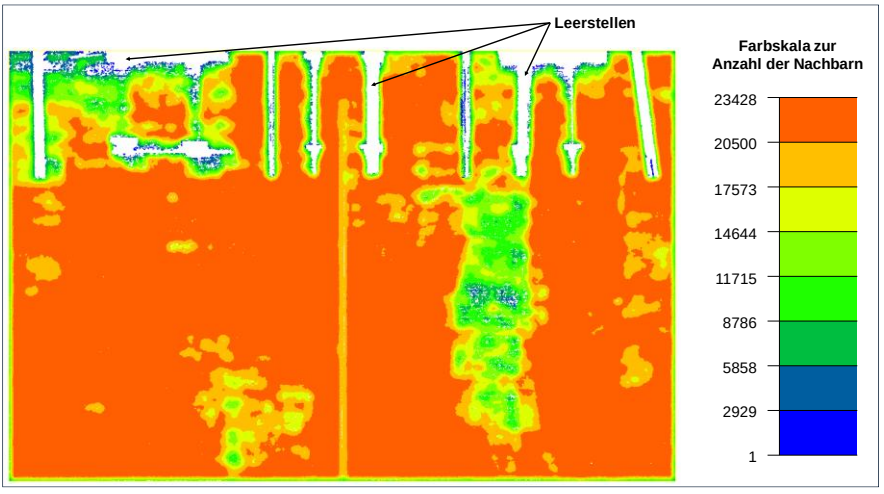


Abb. 5.16: Auswertung der vorgangsbezogenen Punktmenge des UG 6 (Bildschirmaufnahme *CloudCompare - 2023*)

Auswertung Normalenvektor und Winkel

In Tab. 5.7 sind die Ergebnisse des Skalarprodukts (Richtung und Winkel) der kritischen Fläche der UG der Fallstudie 2 im Rahmen des Fortschrittsmeldung dargestellt. Der Auflistung ist zu entnehmen, dass sowohl bei der virtuellen Befliegung (UG 5) als auch bei der realen Befliegung (UG 6) die kritische Fläche im Rahmen des zulässigen Winkels aus der vorgangsbezogenen Punktmenge rekonstruiert wurde und somit eine Fortschrittsmeldung erfolgen konnte.

Tab. 5.7: Auswertung der Normalenvektoren und Winkel in Fallstudie 2

UG		Richtung [-]	Winkel [°]	Zulässiger Winkel [°]
5	Virtuelle Befliegung	0,999717	0,68	1,17
6	Reale Befliegung	0,999921	0,72	1,17

Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM

In Tab. 5.8 wird die Fortschrittsmeldung für die UG des Vorgangs "Schließschalung (außen) ausbauen" im 4D-BIM dargestellt. Die Tabelle enthält Informationen zum geplanten Ende, dem tatsächlichen Ende und dem Fertigstellungsgrad des Vorgangs. Für UG 6 wurde das Datum der realen Befliegung als Referenz herangezogen.

Tab. 5.8: Fortschrittsmeldung in das 4D-BIM für die UG der Fallstudie 2

UG		Ende	Ende Ist	Fertigstellungs-grad [%]
5	Virtuelle Befliegung	17.02.2023 17:00	17.02.2023 17:30	100
6	Reale Befliegung	17.02.2021 17:00	20.02.2023 12:00	100

Die Fortschrittsmeldung in beiden Fallstudien ist zufriedenstellend. Die vorgangsbezogene Punktwolke wurde in beiden Fällen vollständig rekonstruiert und der Vorgang konnte unter Berücksichtigung der Toleranzschwelle (1 Werktag) mit 100 % Fertigstellungsgrad gemeldet werden.

5.4 Schlussbetrachtung der Fallstudien

Die Erprobung und Validierung der Methodik durch die beiden Fallstudien war erfolgreich. Insbesondere bei Fallstudie 2 betonen die Ergebnisse die Robustheit der angewandten Methodik und verdeutlichen die Fähigkeit, trotz der Herausforderungen bei der Datenerfassung unter realen Bedingungen eine Fortschrittsmeldung zu ermöglichen und somit zufriedenstellende Ergebnisse zu erzielen. Bei den vier UG in Fallstudie 1 und dem fünften UG in Fallstudie 2 wurde eine virtuelle Befliegung mit synthetischer Datenerfassung auf Grundlage der simplifizierten kritischen Flächen wie vorgesehen durchgeführt. Beim sechsten UG in Fallstudie 2 wurde anschließend eine reale Befliegung durchgeführt und trotz Einschränkungen mit den gewünschten Ergebnissen abgeschlossen. In allen sechs UG konnten vorgangsbezogene Punktwolken erstellt werden, die spezifisch auf die jeweiligen Vorgänge bezogen sind. Diese Punktwolken wurden für die schlanke Baufortschrittskontrolle verwendet und haben gezeigt, dass die gesammelten Daten qualitativ ausreichend detailliert waren, um eine präzise Fortschrittsmeldung innerhalb der Toleranzschwelle zu ermöglichen.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung eines Beitrags für eine vorgangsbezogenen Initiierung der Datenerfassung mit anschließender schlanken Baufortschrittskontrolle unter Verwendung eines 4D-BIM. Es erfolgte unteranderem eine Priorisierung von Erfassungstechnologien für eine automatisierte Datenerfassung im Brückenbau. Die entwickelte Methodik stellt eine prozessorientierte Vorgehensweise zur Verfügung, die einen Beitrag für eine ereignisorientierte und drohnenbasierte Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle auf Grundlage eines 4D-BIM im Brückenbau liefert.

Im Rahmen von Kapitel 2 werden die wesentlichen Grundlagen erörtert, die im Zusammenhang mit der vorgangsbezogenen Initiierung der Datenerfassung und der anschließenden schlanken Baufortschrittskontrolle unter Verwendung eines 4D-BIM stehen. Dazu gehören die Grundlagen von BIM im Bauwesen, des Datenaustauschs, geometrische Repräsentationen, modellbasierte Terminplanung, Erfassungstechnologien und -plattformen sowie die aktuelle Gesetzgebung zu Drohnen in Deutschland. Es wird aufgezeigt, dass neben der mangelnden anwendungsfallbezogenen Eignung von Erfassungstechnologien auch die Bedeutung der Planung der Datenerfassung und einer modellbasierten Baufortschrittskontrolle auf Basis eines 4D-BIM deutlich wird. Des Weiteren wird dargelegt, dass die Einbindung von Prinzipien der Lean Construction Methode eine Optimierung der Datenerfassung und Baufortschrittskontrolle ermöglichen kann.

In Kapitel 3 erfolgt eine Potenzialanalyse bestehender Erfassungstechnologien. Hierzu wurde eine NWA durchgeführt, um verschiedene Erfassungstechnologien anhand gemeinsamer Kriterien zu vergleichen und Empfehlungen für bauausführende relevante AWF zu geben. Die Ergebnisse der NWA zeigen, dass das größte Potenzial für eine automatisierte Datenerfassung im Bereich des Brückenbaus bei den Erfassungstechnologien LiDAR und Photogrammetrie mit Drohnen liegt. Als entscheidende Kriterien für die Beurteilung der Erfassungstechnologien wurden der Automatisierungsgrad (LOADA) und der erforderliche Aufwand identifiziert. Es wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen verschiedenen AWF und der Auswahl von Erfassungstechnologien festgestellt. Basierend auf den Ergebnissen der NWA wurde anschließend mittels einer empirischen Studie der aktuelle Einsatz von Drohnen erfasst. Ziel war es, den Einsatz von Drohnen sowie die Erfahrungen von Vermessungsingenieurinnen und -ingenieuren zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen, dass nur 2,2 % der befragten Personen Drohnen täglich nutzen, während 28,0 % sie wöchentlich oder monatlich einsetzen. Die bevorzugte Erfassungstechnologie ist dabei hauptsächlich die Drohne mit Photogrammetrie mit 73,1 %, im Gegensatz zu Drohnen mit LiDAR mit 2,7 %. Ein ähnliches Muster zeigt sich bei den Unternehmensbeständen, wobei 74,2 % Photogrammetrie Drohnen, 2,2 % LiDAR Drohnen und 12,6 % beide Erfassungstechnologien besitzen. Die Photogrammetrie Drohne erfreut sich in AWF wie der Baufortschrittskontrolle größerer Beliebtheit, hauptsächlich aufgrund ihrer Kosteneffizienz und der hervorragenden Präzision, insbesondere in Verbindung mit RTK-Modulen.

Die identifizierte Erfassungstechnologie dient als Ausgangspunkt für die Entwicklung einer vorgangsbezogenen Initiierung der Datenerfassung mit anschließender schlanken Baufortschrittskontrolle unter Verwendung eines 4D-BIM in Kapitel 4. Die Methodik basiert auf dem Pull-Prinzip, bei dem Informationen zeitgenau in den Prozess gezogen werden. Zudem wird angenommen, dass jeder Vorgang und jede sichtbare Aktivität auf planare Flächen simplifiziert werden können. Das Kapitel umfasst die Einführung eines spezifischen Fachmodells für die drohnenbasierte Datenerfassung mit Klassen und Merkmalen für die Informationsdomänen "*geometry*" und "*activities*", sowie zwei Detaillierungsgrade auf der Ebene der Detailterminplanung eines 4D-BIM. Eine Vorgehensweise zur Initiierung einer vorgangsbezogenen Planung und Datenerfassung wird entwickelt, bei der geometrische Änderungen von Vorgängen identifiziert werden. Dieser Schritt ist erforderlich, da allein eine Verknüpfung im 4D-BIM zwischen einem Vorgang und einem Modellelement nicht ausreichend ist. Die Planung der Datenerfassung für kritische Flächen umfasst die Festlegung von Befliegungszeitpunkten, Wegpunkten, Flugrouten und navigierbarem Raum. Eine kontinuierliche Verbesserung der Datenerfassung (PDCA-Zyklus) wird durch eine virtuelle Befliegung simuliert. Eine synthetische Studie konzentrierte sich zunächst auf die Entwicklung eines geeigneten Versuchsaufbaus sowie auf die Bestimmung von Flugparametern und Auswertungsparametern für die vorgangsbezogene Punktwolke zur Baufortschrittskontrolle. Es wird unter anderem empfohlen, den Abstand zur kritischen Fläche auf weniger als 20 m festzulegen und die Drohne mit einer Geschwindigkeit von höchstens einem Meter pro Sekunde fliegen zu lassen. Die schlanke Baufortschrittskontrolle basiert auf den festgelegten kritischen Flächen und der vorgangsbezogenen Punktwolke. Zunächst wird das Interessensvolumen anhand eines Toleranzwerts (25 cm) und der kritischen Fläche konstruiert, um eine vorgangsbezogene Punktmenge zu filtern. Nach der Rekonstruktion der kritischen Fläche erfolgt durch einen Abgleich der Ausrichtung der rekonstruierten und der kritischen Fläche eine Fortschrittsmeldung ins 4D-BIM. Die Entwicklung einer Softwareintegration wird beschrieben, um die entwickelte Methodik prozessorientiert und praxisgerecht im 4D-BIM zu integrieren.

Abschließend wird in Kapitel 5 die Anwendbarkeit der entwickelten Methodik demonstriert. Zunächst wurde die Planung der Datenerfassung durch eine virtuelle Befliegung erfolgreich erprobt und anschließend in einer realen Befliegung validiert. Sowohl die synthetische als auch die reale Punktwolke der Fallstudien wurden erfolgreich rekonstruiert und der Baufortschritt konnte im Rahmen der Toleranzschwelle von einem Tag gemeldet werden. Trotz der wetterbedingten Herausforderungen konnte unter realen Bedingungen eine Fortschrittsmeldung bei der Datenerfassung ermöglicht werden. Im Ergebnis hat sich die Methodik als geeignet und praxistauglich erwiesen.

Die Methodik gewährleistet die Erzeugung fundierter und übertragbarer Erkenntnisse sowie die Umsetzbarkeit der Forschungsergebnisse sowohl in kontrollierten als auch in realen Umgebungen. Die Integration bestehender Lösungen ermöglicht anschließend eine schnelle Umsetzung der Forschungsergebnisse in die Bauindustrie, was die Effizienz und Wirksamkeit der entwickelten Ansätze verbessert.

6.2 Ausblick

Die entwickelte Methodik und deren Nutzung wurden am Beispiel des Infrastrukturbaus und insbesondere des Betonbrückenbaus beleuchtet und demonstriert. Eine Skalierbarkeit und Übertragung der Methodik ermöglicht eine Verwendung in anderen Anwendungsfeldern. Dies gilt es in zukünftigen Forschungsarbeiten aufzugreifen. In dieser Arbeit wurde auf die Anwendung komplexer Such-Algorithmen im dreidimensionalen Raum zur Ermittlung der optimalen Flugroute verzichtet. Dies geschah unter der Annahme, dass bei der Simplifizierung der Geometrie eines Vorgangs zu einer kritischen Fläche die operative Arbeitsvorbereitung den navigierbaren Raum visuell überprüft. Die Integration solcher Algorithmen im 4D-BIM und in zukünftigen Arbeiten kann das Risiko menschlicher Fehler jedoch weiter minimieren.

Die Auswahl der befragten Personen sowie der empirischen Studie könnte die Repräsentativität der Ergebnisse beeinträchtigen, da sie möglicherweise nicht übertragbar auf die gesamte Baubranche sind. In zukünftigen Arbeiten könnten neben weiteren Anwendungsfällen auch zusätzliche Erfassungstechnologien wie bspw. die Auto-ID-Technologien untersucht und bewertet werden. Künftige Forschungsarbeiten sollten sich auf die Bewältigung von Hindernissen im Hinblick auf Hard- und Software konzentrieren, wobei Hersteller eine Schlüsselrolle bei der Lösung dieser Herausforderungen spielen können. Außerdem sollten regulatorische Aspekte von der Politik aufgegriffen werden, um den Einsatz von Drohnen attraktiver zu gestalten.

Eine vorgangsbezogene Datenerfassung liefert Daten in Bezug auf Ausschnitte ausgewählter Bereiche der Baustelle. Es kann vorkommen, dass keine fest installierten Zielobjekte in den Punktwolken sichtbar bzw. vorhanden sind, was eine Registrierung im globalen Koordinatensystem erschwert. In diesem Zusammenhang sollten Algorithmen für eine grobe und präzise Registrierung zwischen dem 4D-BIM und den erfassten Punktwolken oder auch die Hardware der Drohne weiterentwickelt werden, damit in solchen Fällen, auch in Kombination mit RTK/PPK, eine Registrierung möglich ist. Die Geschwindigkeit der Drohne und die Bewegungsunschärfe können für eine umfassende Planung und Simulation der Datenerfassung sowohl in synthetischen als auch in realen Studien weiter untersucht werden. Insbesondere die Berücksichtigung saisonaler Wetterbedingungen kann den Zeitpunkt und die Durchführung der Datenerfassung beeinflussen und die Qualität der Ergebnisse optimieren.

Des Weiteren wurde im Rahmen dieser Arbeit die Annahme getroffen, dass jeder Vorgang oder jede sichtbare Aktivität auf planare Flächen simplifiziert werden kann. Durch die Implementierung weiterer Klasse innerhalb des RANSAC-Algorithmus besteht die Möglichkeit, zusätzliche Formtypen zu rekonstruieren. Auch wurden die Wegpunkte stets senkrecht zur kritischen Fläche definiert. Die Verwendung einer schrägen Ausrichtung der Kamera kann eine vollständige und gleichmäßige Abdeckung auch in topografisch anspruchsvollen Gebieten sicherstellen. In zukünftigen Arbeiten sollten diese spezifischen Anforderungen untersucht werden. Der Datentransfer im Rahmen der vorliegenden Arbeit erfolgt manuell. Zukünftige Arbeiten könnten eine automatisierte Integration zwischen der Drohne und dem 4D-BIM in Echtzeit umsetzen, um einen ganzheitlichen Informationsfluss sicherzustellen.

Literaturverzeichnis

Abreu et al. - 2023 — Abreu, Nuno; Pinto, Andry; Matos, Aníbal; Pires, Miguel: *Procedural Point Cloud Modelling in Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM Applications: A Review, in:* ISPRS International Journal of Geo-Information 12, Heftnr. 7, S. 260; 2023. DOI: 10.3390/ijgi12070260.

Ailland - 2013 — Ailland, Karin: *Ereignisbasierte Abbildung von Bau-Ist-Zuständen;* Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar; Baubetrieb und Bauverfahren; 2013; https://e-pub.uni-weimar.de/opus4/frontdoor/index/index/docId/2065 [Zugriff am: 21.12.2023].

Albahri und Hammad - 2017 — Albahri, Ameen Hamza; Hammad, Amin: *A novel method for calculating camera coverage in buildings using BIM, in:* Journal of Information Technology in Construction, Heftnr. 22, S. 16–33; 2017.

Albertz - 2002 — Albertz, Jörg: *Albrecht Meydenbauer-Pioneer of photogrammetric documentation of the cultural heritage, in:* International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Heftnr. 5/C7, Jahrgang 34, S. 19–25; 2002.

Arman und Aggarwal - 1993 — Arman, Farshid; Aggarwal, Jake K.: *Model-based object recognition in dense-range images—a review, in:* ACM Computing Surveys 25, Heftnr. 1, S. 5–43; 1993. DOI: 10.1145/151254.151255.

Aryan et al. - 2021 — Aryan, Afrooz; Bosché, Frédéric; Tang, Pingbo: *Planning for terrestrial laser scanning in construction: A review, in:* Automation in Construction 125, S. 103551; 2021. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103551.

Balamuralidhar et al. - 2021 — Balamuralidhar, Navaneeth; Tilon, Sofia; Nex, Francesco: *MultEYE: Monitoring System for Real-Time Vehicle Detection, Tracking and*

Speed Estimation from UAV Imagery on Edge-Computing Platforms, in: Remote Sensing 13, Heftnr. 4, S. 573; 2021. DOI: 10.3390/rs13040573.

Bauer - 2003 Bauer, Manfred: *Vermessung und Ortung mit Satelliten;* Wichmann; Heidelberg; 2003. ISBN: 978-3-8790-7360-3.

BDLI - 2023 BDLI: *Bestand an Drohnen im privaten und kommerziellen Gebrauch in Deutschland (Stand: Juli 2023) [Graph];* https://de.statista.com/statistik/daten/studie/972524/umfrage/anzahl-der-drohnen-in-deutschland-nach-verwendungszweck/ [Zugriff am: 24.06.2024].

BDLI et al. - 2023 BDLI, & Verband Unbemannte Luftfahrt, & BDL: *Prognose des Bestandes an kommerziell und privat genutzten Drohnen in Deutschland in den Jahren 2022 bis 2030 (in 1.000; Stand: Juli 2023) [Graph];* https://de.statista.com/statistik/daten/studie/972642/umfrage/bestand-an-privat-und-kommerziell-genutzten-drohnen-in-deutschland/;

Becker und Tschickardt - 2023 Becker, Steven; Tschickardt, Thomas: *BIMTakt – Optimierung der Produktionsplanung durch ganzheitliche Integration von BIM und Lean Construction, in:* Bautechnik 100, Heftnr. 2, S. 75–85; 2023. DOI: 10.1002/bate.202200088.

Besl - 1992 Besl, P. J.; McKay, Neil D.: *A method for registration of 3-D shapes, in:* IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence 14, Heftnr. 2, S. 239–256; 1992. DOI: 10.1109/34.121791.

Biswas - 2019 Biswas, Humayun: *Automatic Planning for Scanning: Optimizing 3D Laser Scanning Operations Using BIM and TLS, in:* IAENG International Journal of Computer Science, S. 9–17; 2019.

Biswas et al. - 2015 Biswas, Humayun; Bosché, Frédéric; Sun, Ming: *Planning for Scanning Using Building Information Models: A Novel Approach with Occlusion Handling*; in Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015); Oulu, Finland; International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC); 2015.

Blankenbach - 2021 Blankenbach, Jörg: *Bauwerksvermessung für BIM*; in Building Information Modeling, S. 343–362; Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN:978-3-658-05605-6.

Blender - 2023 Blender Online Community: *Blender - a 3D modelling and rendering package;* Stichting Blender Foundation, Amsterdam; 2023; http://www.blender.org [Zugriff am: 21.12.2023].

Blenderkit - 2023 Blenderkit: *BlenderKit - free models, materials, HDRs & more;* https://www.blenderkit.com/ [Zugriff am: 21.12.2023].

BMDV - 2015 BMDV: *Stufenplan Digitales Planen und Bauen;* https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 23.12.2023].

BMDV - 2021 BMDV: *Masterplan BIM - Bundesfernstraßen;* https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 21.12.2023].

Bolourian et al. - 2017 Bolourian, Neshat; Soltani, Mohammed Mostafa; Albahri, Ameen Hamza; Hammad, Amin: *High Level Framework for Bridge Inspection Using LiDAR-equipped UAV*; in 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2017), S. 683–688; Taipei, Taiwan; Faculty of

Engineering, Slovak University of Technology in Bratislava; Printed by Curran Associates, Inc; Bratislava, Slovakia, New York; 2017. ISBN:978-1-5108-4473-5.

Bolourian und Hammad - 2020 Bolourian, Neshat; Hammad, Amin: *LiDAR-equipped UAV path planning considering potential locations of defects for bridge inspection, in:* Automation in Construction 117, S. 103250; 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103250.

Borrmann et al. - 2021 Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob: *Building Information Modeling;* Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN: 978-3-658-05605-6.

Borrmann et al. - 2021a Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian; Beetz, Jakob: *Die BIM-Methode im Überblick*; in Building Information ModelingSpringer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN:978-3-658-05605-6.

Borrmann et al. - 2021b Borrmann, André; Beetz, Jakob; Koch, Christian; Liebich, Thomas; Muhic, Sergej: *Industry Foundation Classes – Ein herstellerunabhängiges Datenmodell für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks*; in Building Information Modeling, S. 95-146; Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN:978-3-658-05605-6.

Borrmann und Berkhahn - 2021 Borrmann, André; Berkhahn, Volker: *Grundlagen der geometrischen Modellierung*; in Building Information Modeling, S. 35–51; Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN:978-3-658-05605-6.

Bortz und Döring - 2006 Bortz, Jürgen; Döring, Nicola: *Forschungsmethoden und Evaluation;* Springer Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg; 2006. ISBN: 978-3-540-33305-0.

Bosché - 2010 Bosché, Frédéric: *Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction, in:* Advanced Engineering Informatics 24, Heftnr. 1, S. 107–118; 2010. DOI: 10.1016/j.aei.2009.08.006.

Bosché et al. - 2013 Bosché, Frédéric; Guillemet, Adrien; Turkan, Yelda; Haas, Carl T.; Haas, Ralph: *Tracking the Built Status of MEP Works: Assessing the Value of a Scan-vs-BIM System, in:* Journal of Computing in Civil Engineering 28, Heftnr. 4, S. 1–14; 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000343.

Bosché et al. - 2014 Bosché, Frédéric; Ahmed, Mahmoud; Turkan, Yelda; Haas, Carl T.; Haas, Ralph: *The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning and BIM: The case of cylindrical MEP components, in:* Automation in Construction 49, S. 201–213; 2014. DOI: 10.1016/j.autcon.2014.05.014.

Bosché und Haas - 2008 Bosché, Frédéric; Haas, Carl T.: *Automated retrieval of 3D CAD model objects in construction range images, in:* Automation in Construction 17, Heftnr. 4, S. 499–512; 2008. DOI: 10.1016/j.autcon.2007.09.001.

Braun - 2020 Braun, Alexander: *Automated BIM-based construction progress monitoring by processing and matching semantic and geometric data;* Dissertation, Technische Universität München; Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation; 2020; https://media-tum.ub.tum.de/doc/1549048/1549048.pdf [Zugriff am: 21.12.2023].

Braun et al. - 2021 Braun, Alexander; Borrmann, André; Koch, Christian: *Automatisierte Baufortschrittserkennung mit BIM*; in Building Information

Modeling, S. 563–576; Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2021. ISBN:978-3-658-05605-6.

Brewer - 2017 Brewer, Daniel: *3D Flight Navigation Using Voxel Octrees*; in Game AI Pro 3, S. 265–274; CRC Press Taylor & Francis Routledge; Boca Raton, London, New York; 2017. ISBN:978-1498742580.

Bufton - 1989 Bufton, Jack L.: *Laser Altimetry Measurements from Aircraft and Spacecraft, in:* Proceedings of the IEEE 77, Heftnr. 3, S. 463–477; 1989.

buildingSMART - 2023 buildingSMART International: *IFC 4.3.1.0 Documentation;* https://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org [Zugriff am: 21.12.2023].

Bundestag - 2021 Bundestag; *Gesetz zur Anpassung nationaler Regelungen an die Durchführungsverordnung (EU) 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb der unbemannten Luftfahrt;* Bundesgesetzblatt Jahrgang 2021 Teil I Nr. 32, ausgegeben am 17.06.2021; 2021.

Büssow - 2004 Büssow, Christian.: *Prozessbewertung in der Logistik;* Deutscher Universitätsverlag; Imprint: Deutscher Universitätsverlag; Wiesbaden; 2004. ISBN: 978-3-322-81685-6; https://permalink.obvsg.at/;

Chen und Medioni - 1991 Chen, Yang; Medioni, Gérard Guy: *Object modeling by registration of multiple range images*; in Proceedings. 1991 IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 2724–2729; Sacramento, CA, USA; IEEE Comput. Soc. Press; 1991. ISBN:0-8186-2163-X.

Chvátal - 1975 Chvátal, V.: *A combinatorial theorem in plane geometry, in:* Journal of Combinatorial

Theory, Series B 18, Heftnr. 1, S. 39–41; 1975. DOI: 10.1016/0095-8956(75)90061-1.

CloudCompare - 2023 — Girardeau, Daniel: *Cloud Compare;* 2023; https://www.danielgm.net/cc/ [Zugriff am: 21.12.2023].

Collazo et al. - 2020 — Collazo, Jorge Rouco; López, José Antonio Benavides; Civantos, José María Martín: *Falling from the sky*; in Studies in Archaeometry, S. 87–174; Archaeopress Publishing Ltd; 2020. ISBN:9781789697339.

Debus und Mellenthin Filardo - 2021 — Debus, Paul; Mellenthin Filardo, Martina: *Drohnen im Bauwesen;* bSD Verlag - Haus der Bundespressekonferenz / 4103; Berlin; 2021. ISBN: 978-3948742324.

Debus und Rodehorst - 2021b — Debus, Paul; Rodehorst, Volker: *Multi-scale Flight Path Planning for UAS Building Inspection*; in Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering, S. 1069–1085; São Paulo, Brazil; Springer International Publishing; Imprint: Springer; Cham; 2021. ISBN:978-3-030-51295-8.

Delaunay - 1934 — Delaunay, Boris N.: *Sur la sphère vide, in:* Bulletin of Academy of Sciences of the USSR. 7, Heftnr. 6, S. 793–800; 1934.

Deming - 1982 — Deming, William Edwards: *Out of the crisis;* The MIT Press; Cambridge, Mass.; 1982.

DESITE API - 2023 — ThinkProject: *DESITE BIM API Documentation - 3.2;* https://bimdocs.thinkproject.com/desiteAPI/3.2/index.html [Zugriff am: 21.12.2023].

Dickmann - 2015 — Dickmann, Philipp: *Schlanker Materialfluss;* Springer Vieweg; s.l.; 2015. ISBN: 3662448688; http://gbv.eblib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4178837;

Dijkstra - 1959 Dijkstra, Edsger Wybe: *A note on two problems in connexion with graphs, in:* Numerische Mathematik, Heftnr. 1, S. 269–271; 1959. DOI: 10.1007/BF01386390.

DIN 18202:2019-07 *DIN 18202:2019-07, Toleranzen im Hochbau - Bauwerke;* Beuth Verlag GmbH; Berlin. DOI: 10.31030/3061349.

DIN 2769:2023-04 *DIN 2769:2023-04, Geometrische Produktspezifikation_(GPS)_- Allgemeintoleranzen_- Tabellenwerte für geometrische Toleranzen und Toleranzen für Längen- und Winkelgrößenmaße ohne individuelle Toleranzangabe;* Beuth Verlag GmbH; Berlin. DOI: 10.31030/3416574.

DIN EN 13760:2011-03 Deutsches Institut für Normung: *DIN EN 13670:2011-03, Ausführung von Tragwerken aus Beton; Deutsche Fassung EN 13670:2009;* Beuth Verlag GmbH; Berlin; 2011. DOI: 10.31030/1562159.

DIN EN 397:2013-04 *DIN EN 397:2013-04, Industrieschutzhelme; Deutsche Fassung EN_397:2012+A1:2012;* Beuth Verlag GmbH; Berlin. DOI: 10.31030/1972875.

DIN EN ISO 16739-1 DIN EN ISO 16739-1:2024-03: *DIN EN ISO 16739-1:2024-03, Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement - Teil 1: Datenschema;* Beuth Verlag GmbH; Berlin. DOI: 10.31030/3144077.

DIN EN ISO 19650-1 DIN EN ISO 19650-1: *DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Informationsmanagement mit BIM - Teil 1: Begriffe und Grundsätze (ISO 19650-1:2018); Deutsche Fassung EN ISO 19650-1:2018;*

Beuth Verlag GmbH; Berlin.
DOI: 10.31030/3030494.

DJI - 2022 DJI: *DJI Mini 3 Pro - Handbuch v1.2;* https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mini_3_Pro/UM/DJI_Mini_3_Pro_User_Manual_v1.2_DE.pdf [Zugriff am: 21.12.2023].

DJI - 2023a DJI: *Zenmuse P1;* https://enterprise.dji.com/de/zenmuse-p1?site=enterprise&from=nav [Zugriff am: 21.12.2023].

DJI - 2023b DJI: *Zenmuse L2;* https://enterprise.dji.com/de/zenmuse-l2?site=enterprise&from=nav [Zugriff am: 21.12.2023].

Dombrowski und Mielke - 2015 Dombrowski, Uwe; Mielke, Tim: *Ganzheitliche Produktionssysteme;* Springer Berlin Heidelberg; Berlin, Heidelberg; 2015. ISBN: 978-3-662-46163-1.

Donath et al. - 2008 Donath, Dirk; Braunes, Jörg; Korte, Michael: *Bauaufnahme und Planung im Bestand;* Vieweg + Teubner; Wiesbaden; 2008. ISBN: 978-3-8348-0398-6.

Dunteman - 1989 Dunteman, George: *Principal Components Analysis;* SAGE Publications, Inc; 2455 Teller Road, Newbury Park California 91320 United States of America; 1989. ISBN: 9780803931046.

Ebrahimi et al. - 2021 Ebrahimi, Dariush; Sharafeddine, Sanaa; Ho, Pin-Han; Assi, Chadi: *Autonomous UAV Trajectory for Localizing Ground Objects: A Reinforcement Learning Approach, in:* IEEE Transactions on Mobile Computing 20, Heftnr. 4, S. 1312–1324; 2021.
DOI: 10.1109/TMC.2020.2966989.

ECMA - 2013 ECMA: *ECMA-404 -The JSON data interchange format;* https://ecma-

international.org/wp-content/uploads/ECMA-404_1st_edition_october_2013.pdf [Zugriff am: 15.05.2024].

Egger et al. - 2013 Egger, Martin; Hausknecht, Kerstin; Liebich, Thomas; Przybylo, Jakob: *BIM-Leitfaden für Deutschland;* https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 21.12.2023].

Eisenführ et al. - 2010 Eisenführ, Franz; Weber, Martin; Langer, Thomas: *Rationales Entscheiden;* Springer; Berlin, Heidelberg; 2010. ISBN: 978-3-642-02848-9.

Erlach - 2020 Erlach, Klaus: *Wertstromdesign;* Springer Vieweg; Berlin, Heidelberg; 2020. ISBN: 978-3-662-58907-6.

EU - 2019 Europäischen Union (EU); *Durchführungsverordnung 2019/947 der Kommission vom 24. Mai 2019 über die Vorschriften und Verfahren für den Betrieb unbemannter Luftfahrzeuge;* 11.06.2019.

Fidanova - 2021 Fidanova, Stefka: *Ant Colony Optimization*; in Ant Colony Optimization and Applications, S. 3–8; Springer International Publishing; Cham; 2021. ISBN:978-3-030-67379-6.

Fischler und Bolles - 1981 Fischler, Martin A.; Bolles, Robert C.: *Random sample consensus, in:* Communications of the ACM 24, Heftnr. 6, S. 381–395; 1981. DOI: 10.1145/358669.358692.

Freimuth et al. - 2017 Freimuth, Henk; Müller, Jan; König, Markus: *Planning UAV-Assisted Visual Inspections of Construction Sites*; in Lean and Computing in Construction Congress - Volume 1: Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction, S. 161–168; Heraklion, Crete, Greece; Heriot-Watt University; Edinburgh, UK; 2017. ISBN:9780956595164.

Freimuth und König - 2018 Freimuth, Henk; König, Markus: *Planning and executing construction inspections with unmanned aerial vehicles, in:* Automation in Construction 96, S. 540–553; 2018. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.016.

Freimuth und König - 2019 Freimuth, Henk; König, Markus: *A Framework for Automated Acquisition and Processing of As-Built Data with Autonomous Unmanned Aerial Vehicles, in:* Sensors (Basel, Switzerland) 19, Heftnr. 20; 2019. DOI: 10.3390/s19204513.

Gastl - 2005 Gastl, René: *Kontinuierliche Verbesserung im Umweltmanagement;* vdf Hochsch.-Verl. an der ETH; Zürich; 2005. ISBN: 3728130346.

Glock et al. - 2022 Glock, Christian; Heckmann, Michael; Hondl, Timo; Kaufmann, Fabian; Schellen, Marius; Sefrin, Rabea: *Massivbau in Zeiten von Klimawandel und Ressourcenverknappung – Herausforderungen und Lösungsansätze/Concrete construction in times of climate change and resource shortage – challenges and solutions, in:* Bauingenieur 97, Heftnr. 01-02, S. 1–12; 2022. DOI: 10.37544/0005-6650-2022-01-02-33.

Glock et al. - 2023 Glock, Christian; Dernbach, Aaron; Heckmann, Michael; Hondl, Timo; Kaufmann, Fabian; Schellen, Marius: *Treibhausgas- und ressourcenreduzierter (Beton-)Bau - Herausforderungen, Lösungsansätze, Anreizsysteme, in:* DBV-Heft 50, Band 1 - Nachhaltiges Bauen mit Beton, S. 26–65; 2023.

Gonçalves - 2023 Gonçalves, Gil: *Using structure-from-motion workflows for 3D mapping and remote sensing*; in Unmanned Aerial Systems for Monitoring Soil, Vegetation, and Riverine Environments, S. 71–90; Elsevier; 2023. ISBN:9780323852838.

Gorski - 2022 Gorski, Thomas: *Der Einsatz von Drohnen in der Bauindustrie*; in Auf dem Weg zu einer nachhaltigen, effizienten und profitablen Wertschöpfung von Gebäuden, S. 361–376; Springer Fachmedien Wiesbaden; Wiesbaden; 2022. ISBN:978-3-658-34961-5.

Gotzig und Geduld - 2015 Gotzig, Heinrich; Geduld, Georg: *LIDAR-Sensorik*; in Handbuch Fahrerassistenzsysteme, S. 317–334; Springer Vieweg; Wiesbaden; 2015. ISBN:9783658057343.

Grötschel - 2015 Grötschel, Martin: *Schnelle Rundreisen: Das Travelling-Salesman-Problem*; in Diskrete Mathematik erleben, S. 95–129; Springer Spektrum, Wiesbaden; 2015.

Guevremont und Hammad - 2020 Guevremont, Michel; Hammad, Amin: *Levels of development definition for 4D simulation of construction projects, in:* Hydropower & Dams 27, Heftnr. 4, S. 76–92; 2020.

Günther und Tempelmeier - 2009 Günther, Hans-Otto; Tempelmeier, Horst: *Produktion und Logistik;* Springer; Berlin; 2009. ISBN: 978-3642003790.

Hamledari et al. - 2021 Hamledari, Hesam; Sajedi, Seyed Omid; McCabe, Brenda; Fischer, Martin: *Automation of Inspection Mission Planning Using 4D BIMs and in Support of Unmanned Aerial Vehicle–Based Data Collection, in:* Journal of Construction Engineering and Management 147, Heftnr. 3, S. 04020179-1 - 04020179-15; 2021. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001995.

Hanff und Melzner - 2016 Hanff, Jochen; Melzner, Jürgen: *Modellbasiertes Bauprozessmanagement, in:* BIM – Building Information Modeling, S. 125–129; 2016.

Hanusch - 2010 Hanusch, Horst: *Nutzen-Kosten-Analyse;* Vahlen; München; 2011. ISBN: 978-3-8006-3412-5.

Hat et al. - 1968 — Hart, Peter; Nilsson, Nils; Raphael, Bertram: *A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths, in:* IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics 4, Heftnr. 2, S. 100–107; 1968. DOI: 10.1109/tssc.1968.300136.

Höhle - 2013 — Höhle, Julian: *Oblique aerial images and their use in cultural heritage documentation, in:* ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XL-5/W2, S. 349–354; 2013. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-349-2013.

Hough - 1959 — Hough, Paul V. C.: *Machine Analysis of Bubble Chamber Pictures*; in Proceedings of the 2nd International Conference on High-Energy Accelerators and Instrumentation, S. 554–558; Cern, Geneva, Switzerland; 1959.

Hüsselmann et al. - 2020 — Claus Hüsselmann; Rolf Litzenberger; Nikolas Schick; Lukas M. Spannenberger: *Sensitivitätsanalyse von Nutzwerten - Systematische Betrachtungen zur Nutzwertanalyse;* 2020.

Ibrahim et al. - 2019 — Ibrahim, Amir; Sabet, Ali; Golparvar-Fard, Mani: *BIM-driven mission planning and navigation for automatic indoor construction progress detection using robotic ground platform*; in 2019 European Conference on Computing in Construction, S. 182–189; Chania, Crete, Greece; European Council on computing in construction; Chania; 2019. ISBN:978-1-910963-37-1.

Ibrahim und Golparvar-Fard - 2019 — Ibrahim, Amir; Golparvar-Fard, Mani: *4D BIM Based Optimal Flight Planning for Construction Monitoring Applications Using Camera-Equipped UAVs*; in Computing in Civil Engineering 2019, S. 217–224; Atlanta, Georgia; American Society of Civil Engineers; Reston, VA; 2019. ISBN:9780784482438.

Imai - 1997 Imai, Masaaki: *Gemba Kaizen;* Wirtschaftsverl. Langen Müller Herbig; München; 1997. ISBN: 3-7844-7362-8.

Jiménez et al. - 2021 Jiménez-Jiménez, Sergio Iván; Ojeda-Bustamante, Waldo; Marcial-Pablo, Mariana; Enciso, Juan: *Digital Terrain Models Generated with Low-Cost UAV Photogrammetry: Methodology and Accuracy, in:* ISPRS International Journal of Geo-Information 10, Heftnr. 5, S. 285; 2021. DOI: 10.3390/ijgi10050285.

Kaufman - 1993 Kaufman, Arie; Cohen, D.; Yagel, R.: *Volume graphics, in:* Computer 26, Heftnr. 7, S. 51–64; 1993. DOI: 10.1109/mc.1993.274942.

Kim et al. - 2013 Kim, Changyoon; Kim, Byoungil; Kim, Hyoungkwan: *4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring, in:* Automation in Construction 35, S. 44–52; 2013. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.03.005.

Kochendörfer et al. - 2018 Kochendörfer, Bernd; Liebchen, Jens H.; Viering, Markus G.: *Bau-Projekt-Management;* Springer Vieweg; Wiesbaden, Heidelberg; 2018. ISBN: 978-3-8348-2245-1.

Kopsida et al. - 2015 Kopsida, Marianna; Brilakis, Ioannis; Vela, Patricio Antonio: *A review of automated construction progress monitoring and inspection methods*; in Proceedings of the 32nd CIB W78 Conference 2015, S. 421–431; Eindhoven, Nethderland; 2015.

Koutsoudis et al. - 2015 Koutsoudis, Anestis; Arnaoutoglou, F.; Pavlidis, George: *Structure from motion-multiple view stereovision (SFM/MVS) - An introduction on how to perform SFM/MVS, in:* Digarch, S. 1–20; 2015.

Krijnen - 2023 Krijnen, Thomas: *IfcOpenShell;* 2023; http://ifcopenshell.org/ [Zugriff am: 21.12.2023].

Kühnapfel - 2021 Kühnapfel, Jörg B.: *Scoring und Nutzwertanalysen;* Springer Gabler; Wiesbaden, Heidelberg; 2021. ISBN: 978-3-658-34809-0.

Lari und Habib - 2014 Lari, Zahra; Habib, Ayman: *An adaptive approach for the segmentation and extraction of planar and linear/cylindrical features from laser scanning data, in:* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 93, S. 192–212; 2014. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2013.12.001.

LBA - 2022 Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV); *Erlass des Bundesministeriums für Digitales und Verkehr zum gewerblichen Betrieb von unbemannten Luftfahrtsystemen in der offenen Kategorie, Unterkategorie A2, die nicht gemäß der Delegierten Verordnung (EU) 2019/945 klassifiziert sind. Gültigkeit: 01. Januar 2022 bis 31. August 2022;* PG Unb LF/6312.1/8.

LBA - 2023a LBA: *Statistik registrierte Betreiber Unbemannte Luftfahrtsysteme (UAS) sowie bestandene Prüfungen in der offenen Kategorie, Unterkategorien A1 /A 3 und A2 ab 2021;* https://www.lba.de/SharedDocs/Downloads/DE/SBl/SBl3/Statistiken/Betrieb/UAS.html?nn=2092166 [Zugriff am: 21.12.2023].

LBA - 2023b LBA: *UAS-Klassifizierungen;* https://lba-openuav.de/onlinekurs/lehrmaterial/luftrecht-und-sicherheit/uas-klassifizierungen/ [Zugriff am: 21.12.2023].

Lee et al. - 2019 Lee, Joa Hyoung; Park, Jeong-Ho; Jang, Byung-Tae: *Progress Monitoring system based on Volume Comparison for the Construction Site*; in 2019 International

Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC), S. 986–989; Jeju Island, Korea (South); IEEE; 2019. ISBN:978-1-7281-0893-3.

Lermen und Tschickardt - 2023 Lermen, Hanna (Verfassende); Tschickardt, Thomas (Betreuer): *Anwendung und Weiterentwicklung von photogrammetrischen Verfahren für die Erstellung von drohnenbasierten Punktwolken: Optimierung der Flugplanung und Wegpunkte;* Masterarbeit, RPTU Kaiserslautern-Landau; Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion; 2023.

Lichtblau - 2008 Lichtblau, Karl: *Wertschöpfungskette Bau - Analyse der volkswirtschaftlichen Bedeutung der Wertschöpfungskette Bau;* 11.08.2008.

Liker - 2013 Liker, Jeffrey: *Der Toyota Weg;* FBV; München; 2013. ISBN: 9783898791885; http://site.ebrary.com/lib/hsalbsig/docDetail.action?docID=10684046;

Lin et al. - 2013 Lin, Ya-Hong; Liu, Yu-Shen; Gao, Ge; Han, Xiao-Guang; Lai, Cheng-Yuan; Gu, Ming: *The IFC-based path planning for 3D indoor spaces, in:* Advanced Engineering Informatics 27, Heftnr. 2, S. 189–205; 2013. DOI: 10.1016/j.aei.2012.10.001.

LuftVG - 2023 Bundesministerium für Justiz; *Luftverkehrsgesetz.* LuftVGNeugefasst durch Bek. v. 10.5.2007 I 698.

LuftVO - 2015 Bundesministerium für Justiz; *Luftverkehrs-Ordnung.* LuftVO.

Maalek et al. - 2018 Maalek, Reza; Lichti, Derek D.; Ruwanpura, Janaka Y.: *Robust Segmentation of Planar and Linear Features of Terrestrial Laser Scanner Point Clouds Acquired from Construction Sites, in:* Sensors (Basel, Switzerland) 18, Heftnr. 3; 2018. DOI: 10.3390/s18030819.

Maalek et al. - 2019 — Maalek, Reza; Lichti, Derek D.; Ruwanpura, Janaka Y.: *Automatic Recognition of Common Structural Elements from Point Clouds for Automated Progress Monitoring and Dimensional Quality Control in Reinforced Concrete Construction, in:* Remote Sensing 11, Heftnr. 9, S. 1102; 2019. DOI: 10.3390/rs11091102.

Metashape - 2023 — AgiSoft: *Metashape Professional;* 2023; https://www.agisoft.com/downloads/installer/ [Zugriff am: 21.12.2023].

Morgenthal et al. - 2019 — Morgenthal, Guido; Hallermann, Norman; Kersten, Jens; Taraben, Jakob; Debus, Paul; Helmrich, Marcel; Rodehorst, Volker: *Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges, in:* Automation in Construction 97, S. 77–95; 2019. DOI: 10.1016/j.autcon.2018.10.006.

Moselhi et al. - 2020 — Moselhi, Osama; Bardareh, Hassan; Zhu, Zhenhua: *Automated Data Acquisition in Construction with Remote Sensing Technologies, in:* Applied Sciences 10, Heftnr. 8, S. 2846; 2020. DOI: 10.3390/app10082846.

Nagel - 1990 — Nagel, Kurt: *Nutzen der Informationsverarbeitung;* Oldenbourg; München, Wien; 1990. ISBN: 978-3-486-21607-3.

Nechyporchuk und Baskova - 2021 — Nechyporchuk, Y.; Baskova, R.: *The level of detail for 4D BIM modeling, in:* IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 1209, Heftnr. 1, S. 12002; 2021. DOI: 10.1088/1757-899X/1209/1/012002.

Nollau und Bucher - 2004 — Nollau, Hans-Georg; Bucher, Marko: *Geschäftsprozessoptimierung im Mittelstand;* Eul; Lohmar, Köln; 2004. ISBN: 3-89936-222-5.

Oerter und Tschickardt - 2025 — Oerter, Nico; Tschickardt, Thomas: *Ein Ansatz für die automatische Aktualisierung eines*

IFC-Modells auf der Grundlage von Punktwolke, in: Bauingenieur 100, Heftnr. 3; 2025.

Ohno - 1982 Ohno, Taiichi: *How the Toyota Production System was Created, in:* Japanese Economic Studies 10, Heftnr. 4, S. 83–101; 1982. DOI: 10.2753/JES1097-203X100483.

Omar und Nehdi - 2016 Omar, Tarek; Nehdi, Moncef L.: *Data acquisition technologies for construction progress tracking, in:* Automation in Construction 70, S. 143–155; 2016. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.06.016.

Omar und Nehdi - 2018 Omar, Tarek; Nehdi, Moncef L.: *Automated Data Collection for Progress Tracking Purposes: A Review of Related Techniques*; in Facing the Challenges in Structural Engineering, S. 391–405; Springer International Publishing; Cham; 2018. ISBN:978-3-319-61913-2.

O'Rurke - 1987 O'Rurke, Joseph: *Art Gallery Theorems and Algorithms;* Oxford University Press; 1987; http://www.science.smith.edu/~jorourke/books/ArtGallery-Theorems/Art_Gallery_Full_Book.pdf [Zugriff am: 21.12.2023].

Pučko et al. - 2018 Pučko, Zoran; Šuman, Nataša; Rebolj, Danijel: *Automated continuous construction progress monitoring using multiple workplace real time 3D scans, in:* Advanced Engineering Informatics 38, S. 27–40; 2018. DOI: 10.1016/j.aei.2018.06.001.

Puri und Turkan - 2020 Puri, Nisha; Turkan, Yelda: *Bridge construction progress monitoring using lidar and 4D design models, in:* Automation in Construction 109, S. 102961; 2020. DOI: 10.1016/j.autcon.2019.102961.

Rebolj et al. - 2017 Rebolj, Danijel; Pučko, Zoran; Babič, Nenad Čuš; Bizjak, Marko; Mongus, Domen: *Point*

cloud quality requirements for Scan-vs-BIM based automated construction progress monitoring, in: Automation in Construction 84, S. 323–334; 2017. DOI: 10.1016/j.autcon.2017.09.021.

Reed et al. - 1997 — Reed, Michael. K.; Allen, Peter. K.; Stamos, I.: *3-D Modeling from Range Imagery: An Incremental Method with a Planning Component*; in Proceedings. International Conference on Recent Advances in 3-D Digital Imaging and Modeling (Cat. No.97TB100134), S. 76–83; Ottawa, Ont., Canada; IEEE Comput. Soc. Press; 1997. ISBN:0-8186-7943-3.

Reja et al. - 2022 — Reja, Varun Kumar; Pradeep, Megha S.; Varghese, Koshy: *A Systematic Classification and Evaluation of Automated Progress Monitoring Technologies in Construction*; in Proceedings of the 39th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, S. 120–127; International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC); 2022.

Riegl - 2023 — Riegl: *Riegl VUX-1UAV22;* http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegldownloads/RIEGL_VUX-1UAV-22_Datasheet_2023-04-25.pdf [Zugriff am: 21.12.2023].

Saieg et al. - 2018 — Saieg, Pedro; Sotelino, Elisa Dominguez; Nascimento, Daniel; Caiado, Rodrigo Goyannes Gusmão: *Interactions of Building Information Modeling, Lean and Sustainability on the Architectural, Engineering and Construction industry: A systematic review, in:* Journal of Cleaner Production 174, S. 788–806; 2018. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.11.030.

Sawhney und Knight - 2023 — Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS): *Digitalisation in construction report 2023;* Royal Institution of Chartered Surveyors (RICS); 2023. ISBN: 978-1-78321-500-3.

Schnabel et al. - 2007 Schnabel, R.; Wahl, R.; Klein, R.: *Efficient RANSAC for Point-Cloud Shape Detection, in:* Computer Graphics Forum 26, Heftnr. 2, S. 214–226; 2007. DOI: 10.1111/j.1467-8659.2007.01016.x.

Scott et al. - 2003 Scott, William R.; Roth, Gerhard; Rivest, Jean-François: *View planning for automated three-dimensional object reconstruction and inspection, in:* ACM Computing Surveys 35, Heftnr. 1, S. 64–96; 2003. DOI: 10.1145/641865.641868.

Seifert et al - 2019 Seifert, Erich; Seifert, Stefan; Vogt, Holger; Drew, David; van Aardt, Jan; Kunneke, Anton; Seifert, Thomas: *Influence of Drone Altitude, Image Overlap, and Optical Sensor Resolution on Multi-View Reconstruction of Forest Images, in:* Remote Sensing 11, Heftnr. 10, S. 1252; 2019. DOI: 10.3390/rs11101252.

Sillet - 2023 Sillet, Julio: *Textur für das Material "Concrete Tiles";* https://www.blenderkit.com/asset-gallery-detail/7cb20f71-5540-4f2f-892e-426d2d9bf1fd/;

Son et al. - 2017 Son, Hyojoo; Kim, Changwan; Kwon Cho, Yong: *Automated Schedule Updates Using As-Built Data and a 4D Building Information Model, in:* Journal of Management in Engineering 33, Heftnr. 4, S. 4017012; 2017. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000528.

Song et al. - 2020 Song, Changhao; Wang, Kai; Cheng, Jack Chin Pang: *BIM-Aided Scanning Path Planning for Autonomous Surveillance UAVs with LiDAR*; in Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2020), S. 1195–1202; Kitakyushu, Japan; 2020. ISBN:978-952-94-3634-7.

Spieth et al. - 2016 Spieth, Dominik; Hermes, Michael; Berner, Fritz: *Wechselwirkungen zwischen Lean Construction und der Arbeitsmethode BIM am Beispiel der BIM-Anwendungsfälle Visualisierung und Bauablaufmodellierung/Interaction between Lean Construction and the working method BIM using the example of application of visualization and modelling of the construction process, in:* Bauingenieur 91, Heftnr. 11, S. 466–472; 2016. DOI: 10.37544/0005-6650-2016-11-64.

Steiner und Benesch - 2018 Steiner, Elisabeth; Benesch, Michael: *Der Fragebogen;* Facultas; Wien; 2018. ISBN: 978-3-8252-8727-6; http://www.blickins-buch.de/item/92b819794de4dec-cdf01ef3aa64a5882;

Tang und Alaswad - 2012 Tang, Pingbo; Alaswad, Fahd Saleh: *Sensor Modeling of Laser Scanners for Automated Scan Planning on Construction Jobsites*; in Construction Research Congress 2012, S. 1021–1031; West Lafayette, Indiana, United States; American Society of Civil Engineers; Reston, Va.; 2012. ISBN:9780784412329.

Tauberger - 2008 Tauberger, André: *Controlling für die öffentliche Verwaltung;* OLDENBOURG WISSENSCHAFTSVERLAG; 2008. ISBN: 978-3-486-58636-7.

thinkproject - 2023 Hanff, Jochen; Horstmann, Ansger; Losch, Stefan: *DESITE md pro;* thinkproject; 2023; https://thinkproject.com/desite-bim-downloads/ [Zugriff am: 21.12.2023].

Torres und Pfitzner - 2023 Torres, Miguel A. Vega; Pfitzner, Fabian: *Investigating Robot Dogs for Construction Monitoring: A Comparative Analysis of Specifications and On-site Requirements*; in Tagungsband 34. Forum Bauinformatik, S. 144-151; Ruhr-Universität Bochum; Ruhr-Universität Bochum; 2023.

Tran und Khoshelham - 2019 Tran, Ha; Khoshelham, Kourosh: *Building change detection through comparison of a lidar scan with a Building Information Model, in:* ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W13, S. 889–893; 2019. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W13-889-2019.

Tschickardt - 2023 Tschickardt, Thomas: *Initiierung einer Datenerfassung zur Steuerung des Baufortschritts auf Basis von Lean-Prinzipien unter Verwendung des 4D-BIM*; in Tagungsband 34. Forum Bauinformatik, S. 176–183; Ruhr-Universität Bochum; Ruhr-Universität Bochum; 2023.

Tschickardt - 2024 Tschickardt, Thomas: *Verfügbarkeitsmodell A 10/A 24: Modellbasierte Projektabwicklung über den Lebenszyklus, in:* Bautechnik 101, Heftnr. 1; 2024.
DOI: 10.1002/bate.202300091.

Tschickardt et al. - 2018 Tschickardt, Thomas; Krause, Daniel; Akkermann, Jan: *Entwicklung und Evaluation von BIM-4-D-Methoden am Beispielprojekt Gateway Gardens Los 2, Frankfurt/Main, in:* Bautechnik 95, Heftnr. 7, S. 453–462; 2018.
DOI: 10.1002/bate.201800026.

Tschickardt et al. - 2023a Tschickardt, Thomas; Lermen, Hanna; Glock, Christian: *Anwendungsfall-bezogene Nutzwertanalyse für Erfassungstechnologien im Brückenbau, in:* Bautechnik 100, Heftnr. 11; 2023. DOI: 10.1002/bate.202300063.

Tschickardt et al. - 2023b Tschickardt, Thomas; Oerter, Nico; Glock, Christian; Kaufmann, Fabian; Schellen, Marius: *Initiation of data acquisition based on 4D-BIM for lean construction progress control*; in Proceedings of the 2023 European Conference on Computing in Construction and the 40th International CIB W78 Conference, European Council for Computing in Construction; 2023.

Tschickardt et al. - 2024 Tschickardt, Thomas; Schuchhardt, Nils; Oerter, Nico: *Optimierung der 4D-Modellierung durch die Anwendung von flexiblen Verknüpfungsregeln am Beispielprojekt „Weserquerung A281“, in:* Bautechnik 101, Heftnr. 8; 2024. DOI: 10.1002/bate.202400005.

Tschickardt und Knappe - 2021 Tschickardt, Thomas; Knappe, Anne-Sophie: *Modellbasiertes Erhaltungsmanagement im Verkehrswegebau am Beispiel des Pilotprojekts „Verfügbarkeitsmodell A 10/A 24“*; in Digitale Transformation im Lebenszyklus der Verkehrsinfrastruktur (DTV), S. 277–286; expert verlag GmbH; Tübingen; 2021.

Tschickardt und Krause - 2019 Tschickardt, Thomas; Krause, Daniel: *BIM im Verkehrswegebau am Beispielprojekt „Verfügbarkeitsmodell A 10/A 24“, in:* Bautechnik 96, Heftnr. 3, S. 259–268; 2019. DOI: 10.1002/bate.201800104.

Tschickardt und Krause - 2024 Tschickardt, Thomas; Krause, Daniel: *Digitale Transformation im Infrastrukturbau: Erfahrungen und Chancen: Ganzheitliches Informationsmanagement und 4D-BIM am Beispiel des Projekts "Verfügbarkeitsmodell A 10/A 24“*; in BIM für Bauausführende - Chancen und Herausforderungen digitaler Bauprozesse, Springer; 2024.

Tulke - 2010 Tulke, Jan: *Kollaborative Terminplanung auf Basis von Bauwerksinformationsmodellen;* Verl. der Bauhaus-Univ; Weimar; 2010. ISBN: 978-3-86068-416-0.

Turkan et al. - 2012 Turkan, Yelda; Bosché, Frédéric; Haas, Carl T.; Haas, Ralph: *Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies, in:* Automation in Construction 22, S. 414–421; 2012. DOI: 10.1016/j.autcon.2011.10.003.

Turkan et al. - 2013 Turkan, Yelda; Bosché, Frédéric; Haas, Carl T.; Haas, Ralph: *Toward Automated Earned*

Value Tracking Using 3D Imaging Tools, in: Journal of Construction Engineering and Management 139, Heftnr. 4, S. 423–433; 2013. DOI: 10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000629.

Turkan et al. - 2014 — Turkan, Yelda; Bosché, Frédéric; Haas, Carl T.; Haas, Ralph: *Tracking of secondary and temporary objects in structural concrete work, in:* Construction Innovation 14, Heftnr. 2, S. 145–167; 2014. DOI: 10.1108/CI-12-2012-0063.

Turkan et al. - 2019 — Turkan, Yelda; Olsen, Michael J.; Gambatese, John; Puri, Nisha: *Project Progress Tracking Using Lidar and 4D Design Models;* 2019.

Tuttas - 2017 — Tuttas, Sebastian Andreas: *Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle;* Dissertation, Technische Universität München; Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation; 13.03.2017; https://www.pf.bgu.tum.de/pub/2017/tuttas_phd17_dis.pdf [Zugriff am: 21.12.2023].

Tuttas et al. - 2016 — Tuttas, Sebastian Andreas; Braun, Alexander; Borrmann, André; Stilla, Uwe: *Evaluation of acquisition strategies for image-based construction site monitoring*; in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 2016, S. 733–740; Prague, Czech Republic; 2016.

Tuytel - 2023 — Tuytel, Rob: *Textur für das Material "Concrete Layer 02";* https://www.blenderkit.com/get-blenderkit/61a9e3be-2209-4d4d-ba19-111ea94de7e7/ [Zugriff am: 21.12.2023].

VDI 2870-1 — Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *2870-1:2012-07 Ganzheitliche Produktionssysteme Grundlagen, Einführung und Bewertung;* 2012.

VDI 2870-2 — Verein Deutscher Ingenieure (VDI): *2870-2:2013-02 Ganzheitliche Produktionssysteme Methodenkatalog;* 2013.

Vo et al. - 2015 — Vo, Anh-Vu; Truong-Hong, Linh; Laefer, Debra F.; Bertolotto, Michela: *Octree-based region growing for point cloud segmentation, in:* ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 104, S. 88–100; 2015. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.01.011.

Wang et al. - 2020 — Wang, Qian; Tan, Yi; Mei, Zhongya: *Computational Methods of Acquisition and Processing of 3D Point Cloud Data for Construction Applications, in:* Archives of Computational Methods in Engineering 27, Heftnr. 2, S. 479–499; 2020. DOI: 10.1007/s11831-019-09320-4.

Wavefront - 1989 — Wavefront Technologies: *OBJ File Format;* http://www.cs.cmu.edu/~mbz/personal/graphics/obj.html [Zugriff am: 04.05.2023].

Weber - 2014 — Weber, Rainer: *Kanban-Einführung;* expert; Renningen; 2014. ISBN: 3816932851.

Westermann - 2021 — Westermann, Georg: *Kosten-Nutzen-Analyse;* E. Schmidt; Berlin; 2021. ISBN: 978-3-503-19502-2.

Winkler und Tschickardt - 2023 — Winkler, Andreas (Verfassende); Tschickardt, Thomas (Betreuer): *Einfluss der Flugplanungsparameter auf die Effektivität des RANSAC Algorithmus für eine photogrammetrisch-gestützte Baufortschrittskontrolle;* Studienarbeit, RPTU Kaiserslautern-Landau; Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion; 2023.

Wu et al. - 2021 — Wu, Chao; Yuan, Yongbo; Tang, Yang; Tian, Boquan: *Application of Terrestrial Laser Scanning (TLS) in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) Industry, in:* Sensors

(Basel, Switzerland) 22, Heftnr. 1; 2021. DOI: 10.3390/s22010265.

Xu et al. - 2017 — Xu, Man.; Wei, Shuangfeng.; Zlatanova, Sisi.; Zhang, Ruiju: *BIM-based indoor path planning considering obstacles*; in ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, S. 417–423; Wuhan, China; 2017.

Xue et al. - 2021 — Xue, Jingguo; Hou, Xueliang; Zeng, Ying: *Review of Image-Based 3D Reconstruction of Building for Automated Construction Progress Monitoring, in:* Applied Sciences 11, Heftnr. 17, S. 7840; 2021. DOI: 10.3390/app11177840.

Zhang et al. - 2016 — Zhang, Cheng; Kalasapudi, Vamsi Sai; Tang, Pingbo: *Rapid data quality oriented laser scan planning for dynamic construction environments, in:* Advanced Engineering Informatics 30, Heftnr. 2, S. 218–232; 2016. DOI: 10.1016/j.aei.2016.03.004.

Zhang et al. - 2022 — Zhang, Hongwei; Chen, Weining; Ding, Yalin; Qu, Rui; Chang, Sansan: *Optical System Design of Oblique Airborne-Mapping Camera with Focusing Function, in:* Photonics 9, Heftnr. 8, S. 537; 2022. DOI: 10.3390/photonics9080537.

Zhang und Arditi - 2013 — Zhang, Chengyi; Arditi, David: *Automated progress control using laser scanning technology, in:* Automation in Construction 36, S. 108–116; 2013. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.08.012.

Zhang und Arditi - 2020 — Zhang, Chengyi; Arditi, David: *Advanced Progress Control of Infrastructure Construction Projects Using Terrestrial Laser Scanning Technology, in:* Infrastructures 5, Heftnr. 10, S. 83; 2020. DOI: 10.3390/infrastructures5100083.

Zier - 2023 Zier, Patrick: *Aufnahme des fertigen Zustands der „Ersatzneubaus Brücke Lohring Bochum“ mit Blick auf das Widerlager Achse 30 sowie den V-förmigen Stahlstützen der Achse 20;* https://www.patrickzier.com/kontakt.html;

Anhang A Zusatzinformationen zu Abschnitt 2.2.1

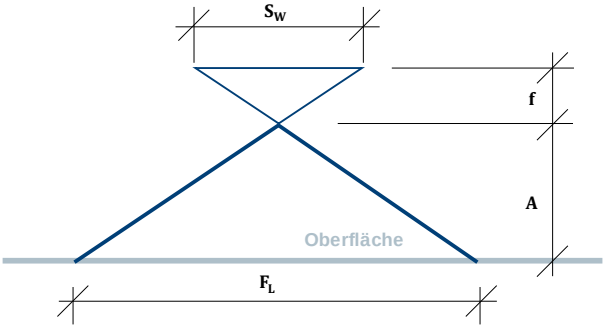


Abb. A.1: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Bodenauflösung - Seitenansicht

Winkel ähnlicher Dreiecke sind kongruent und die entsprechenden Seiten im Verhältnis sind gleich. Durch Anwendung des Strahlensatzes bei Abb. A.1 ergibt sich:

$$\frac{F_L}{A} = \frac{S_w}{f} \tag{A.1}$$

mit F_L Breite der Fotografie [cm].

A Abstand des Sensors zum erfassten Objekt [cm].

S_w Sensorweite [mm].

f Brennweite [mm].

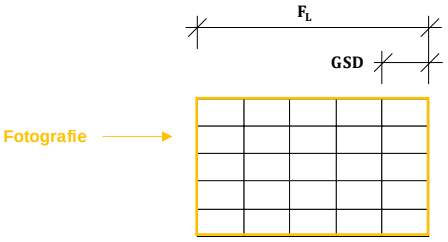


Abb. A.2: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Bodenauflösung - Fotografie

Nach anschließender Substitution durch die Multiplikation der Bodenauflösung mit der Bildweite aus Abb. A.2 ergibt sich:

$$\frac{GSD * B_w}{A} = \frac{S_w}{f} \tag{A.2}$$

mit B_w Horizontale Auflösung des Sensors (Bildweite) [px].

Schlussendlich ergibt sich:

$$GSD = \frac{A * S_w}{f * B_w} \tag{A.3}$$

Anhang B Zusatzinformationen zu Abschnitt 2.2.3

Tab. A.1: Gesetzesanforderungen von Drohnen, Tabelle in Anlehnung an *EU - 2019* und *LBA - 2023b*

Betriebskategorie		Drohnenklasse	Startgewicht	Bedingungen	Genehmigungen / Erklärungen	Registrierungspflicht	Kompetenznachweis
offen	A1	C0	< 250 g	Kein Überfliegen von Menschenansammlungen und unbeteiligten Personen	keine	Mit Sensor ausgestattet, der personenbezogene Daten erfassen kann; Aufprall 80 J	nein
		C1	< 900 g	Kein Überfliegen von Menschenansammlungen und unbeteiligten Personen; gesicherte Steuerung durch Piloten			
	A2	C2	< 4 kg	Horizontaler Sicherheitsabstand von mindestens 30 m; im Langsamflugmodus von mindestens 5 m; gesicherte Steuerung durch Piloten		ja	ja
	A3	C3	< 25 kg	Horizontaler Sicherheitsabstand von mindestens 150 m zu Wohn-, Gewerbe-, Industrie- und Erholungsgebieten; gesicherte Steuerung durch Piloten		ja	ja
speziell		C4	> 25 kg	Kategorie zutreffend, sofern eine der Bedingungen der offenen Kategorie nicht erfüllt ist; gesicherte Steuerung durch Piloten	Betriebsgenehmigung, Betriebserklärung	ja	ja
zulassungspflichtig		-	beliebig	Überfliegen von Menschenansammlungen, Beförderung von Menschen, Transport gefährlicher Güter, gesicherte Steuerung durch Piloten, hohes Risiko für Dritte	Zulassung, Betreiberzeugnis, ggf. Fernpilotenlizenz	ja	ja

Anhang C Nutzwert- und Sensitivitätsanalyse

Fragebogen zur Nutzwertanalyse

Tab. C.1: Fragebogen der NWA zur Bewertung der Erfassungstechnologien anhand der Kriterien

Bewertungskriterium		Photogrammetrie Krankamera	Photogrammetrie Handkamera	Photogrammetrie Drohne	LiDAR Stativ	LIDAR Drohne	Mobile Mapping Systeme
Bezeichnung des AWF							
1.1	Aufwand						
1.2	Einsatzbereiche						
1.3	Entfernung						
1.4	Genauigkeit						
1.5	Kosten						
1.6	LOADA						
1.7	Gebrauchstauglichkeit						

Der Fragebogen wurde für die untersuchten AWF gemäß Abschnitt 3.1.2.4 bereitgestellt.

Tab. C.2: Fragebogen der NWA zur Bewertung der Kriterien für die untersuchten AWF

Bewertungskriterium		AWF 140 - Bau-fortschritts-kontrolle	AWF 160 - Abrechnung von Bau-leistungen	AWF 170 - Abnahme- und Mängel-manage-ment	AWF 190 - Projekt- und Bauwerks-dokumenta-tion
1.1	Aufwand				
1.2	Einsatzbereiche				
1.3	Entfernung				
1.4	Genauigkeit				
1.5	Kosten				
1.6	LOADA				
1.7	Gebrauchstauglichkeit				
	Summe = 28!				

Ergebnisse zu den Bewertungskriterien der Nutzwertanalyse

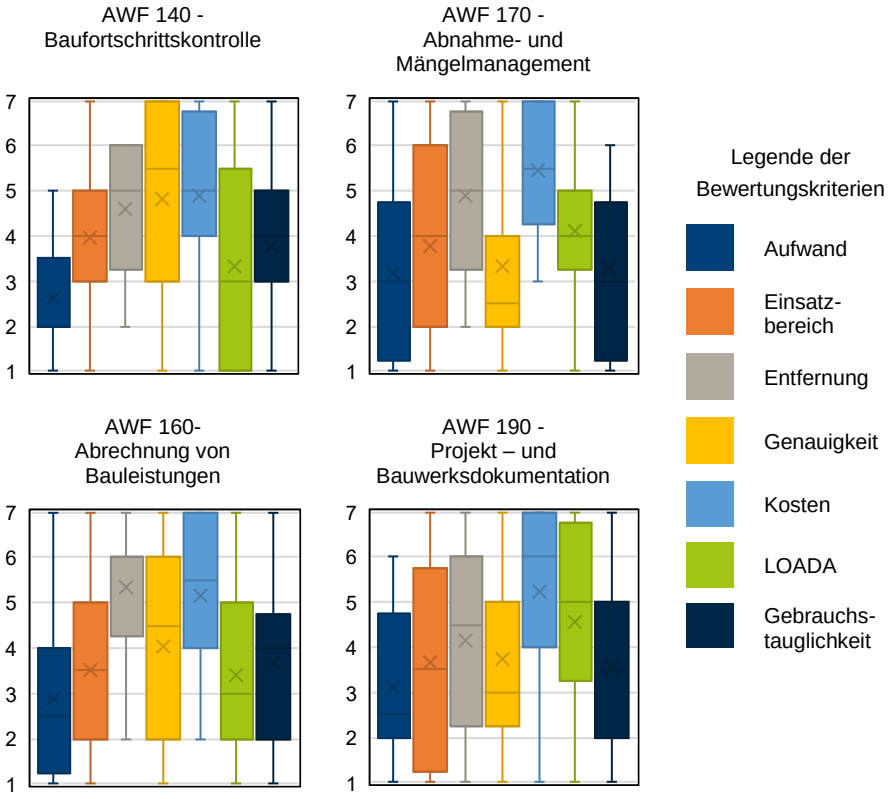


Abb. C.1: Verteilung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien in Ordinalskala für die untersuchten AWF innerhalb der NWA für die 18 befragten Personen

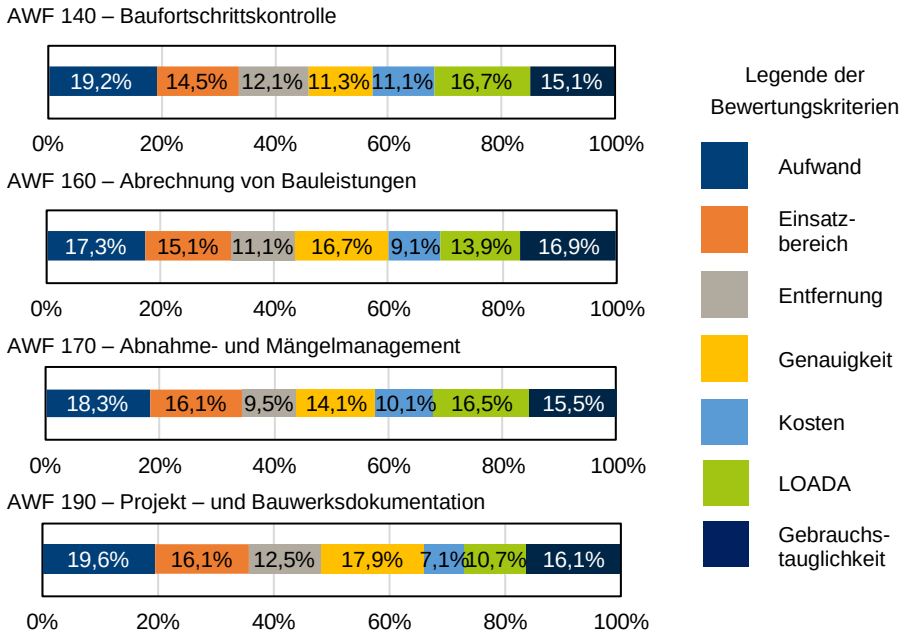


Abb. C.2: Prozentuale Verteilung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien für die untersuchten AWF innerhalb der NWA für die 18 befragten Personen

Nutzwerte nach Rangordnungsverfahren

Tab. C.3: Endrangfolge für den AWF 140 - Baufortschrittskontrolle

Befragte Person	Photogrammetrie Krankamera	Photogrammetrie Handkamera	Photogrammetrie Drohne	LiDAR Stativ	LIDAR Drohne	Mobile Mapping Systeme
01: $ER_{e;140;01}$	5	2	1	4	3	6
02: $ER_{e;140;02}$	6	1	5	3	4	2
03: $ER_{e;140;03}$	4	6	2	5	3	1
04: $ER_{e;140;04}$	1	3	5	6	4	2
05: $ER_{e;140;05}$	4	6	3	2	1	5
06: $ER_{e;140;06}$	5	1	4	3	2	6
07: $ER_{e;140;07}$	4	6	1	2	3	5
08: $ER_{e;140;08}$	6	4	2	5	1	3
09: $ER_{e;140;09}$	1	2	6	3	4	5
10: $ER_{e;140;10}$	3	6	2	4	1	5
11: $ER_{e;140;11}$	4	5	2	3	1	6
12: $ER_{e;140;12}$	1	2	4	5	3	6
13: $ER_{e;140;13}$	1	6	2	5	4	3
14: $ER_{e;140;14}$	2	1	5	3	6	3
15: $ER_{e;140;15}$	1	2	5	3	5	4
16: $ER_{e;140;16}$	5	4	2	1	3	6
17: $ER_{e;140;17}$	6	3	3	1	2	5
18: $ER_{e;140;18}$	6	5	2	4	1	3
$\sum ER_{e;140}$	**65**	**65**	**56**	**62**	**51**	**76**
Endrangfolge $R_{e,140}$	5	5	2	3	1	6

Tab. C.4: Endrangfolge für den AWF 160 - Abrechnung von Bauleistung

Befragte Person	**Photogrammetrie Krankamera**	**Photogrammetrie Handkamera**	**Photogrammetrie Drohne**	**LiDAR Stativ**	**LIDAR Drohne**	**Mobile Mapping Systeme**
01: $ER_{e;160;01}$	6	3	1	2	5	4
02: $ER_{e;160;02}$	6	2	5	4	3	1
03: $ER_{e;160;03}$	4	6	2	5	3	1
04: $ER_{e;160;04}$	1	2	4	5	6	3
05: $ER_{e;160;05}$	5	6	2	2	1	4
06: $ER_{e;160;06}$	1	2	5	4	3	6
07: $ER_{e;160;07}$	6	5	2	1	3	4
08: $ER_{e;160;08}$	6	5	2	4	1	3
09: $ER_{e;160;09}$	2	1	5	3	4	6
10: $ER_{e;160;10}$	4	6	2	3	1	5
11: $ER_{e;160;11}$	4	5	2	3	1	6
12: $ER_{e;160;12}$	1	4	3	5	2	6
13: $ER_{e;160;13}$	1	6	4	5	3	2
14: $ER_{e;160;14}$	6	2	4	1	4	3
15: $ER_{e;160;15}$	1	2	3	5	3	6
16: $ER_{e;160;16}$	5	5	2	1	3	4
17: $ER_{e;160;17}$	5	3	4	1	2	5
18: $ER_{e;160;18}$	6	4	2	5	1	3
$\sum ER_{e;160}$	**70**	**69**	**54**	**59**	**49**	**72**
Endrangfolge $R_{e,160}$	5	4	2	3	1	6

Tab. C.5: Endrangfolge für den AWF 170 - Abnahme- und Mängelmanagement

Befragte Person	**Photogrammetrie Krankamera**	**Photogrammetrie Handkamera**	**Photogrammetrie Drohne**	**LiDAR Stativ**	**LIDAR Drohne**	**Mobile Mapping Systeme**
01: $ER_{e;170;01}$	5	3	1	2	4	5
02: $ER_{e;170;02}$	6	1	5	4	3	2
03: $ER_{e;170;03}$	4	6	3	5	1	2
04: $ER_{e;170;04}$	4	5	3	2	6	1
05: $ER_{e;170;05}$	6	3	2	4	1	5
06: $ER_{e;170;06}$	1	3	4	5	2	6
07: $ER_{e;170;07}$	5	4	3	1	2	5
08: $ER_{e;170;08}$	6	1	2	4	5	2
09: $ER_{e;170;09}$	2	1	5	4	3	6
10: $ER_{e;170;10}$	3	6	2	4	1	5
11: $ER_{e;170;11}$	4	5	2	3	1	6
12: $ER_{e;170;12}$	2	4	3	4	1	6
13: $ER_{e;170;13}$	6	5	2	4	2	1
14: $ER_{e;170;14}$	6	1	3	3	3	2
15: $ER_{e;170;15}$	4	1	2	6	2	5
16: $ER_{e;170;16}$	5	6	2	1	3	4
17: $ER_{e;170;17}$	4	6	2	3	1	5
18: $ER_{e;170;18}$	6	5	2	4	1	3
$\sum ER_{e;170}$	**79**	**66**	**48**	**63**	**42**	**71**
Endrangfolge $R_{e,170}$	6	4	2	3	1	5

Tab. C.6: Endrangfolge für den AWF 190 - Projekt- und Bauwerksdokumentation

Befragte Person	**Photogrammetrie Krankamera**	**Photogrammetrie Handkamera**	**Photogrammetrie Drohne**	**LiDAR Stativ**	**LiDAR Drohne**	**Mobile Mapping Systeme**
01: $ER_{e;190;01}$	6	4	1	1	3	5
02: $ER_{e;190;02}$	6	1	5	3	4	2
03: $ER_{e;190;03}$	5	6	1	4	3	2
04: $ER_{e;190;04}$	1	5	4	3	6	2
05: $ER_{e;190;05}$	5	3	4	2	1	6
06: $ER_{e;190;06}$	1	2	5	4	3	6
07: $ER_{e;190;07}$	6	5	2	1	3	4
08: $ER_{e;190;08}$	6	5	2	4	1	2
09: $ER_{e;190;09}$	4	1	4	3	2	6
10: $ER_{e;190;10}$	4	6	2	3	1	5
11: $ER_{e;190;11}$	4	5	2	3	1	6
12: $ER_{e;190;12}$	1	4	2	5	3	6
13: $ER_{e;190;13}$	5	6	1	3	1	4
14: $ER_{e;190;14}$	4	1	5	2	5	3
15: $ER_{e;190;15}$	1	2	4	6	4	3
16: $ER_{e;190;16}$	6	4	2	1	3	5
17: $ER_{e;190;17}$	4	5	3	1	2	5
18: $ER_{e;190;18}$	6	5	2	4	1	3
$\sum ER_{e;190}$	**75**	**70**	**51**	**53**	**47**	**75**
Endrangfolge $R_{e,190}$	6	4	2	3	1	6

Tab. C.7: Endrangfolgen für die Erfassungstechnologien der untersuchten AWF innerhalb der NWA für 18 befragten Personen

	AWF 140 – Baufortschrittskontrolle		**AWF 160 - Abrechnung von Bauleistungen**		**AWF 170 - Abnahme- und Mängelmanagment**		**AWF 190 - Projekt- und Bauwerksdokumentation**	
Erfassungstechnologie	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang
Photogrammetrie Krankamera	65	5	70	5	79	6	75	6
Photogrammetrie Handkamera	65	5	69	4	66	4	70	4
Photogrammetrie Drohne	56	2	54	2	48	2	51	2
LiDAR Stativ	62	3	59	3	63	3	53	3
LiDAR Drohne	51	1	49	1	42	1	47	1
Mobile Mapping Systeme	76	6	72	6	71	5	75	6

Durchführung der Sensitivitätsanalysen

Sensitivitätsanalyse: Gleichsetzung von Bewertungskriterien und Bewertungen

Nach *Kühnapfel - 2021* werden bei einer Gleichsetzung sowohl Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien als auch die Bewertungen der befragten Personen gleichgesetzt. Die Berechnung der Nutzwerte nach dem Durchschnittsverfahren gemäß Gleichung (3.3) wird durch Gleichsetzung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien (S1) zu Gleichung (C.1) bzw. Gleichsetzung der Teil-Nutzwerte der befragten Personen (S2) zu Gleichung (C.2) angepasst.

$$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S1} = \sum_{b=1}^{BK} \tilde{g}_{b;a} * \overline{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.1}$$

$$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S2} = \sum_{b=1}^{BK} \ddot{g}_{b;a} * \widetilde{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.2}$$

mit

$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S1}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Gleichsetzung der wichtigsten Bewertungskriterien.
$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S2}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Gleichsetzung der wichtigsten Bewertungen.
$\tilde{g}_{b;a}$	Gleichsetzung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien b untereinander.
$\widetilde{\mathrm{BP}}_{e;b;a}$	Gleichsetzung der Teil-Nutzwerte der befragten Personen untereinander.

Nachfolgend ist ein Beispiel einer Gleichsetzung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien (S1) und der Bewertungen aller befragten Personen (S2) für a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle und Erfassungstechnologie e = LiDAR Drohne. Die Bewertungskriterien werden mit einem Gewichtungsfaktor von 14,3 % (entspricht einem siebten Anteil von 100 %) berücksichtigt, während die Bewertung selbst mit 2,62 von 18,33 (entspricht ebenfalls einem siebten Anteil von 100 %) bewertet wird. Bei der Gleichsetzung von Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien als auch der Bewertungen der befragten Personen tritt kein Unterschied auf.

Tab. C.8: Beispiel für eine Gleichsetzung der Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien und der Bewertungen aller befragten Personen

Verfahren		**Durchschnitts-verfahren**			**S1**		**S2**	
Bewertungskriterium		**Gewichtung [%]**	**Bewertung**	**Teilnutzwert**	**Gleichgesetzte Gewichtung [%]**	**Teilnutzwert**	**Gleichgesetzte Bewertung**	**Teilnutzwert**
1.1	Aufwand	19,2	2,56	0,49	14,3	0,37	2,62	0,50
1.2	Einsatzbereiche	14,5	2,39	0,35	14,3	0,34	2,62	0,38
1.3	Entfernung	12,1	3,22	0,39	14,3	0,46	2,62	0,32
1.4	Genauigkeit	11,3	3,22	0,36	14,3	0,46	2,62	0,30
1.5	Kosten	11,1	2,06	0,23	14,3	0,30	2,62	0,30
1.6	LOADA	16,7	2,44	0,41	14,3	0,35	2,62	0,44
1.7	Gebrauchstauglichkeit	15,1	2,44	0,37	14,3	0,35	2,62	0,40
$\sum \mathrm{GN}_{e;140}^{\text{S1 bzw. S2}}$		100	18,33	2,60	100	2,62	18,33	2,62

Sensitivitätsanalyse: Glättung von Ausreißern

Nach *Kühnapfel - 2021* wird bei einer Glättung von Ausreißern jeweils ein Durchschnittswert der zwei wichtigsten sowie der zwei unwichtigsten Bewertungskriterien sowie der Bewertungen der befragten Personen gebildet. Dabei bleibt die verbleibende Gewichtung unverändert. Die Berechnung der Nutzwerte nach dem Durchschnittsverfahren wird durch Glättung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien (S3) zu Gleichung (C.3) bzw. Glättung der Bewertung der befragten Personen (S4) zu Gleichung (C.4) angepasst.

$$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S3} = \sum_{b=1}^{BK} \breve{g}_{e;a} * \overline{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.3}$$

$$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S4} = \sum_{b=1}^{BK} \breve{\breve{g}}_{b;a} * \breve{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.4}$$

mit $\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S3}$ Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Glättung von Ausreißern der wichtigsten Bewertungskriterien.

$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S4}$ Gesamtnutzen Sensitivitätsanalyse aufgrund der Glättung von Ausreißer der wichtigsten Bewertungen.

$\breve{g}_{e;a}$ Glättung der Gewichtsfaktoren der Kriterien b.

$\breve{\mathrm{BP}}_{e;b;a}$ Glättung der Bewertung der befragten Personen.

Nachfolgend zeigt ein Beispiel für die Glättung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien (S3) bzw. der Bewertung aller befragten Personen (S4) für AWF a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle und Erfassungstechnologie e = LiDAR Drohne. Aus den Kriterien der niedrigsten und höchsten Gewichtung sowie Bewertung wird jeweils der Durchschnitt gebildet und ergibt somit eine neue geglättete Bewertung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien (S3) bzw. der Bewertung der befragten Personen (S4).

Tab. C.9: Beispiel für eine Glättung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien sowie der Bewertungen aller befragten Personen

Verfahren		**Durchschnittsverfahren**			**S3**		**S4**	
Bewertungskriterium		**Gewichtung [%]**	**Bewertung**	**Teilnutzwert**	**Geglättete Gewichtung [%]**	**Teilnutzwert**	**Geglättete Bewertung**	**Teilnutzwert**
1.1	Aufwand	19,2	2,56	0,49	18,8	0,46	2,56	0,49
1.2	Einsatzbereiche	14,5	2,39	0,35	14,5	0,35	2,22	0,32
1.3	Entfernung	12,1	3,22	0,39	12,1	0,39	3,22	0,39
1.4	Genauigkeit	11,3	3,22	0,36	11,2	0,61	3,22	0,36
1.5	Kosten	11,1	2,06	0,23	11,2	0,23	2,22	0,25
1.6	LOADA	16,7	2,44	0,41	18,0	0,44	2,44	0,41
1.7	Gebrauchstauglichkeit	15,1	2,44	0,37	15,1	0,37	2,44	0,37
$\sum \mathrm{GN}_{e;140}^{\text{S3 bzw. S4}}$		100	18,33	2,60	100	2,59	18,32	2,59

Sensitivitätsanalyse: Spreizung der wichtigsten Bewertungskriterien und Bewertungen

Nach *Kühnapfel - 2021* liegt der Fokus bei einer Spreizung verstärkt auf den bedeutendsten Bewertungskriterien, während die weniger wichtigen Kriterien weniger Beachtung finden. Eine gängige Praxis sieht vor, dass die Kriterien, die zu den rund 20 % wichtigsten gehören, um 25 % erhöht werden. Die maximale Bewertung gemäß dem Bewertungsschema darf nicht überschritten werden. Gleichzeitig werden die Gewichtungen aller anderen Kriterien proportional reduziert. Die Berechnung der Nutzwerte nach dem Durchschnittsverfahren wird durch eine Spreizung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien zu (S5) Gleichung (C.5) bzw. eine Spreizung der Bewertung der befragten Personen (S6) zu Gleichung (C.6) angepasst.

$$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S5} = \sum_{b=1}^{BK} \hat{g}_{e;a} * \overline{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.5}$$

$$\mathrm{GN}_{e,;a}{}^{S6} = \sum_{n=1}^{BK} \ddot{g}_{b;a} * \widehat{\mathrm{BP}}_{e;b;a} \tag{C.6}$$

mit

$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S5}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Spreizung der wichtigsten Bewertungskriterien.
$\mathrm{GN}_{e;a}{}^{S6}$	Gesamtnutzen der Sensitivitätsanalyse aufgrund der Spreizung der wichtigsten Bewertungen.
$\hat{g}_{e;a}$	Spreizung der Gewichtsfaktoren der Kriterien b.
$\widehat{\mathrm{BP}}_{e;b;a}$	Spreizung der Bewertung der befragten Personen.

Nachfolgend ist ein Beispiel für die Spreizung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien für AWF a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle und Erfassungstechnologie e = LiDAR Drohne dargestellt. Das Gewicht der Bewertungskriterien 1.1 und 1.6 wird um 25 % erhöht. Im Gegensatz dazu werden die Bewertungskriterien 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 und 1.7 um 14,0 % reduziert, um sicherzustellen, dass das Gesamtgewicht unverändert bei 100 % bleibt.

Tab. C.10: Beispiel für eine Spreizung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien

Verfahren		**Durchschnittsverfahren**			**S5**		
Bewertungskriterium		**Gewichtung [%]**	**Bewertung**	**Teilnutzwert**	**Spreizung [%]**	**Gewichtung [%]**	**Teilnutzwert**
1.1	Aufwand	19,2	2,56	0,49	+ 25,0	24,1	0,61
1.2	Einsatzbereiche	14,5	2,39	0,35	- 14,0	12,5	0,30
1.3	Entfernung	12,1	3,22	0,39	- 14,0	10,4	0,34
1.4	Genauigkeit	11,3	3,22	0,36	- 14,0	9,7	0,31
1.5	Kosten	11,1	2,06	0,23	- 14,0	9,6	0,20
1.6	LOADA	16,7	2,44	0,41	+ 25,0	20,8	0,51
1.7	Gebrauchstauglichkeit	15,1	2,44	0,37	- 14,0	13,0	0,32
	$\sum \mathrm{GN}_{e;140}{}^{S5}$	100	18,33	2,60		100	2,59

Nachfolgend ist ein Beispiel für die Spreizung der Gewichtsfaktoren der Bewertungskriterien für AWF a = AWF 140 – Baufortschrittskontrolle und Erfassungstechnologie e = LiDAR Drohne dargestellt. Die Bewertungskriterien 1.3 und 1.4 haben den größten Einfluss. Ihre Bewertung wird um 25 % erhöht, kann jedoch nicht die maximale Bewertung der Bewertungsskala gemäß Abschnitt 3.1.2.7 überschreiten. Im Gegensatz dazu werden die Bewertungskriterien 1.1, 1.2, 1.5, 1.6 und 1.7 um 13,1 % reduziert, um sicherzustellen, dass die Gesamtbewertung unverändert bei 18,33 bleibt.

Tab. C.11: Beispiel für eine Spreizung der Bewertung aller befragten Personen

Verfahren		**Durchschnittsverfahren**			**S6**		
Bewertungskriterien		**Gewichtung [%]**	**Bewertung**	**Teilnutzwert**	**Spreizung [%]**	**Bewertung [%]**	**Teilnutzwert**
1.1	Aufwand	19,2	2,56	0,49	- 13,1	2,22	0,53
1.2	Einsatzbereiche	14,5	2,39	0,35	- 13,1	2,08	0,26
1.3	Entfernung	12,1	3,22	0,39	+ 25,0	4,00	0,42
1.4	Genauigkeit	11,3	3,22	0,36	+ 25,0	4,00	0,39
1.5	Kosten	11,1	2,06	0,23	- 13,1	1,79	0,17
1.6	LOADA	16,7	2,44	0,41	- 13,1	2,13	0,44
1.7	Gebrauchstauglichkeit	15,1	2,44	0,37	- 13,1	2,13	0,28
	$\sum \mathrm{GN}_{e;140}{}^{S6}$	100	18,33	2,60		18,33	2,49

Nachfolgend sind die Gesamtübersichten der durchgeführten Sensitivitätsanalysen der untersuchten AWF innerhalb der NWA für die 18 befragten Personen aufgeführt.

Tab. C.12: Gesamtübersicht der Sensitivitätsanalysen für den AWF 140 und AWF 190

Erfassungs-technologie	Durchschnittsverfahren		Gleichsetzung von Bewertungs-kriterien und Bewertungen		Glättung von Ausreißern bei Gewichtungsfaktoren der Bewertungskriterien		Glättung von Ausreißern bei der Bewertung		Spreizung bei Gewichtungs-faktoren der Bewertungs-kriterien		Spreizung bei der Bewertung	
	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang
AWF 140 – Baufortschrittskontrolle												
Photogrammetrie Krankamera	2,2	4	2,2	5	2,2	4	2,2	5	2,3	3	2,3	3
Photogrammetrie Handkamera	2,2	4	2,3	4	2,2	4	2,4	3	2,2	6	2,1	6
Photogrammetrie Drohne	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,4	2
LiDAR Stativ	2,4	3	2,4	3	2,4	3	2,4	3	2,3	3	2,3	3
LiDAR Drohne	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,5	1
Mobile Mapping Systeme	2,2	4	2,2	5	2,2	4	2,2	5	2,3	3	2,2	5
AWF 160 – Abrechnung von Bauleistungen												
Photogrammetrie Krankamera	2,1	5	2,1	5	2,1	5	2,1	6	2,2	4	2,2	4
Photogrammetrie Handkamera	2,0	6	2,1	5	2,1	5	2,4	3	2,1	6	2,1	6
Photogrammetrie Drohne	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,4	2
LiDAR Stativ	2,5	2	2,4	3	2,4	3	2,4	3	2,4	3	2,4	2
LiDAR Drohne	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,5	1
Mobile Mapping Systeme	2,2	4	2,2	4	2,2	4	2,2	5	2,2	4	2,2	4

Tab. C.13: Gesamtübersicht der Sensitivitätsanalysen für den AWF 170 und 190

Erfassungs-technologie	Durchschnittsverfahren		Gleichsetzung von Bewertungs-kriterien und Bewertungen		Glättung von Ausreißern bei Ge-wichtungsfaktoren der Bewer-tungskriterien		Glättung von Ausreißern bei der Bewertung		Spreizung bei Gewichtungsfakto-ren der Bewertungskriterien		Spreizung bei der Bewertung	
	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang	Σ	Rang
AWF 170 - Abnahme- und Mängelmanagement												
Photogrammetrie Krankamera	1,9	6	1,8	6	1,9	6	1,9	6	1,9	6	1,9	6
Photogrammetrie Handkamera	2,2	4	2,3	4	2,2	4	2,3	3	2,2	4	2,2	3
Photogrammetrie Drohne	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,5	2	2,4	2
LiDAR Stativ	2,4	3	2,4	3	2,4	3	2,3	3	2,3	3	2,2	3
LiDAR Drohne	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,6	1	2,5	1
Mobile Mapping Systeme	2,1	5	2,1	5	2,2	4	2,1	5	2,1	5	2,1	5
AWF 190 - Projekt- und Bauwerksdokumentation												
Photogrammetrie Krankamera	2,1	6	2,2	6	2,1	6	2,1	6	2,1	6	2,1	6
Photogrammetrie Handkamera	2,4	4	2,4	4	2,4	4	2,6	2	2,3	5	2,2	5
Photogrammetrie Drohne	2,6	2	2,6	1	2,6	2	2,6	2	2,6	3	2,6	3
LiDAR Stativ	2,6	2	2,5	3	2,6	2	2,6	2	2,7	1	2,7	2
LiDAR Drohne	2,7	1	2,6	1	2,7	1	2,7	1	2,7	1	2,8	1
Mobile Mapping Systeme	2,3	5	2,3	5	2,4	4	2,3	5	2,4	4	2,4	4

Anhang D Empirische Studie zum Einsatz von Drohnen

Fragebogen der empirischen Studie

Tab. D.1: Fragebogen der empirischen Studie

Nummer	Frage	Verzweigung
1	Welchem Geschlecht ordnen Sie sich zu?	
	Männlich	Gehe zu Frage 2
	Weiblich	Gehe zu Frage 2
	Divers	Gehe zu Frage 2
	Keine Angabe	Gehe zu Frage 2
2	Welcher Alterskategorie ordnen Sie sich zu?	
	Unter 18 Jahren	Gehe zu Frage 3
	18-24 Jahre	Gehe zu Frage 3
	25-34 Jahre	Gehe zu Frage 3
	35-44 Jahre	Gehe zu Frage 3
	45-54 Jahre	Gehe zu Frage 3
	55-64 Jahre	Gehe zu Frage 3
	Über 65 Jahre	Gehe zu Frage 3
3	Wie viel Berufserfahrung besitzen Sie im Vermessungswesen?	
	Weniger als 1 Jahr	Gehe zu Frage 4
	1-5 Jahre	Gehe zu Frage 4
	6-10 Jahre	Gehe zu Frage 4
	11-15 Jahre	Gehe zu Frage 4
	Über 15 Jahre	Gehe zu Frage 4
	Keine Angabe	Gehe zu Frage 4
4	Welcher Kategorie ist Ihr Arbeitgeber zuzuordnen?	
	Ingenieurbüro	Gehe zu Frage 5
	Vermessungsbüro	Gehe zu Frage 5
	Öffentlich bestellte Vermessungsingenieure (ÖbVI)	Gehe zu Frage 5
	Ausführendes Unternehmen	Gehe zu Frage 5
	Anlagenbetreiber (Bund, Land, Stadt, Kommune)	Gehe zu Frage 5
	Öffentlicher Dienst	Gehe zu Frage 5
	Forschung (Universitäten/Hochschulen) und Entwicklung	Gehe zu Frage 5
	Sonstiges	Gehe zu Frage 5
	Keine Angabe	Gehe zu Frage 5

Tab. D.1 (Fortsetzung)

5	Welchen akademischen Grad und welche sonstige Ausbildung besitzen Sie?	
	Hauptschulabschluss	Gehe zu Frage 6
	Realschulabschluss	Gehe zu Frage 6
	Berufsausbildung (z.B. Vermessungstechniker)	Gehe zu Frage 6
	Meisterabschluss	Gehe zu Frage 6
	Bachelor-Abschluss	Gehe zu Frage 6
	Master-Abschluss	Gehe zu Frage 6
	Promotion (Doktorgrad)	Gehe zu Frage 6
	Habilitation	Gehe zu Frage 6
	Sonstiges (z.B. Diplom-Ingenieur, Assessor etc.)	Gehe zu Frage 6
	Keine Angabe	Gehe zu Frage 6
6	Bitte geben Sie das Land an, in dem Sie gerade arbeiten.	
	Deutschland	Gehe zu Frage 7
	Österreich	Gehe zu Frage 7
	Schweiz	Gehe zu Frage 7
	Keine Angabe	Gehe zu Frage 7
7	Wie viele Personen sind bei Ihrem Arbeitgeber beschäftigt?	
	< 10 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
	11-50 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
	51-100 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
	101-250 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
	> 250 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
	> 500 Mitarbeitende	Gehe zu Frage 8
8	Haben Sie Erfahrungen im Einsatz von Drohnen für Vermessungszwecke?	
	Ja	Gehe zu Frage 9
	Nein	Gehe zu Frage 22
9	Wie häufig verwenden Sie Drohnen in Ihrem Berufsalltag?	
	Täglich	Gehe zu Frage 10
	Mehrmals die Woche	Gehe zu Frage 10
	Einmal pro Woche	Gehe zu Frage 10
	Einmal pro Monat	Gehe zu Frage 10
	Seltener	Gehe zu Frage 10

Tab. D.1 (Fortsetzung)

10	Welche Arten von Drohnen haben Sie bereits für Vermessungszwecke eingesetzt?	
	Photogrammetrische Drohnen	Gehe zu Frage 11
	LiDAR-bestückte Drohnen	Gehe zu Frage 11
	Beide	Gehe zu Frage 11
11	Welche Arten von Drohnen haben Sie im Unternehmen im Einsatz bzw. sind beschafft worden?	
	Photogrammetrische Drohnen	Gehe zu Frage 12
	LiDAR-bestückte Drohnen	Gehe zu Frage 12
	Beide	Gehe zu Frage 12
	Keine	Gehe zu Frage 12
12	Wenn Sie eine LiDAR Drohne verwendet haben, wie würden Sie den Grad des Einsatzes bewerten?	
	Sehr häufig	Gehe zu Frage 13
	Häufig	Gehe zu Frage 13
	Gelegentlich	Gehe zu Frage 13
	Selten	Gehe zu Frage 13
	Noch nie verwendet	Gehe zu Frage 13
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 13
13	Welche Anwendungsgebiete haben Sie eine LiDAR Drohne abgedeckt? (Mehrfachnennung möglich)	
	Geländemodellierung	Gehe zu Frage 14
	Volumenberechnungen	Gehe zu Frage 14
	Straßenplanung und -vermessung	Gehe zu Frage 14
	Bauüberwachung	Gehe zu Frage 14
	Waldinventur	Gehe zu Frage 14
	Archäologie	Gehe zu Frage 14
	Keine	Gehe zu Frage 14
	Sonstiges	Gehe zu Frage 14
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 14

Tab. D.1 (Fortsetzung)

14	Welche Vorteile sehen Sie beim Einsatz von einer LiDAR Drohne im Vergleich zu Photogrammetrie Drohne? (Mehrfachnennung möglich)	
	Höhere Genauigkeit der Daten	Gehe zu Frage 15
	Bessere Erfassung von komplexen Geländeformen	Gehe zu Frage 15
	Effizientere Datenerfassung	Gehe zu Frage 15
	Schnellere Verarbeitungszeiten	Gehe zu Frage 15
	Keine Vorteile	Gehe zu Frage 15
	Sonstiges	Gehe zu Frage 15
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 15
15	Welche Herausforderungen haben Sie beim Einsatz einer LiDAR Drohne erlebt? (Mehrfachnennung möglich)	
	Hohe Anschaffungskosten für die LiDAR-Technologie	Gehe zu Frage 16
	Komplexität der Datenauswertung	Gehe zu Frage 16
	Begrenzte Reichweite der Drohnen	Gehe zu Frage 16
	Schwierigkeiten bei der Integration der LiDAR-Daten mit anderen Vermessungsdaten	Gehe zu Frage 16
	Sonstiges	Gehe zu Frage 16
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 16
16	Wie würden Sie ihre bisherigen Gesamtinvestitionskosten für den Erwerb einer LiDAR Drohne einschließlich Hardware und notwendiger Schulungsmaßnahmen einschätzen?	
	Weniger als 10.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	10.000 Euro bis 25.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	25.000 Euro bis 50.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	50.000 Euro bis 150.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	Über 150.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	Über 250.000 Euro	Gehe zu Frage 17
	Kein Erwerb	Gehe zu Frage 17

Tab. D.1 (Fortsetzung)

17	Inwieweit würden Sie die anwendungsorientierte Nutzung einer LiDAR Drohne weiterempfehlen?	
	Sehr stark empfehlen	Gehe zu Frage 18
	Eher empfehlen	Gehe zu Frage 18
	Neutral	Gehe zu Frage 18
	Eher nicht empfehlen	Gehe zu Frage 18
	Gar nicht empfehlen	Gehe zu Frage 18
	Sehr stark empfehlen	Gehe zu Frage 18
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 18
18	Bevorzugen Sie die Erfassung mit einer anderen Technologie?	
	Nein, ich bevorzuge LiDAR Drohnen	Gehe zu Frage 19
	Ich habe keine Präferenz	Gehe zu Frage 19
	Sonstiges	Gehe zu Frage 19
	Keine Erfahrung mit LiDAR (Siehe Frage 11)	Gehe zu Frage 19
19	Wie erfolgt die Befliegung bei Ihnen?	
	Mittels vorgeplanter Flugroute für eine horizontale (Nadir Ausrichtung) Erfassung	Gehe zu Frage 20
	Mittels vorgeplanter Flugroute für eine horizontale Erfassung (z.B. mit einer 45° geneigten Kamera, um gewisse Höheninformationen zu erfassen)	Gehe zu Frage 20
	Mittels manuellen Modus, um hauptsächlich vertikale Flächen zu erfassen	Gehe zu Frage 20
	Kombination aus horizontaler und vertikaler Erfassung	Gehe zu Frage 20
	Sonstiges	Gehe zu Frage 20
20	Wie schätzen Sie die zukünftige Entwicklung des Einsatzes einer LiDAR Drohne im Vermessungswesen ein?	
	Es wird stark zunehmen	Gehe zu Frage 21
	Es wird moderat zunehmen	Gehe zu Frage 21
	Keine Veränderung	Gehe zu Frage 21
	Es wird moderat abnehmen	Gehe zu Frage 21
	Es wird stark abnehmen	Gehe zu Frage 21
21	Welche weiteren technologischen Entwicklungen wären Ihrer Meinung nach wünschenswert, um den Einsatz einer LiDAR Drohne im Vermessungswesen zu verbessern?	
	Ihre Antwort eingeben	Gehe zu Frage 22
22	Gibt es sonstige Anmerkungen oder Erfahrungen, die Sie teilen möchten?	
	Ihre Antwort eingeben	Ende

Umfrage Ergebnisse zu Fragen zur Demografie

Geschlechtsverteilung

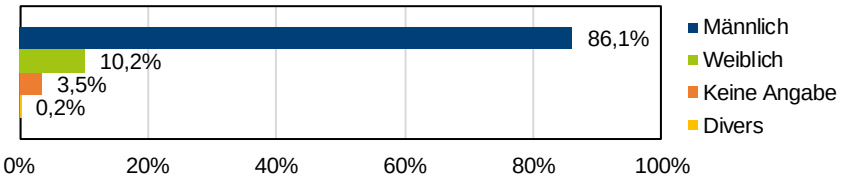


Abb. D.1: Empirische Studie – Geschlechtsverteilung (n = 423)

Altersverteilung

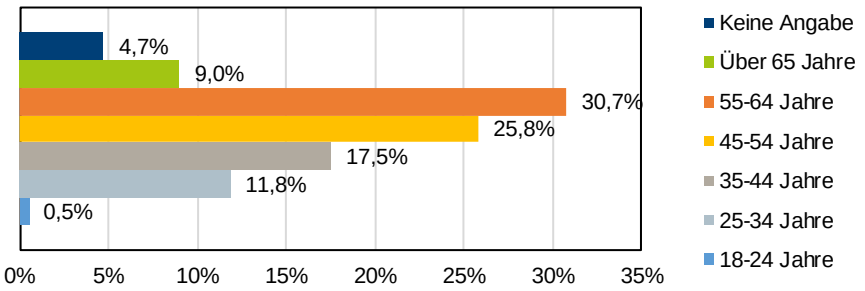


Abb. D.2: Empirische Studie – Altersverteilung (n = 423)

Berufserfahrung

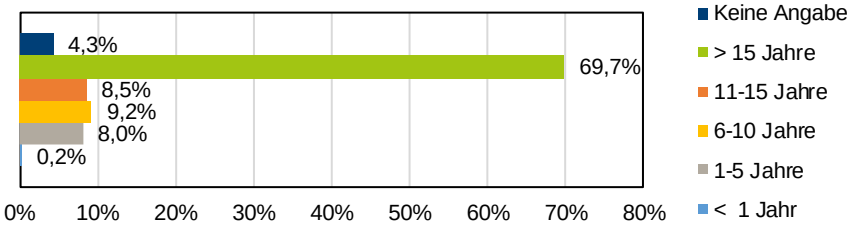


Abb. D.3: Empirische Studie – Berufserfahrung (n = 423)

Arbeitsgeberkategorie

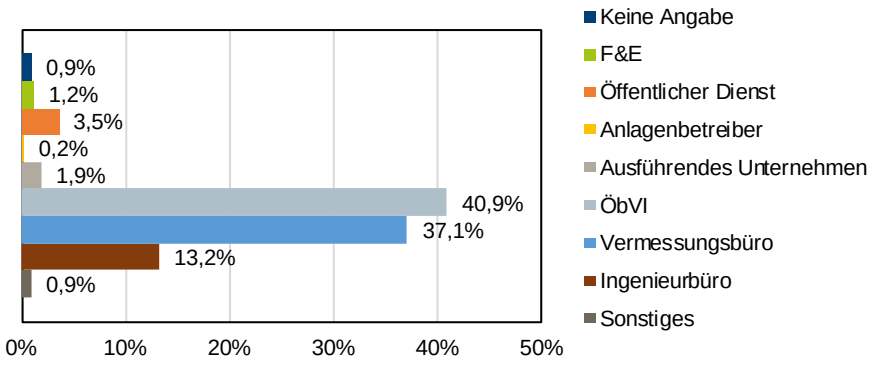


Abb. D.4: Empirische Studie – Arbeitsgeberkategorie (n = 423)

Akademischer Grad

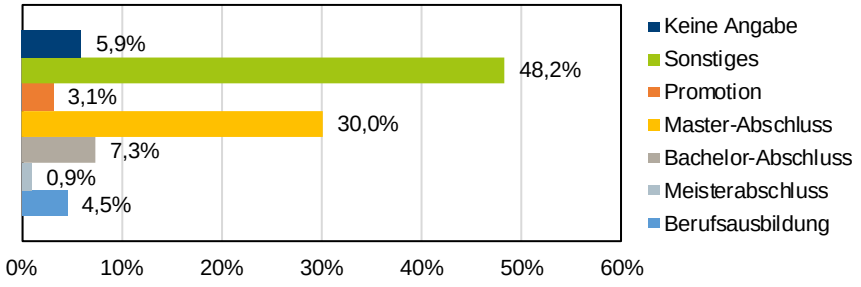


Abb. D.5: Empirische Studie – Akademischer Grad (n = 423)

Länderkategorie

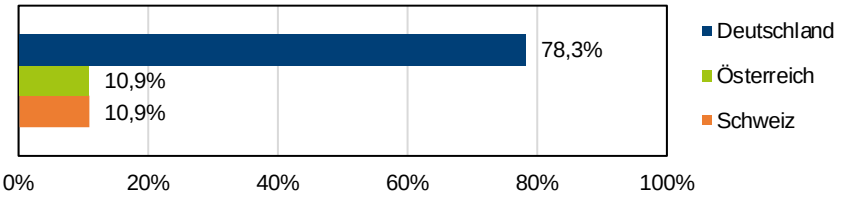


Abb. D.6: Empirische Studie – Länderkategorie (n = 423)

Unternehmensgröße (Anzahl der Mitarbeitenden)

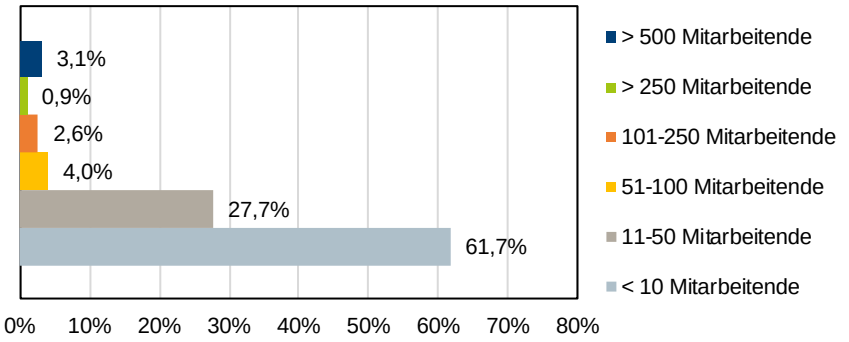


Abb. D.7: Empirische Studie – Unternehmensgröße (n = 423)

Umfrage Ergebnisse zu Fragen zum Einsatz und Erfahrungen von Drohnen

Im zweiten Abschnitt des Fragebogens wurden spezifischen Fragen zu den Erfassungstechnologien LiDAR Drohne und Photogrammetrie Drohne gestellt. Nachfolgend werden die Antworten zu diesen Fragen präsentiert.

Kategorie: Nutzung von und Erfahrungen mit Drohnen

Haben Sie Erfahrungen im Einsatz von Drohnen für Vermessungszwecke?

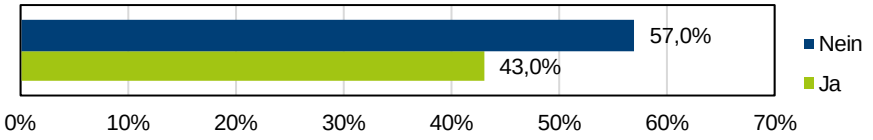


Abb. D.8: Empirische Studie – Erfahrungen im Einsatz von Drohnen für Vermessungszwecke (n = 423)

Welche Arten von Drohnen haben Sie bereits für Vermessungszwecke eingesetzt?

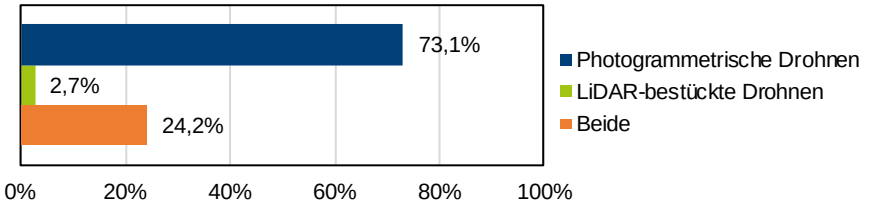


Abb. D.9: Empirische Studie – Erfahrung mit Drohnen zu Vermessungszwecke (n = 182)

Welche Arten von Drohnen haben Sie in Ihrem Unternehmen im Einsatz bzw. sind beschafft worden?

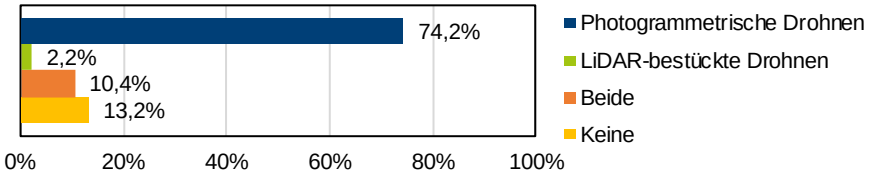


Abb. D.10: Empirische Studie – Arten von Drohnen im Unternehmen (n = 182)

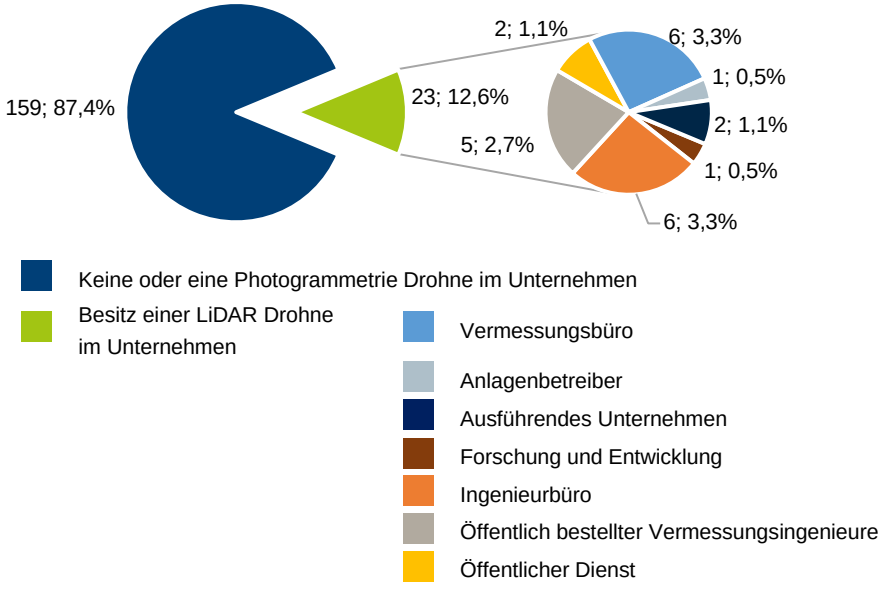


Abb. D.11: Empirische Studie – Arten von Drohnen im Unternehmen in Bezug auf die Arbeitgeberkategorien (n = 182)

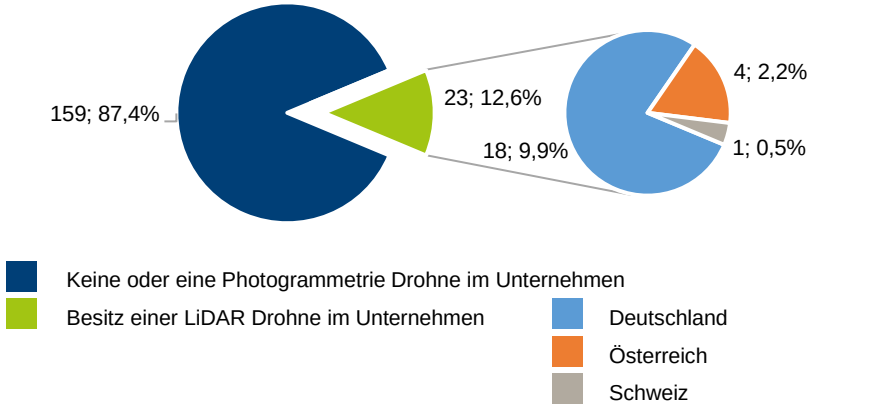


Abb. D.12: Empirische Studie – Arten von Drohnen im Unternehmen in Bezug auf die Länderkategorie (n = 182)

Wie erfolgt die Befliegung bei Ihnen? (Mehrfachnennung möglich)

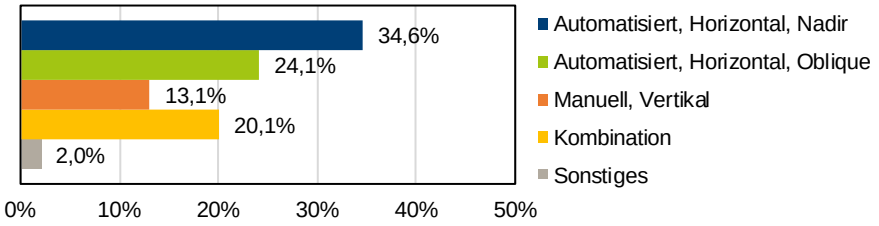


Abb. D.13: Empirische Studie – Umsetzung der Befliegung zur Datenerfassung (n = 182)

Kategorie: Einsatz einer LiDAR Drohnen und deren Bewertung

Wenn Sie eine LiDAR Drohne verwendet haben, wie würden Sie den Grad des Einsatzes bewerten?

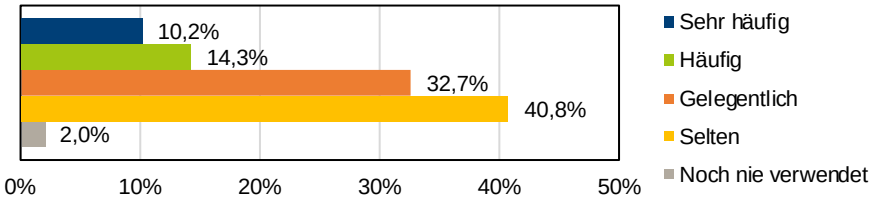


Abb. D.14: Empirische Studie – Einsatzgrad einer LiDAR Drohne (n = 49)

Welche Anwendungsgebiete haben Sie mit eine LiDAR Drohne abgedeckt? (Mehrfachnennung möglich)

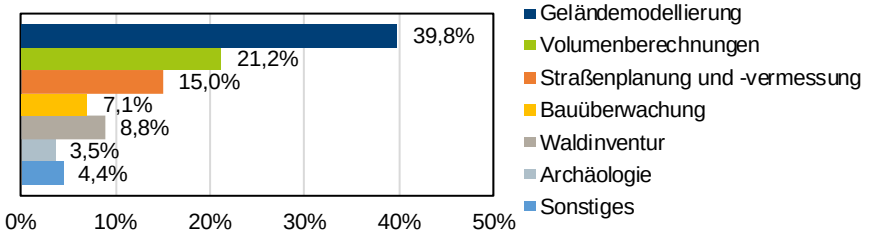


Abb. D.15: Empirische Studie – Anwendungsgebiete einer LiDAR Drohne (n = 49)

Welche Herausforderungen haben Sie beim Einsatz von einer LiDAR Drohne erlebt? (Mehrfachnennung möglich)

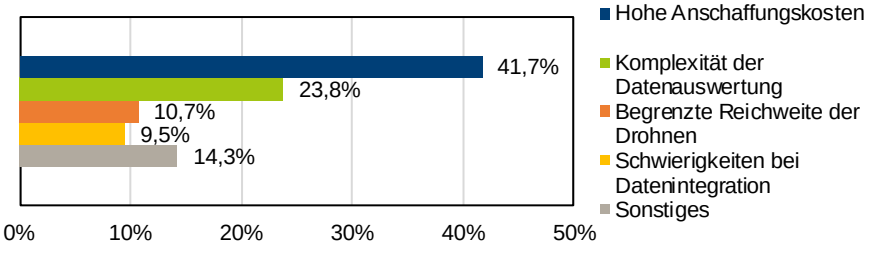


Abb. D.17: Empirische Studie – Herausforderungen beim Einsatz einer LiDAR Drohne (n = 49)

Kategorie: Investition und Empfehlungen

Wie würden Sie ihre bisherigen Gesamtinvestitionskosten für den Erwerb einer LiDAR Drohne einschließlich Hardware und notwendiger Schulungsmaßnahmen einschätzen?

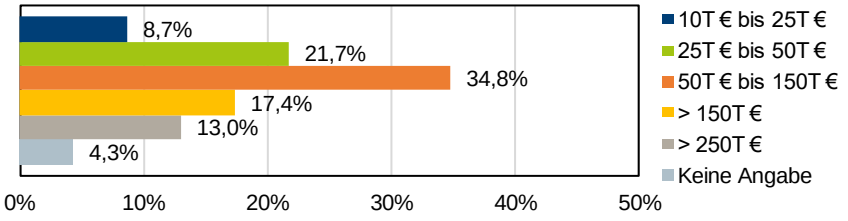


Abb. D.18: Empirische Studie – Gesamtinvestitionskosten für den Erwerb einer LiDAR Drohne einschließlich Hardware und notwendiger Schulungsmaßnahmen (n = 23)

Bevorzugen Sie die Erfassung mit einer anderen Technologie?

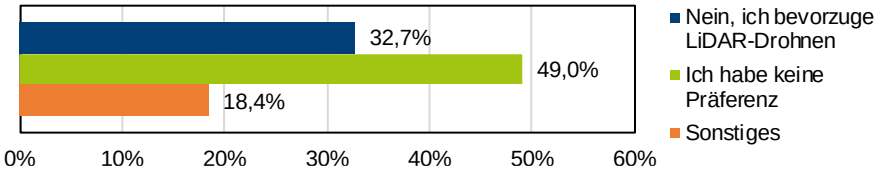


Abb. D.19: Empirische Studie – Präferenz zur drohnenbasierten Datenerfassung (n = 49)

Kategorie: Zukunftsaussichten und Optimierungen

Wie schätzen Sie die zukünftige Entwicklung des Einsatzes von einer LiDAR Drohne im Vermessungswesen ein?

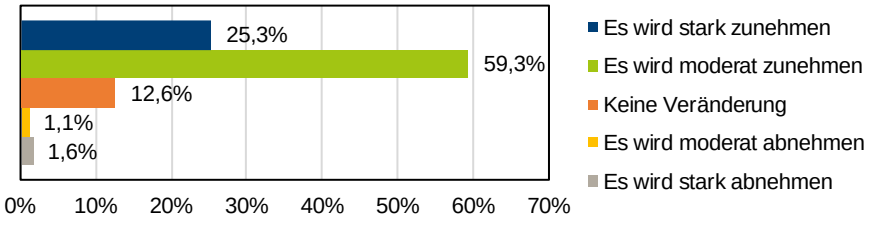


Abb. D.20: Empirische Studie – Einschätzung zur zukünftigen Entwicklung einer LiDAR Drohne (n = 182)

Gibt es sonstige Anmerkungen oder Erfahrungen, die Sie teilen möchten?

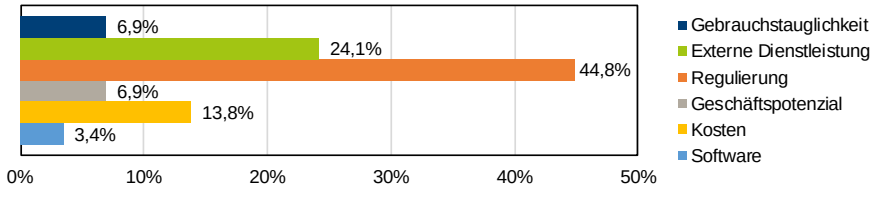


Abb. D.21: Empirische Studie – Weitere Anmerkungen (n = 28)

Anhang E Zusatzinformationen zu den Abschnitten 4.1.2 und 4.2.2

Einführung des Fachmodells "**Drohnenbasierte Datenerfassung**"

Tab. E.1: Struktur des Fachmodells DBDA mit Beschreibung und Beispielnamen des geometrischen Objekts in der Informationsdomäne "*geometry*"

Struktur	**Beschreibung**	**Beispielname**
Fachmodell	Drone Based Data Acquisition	
Vorgang	Drohnenerfassbarer Vorgang mit Ordnungszahl und Vorgangsname	1.1.1.2.1.6.2.3_Beton einbauen
Container	drone-acquirable critical surfaces	
Objekt	Fläche mit Identifikator und Nummerierung	CS_ING_BBW_GRU_FUN_03
Container	drone waypoints	
Objekt	Punkt mit Identifikator und Nummerierung	WP_ING_BBW_GRU_FUN_03_001
Container	idealized flight path	
Objekt	Linie mit Identifikator und Nummerierung	IFP_ING_BBW_GRU_FUN_03_001
Container	flight corridor	
Objekt	Körper des Flugkorridors der Drohne	FC_ING_BBW_GRU_FUN_03_001
Container	as-flown flight path	
Objekt	Linie mit Identifikator und Nummerierung	AFP_ING_BBW_GRU_FUN_03_001

Informationsdomäne "*geometry*" - Objektunabhängig

Tab. E.2: Merkmalgruppe der Informationsdomäne "*geometry*", Objektunabhängig

Merkmalname	Datentyp	Beschreibung
DBDA:AcquisitionDate	xs:date	Datum der Drohnenerfassung [YYYY-MM-DD].
DBDA:AcquisitionTime	xs:string	Uhrzeit der Datenerfassung [HH:MM].
DBDA:Class	xs:string	Gibt den Typ des geometrischen Objektes an. Wert: "Surface", "Waypoint", "Flighpath", "FlightCorridor" und "real-Flighpath".
DBDA:DistanceFromObject[1]	xs:double	Abstand, den die Drohne von der kritischen Fläche besitzt [m].
DBDA:DistanceOverlappingFront[1]	xs:double	Abstand zum nächsten Wegpunkt in Vorwärtsrichtung [m].
DBDA:DistanceOverlappingSide[1]	xs:double	Abstand zum nächsten Wegpunkt in Seitwärtsrichtung [m].
DBDA:Dronecamera[1]	xs:string	Art der Drohne bzw. Kamera, die eingesetzt wird. Wert als Text.
DBDA:FlightSpeed[1]	xs:double	Angabe der Fluggeschwindigkeit [m/s].
DBDA:GSD[1]	xs:double	GSD die zu Erfassung der kritischen Fläche herangezogen wird [cm/px].
DBDA:LinkedTaskID	xs:IDREF	Verknüpfung des simplifizierten Vorgangs.
DBDA:LinkedTaskName	xs:string	Name des zugrunde liegenden Vorgangs. Wert als Text.
DBDA:Name[1]	xs:string	Name der kritischen Fläche. Wert zusammengesetzt aus DBDA:Class_ DBDA:OriginObjectCode_DBDA:Numbering.
DBDA:Numbering	xs:string	Fortlaufende Nummerierung der kritischen Fläche/des Wegpunktes/der Flugroute/der geflogenen Flugroute. Beginnend mit 01 bis maximal 99.
DBDA:OriginObjectCode[1]	xs:string	Codierung des Objektes. Wert als Text.
DBDA:OriginObjectID[1]	xs:IDREF	ID des Objektes, zu dem die kritische Fläche zugeordnet bzw. von simplifiziert wurde.
DBDA:OverlappingFront[1]	xs:double	Angabe zur Vorwärtsüberlappung. Wert in Prozent.
DBDA:OverlappingSide[1]	xs:double	Angabe zur Seitwärtsüberlappung. Wert in Prozent.
DBDA:PhotoInterval[1]	xs:double	Intervall, in dem die Fotografien erzeugt werden [s].
DBDA:TiltAngleCamera[1]	xs:double	Angabe des Neigungswinkels der Kamera. 0° für Nadir (horizontale Auflösung) und 90° für vertikale Auflösung.

[1] (nicht bei geflogenen Flugrouten)

Informationsdomäne "*geometry*" - Kritische Fläche

Tab. E.3: Merkmalgruppe der Informationsdomäne "*geometry*" für das Objekt der kritischen Fläche

Merkmalname	Datentyp	Beschreibung
DBDA:Abstraction	xs:boolean	Anwendung einer Abstraktion. Wert ist Ja oder Nein.
DBDA:FlightDurationByFace	xs:double	Dauer der Befliegung bezogen auf eine kritische Fläche [s].
DBDA:FlightPathLengthByFace	xs:double	Länge der Flugkurve einer kritischen Fläche [m].
DBDA:maxVertexX	xs:double	Maximale globale X-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:maxVertexY	xs:double	Maximale globale Y-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:maxVertexZ	xs:double	Maximale globale Z-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:minVertexX	xs:double	Minimale globale X-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:minVertexY	xs:double	Minimale globale Y-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:minVertexZ	xs:double	Minimale globale Z-Koordinate der abstrahierten Fläche.
DBDA:Status	xs:string	Angabe, ob die kritische Fläche bereits in einer Datenerfassung rekonstruiert wurde. Wert als Text.
DBDA:SurfaceAbstraction	xs:double	Flächeninhalt der simplifizierten und abstrahierten kritischen Fläche [m²].
DBDA:SurfaceNormalVector	xs:string	Normalenvektor in den Koordinatenrichtungen X, Y, und Z. Wert als Text.
DBDA:SurfaceOfInterest	xs:double	Flächeninhalt der simplifizierten kritischen Fläche [m²].
DBDA:SurfaceOfInterestID	xs:ID	ID des geometrischen Objektes.

Informationsdomäne "*geometry*" - Wegpunkt

Tab. E.4: Merkmalgruppe der Informationsdomäne "*geometry*" für das geometrische Objekt eines Wegpunktes

Merkmalname	Datentyp	Beschreibung
DBDA:GlobalWaypointX	xs:double	Globale X-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:GlobalWaypointY	xs:double	Globale Y-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:GlobalWaypointZ	xs:double	Globale Z-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:Latitude	xs:double	Breitengrad des Wegpunkts.
DBDA:LocalWaypointX	xs:double	Lokale X-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:LocalWaypointY	xs:double	Lokale Y-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:LocalWaypointZ	xs:double	Lokale Z-Koordinate des Wegpunkts.
DBDA:Longitude	xs:double	Längengrad des Wegpunkts.
DBDA:OriginSurfaceOfInterestID	xs:IDREF	Verknüpfung der ID der simplifizierten (abstrahierten) kritischen Fläche.
DBDA:WaypointID	xs:ID	ID des geometrischen Objektes.
DBDA:WaypointType	xs:string	Art des Wegpunkts mit "Startpoint" "Endpoint" oder "InBetweenPoint". Wert als Text.

Informationsdomäne "*geometry*" - Flugroute

Tab. E.5: Merkmalgruppe der Informationsdomäne "*geometry*" für geometrische Objekt der Flugrouten

Merkmalname	**Datentyp**	**Beschreibung**
DBDA:EndPointID[1,2]	xs:IDREF	Verknüpfung der ID des Endpunktes.
DBDA:EndPointNumbering[1,2]	xs:string	Nummerierung des Endpunktes des Linienobjektes. Wert als Text.
DBDA:EndPointX[1, 2, 3]	xs:double	Globale Y-Koordinate des Endpunkts des Segments.
DBDA:EndPointY[1, 2, 3]	xs:double	Globale Y-Koordinate des Endpunkts des Segments.
DBDA:EndPointZ[1, 2, 3]	xs:double	Globale Z-Koordinate des Endpunkts des Segments.
DBDA:FlightDuration[1, 2, 3]	xs:double	Dauer der Befliegung des Teilstücks [s].
DBDA:FlightPathID[1, 2, 3]	xs:ID	ID des geometrischen Objektes.
DBDA:FlightPathLength[1,2]	xs:double	Länge des aktuellen Teilstücks [m].
DBDA:OriginSurfaceOfInterestID[1,2]	xs:IDREF	Verknüpfung der ID der kritischen oder abstrahierten Fläche, auf die sich die Flugroute beziehen.
DBDA:StartPointID[1,2]	xs:IDREF	Verknüpfung der ID des Startpunktes.
DBDA:StartPointNumbering[1,2]	xs:string	Nummerierung des Startpunktes des Linienobjektes. Wert als Text.
DBDA:StartPointX[1, 2, 3]	xs:double	Globale X-Koordinate des Startpunktes des Segments.
DBDA:StartPointY[1, 2, 3]	xs:double	Globale Y-Koordinate des Startpunktes des Segments.
DBDA:StartPointZ[1, 2, 3]	xs:double	Globale Z-Koordinate des Startpunktes des Segments.
DBDA:WaypointConnection[1, 2]	xs:string	Verbindung der Wegpunkte. Wert zusammengesetzt aus DBDA:Numbering_DBDA:Numbering
DBDA:DroneDimensions[2]	xs:double	Angabe zum Querschnitt [m].
DBDA:Frequence[3]	xs:int	Frequenz in der die geflogene Flugroute durch Teilstücke dargestellt wurde [s].

[1] geplanten Flugroute

[2] Flugkorridor

[3] geflogene Flugrouten

Informationsdomäne "*activities*" - Vorgang

Tab. E.6: Merkmalgruppe der Informationsdomäne "*activities*" für einen drohnenerfassbaren Vorgang

Merkmalname	Datentyp	Beschreibung
DBDA:ActualFinish	xs:dateTime	Fertigstellungsdatum des Vorgangs. Wert als YYYY-MM-DD HH:MM
DBDA:FlightDurationByTask	xs:double	Dauer der Befliegung bezogen auf den Vorgang [s].
DBDA:FlightPathLengthByTask	xs:double	Länge des Flugpfades für den Vorgang [m].
DBDA:GeometricChange	xs:string	Geometrische Änderung eines Vorgangs. Wert als Text.
DBDA:NumberOfSurfacesOfInterest	xs:int	Anzahl der simplifizierten (abstrahierten) kritischen Flächen. Wert als Ganzzahl.
DBDA:PercentComplete	xs:double	Fertigstellungsgrad des Vorgangs. Wert als Prozent.
DBDA:SurfaceOfInterest	xs:double	Flächeninhalt der simplifizierten kritischen Fläche [m²].
DBDA:Status	xs:string	Angabe, ob die simplifizierte kritische Fläche bereits in einer Datenerfassung rekonstruiert wurde. Wert als Text.
DBDA:SurfaceOfInterestId	xs:string	ID der simplifizierten (abstrahierten) kritischen Fläche. Wert als Text.

Beispiel der geometrischen Änderung aus Abschnitt 4.2.2

Nachfolgend wird ein Beispiel zur Verdeutlichung der geometrischen Änderung aufgeführt. Herangezogen wird der Vorgang "Beton einbauen" mit der Vorgangsnummer 1.1.1.2.1.6.2.3.

Menge $SE_{i,Anfang}$ definiert die Menge an sichtbaren Elementen am Anfang von Tag i = 14.07.2021 und weist 2659 sichtbare Elemente für den Anfang des Tages i auf und ist in der nachfolgenden Abbildung visualisiert.

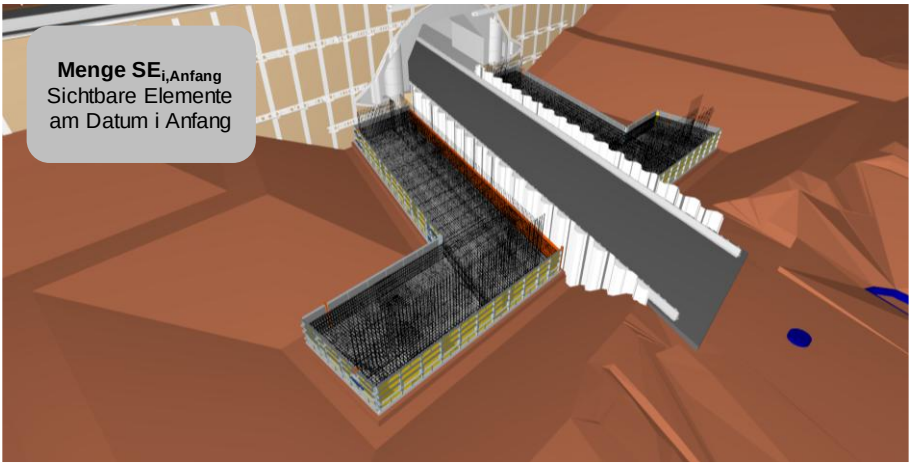


Abb. E.1: Menge $SE_{i,Anfang}$ der sichtbaren Elemente am Datum Anfang 14.07.2021 08:00 Uhr

Menge $SE_{i,Ende}$ definiert die Menge an sichtbaren Elementen am Ende von Tag i und weist 2661 sichtbare Elemente für das Ende des Tages i auf und ist in der nachfolgenden Abbildung visualisiert.

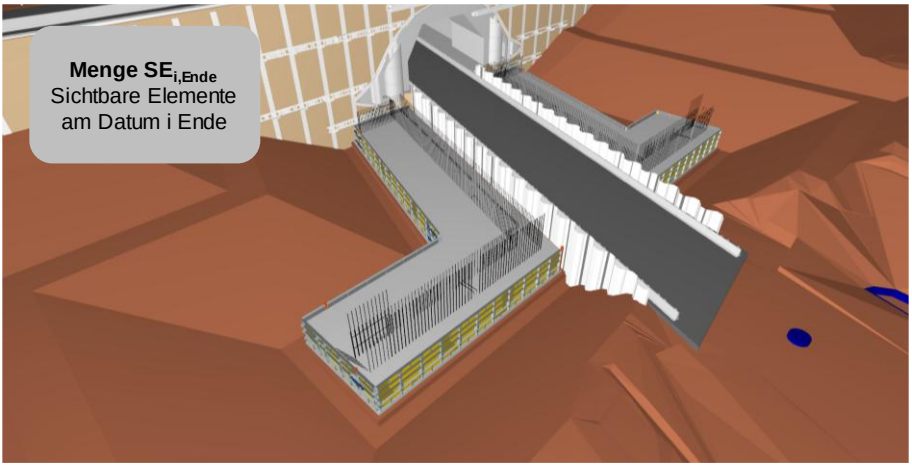


Abb. E.2: Menge $SE_{i,Ende}$ der sichtbaren Elemente am Datum Ende 14.07.2021 17:00 Uhr

Menge VE_j definiert die Menge an verknüpften Elementen für den Vorgang "Beton einbauen" mit der Vorgangsnummer 1.1.1.2.1.6.2.3 und ist nachfolgend visualisiert. Die Menge $VE_{1.1.1.2.1.6.2.3}$ stellt hierbei ein verknüpftes Element dar.

Menge VE_j
Verknüpfte Elemente des Vorgangs V_j

Abb. E.2: Menge VEj der verknüpften Elemente des Vorgangs "1.1.1.2.1.2.6.3 Beton einbauen"

Gemäß der Gleichung (4.1) ergibt sich für die Schnittmenge $SEVE_{i,Anfang;j}$

$$\mathrm{SEVE}_{14.07.2021,08:00;1.1.1.2.1.6.2} = \{x|(x \in 2659 \text{ sichtbare Elemente}) \wedge (x \in 1 \text{ verknüpftes Element})\}$$

$$\mathrm{SEVE}_{14.07.2021,08:00;1.1.1.2.1.6.2} = 0$$

Gemäß der Gleichung (4.2) ergibt sich für die Schnittmenge $SEVE_{i,Ende;j}$

$$\mathrm{SEVE}_{14.07.2021,17:00;1.1.1.2.1.6.2} = \{x|(x \in 2661 \text{ sichtbare Elemente}) \wedge (x \in 1 \text{ verknüpftes Element})\}$$

$$\mathrm{SEVE}_{14.07.2021,17:00;1.1.1.2.1.6.2} = 1$$

Das Schnittmengenverhältnisses SMV (vgl. Gleichung (4.3)) ermittelt anschließend die geometrische Änderung.

$$\mathrm{SMV} = \frac{0}{1} = 0 \rightarrow \text{Herstellen}$$

Entsprechend der geometrischen Änderung wird das Merkmal "DBDA:GeometricChange" mit dem Datentyp xs:string und dem Merkmalwert "Herstellen am Vorgang "Beton einbauen" mit der Vorgangsnummer 1.1.1.2.1.6.2.3. erzeugt, wie nachfolgend dargestellt.

Tab. E.7: Beispielvorgang mit Merkmal DBDA:GeometricChange und dem Merkmalwert entsprechend der geometrischen Änderung

Vorgangsnummer	**Name des Vorgangs**	**DBDA:GeometricChange**
1.1.1.2.1.6.2.3	Beton einbauen	Herstellen

Konfigurationen 4D-Visualisierung

Name	< Anfang	< Anfangs-farbe	Aktiv	Aktive Farbe	> Ende	> Endfarbe
LO4D 1						
Herstellen	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Rückbauen	Modellfarbe		Farbe		Ausblenden	
Nachbehandeln	Modellfarbe		Farbe		Modellfarbe	
LO4D 2						
Einschalen	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Bewehren	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Betonieren	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Ausschalen	Modellfarbe		Farbe		Ausblenden	
Nachbehandeln	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Trocknen	Ausblenden		Farbe		Modellfarbe	
Allgemein						
Sperren	Modellfarbe		Farbe		Modellfarbe	
Vorhalten	Modellfarbe		Modellfarbe		Modellfarbe	
Versetzen	Ausblenden		Modellfarbe		Ausblenden	

Abb. E.3: Konfigurationen 4D-Visualisierung für LO4D 1 und 2

Anhang F Zusatzinformationen zu den Abschnitten 4.3.3 und 4.4.1

Auswertungsbeispiel hinsichtlich der maximalen Anzahl der Nachbarn

Die maximale Anzahl der Nachbarn in der Farbe Orange mit Vergrößerung des Randbereiches in den Farben Gelb und Grün.

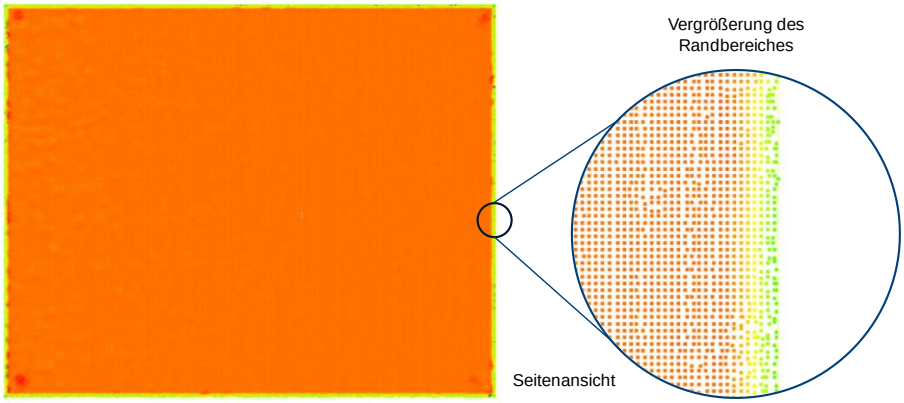


Abb. F.1: Auswertungsbeispiel hinsichtlich der Anzahl der Nachbarn (Bildschirmaufnahme *CloudCompare - 2023*)

Auswertung der synthetischen Studie

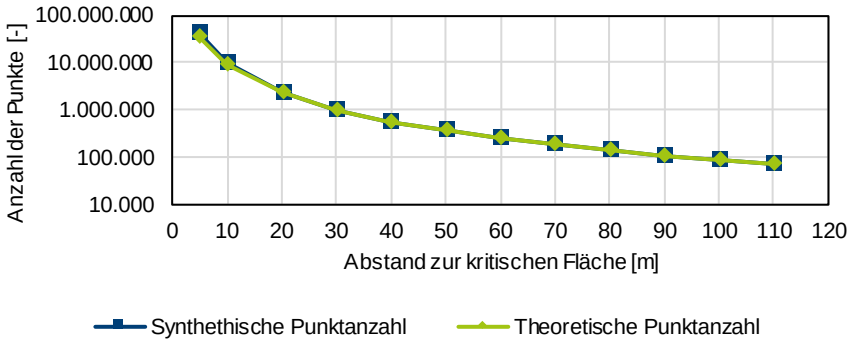


Abb. F.2: Anzahl der Punkte einer kritischen Fläche mit Betontextur der synthetischen Studie bei Abständen von 5 bis 110 m

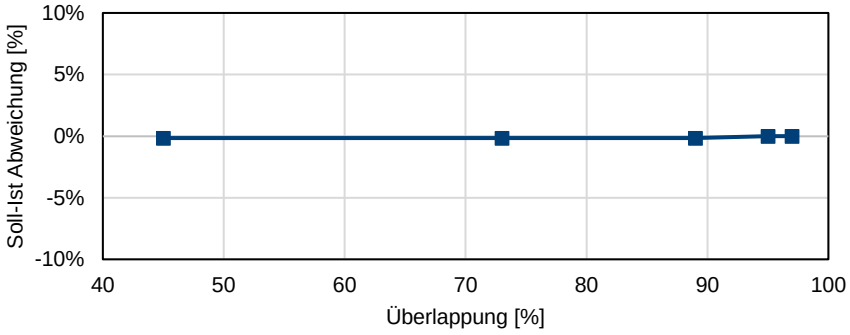


Abb. F.3: Prozentuale Abweichung der Ist- und Soll-GSD bei verschiedenen Vorwärtsüberlappungen zur kritischen Fläche mit einem Abstand von 20 m

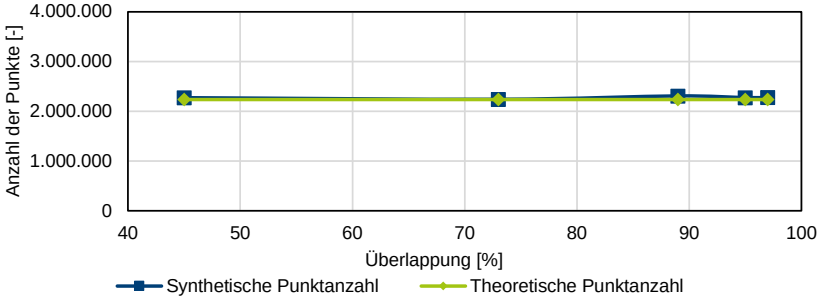


Abb. F.4: Anzahl der synthetischen und theoretischen Punkte einer kritischen Fläche mit Betontextur der synthetischen Studie bei Abständen von 5 bis 110 m

Herleitung der Formel zur Berechnung der Geschwindigkeit mittels Fotolänge und Abstand der Wegpunkte

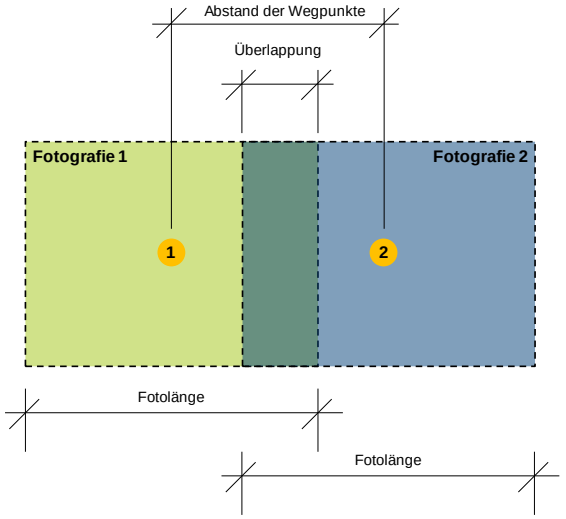


Abb. F.5: Beispielhafte Darstellung zur Ermittlung der Überlappung von Fotografien

Die Länge der Fotografie F_L wird berechnet mit

$$F_L = GSD * B_w \tag{F.1}$$

mit F_L Breite der Fotografie [cm].

GSD Bodenauflösung [cm/px].

B_w horizontale Auflösung des Sensors (Bildweite) [px].

Nach anschließender Substitution der GSD aus Gleichung (2.1) ergibt sich für die Fotolänge:

$$F_L = \frac{A * S_w}{f} \tag{F.2}$$

mit A Abstand des Sensors zum erfassten Objekt [m].

S_w Sensorweite [mm].

f Brennweite [mm].

Wenn der Abstand der Wegpunkte AW gemäß Gleichung (4.5) durch die Länge eines der Fotografie F_L geteilt wird, ergibt sich ein Verhältnis, das angibt, wie viel der Fotografie relativ zu seiner Länge überlappt wird. Durch Subtraktion des Verhältnisses von 1 ergibt sich der Anteil der Überlappung. Je größer der Abstand der Wegpunkte AW im Verhältnis zur Länge F_L ist, desto kleiner wird die Überlappung.

$$O = 1 - \frac{AW}{F_L} \tag{F.3}$$

Nach anschließender Substitution der Abstand der Wegpunkte A und Fotolänge F_L ergibt sich:

$$O = 1 - \left(v * (I + t) * \frac{f}{A * S_w}\right) \tag{F.4}$$

Zur Umstellung der Geschwindigkeit der Drohne ergeben sich folgende Schritte:

$$v * (I + t) * \frac{f}{A * S_w} = 1 - O \tag{F.5}$$

und

$$v * \frac{f}{A * S_w} = \frac{1 - O}{I + t} \tag{F.6}$$

Schlussendlich ergibt sich:

$$v = \frac{1 - O}{I + t} * \frac{A * S_w}{f} \tag{F.7}$$

mit

	v	Geschwindigkeit der Drohne [m/s].
	O	Überlappung der Fotografien [%].
	I	Intervall der Fotografien [s].
	t	Verschlusszeit der Kamera [s] mit $t \ll I$.
	A	Abstand des Sensors zum erfassten Objekt [m].
	S_w	Sensorweite [mm].
	f	Brennweite [mm].

Herleitung der Aufprallenergie

Der Ausgangspunkt der Aufprallenergie ist zum einen die potenzielle Energie zu Beginn und am Ende sowie die kinetische Energie zu Beginn und am Ende des Aufpralls. Die potenzielle Energie zu Beginn (bevor die Drohne fällt) des Aufpralls lässt sich mit Gleichung F.8 bestimmen:

$$E_{p,Anfang} = M * g * h \tag{F.8}$$

mit M Masse der Drohne [kg].

g Erdbeschleunigung [m/s²].

h Flughöhe bzw. Absturzhöhe der Drohne [m].

Da die Drohne am Ende des Falls nicht über der Absturzhöhe ist, beträgt die potenzielle Energie am Ende des Falls 0 J (h = 0), siehe Gleichung F.9:

$$E_{p,Ende} = 0 \tag{F.9}$$

Die kinetische Energie eines Objekts zu Beginn wird durch Gleichung F.10 berechnet:

$$E_k = \frac{1}{2} * M * v^2 \tag{F.10}$$

mit $v =$ Geschwindigkeit der Drohne [m/s].

Die kinetische Energie am Ende des Falls beträgt 0 J, da die Geschwindigkeit der Drohne am Ende gleich Null ist. Die gesamte Energie lässt sich nach Gleichung F.11 berechnen:

$$E_{gesamt} = E_{p,Anfang} + E_{p,Ende} + E_{k,Anfang} + E_{k,Ende} \tag{F.11}$$

Nach Umstellung ergibt sich für die gesamte Energie:

$$E_{gesamt} = (M * g * h) + \left(\frac{1}{2} * M * v^2\right) \tag{F.12}$$

Schlussendlich ergibt sich die Aufprallenergie:

$$AE = M * \left(\frac{1}{2} * v^2 + g * h\right) \tag{F.13}$$

Normierte Abweichungen für Bauteile für Berechnung des Toleranzwertes

Tab. F.8: Auszug von zulässigen Abweichungen für Stützen, Wände, Balken und Platten aus *DIN EN 13760:2011-03*

Bauteil	**Beschreibung**	**Zulässige Abweichung**
Stütze und Wände	Schiefstellung einer Stütze oder Wand	Höhe ≤ 10 m: 15 mm oder Höhe / 400 Höhe > 10 m: 25 mm oder Höhe / 600
Stütze und Wände	Auslenkung einer Stütze oder einer Wand	15 mm oder Höhe / 300, aber nicht größer als 30 mm
Stütze	Lage einer Stütze in der Ebene, bezogen auf die Hilfslinien	± 25 mm
Wand	Lage einer Wand in der Ebene, bezogen auf die Hilfslinien	± 25 mm
Balken	Geradheit von Balken in waagrechter Richtung	± 20 mm oder ± Länge / 600
Platte	Neigung eines Balkens oder einer Platte	± (10 + Länge /500) mm

Tab. F.9: Auszug von Grenzabweichungen für Maße nach *DIN 18202:2019-07*

Bezug	**Grenzabweichung in mm bei Nennmaß in m**					
	< 1	**1 – 3**	**3 – 6**	**6 – 15**	**15 – 30**	**30 >**
Abmessungen im Grundriss	± 10	± 12	± 16	± 20	± 24	± 30
Abmessungen in der Höhe	± 10	± 16	± 16	± 20	± 30	± 30

Anhang G Zusatzinformationen zu Abschnitt 4.5

Seite "Flächen"

Berechnung der geometrischen Änderung und Auswahl der kritischen Fläche.

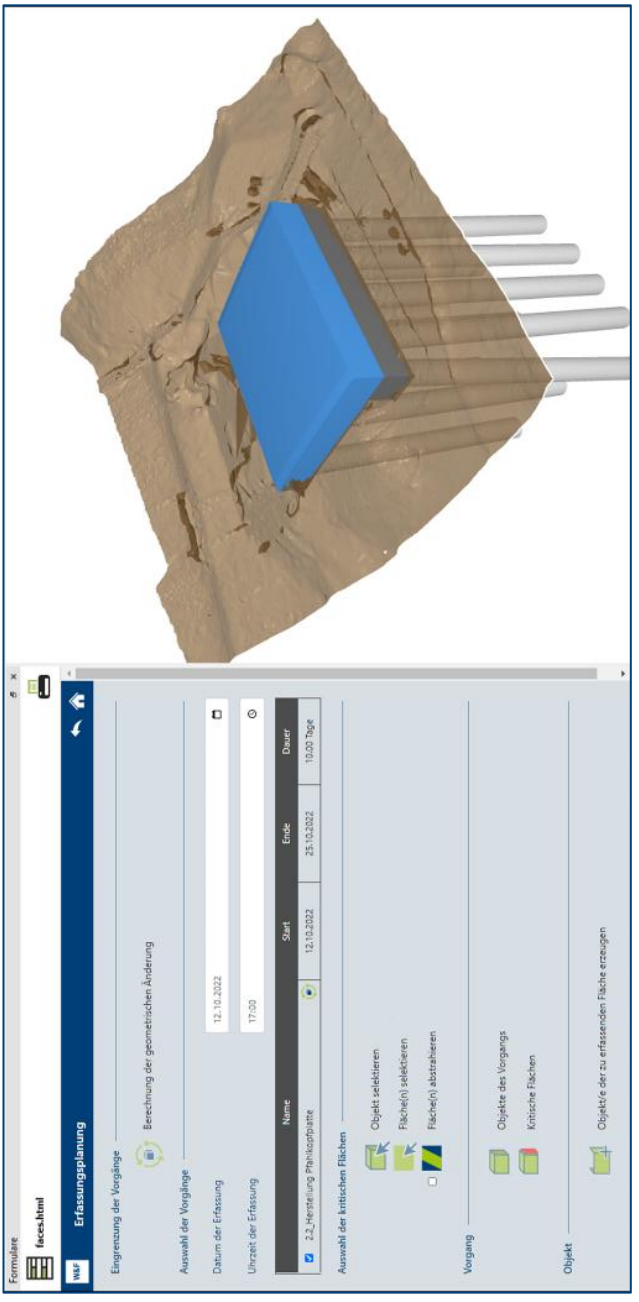


Abb. G.1: Darstellung der Seite "Flächen" der Softwareintegration, Teil 1 von 2 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Erzeugung der kritischen Fläche als geometrisches Objekt.

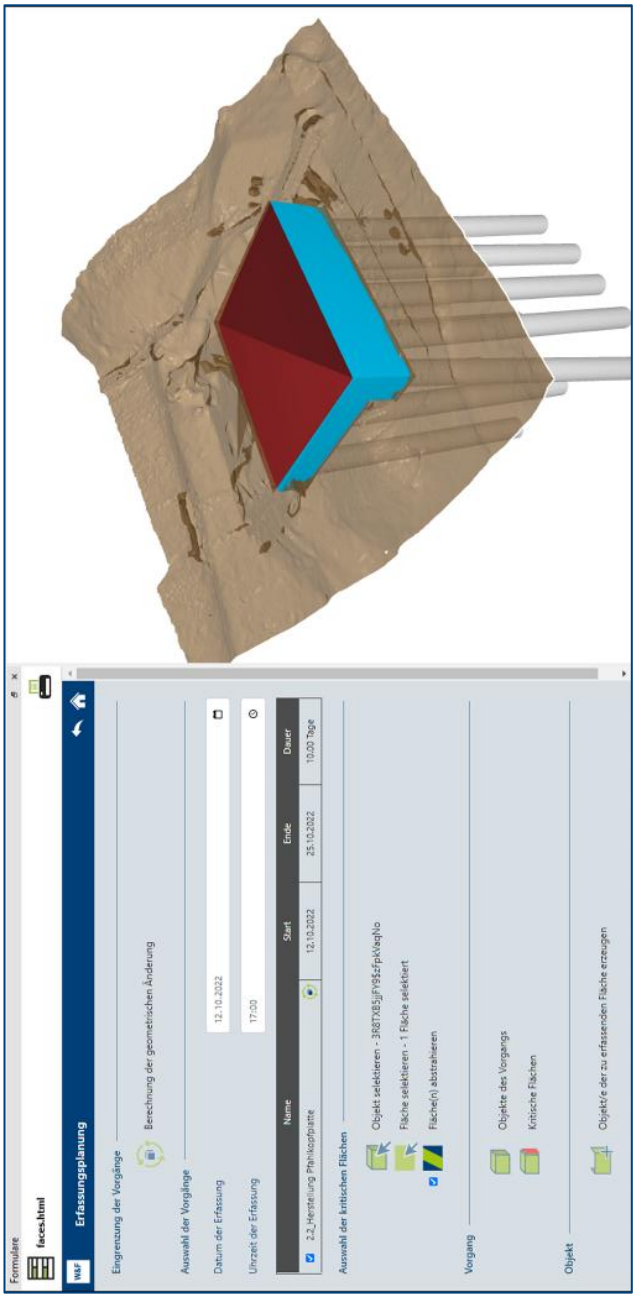


Abb. G.2: Darstellung der Seite "Flächen" der Softwareintegration, Teil 2 von 2 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Seite "Wegpunkte"

Definitiv der Flugparameter.

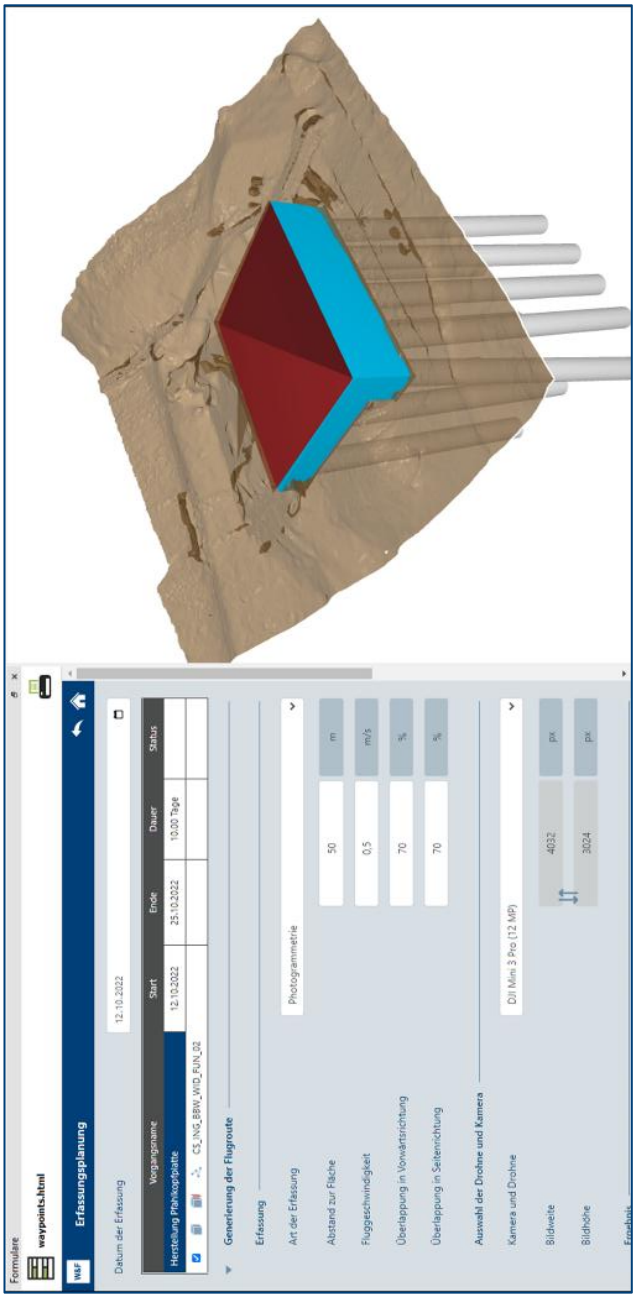


Abb. G.3: Darstellung der Seite "Wegpunkte" der Softwareintegration, Teil 1 von 4 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Ergebnisdarstellung der Wegpunktberechnung.

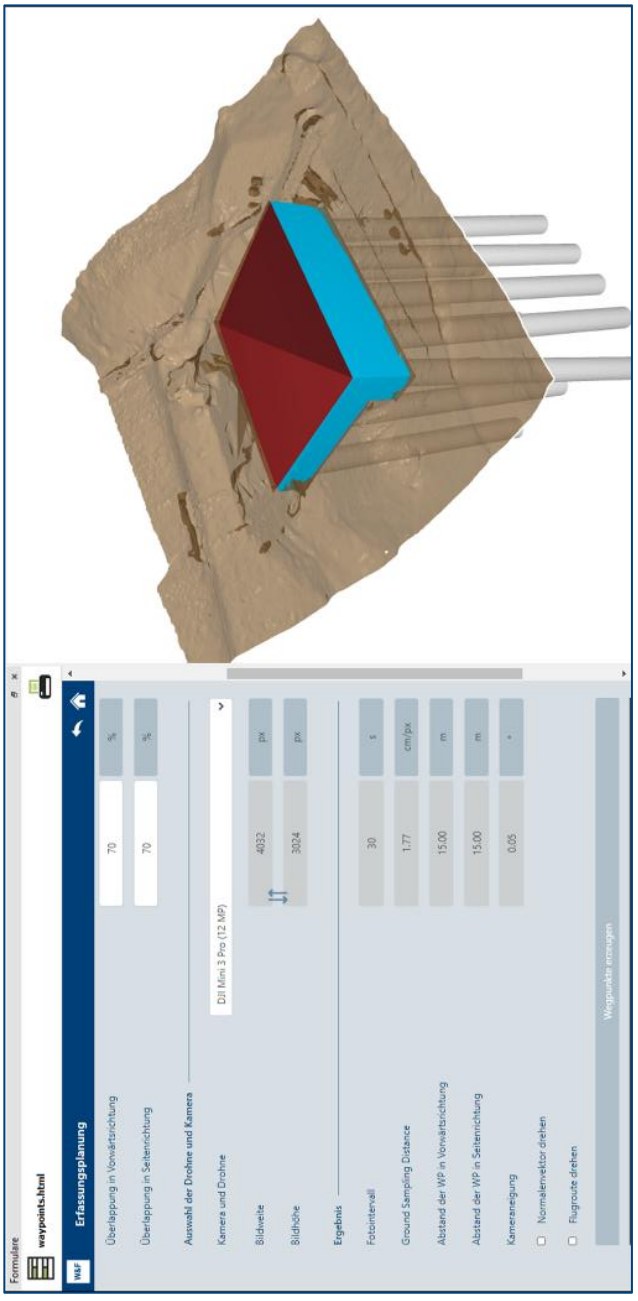


Abb. G.4: Darstellung der Seite "Wegpunkte" der Softwareintegration, Teil 2 von 4 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Berechnung der Wegpunkte mit fortlaufender Nummerierung und X-, Y- und Z-Koordinate.

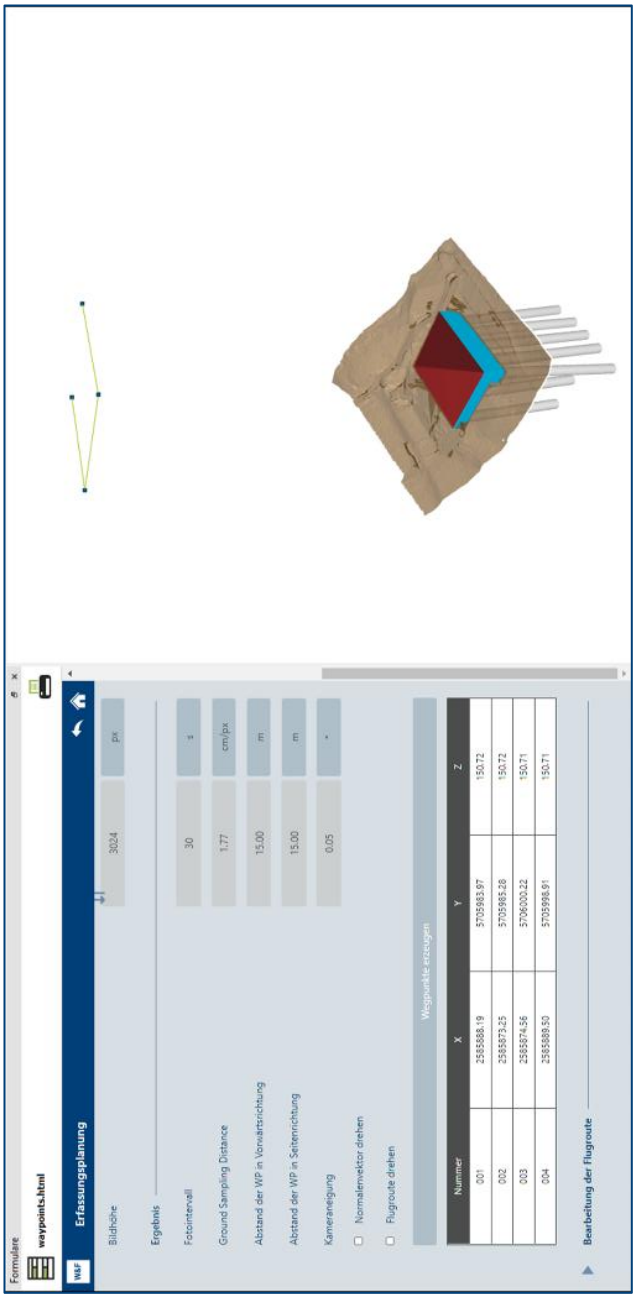


Abb. G.5: Darstellung der Seite "Wegpunkte" der Softwareintegration, Teil 3 von 4 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Bearbeiten der Wegpunkteliste und Hinzufügen einen Start- und Landepunkts der Flugroute.

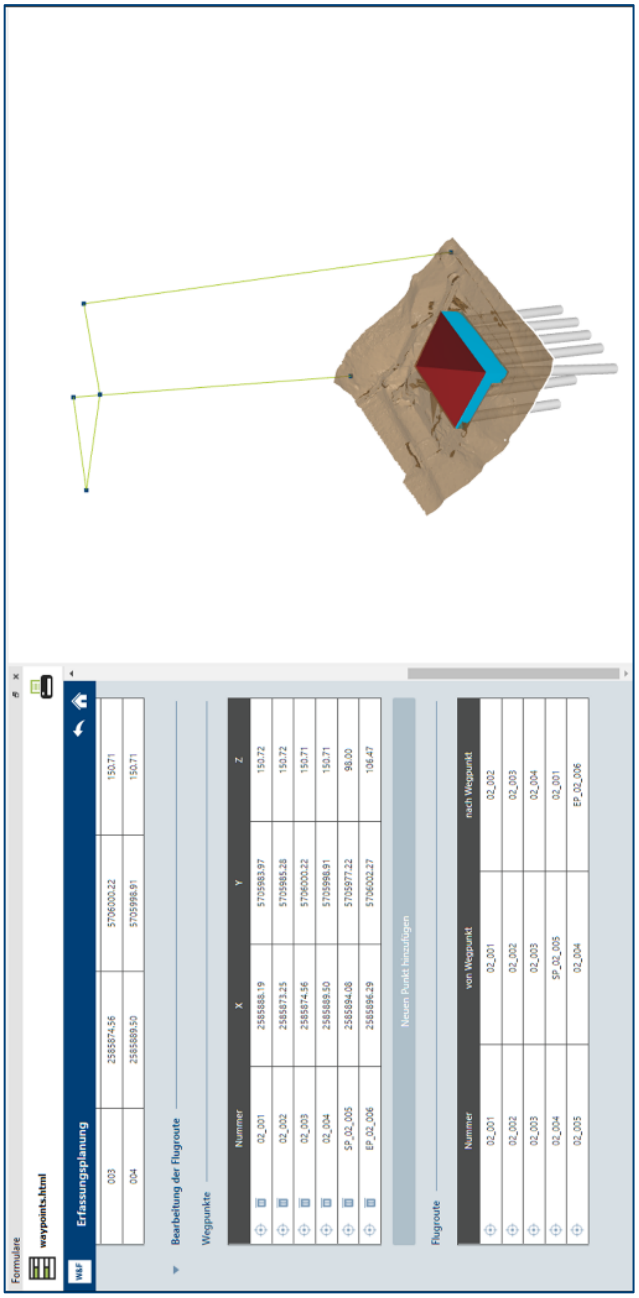


Abb. G.6: Darstellung der Seite "Wegpunkte" der Softwareintegration, Teil 4 von 4 (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Seite "Erfassung"

Darstellung der Flugroute sowie Möglichkeit zur Erstellung des Flugkorridors zur Kollisionsprüfung.

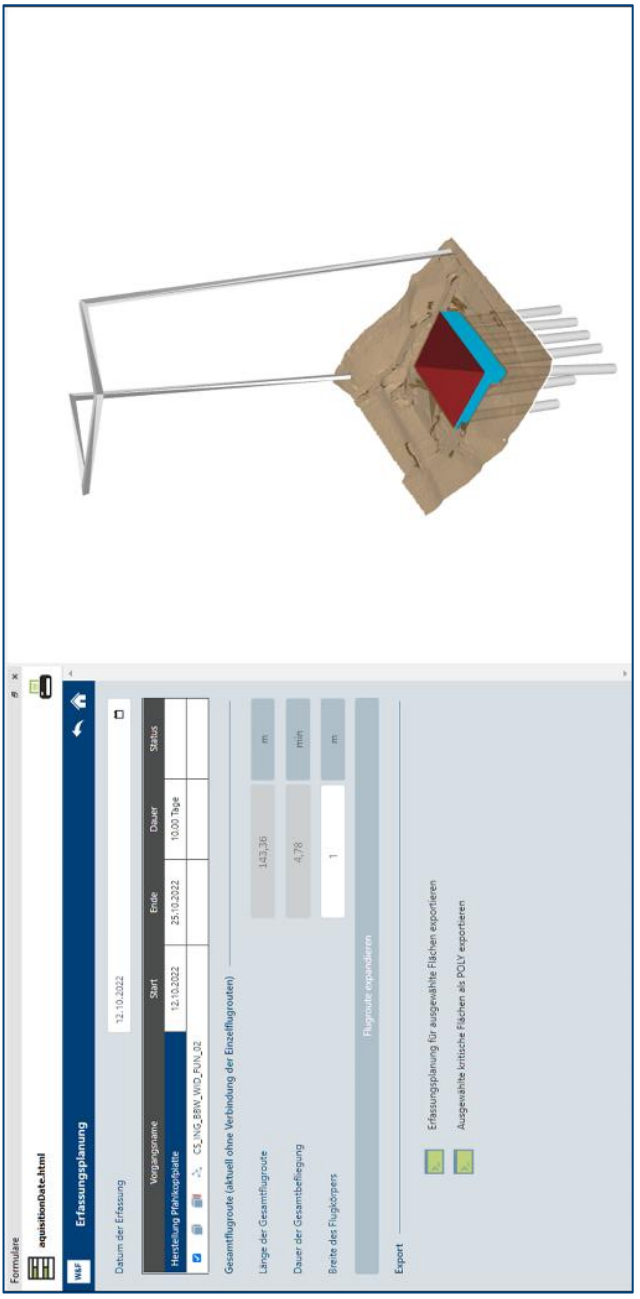


Abb. G.7: Darstellung der Seite "Erfassung" der Softwareintegration (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Seite "Auswertung"

Import der Ist-Daten zur Aktualisierung des Terminplans und zur Darstellung der Befliegung.

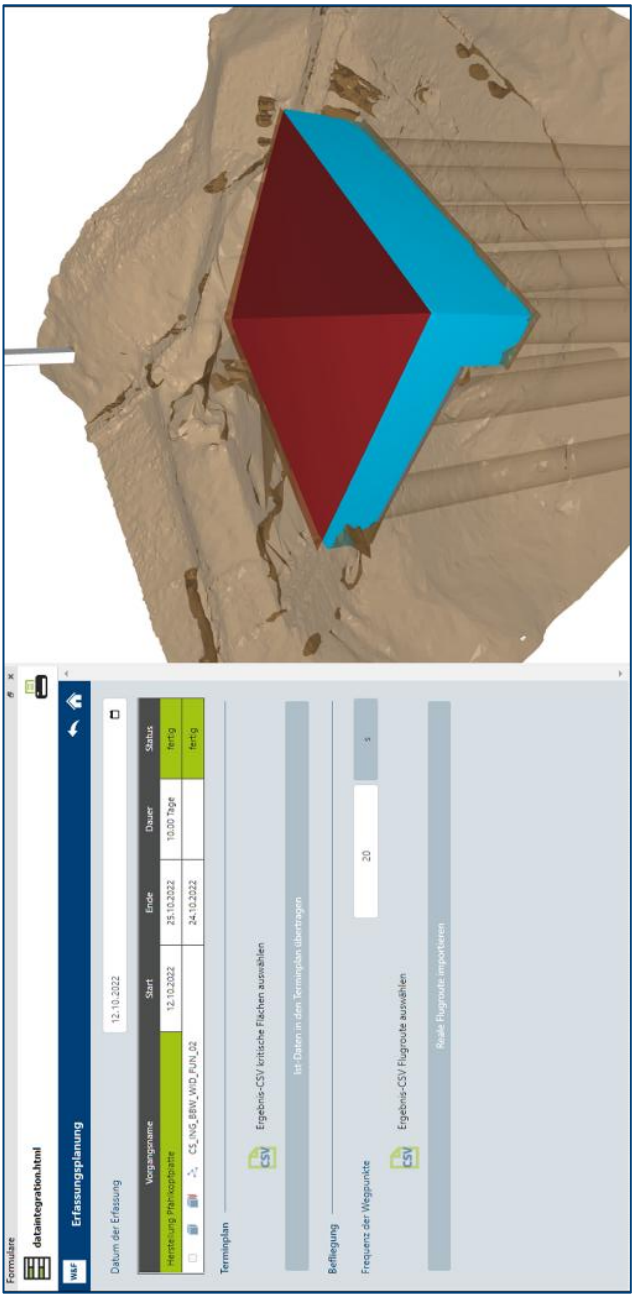
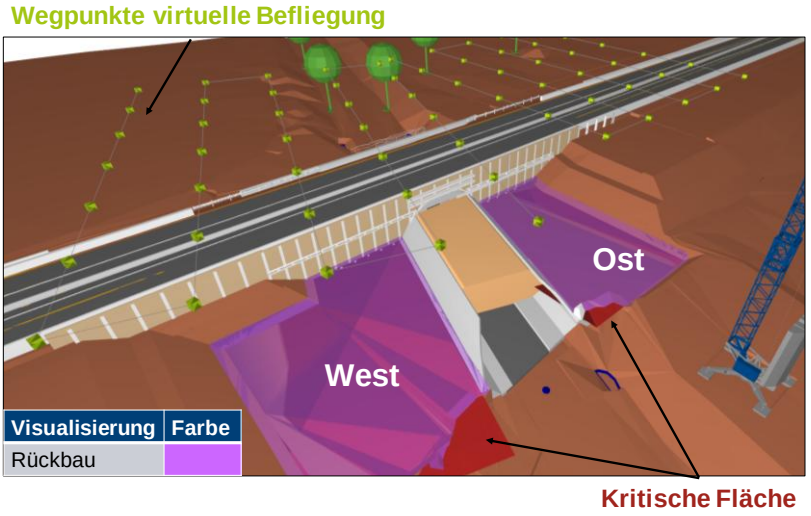


Abb. G.8: Darstellung der Seite "Auswertung" der Softwareintegration (Bildschirmaufnahme, *thinkproject - 2023*)

Anhang H Zusatzinformationen zu Abschnitt 5.2.3

UG 1: "Bestandshinterfüllung bis zur 2. Ankerlage auf +37,35 m abtragen"

a)



b)

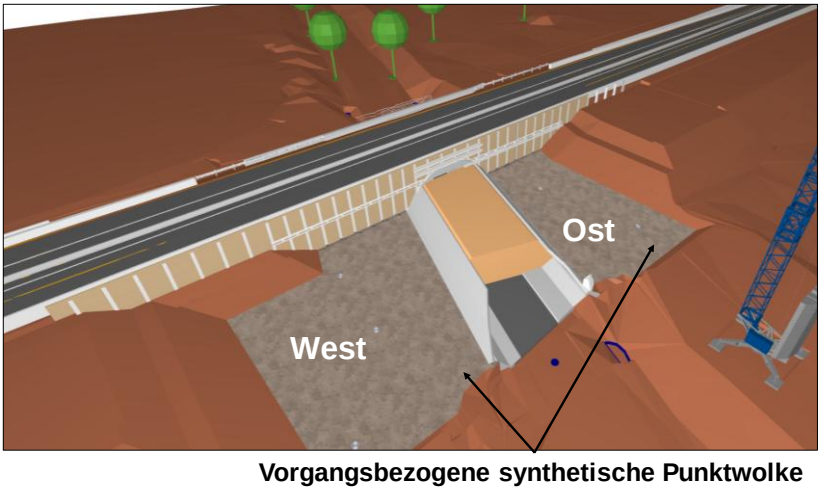
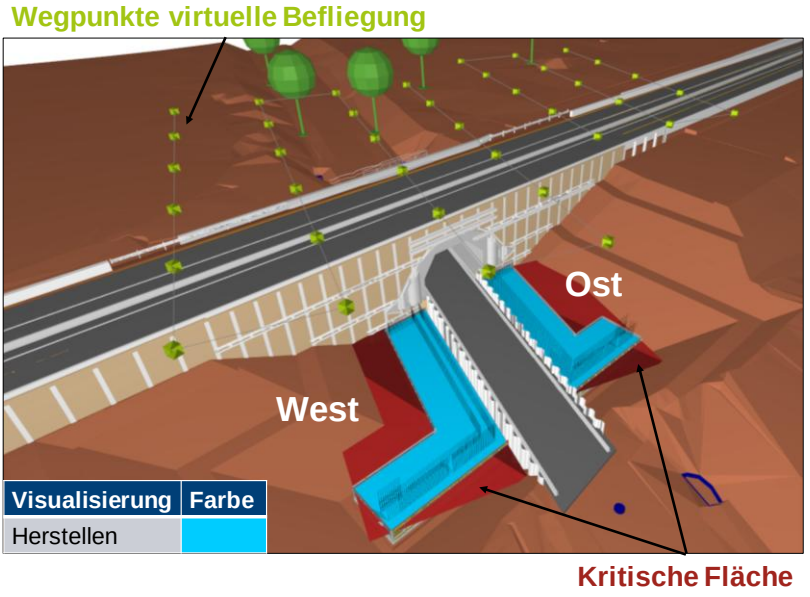


Abb. H.1: Visualisierung des UG 1 mit den kritischen Flächen in a) und in Form der synthetischen Punktwolke in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

UG 2: "Beton einbauen der Fundamente der Achsen 10 und 20"

a)



b)

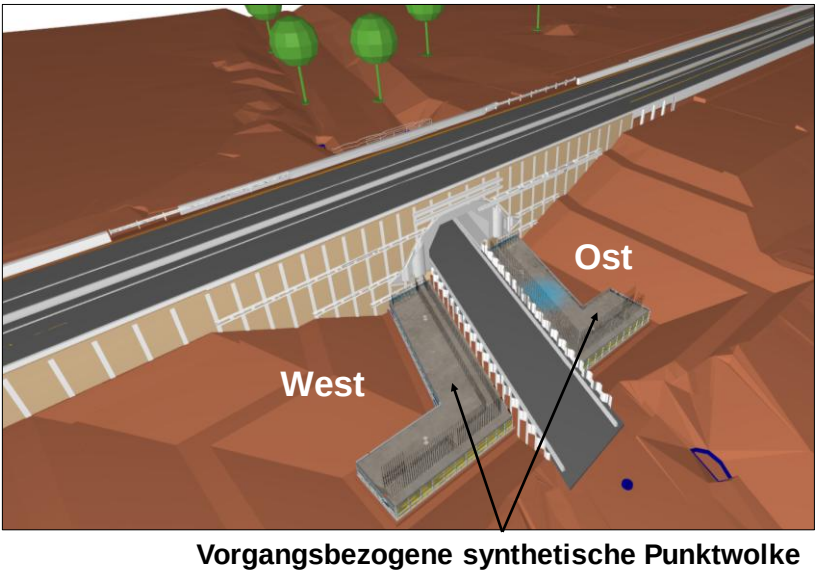
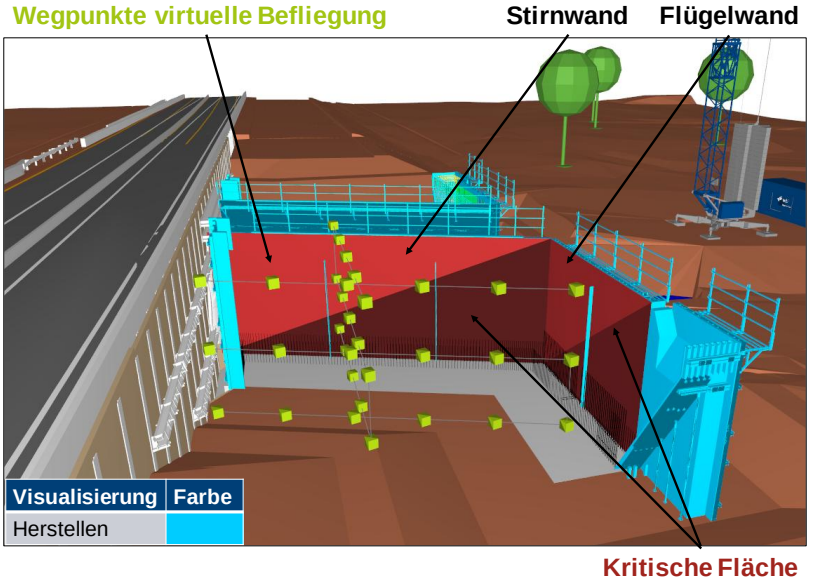


Abb. H.2: Visualisierung des UG 2 mit den kritischen Flächen in a) und in Form der synthetischen Punktwolken in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

UG 3: "Schalung stellen der Widerlager- und Flügelwand der Achse 10"

a)



b)

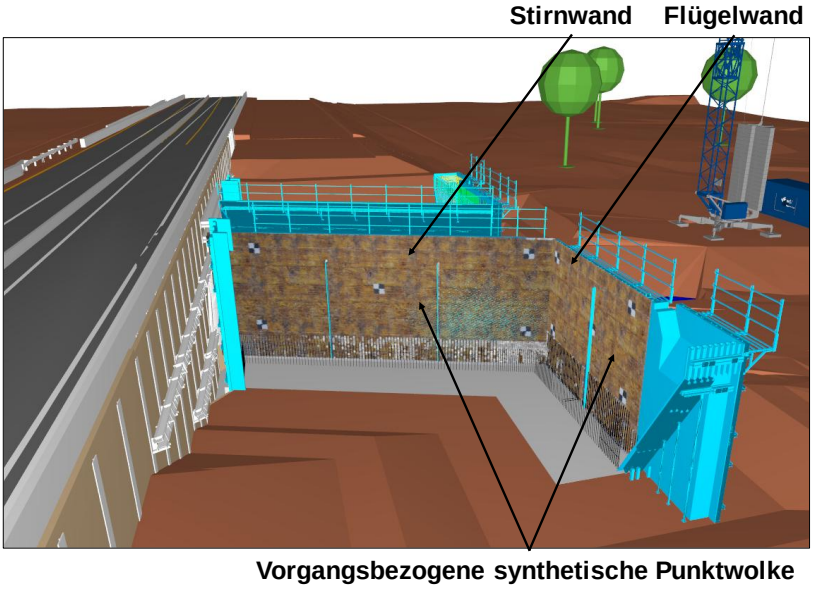
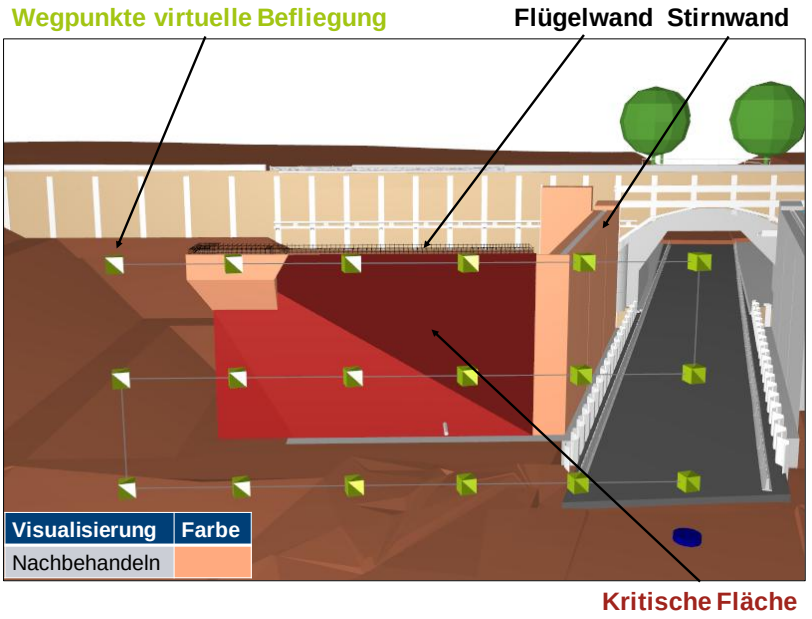


Abb. H.3: Visualisierung des UG 3 mit den kritischen Flächen in a) und in Form der synthetischen Punktwolke in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

UG 4: "Schalung ausbauen sowie Nachbehandeln der Widerlager- und Flügelwand der Achse 10"

a)



b)

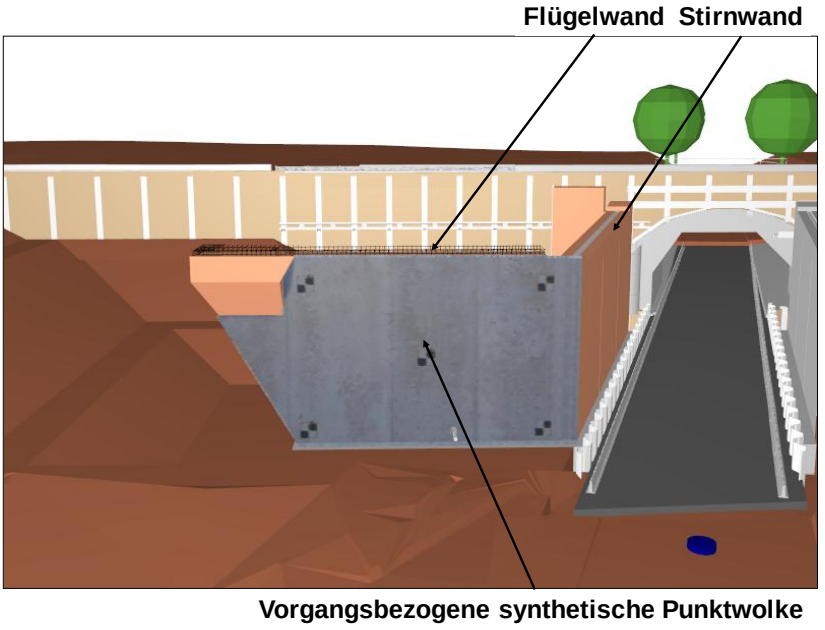


Abb. H.4: Visualisierung des UG 4 mit den kritischen Flächen in a) und in Form der vorgangsbezogenen Punktwolke in b) (Bildschirmaufnahme *thinkproject - 2023*)

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name:	Thomas Günter Tschickardt
Geburtsjahr	1989
Geburtsort	Mainz
Staatsangehörigkeit:	deutsch

Akademischer Werdegang

2020 - 2024	Externer Doktorand an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU) (ehemals Technische Universität Kaiserslautern, TUK) im Fachgebiet Bauingenieurwesen, Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion bei Prof. Dr.-Ing. Christian Glock.
2016 - 2018	Studium des Bauingenieurwesens mit der Vertiefungsrichtung Konstruktiver Ingenieurbau an der Hochschule Karlsruhe Technik und Wirtschaft mit dem Abschluss "Master of Engineering".
2012 - 2016	Studium des Internationalen Bauingenieurwesens an der Hochschule Mainz University of Applied Sciences mit dem Abschluss "Bachelor of Engineering".

Beruflicher Werdegang

seit 2023	Leiter BIM-Management, Abteilung Unternehmensentwicklung und Prozessmanagement, Team Digital Construction, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt am Main.
2018 - 2022	Digital Construction Manager Abteilung Unternehmensentwicklung und Prozessmanagement, Team Digital Construction, Wayss & Freytag Ingenieurbau AG, Frankfurt am Main.