Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 809

Sebastian Andreas Tuttas

Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5221-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig als E-Dissertation auf mediaTUM veröffentlicht:
http://mediatum.ub.tum.de?id=1326249

Veröffentlichungen der DGK

Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 809

Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle

Vollständiger Abdruck der von der promotionsführenden Einrichtung

Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt

der Technischen Universität München

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorgelegt von

Sebastian Andreas Tuttas

Geboren am 05.04.1985 in Fürstenfeldbruck

München 2017

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5221-5

Diese Arbeit ist gleichzeitig als E-Dissertation auf mediaTUM veröffentlicht: http://mediatum.ub.tum.de?id=1326249

Adresse der DGK:



Ausschuss Geodäsie der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (DGK)

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 331 – 288 1685 ● Telefax +49 – 331 – 288 1759

E-Mail post@dgk.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission:

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich
Prüfer der Dissertation:	1. Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
	2. Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
Tag der mündlichen Prüfung:	27.03.2017

© 2017 Bayerische Akademie der Wissenschaften, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen

ISSN 0065-5325 ISBN 978-3-7696-5221-5

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Photogrammetrie und Fernerkundung

Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle

Sebastian Andreas Tuttas

Dissertation

2017

TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt
Photogrammetrie und Fernerkundung

Erfassung von Bauteilen durch photogrammetrische Punktwolken und Abgleich eines 4D-Bauwerkmodells zur Baufortschrittskontrolle

Sebastian Andreas Tuttas

Vollständiger Abdruck der von der promotionsführenden Einrichtung Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:	Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich
Prüfer der Dissertation:	1. Prof. Dr.-Ing. Uwe Stilla
	2. Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

Die Dissertation wurde am 20.09.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Ingenieurfakultät Bau Geo Umwelt am 13.03.2017 angenommen.

Kurzfassung

Arbeitsabläufe gestalten sich bei Bauvorhaben äußerst dynamisch. Gründe dafür sind u.a. schlecht vorhersehbare Randbedingungen, wie Witterungseinflüsse, sowie die große Abhängigkeit einzelner Prozessschritte voneinander. Dies führt häufig dazu, dass die tatsächlich durchgeführte Bauabwicklung weit von der im Vorfeld durchgeführten Bauablaufplanung abweicht und sich in der Folge starke Verzögerungen und Budgetüberschreitungen einstellen können. Die Baufortschrittskontrolle dient dazu, Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Dazu wird ein automatischer Vergleich von Soll-Zustand und Ist-Zustand vorgeschlagen, wobei der geplante Zustand durch ein Building Information Model (BIM) mit 3D-Geometrie und Zeitplan (4D) und der aktuelle Zustand durch eine erfasste Punktwolke repräsentiert werden.

Die vorliegende Arbeit umfasst verschiedene Untersuchungen und Beiträge zur Entwicklung einer automatisierten Baufortschrittskontrolle auf Basis von photogrammetrischen Punktwolken. Dichte photogrammetrische Punktwolken werden durch ein Multi-View-Stereo-Verfahren anhand von Baustellenaufnahmen generiert. Dafür werden verschiedene Erfassungskonzepte, nämlich die Verwendung einer handgetragenen Kamera, der Einsatz eines Unmanned Aerial Vehicles (UAV) und der Betrieb von Krankameras, auf ihre Einsatzfähigkeit hin verglichen. In der Arbeit wird zunächst der grundlegende Ablauf einer Baufortschrittskontrolle auf Basis eines BIM definiert. Außerdem wurde ein Konzept zur fortlaufenden Koregistrierung entworfen, mit dem sowohl die Punktwolken aufeinanderfolgender Aufnahmezeitpunkte zueinander als auch mit dem Bauwerkmodell koregistriert werden. Zur Bestimmung des Baufortschritts müssen für jeden Erfassungszeitpunkt gebaute und nicht gebaute Bauteile und ggf. weitere Zwischenzustände wie Schalung identifiziert werden. Dafür wurde ein zweistufiges Verfahren entwickelt. Zunächst wird die Sichtbarkeit der Bauteile mit Hilfe eines Belegungsgitters überprüft. Damit können nicht sichtbare und noch nicht gebaute Bauteile bestimmt werden. Anschließend wird zur Erkennung des Bauteilzustandes die Punktwolke in der Umgebung des Bauteils bezüglich eines Oberflächenrasters ausgewertet und jede Teilfläche des Bauteils einzeln bewertet. Der Zustand des erwarteten Bauteils wird aus der Kombination der Zustände der Teilflächen abgeleitet.

Die Verfahren wurden auf drei Baustellen über die gesamte Rohbauphase angewendet. Die photogrammetrische Erfassung des Baufortschritts unterstützt mit den orientierten Bilddaten die Dokumentation der Bauphase für das BIM. Außerdem erlaubt sie die automatische Markierung von nicht gebauten und gebauten Bauteilen sowie der nicht erfassten Bereiche. Mit den gewählten Verfahren zur Punktwolkengenerierung und Koregistrierung konnte ein Genauigkeitsniveau von 2 bis 5 cm erreicht werden. Das Abgleichverfahren erlaubte die Erkennung von gebauten und nicht gebauten Bauteilen mit einer hohen Korrektheit von über 98 %. Die Vollständigkeit der Erkennung von gebauten Bauteilen ist geringer und liegt für die Aufnahme mit der handgetragenen Kamera bei 74 % und für die Aufnahme mit UAV bei 86 %.

Abstract

Process sequences on construction sites are extremely dynamic. Reasons for this are, among others, boundary conditions like the weather, which are difficult to predict, or the strong dependency between single process steps. This often causes deviations between the actual execution of the construction works and the planned construction process, what can lead to strong delays and a budget overrun. Construction progress monitoring is needed for early detection of deviations. Therefore, an automatic comparison between the actual state (as-built) and the planned state (as-planned) is proposed. A Building Information Model (BIM) with 3D-geometry and schedule (4D) contains the planned state, while the actual state is represented by an acquired point cloud.

This work comprises different investigations and contributions for the development of an automatised construction site monitoring on the basis of photogrammetric point clouds. Dense point clouds are generated from images acquired on the construction site using a multi-view stereo algorithm. Different acquisition concepts are tested and compared in terms of their operational capabilities. A handheld camera, an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and cameras mounted at the boom of the crane are utilised for acquisition. At first, the basic procedure for construction progress monitoring on basis of a BIM is defined. A concept for consecutive co-registration was designed to register the point clouds of subsequent acquisition dates as well as the point clouds to the model at the same time. Built and not built building elements and, if necessary, temporary states, like formwork, have to be identified for the determination of the construction progress on every acquisition date. A two-stage procedure was developed for this. First, the visibility of the building elements is determined using occupancy grid mapping. Not visible and not built elements can be identified this way. As second step, the point cloud in the surrounding of the building elements is analysed using a raster grid that is defined on the element's surface. The different parts of a building element are assessed individually. By combining the states of these parts, the final state of the expected building elements is derived.

The procedure was applied on three construction sites during the phase of the structural work. The photogrammetric acquisition of the construction process supports the documentation of the building phase for the BIM by the oriented images. It also facilitates the automatic labelling of not built and built building elements as well as not captured areas. An accuracy level of 2 to 5 cm can be expected with the selected methods for point cloud generation and co-registration. The procedure for the as-built as-planned comparison allows the recognition of built and not built elements with a high correctness of over 98 %. The completeness for the detection of built elements is lower and reaches 74 % for the handheld camera and 86 % for the UAV.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung iii

Abstract v

Inhaltsverzeichnis vii

Abkürzungsverzeichnis ix

Abbildungsverzeichnis xi

Tabellenverzeichnis xiii

Notation xv

1 Einleitung 1
- 1.1 Motivation automatische Baufortschrittskontrolle . . . 1
- 1.2 Einbettung in BIM . . . 2
- 1.3 Stand der Forschung . . . 3
  - 1.3.1 Koregistrierung . . . 3
  - 1.3.2 Soll-Ist-Abgleich zur Baufortschrittskontrolle . . . 4
  - 1.3.3 Beitrag dieser Arbeit . . . 8
- 1.4 Aufbau der Arbeit . . . 9

2 Grundlagen 11
- 2.1 Building Infomation Modeling (BIM) . . . 11
- 2.2 Bildbasierte Erstellung von 3D-Punktwolken . . . 13
  - 2.2.1 Bildorientierung - Structure-from-Motion . . . 13
  - 2.2.2 Dichte Rekonstruktion mit Multi-View-Stereo . . . 17
- 2.3 Koregistrierung . . . 21
  - 2.3.1 Grundlagen und Aufgaben . . . 21
  - 2.3.2 ICP in Baustellenszenarien . . . 21

3 Konzepte zur photogrammetrischen Baufortschrittskontrolle 25
- 3.1 Ablauf der Baufortschrittskontrolle . . . 25
- 3.2 Aufnahmestrategien . . . 27
  - 3.2.1 Handgetragene Kamera . . . 27
  - 3.2.2 Flugzeuggetragene Kamera . . . 29
  - 3.2.3 Krangetragene Kamera . . . 31
  - 3.2.4 Vergleich . . . 34
- 3.3 Fortlaufende Koregistrierung . . . 34

4 Methoden zum Soll-Ist-Abgleich 41
- 4.1 Aufbereitung der Punktwolken - Filterung . . . 41
- 4.2 Aufbereitung der Modelldaten . . . 42
- 4.3 Bauteilzustände . . . 43
- 4.4 Sichtbarkeitsanalyse . . . 47

4.5 Bewertungskriterien . . . 49
4.6 Ableitung von Bauteilzuständen . . . 51
4.6.1 Bauteilflächen . . . 51
4.6.2 Gesamtes Bauteil . . . 56

5 Experimente 59
5.1 Modelldaten . . . 59
5.1.1 Testszenario 1 (KS) . . . 60
5.1.2 Testszenario 2 (HFK) . . . 60
5.1.3 Testszenario 3 (TTUM) . . . 60
5.2 Bilddaten . . . 61
5.2.1 Testszenario 1 (KS) . . . 61
5.2.2 Testszenario 2 (HFK) . . . 64
5.2.3 Testszenario 3 (TTUM) . . . 67
5.3 Ergänzende Messdaten . . . 71
5.3.1 Testszenario 1 (KS) . . . 71
5.3.2 Testszenario 2 (HFK) . . . 71
5.3.3 Testszenario 3 (TTUM) . . . 72
5.4 Ground-Truth-Daten . . . 72

6 Ergebnisse 75
6.1 Punktwolken . . . 75
6.2 Koregistrierung . . . 78
6.3 Sichtbarkeit und Detektion . . . 82
6.3.1 Sichtbarkeitsanalyse . . . 82
6.3.2 Bewertung des gesamten Bauteils . . . 85

7 Diskussion 97
7.1 Bewertung der geometrischen Genauigkeit . . . 97
7.2 Bewertung des Abgleichverfahrens . . . 98
7.3 Bewertung der Erfassungskonzepte . . . 101

8 Zusammenfassung und Ausblick 103
8.1 Zusammenfassung . . . 103
8.2 Ausblick . . . 106

Literaturverzeichnis 109

Danksagung 117

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Seite
AR	Augmented Reality	4
BBA	Bündelblockausgleichung	15
BF	Bauteilfläche	42
BIM	Building Information Model / Modeling	1
BKS	Baustellenkoordinatensystem	34
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur	2
CSI	Camera Serial Interface	67
DVW	Deutscher Verein für Vermessungswesen	2
FEP	frei mit extrahierten Punkten	73
GNSS	Global Navigation Satellite System	4
GPS	NAVSTAR-GPS Global Positioning System	5
HFK	Haus für Kinder (Testszenario 2)	60
HSV	HSV-Farbraum Hue = Farbwert, Saturation = Sättigung, Value = Hellwert	6
ICP	Iterative Closest Point	3
IFC	Industry Foundation Classes	2
IMU	Inertial Measurement Unit	21
KS	Karlstraße (Testszenario 1)	60
LOC	Leonhard Obermeyer Center	2
MEP	Mechanical, electrical and plumbing (Leitungen)	2
PCA	Principal Component Analysis	6
RANSAC	Random Sample Consensus	51
RMS	Root Mean Square	51
SfM	Structure from Motion	4
SGM	Semi-Global Matching	17
SIFT	Scale Invariant Feature Transform	14
SVM	Support Vector Machines	6
TLS	Terrestrisches Laserscanning	4
TTUM	TranslaTUM (Testszenario 3)	60
UAV	Unmanned Aerial Vehicle	4

Abbildungsverzeichnis

1.1 Grundkomponenten der Baufortschrittskontrolle 1

2.1 Lebensyzklus eines Gebäudes 12
2.2 Fusion von Disparitätsbildern 19
2.3 Clusterbildung der fusionierten Tiefenwerte 20
2.4 Abstand zwischen Punktwolke und Modellflächen vor ICP 24
2.5 Abstand zwischen Punktwolke und Modellflächen nach ICP 24

3.1 Ablaufdiagramm der Baufortschrittskontrolle 25
3.2 Erfassungsarten und ihre Aufnahmegeometrie 28
3.3 Darstellung des Abdeckungsbereichs von Krankameras 32
3.4 Seitenansicht der Aufnahmegeometrie von Krankameras 33
3.5 Schematische Darstellung von möglichen Aufnahmeszenarien 36
3.6 Ablaufdiagramm des Koregistrierungsansatzes 37
3.7 Beispiele für Pass- und Verknüpfungspunkte 38

4.1 Aufbereitung der Modelldaten 42
4.2 Mögliche Bauteilzustände und ihre Abhängigkeiten 43
4.3 Schematische Darstellung von unterschiedlichen Bauteilzuständen 46
4.4 Beispiel für die Sichtbarkeitsanalyse 48
4.5 Rasterzellen, Voxelgitter und Punktextraktion 50
4.6 Bewertungsfunktionen 53
4.7 Templates zur Bewertung der Quer- und Längsprofile 54
4.8 HSD-Merkmalsraum 55
4.9 Bestimmung des Bauteilzustandes 56

5.1 Building Information Model 59
5.2 Modell KS 60
5.3 Modell HFK 60
5.4 Modell TTUM 61
5.5 Aufnahmen KS 62
5.6 Kameraanordnung KS 63
5.7 UAV-Erfassung 64
5.8 Aufnahmen HFK 65
5.9 Kameraanordnung HFK 66
5.10 Befestigung der Krankameras 67
5.11 Aufnahmen TTUM 69
5.12 Kameraanordnung TTUM 70
5.13 Laserscan KS 71
5.14 Passpunktnetz HFK 72
5.15 Beispiel für verschiedene spezielle Bauteilzustände 74

6.1 Punktwolke KS 76
6.2 Punktwolke HFK 77
6.3 Punktwolke TTUM 77

6.4 Zeitstrahl zur Darstellung der Koregistrierungsergebnisse 79
6.5 Ergebnis der Bauteilerkennung mit allen Zuständen 90
6.6 Ergebnis der Bauteilerkennung TTUM 91
6.7 Analyse von Parametervariationen 92
6.8 Ergebnis der Bauteilerkennung KS 94
6.9 Ergebnis der Bauteilerkennung HFK 95

7.1 Rekonstruktion von Bewehrungsstäben 100

8.1 Überblick über die durchgeführten Schritte bei der Baufortschrittskontrolle 105
8.2 Koregistrierung mit Infrarot Bildern 107
8.3 Kombinierte Innenraumerfassung 107

Tabellenverzeichnis

1.1 Übersicht von Studien zur automatischen Baufortschrittskontrolle 5

3.1 Zeitliche Zusammenhänge bei der Detektion von Bauteilen 26
3.2 Mögliche Aussagen über den Bauzeitpunkt 27
3.3 Überblick über die Erfassungsarten 34

4.1 Übersicht über die Bauteilzustände 47
4.2 Bestimmung der Bauteilflächenzustände 52
4.3 Parameter der Bewertungsfunktionen 54
4.4 Entscheidungsregeln für nicht bestätigte Bauteile 57

5.1 Aufnahmezeitpunkte KS 61
5.2 Aufnahmezeitpunkte HFK 64
5.3 Aufnahmezeitpunkte TTUM 68

6.1 Qualität der dichten Punktwolke bei KS 75
6.2 Qualität der dichten Punktwolke bei HFK 76
6.3 Qualität der dichten Punktwolke bei TTUM 76
6.4 Koregistrierungsgenauigkeit für KS 80
6.5 Koregistrierungsgenauigkeit für HFK 80
6.6 Abweichungen der Passpunktkoordinaten bei KS 81
6.7 Abweichungen der Passpunktkoordinaten bei HFK 81
6.8 Parameter der Sichtbarkeitsanalyse 82
6.9 Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für KS - Anzahl 83
6.10 Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für KS - Anzahl 83
6.11 Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für KS - Fläche 84
6.12 Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für HFK - Fläche 84
6.13 Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für TTUM - Fläche 84
6.14 Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für KS - Anzahl, alternative Parameter . . . 85
6.15 Sichtbare Bauteilflächen für alle Bauteile in allen Szenarien 86
6.16 Sichtbare Bauteilflächen für neu errichtete Bauteile in allen Szenarien 86
6.17 Ergebnis der Bauteilerkennung KS - Anzahl 87
6.18 Ergebnis der Bauteilerkennung KS - Fläche 87
6.19 Ergebnis der Bauteilerkennung KS für neue Bauteile - Anzahl 88
6.20 Ergebnis der Bauteilerkennung KS für neue Bauteile - Fläche 88
6.21 Ergebnis der Bauteilerkennung HFK - Anzahl 89
6.22 Ergebnis der Bauteilerkennung HFK - Fläche 89
6.23 Ergebnis der Bauteilerkennung HFK für neue Bauteile - Anzahl 89
6.24 Ergebnis der Bauteilerkennung HFK für neue Bauteile - Fläche 90

Notation

$\mathcal{A}_{0120}^{KS,HFK,TTUM}$	Aufnahmezeitpunkt in Szenario Karlstraße (KS), Haus für Kinder (HFK), TranslaTUM (TTUM) mit Datum MMTT
A_1, A_2, A_3	radiale Verzeichnungsparameter
——	——
$\mathbf{B}_r, \mathbf{B}_c$	Binärbilder der Mittelwertprofile
B_1, B_2	tangentiale und radial-asymmetrische Verzeichnungsparameter
b	Basislinienlänge
——	——
C_1, C_2	Affinität und Scherung
c_k	Kammerkonstante, Brennweite
c	Spalte (im Rastergitter $\mathfrak{R}$ einer Bauteilfläche)
cl_{min}, cl_{max}	Schwellwerte für die maximalen Werte der log-odd-Werte
——	——
D_{i,P_j}	Entfernung zwischen Kamerazentrum des Referenzbildes i und 3D Punkt $\boldsymbol{X_j}$
$\mathbf{D}$	Disparitätsbild, Tiefenkarte
d	Disparität
dl	Abstand eines Punkts zur Bauteilfläche
——	——
E	SGM Energieterm
e	Fehlerfunktion ICP
——	——
F	Fläche einer BF
$F_{frei,unbek.,unsicher}$	Gesamtfläche mit Zustand *frei*, *unbekannt* oder *unsicher* pro Bauteil
——	——
$\mathcal{G}_V$	Ground Truth mit den Bauteilzuständen aller Bauteile
$\mathcal{G}_S$	Ground Truth mit den Bauteilzuständen der sichtbaren Bauteile
$\mathcal{G}_V^{\Delta}$	Ground Truth mit den Bauteilzuständen aller Bauteile, die sich seit dem vorhergehenden Aufnahmezeitpunkt geändert haben
$\mathcal{G}_S^{\Delta}$	Ground Truth mit den Bauteilzuständen der sichtbaren Bauteile, die sich seit dem vorhergehenden Aufnahmezeitpunkt geändert haben
$\mathcal{G}_{BF}$	Ground Truth für die Sichtbarkeit von Bauteilflächen (BF)
G_i	Wert der Gewichtung zur Bestätigung eines Bauteils aufgrund eines Bewertungskriteriums w_1 bis w_5

g		SGM-Pfad
g_{w_i}		Grenzwerte für die Bewertungskriterien w_1 bis w_4
—		—
h		Höhe über Grund bei UAV und Krankamera
—		—
I_k		innere Orientierung von Kamera k
$\mathbf{I}$		Bild
$\mathbf{I^r}$		rektifiziertes Bild
$\mathbf{I^v}$		verzeichnungskorrigiertes Bild
$\mathbf{I_R}$		Referenzbild für Dense Matching
$\mathbf{I_M}$		Matchbild für Dense Matching
—		—
$\mathbf{K}$		Kameramatrix
$k_{min,i}$		Additionswert zu den Grenzwerten g_{w_i} bei Berechnung der Gewichte G_i
—		—
L		Log-odd-Werte (Logarithmus eines Odds)
l_b		Seitenlänge der Rasterzellen von $\mathbf{B}_r$ und $\mathbf{B}_c$ senkrecht zur Bauteilfläche
l_v		Breite der Pufferzone zur Punktextraktion vor dem Bauteil
l_h		Breite der Pufferzone zur Punktextraktion hinter dem Bauteil
l_r		Seitenlänge der Rasterzellen in $\mathfrak{R}$
l_f		Seitenlänge der Voxelzellen für die Filterung
l_{prof}		Mindestlänge für die Verwendung eines Profils bei der Bewertung der BF
—		—
$\boldsymbol{n}$	$= \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}$	Normalenvektor einer Ebene
—		—
$\boldsymbol{O}$	$= \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix}$	Koordinaten des Kamerazentrums (äußere Orientierung)
o		Kantenlänge der Voxel im Voxelgitter $\mathfrak{V}$ bei der Sichtbarkeitsanalyse
—		—
$\mathcal{P}$		Punktmenge von 3D-Punkten
$\mathbf{P}$		Projektionsmatrix
P		Wahrscheinlichkeit, Bestätigungswert
$\boldsymbol{p}$		Pixel
p_{fl}		Prozentsatz an „belegten“ Rasterzellen einer BF auf Basis der Punktdichte
$p^S_{unb,fre,bel,uns,kon}$		Prozentsatz der Rasterzellen $\mathfrak{R}$ einer BF, die den Status *unbekannt*, *frei*, *belegt*, *unsicher* oder *Konflikt* aufgrund der Sichtbarkeitsabfragen erhalten haben.
—		—

$\boldsymbol{q}$	Richtungseinheitsvektor von Kamerazentrum zu einem Pixel
q_L	Längsüberdeckung (Überdeckung entlang der y-Achse des Bildkoordinatensystems)
q_Q	Querüberdeckung (Überdeckung entlang der x-Achse des Bildkoordinatensystems)
———	———
$\mathbf{R}$	Rotationsmatrix eines Bildes oder Rotationsparameter eines Bildes
$\mathfrak{R}_{i,j}$	Rastergitter - Rasterzelle i, j
R_0	linearer Parameter der radialen Verzeichnungskorrektur
r'	Abstand zwischen Bildpunkt und Bildhauptpunkt
r_K	Radius des Krans entspricht Länge des Auslegers
r	Zeile (im Rastergitter einer Bauteilfläche)
———	———
S_{frei}	maximaler Wert, um ein Voxel anhand des Ergebnisses der Sichtbarkeitsanalyse als *frei* zu markieren
S_{bel}	minimaler Wert, um ein Voxel anhand des Ergebnisses der Sichtbarkeitsanalyse als *belegt* zu markieren
S_{Punkte}	Schwellwert auf die Anzahl der extrahierten Punkte, um eine Rasterzelle als „belegt“ einzustufen
$S_{\mathfrak{R}}$	Schwellwert auf den Prozentsatz der Rasterzellen mit dem gleichen Zustand pro BF für die Zuweisung von Zuständen aus der Sichtbarkeitsanalyse
S_K	Schwellwert auf den Prozentsatz der Rasterzellen mit dem Status *Konflikt* pro BF für die Zuweisung des Zustands *Konflikt* bei der Sichtbarkeitsanalyse
s_y	Sensorhöhe
sk	Scherungsparameter in der Kameramatrix $\mathbf{K}$
s	Messung (= Durchgang oder Ende eines Strahls in einem Voxel) bei der Sichtbarkeitsanalyse
———	———
$\mathrm{T_i}$	Zeitpunkt einer Bildaufnahme
$\mathfrak{T}^{KS,HFK,TTUM}$	Testszenario Karlstraße (KS), Haus für Kinder (HFK), TranslaTUM (TTUM)
$\boldsymbol{t}$	Translationsvektor eines Bildes
———	———
$\mathfrak{V}$	Voxelgitter zur Sichtbarkeitsanalyse
———	———
w_i	Bewertungskriterium für die Bestätigung von Bauteilen
———	———
$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}$	Koordinaten von 3D-Punkten

$\underline{\boldsymbol{X}}$	$=$	$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$	homogene Koordinaten von 3D-Punkten
X			X-Koordinate im Objektkoordinatensystem
x			x-Bildkoordinate
$\boldsymbol{x}$	$=$	$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$	Bildkoordinaten
$\underline{\boldsymbol{x}}$	$=$	$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$	homogene Bildkoordinaten
$\boldsymbol{x}'$	$=$	$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix}$	auf den Bildhauptpunkt bezogene Bildkoordinaten einer idealen Lochkamera
$\boldsymbol{x}_\mathbf{o}$	$=$	$\begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix}$	Bildhauptpunktskoordinaten bzgl. des Bildmittelpunkts
———			———
Y			Y-Koordinate im Objektkoordinatensystem
y			y-Bildkoordinate
———			———
Z			Z-Koordinate im Objektkoordinatensystem
———			———
α			Winkelinkrement für Kranaufnahmen
μ			Mittelwert der Punktabstände dl
$\boldsymbol{\Delta x}$	$=$	$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix}$	Korrekturterme zur Kamerakalibrierung
ω			Rotationswinkel um die X-Achse
φ			Rotationswinkel um die Y-Achse
κ			Rotationswinkel um die Z-Achse

1 Einleitung

1.1 Motivation automatische Baufortschrittskontrolle

Arbeitsabläufe gestalten sich bei Bauvorhaben äußerst dynamisch. Gründe dafür sind u.a. schlecht vorhersehbare Randbedingungen, wie sie beispielsweise durch Witterungseinflüsse hervorgerufen werden, die starke Abhängigkeit einzelner Prozessschritte voneinander, die Beteiligung einer Vielzahl von Unternehmen und das Fehlen einer strikten Prozessabfolge, wie sie in der Fließbandproduktion üblich ist. Dies führt dazu, dass die tatsächlich durchgeführte Bauabwicklung häufig weit vom geplanten Bauablauf abweicht, woraus sich große Verzögerungen und Budgetüberschreitungen ergeben können. Die Baufortschrittskontrolle dient dazu, diese Fehlentwicklungen möglichst frühzeitig zu erkennen. Dafür wird der aktuelle Bauzustand (Ist-Zustand oder *as-built*) erfasst und mit dem geplanten Zustand (Soll-Zustand oder *as-planned*) abgeglichen. Die Erfassung geschieht aktuell durch Begehung des Bauleiters und Dokumentation in einem handschriftlichen oder mobilen, d.h. Tablet oder Smartphone, Bautagebuch. Der Abgleich erfolgt auf Basis von 2D-Plänen. Eine solche manuelle Erfassung ist zeitraubend und mitunter fehleranfällig, weshalb eine automatisierte Unterstützung dieses Prozesses von großem Wert sein könnte. Diese kann den zur Erfassung nötigen Arbeitsaufwand für den Bauleiter minimieren und durch standardisierte Prozesse die Fehleranfälligkeit reduzieren. Neben der Erkennung von Abweichungen von der Planung, wichtig für das Kosten-Controlling und die Organisation des weiteren Arbeitsablaufs, ist die Erfassung des Baufortschritts durch ein Bautagebuch honorar- und haftungsrechtlich vorgeschrieben [HOAI, 2001]. Abbildung 1.1 zeigt den grundsätzlichen Ablauf einer automatisierten Baufortschrittskontrolle, wie er in dieser Arbeit untersucht wird. Die Erfassung des Ist-Zustandes der Baustelle erfolgt mit photogrammetrischen Methoden. Der Soll-Zustand wird durch ein Building Information Model (BIM) repräsentiert. Zu jedem Zeitpunkt, an dem eine Erfassung erfolgt, kann ein Abgleich zwischen Soll- und Ist-Zustand durchgeführt werden.

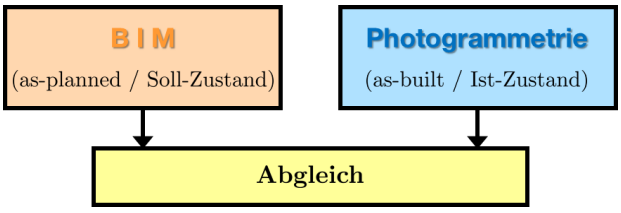


Abbildung 1.1: Grundkomponenten der Baufortschrittskontrolle: Zu jedem Zeitpunkt, bei dem eine photogrammetrische Erfassung des Ist-Zustandes erfolgt, kann ein Abgleich zum Soll-Zustand, der aus dem BIM extrahiert wird, erfolgen.

Grundsätzlich wird eine Automatisierung (i) für die Erfassung der notwendigen Daten auf der Baustelle, (ii) für den Abgleich des Ist-Zustandes mit dem Soll-Zustand sowie (iii) für die Generierung von Folgeaktivitäten angestrebt. Letzteres kann zum Beispiel die automatische Adaption des Zeitplans aufgrund von detektierten Verzögerungen sein. Der Fokus dieser Arbeit liegt auf den ers-

ten beiden Punkten, also auf der Datenerfassung für die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion von Baustellenszenarien sowie auf dem automatisierten Abgleich zwischen Soll- und Ist-Zustand auf Basis eines 4D-Bauwerkmodells (BIM) und den erstellten 3D-Punktwolken. Für die weitere Nutzung der Ergebnisse nach dem Abgleich sei auf die Veröffentlichungen von Braun et al. [2015a, 2016b] verwiesen, die im Zuge des gleichen Forschungsprojekts „Baufortschrittskontrolle auf Basis integrierter Punktwolkeninterpretation und 4D-Bauwerksmodellierung“ entstanden [DFG, 2012].

Die in dieser Arbeit entwickelten Verfahren und Testszenarien konzentrieren sich auf den Rohbau von Gebäudeprojekten. Andere denkbare Szenarien wie die Überwachung von Innenraumausbauten und die Leitungsinstallation (Mechanical, electrical and plumbing (MEP)) für industrielle Anlagen oder die Beobachtung von Infrastrukturprojekten, wie z.B. Brücken oder Bahnstrecken, werden hier nicht betrachtet.

1.2 Einbettung in BIM

Das bereits oben erwähnte Building Information Modeling ist die Erstellung eines umfassenden digitalen Abbilds eines Bauwerks von der ersten Planung über die Errichtung und die Bewirtschaftung bis zum Abbruch, in das alle Fachplanungen und Informationen eingepflegt werden, die dann allen Beteiligten zur Verfügung stehen [Borrmann, 2013; Borrmann et al., 2015]. Eine detaillierte Beschreibung des Konzepts BIM wird in Abschnitt 2.1 gegeben.

Die starken Bemühungen digitale Methoden in der Baubranche zu etablieren, sind Motivation auch für die Baufortschrittskontrolle digitale Erfassungs- und Abgleichmethoden zu entwickeln, die in ein BIM eingebettet werden können. Umgekehrt bietet ein BIM die Grundlage für eine ausschließlich in 3D durchgeführte Baufortschrittskontrolle, da hier der 4D-Soll-Zustand, also das 3D-Modell zu einem bestimmten Zeitpunkt, abgefragt werden kann. Somit wird hier auf die im BIM-Konzept vorgesehene Abkehr von 2D-Plan basierten Arbeiten auf das Arbeiten mit einem 3D-Modell hingearbeitet. Außerdem kann ein BIM, aufgrund des Konzepts des umfassenden Abbilds, bei etwaigen zeitlichen oder geometrischen Abweichungen die benötigten Daten bereitstellen, um möglichst ressourcensparend auf diese reagieren zu können.

Die Wichtigkeit des Themas BIM kann u.a. an den folgenden Punkten gezeigt werden. Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) veröffentlichte vor kurzem den Stufenplan Digitales Planen und Bauen [BMVI, 2015]. Dieser sieht u.a. vor, dass ab Ende 2020 alle Infrastrukturmaßnahmen des BMVI mit BIM im Leistungsniveau I durchgeführt werden sollen. Das sogenannte Leistungsniveau I stellt dabei eine Vorstufe zur vollständigen Umsetzung von BIM dar.

Im gleichen Jahr ist das erste deutschsprachige Fachbuch zum Thema BIM erschienen [Borrmann et al., 2015]. Auch Initiativen wie *buildingSMART*, das aus Standardisierungsbemühungen um das Austauschformat IFC (Industry Foundation Classes) entstand, oder die *Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens mbH (planen-bauen 4.0)* treiben die Einführung von BIM voran. Auch im Bereich der Geodäsie rückt das Thema immer stärker in den Fokus, was zahlreiche Tagungen zum Thema BIM z.B. des *Deutschen Verein für Vermessungswesen - Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement (DVW)* [DVW, 2016a,b] zeigen. Auch an der TU München wird im *Leonhard Obermeyer Center* (LOC) die Forschung im Bereich digitaler Methoden für die bebaute Welt in einem Zentrum aus dem Zusammenschluss von fünf Lehrstühlen der Disziplinen Architekturinformatik, Bauinformatik, Geoinformation, Photogrammetrie & Fernerkundung sowie computergestützte Modellierung und Simulation vorangetrieben [LOC, 2016].

Der Einsatz bzw. die Förderung von BIM ist in einigen Ländern wie USA, Großbritannien, Finnland, Singapur und Australien schon weiter fortgeschritten als in Deutschland [Borrmann et al., 2015]. Zum Vergleich sollen hier die Aktivitäten in Großbritannien aufgezeigt werden: In Großbritannien existiert ebenfalls ein Stufenplan zur Einführung von BIM. Für öffentliche Bauaufträge ist dort die Durchführung mit BIM im Level 2 bereits ab 2016 verbindlich vorgeschrieben [Cabinet Office, 2011]. Dabei kann das Level 2 als vergleichbare Stufe zum Leistungsniveau I in Deutschland angesehen werden. Die *BIMTaskgroup* in Großbritannien hat ihr Pendant in der weiter oben genannten *planen-bauen 4.0*. Die folgende Einführung von Level 3, das „Digitally Built Britain" genannt wird, sieht vor, auf Basis der Erfahrungen von Level 2, in mehreren Stufen ein vollständig integriertes BIM-Verfahren zu etablieren. Dies schließt z.B. den vollständigen Datenaustausch über die IFC-Schnittstelle ein. Die Initiative ist auch stark darauf ausgelegt, britische Standards als Vorbild für internationale BIM-Initiativen durchzusetzen [HMGBIS, 2015].

1.3 Stand der Forschung

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über den Stand der Forschung im Feld Baufortschrittskontrolle. Er ist aufgeteilt in die beiden Abschnitte Koregistrierung (Abschnitt 1.3.1) sowie Soll-Ist-Abgleich (Abschnitt 1.3.2). Das Kapitel schließt mit Abschnitt 1.3.3, der den Beitrag und die Forschungsfragen dieser Arbeit darlegt.

Die sensorgestützte Baufortschrittskontrolle beinhaltet die folgenden vier grundlegenden Schritte [Akinci et al., 2006]:

- Generierung der as-planned Modellinformationen
- Identifizierung der zu überwachenden Objekte
- Datenaufnahme des as-built Zustandes
- Datenanalyse zur Baufortschrittskontrolle

In dieser Arbeit wird die Generierung des Modells, das den geplanten Zustand darstellt, als gegeben angesehen. Die zu überwachenden Objekte ergeben sich aus der Betrachtung der Rohbauphase von Gebäuden in Stahlbetonbauweise. Die zu erfassenden Elemente sind somit Betonbauteile, Schalungsteile sowie die Bewehrung. Die wichtigsten Erfassungsarten für die Baufortschrittskontrolle sind Laserscanning sowie bildbasierte/photogrammetrische Methoden. Verfahren auf Basis von Laserscanning beruhen auf der Interpretation von Punktwolken. Bildbasierte Verfahren können entweder auf der Interpretation der Bilder selbst oder auf den von ihnen abgeleiteten Punktwolken beruhen. Ansätze bei denen Vorrichtungen, wie z.B. RFID-Marker, an den Bauelementen angebracht werden müssen, werden hier nicht berücksichtigt. Eine Übersicht über die Bauwerksvermessung für BIM gibt Blankenbach [2015]. In den folgenden beiden Abschnitten werden die Forschungsarbeiten jeweils auf Grundlage der verwendeten Erfassungsarten sortiert.

1.3.1 Koregistrierung

Die Koregistrierung von Punktwolke und Gebäudemodell ist ein essentieller Schritt und wird in zahlreichen Arbeiten zur Baufortschrittskontrolle behandelt. Als häufigste Registrierungsmethode wird der Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) [Besl & McKay, 1992] oder Varianten davon eingesetzt [Pătrăucean et al., 2015].

Laserscanning

ICP-Verfahren zur Koregistrierung von Modell und Laserscanning-Punktwolken weisen zahlreiche Variationen auf. Um die Koregistrierung ausschließlich mit Punktwolken durchzuführen wird

in Bosché [2010] aus der Vermaschung des Gebäudemodells eine Punktwolke gesampelt. In einer späteren Studie wird ein modifizierter Ansatz verwendet, der statt korrespondierender Punkte korrespondierende Ebenen einsetzt [Bosché, 2012]. Diese müssen dafür in der Laserscanning-Punktwolke detektiert und angepasst werden. Eine Koregistrierung über Ebenen findet sich auch in Hebel & Stilla [2009] und Tuttas & Stilla [2013], wobei die Koregistrierung von Gebäuden für einen kleineren Maßstab, also für die Größenordnung eines ganzes Stadtviertels, betrachtet wird. Ein ICP-Verfahren kann auch durchgeführt werden, indem Ebenen und Punkte verwendet werden. Dieser Ansatz wird von Kim et al. [2013b] eingesetzt, um die Bauteile nach einem Grobregistrierungsschritt einzeln mit dem jeweiligen Modellobjekt zu koregistrieren. Um nicht fälschlicherweise Punkte zu verwenden, die nicht mit der Modellfläche korrespondieren, werden im ICP-Ansatz von Tang & Rasheed [2013] Punkte mit einem zu großen Daten-Modell-Abstand zurückgewiesen. Eine Alternative zu ICP ist die Koregistrierung mit Hilfe von Zielmarken, wie es für ein Baustellenszenario bei Zhang & Arditi [2013] gezeigt wird, wobei die Autoren nicht darauf eingehen, wie die Transformation vom Modell-Koordinatensystem zu dem Marker-Koordinatensystem bestimmt wird.

Bilddaten

Werden Bilder zur Berechnung der Punktwolke verwendet, kann die Koregistrierungsaufgabe gelöst werden indem korrespondierende Punkte im Modell und in den Bildern gemessen werden. Für die Bestimmung der benötigten Transformationsparameter werden in Han & Golparvar-Fard [2015b] und Karsch et al. [2014] eine bzw. mehrere manuell referenzierte Referenzkameras eingesetzt. Auch Golparvar-Fard et al. [2011b,c, 2012] verwenden die manuelle Messung und Zuweisung von korrespondierenden Punkten in Bildern und Modell. Als Alternative wird die Verwendung von Vermessungspunkten vorgeschlagen, was jedoch in den Testszenen nicht angewendet wird. Wenn die Transformation zwischen Modell und Bildern des ersten Aufnahmezeitpunkts bekannt ist, können Punktwolken nachfolgender Zeitpunkte über ICP registriert werden. Dazu kann die spärliche Punktwolke aus einem Structure-from-Motion-Verfahren (SfM) genutzt werden [Golparvar-Fard et al., 2011b,c, 2012]. In den Testszenen der genannten Arbeiten wird jeweils ein nachfolgender Aufnahmezeitpunkt auf diese Weise koregistriert. ICP auf Basis von dichten Punktwolken eines Stereokamerasystem wird in Son & Kim [2010] eingesetzt. Für die Bestimmung der Position von fest installierten Kameras in Bezug zum Modell setzen Kim & Kano [2008] eine Totalstation ein, mit der die Kameras direkt angemessen werden. Die Ausrichtung einer Kamera wird bestimmt, indem ein Marker, der in Blickrichtung der Kamera angebracht ist, angemessen wird. Direkte Georeferenzierung mit Daten eines GNSS-Empfänges auf einem Unmanned Aerial Vehicle (UAV) wird von Zollmann et al. [2014] verwendet. Die Genauigkeit hängt hierbei von den GNSS-Auswertung ab, die nur unter Verwendung von Korrekturdaten und einer Real-Time-Kinematic-Lösung (RTK) Zentimeter-Genauigkeit erreichen kann, ansonsten im Meterbereich liegt.

1.3.2 Soll-Ist-Abgleich zur Baufortschrittskontrolle

In Tabelle 1.1 findet sich eine Übersicht von Studien zur Baufortschrittskontrolle, bei denen Verfahren zum automatischen Abgleich von Soll-Modell und Ist-Zustand gezeigt werden. Eine Sortierung erfolgt in der Tabelle anhand der eingesetzten Erfassungsart. Es sind Studien berücksichtigt, die terrestrisches Laserscanning (TLS), photogrammetrische Punktwolken (PPW) oder Methoden der Bildverarbeitung (BV) verwenden. Studien die ein Konzept (KON) beschreiben, ohne die Verfahren in Versuchsszenarien zu testen, sind entsprechend gekennzeichnet. Verfahren, die sich im Wesentlichen der Darstellung des Bauzustandes im Sinne von Augmented Reality (AR) widmen, sind in der Tabelle nicht aufgeführt, werden aber weiter unten genannt, da Überschneidungen zu den Anwendungen in der Baufortschrittskontrolle bestehen.

Arbeit	TLS	PPW	BV	KON
Akinci et al. [2006]	x			x
Bosché et al. [2008] Bosché et al. [2009]	x			
Bosché [2010]	x			
Turkan et al. [2012]	x			
Turkan et al. [2013]	x			
Turkan et al. [2014]	x			
Kim et al. [2013b]	x			
Zhang & Arditi [2013]	x			
Maalek et al. [2015a] Maalek et al. [2015b]	x			
Rebolj et al. [2008]			x	x
Lukins & Trucco [2007]			x	
Ibrahim et al. [2009]			x	
Wu et al. [2010]			x	
Kim et al. [2013a]			x	
Son & Kim [2010]		x	x	
Golparvar-Fard et al. [2011b] Golparvar-Fard et al. [2011c] Golparvar-Fard et al. [2012]		x		

Tabelle 1.1: Übersicht von Studien zur automatischen Baufortschrittskontrolle, die Arbeiten sind anhand der Erfassungsart des as-built-Zustandes sortiert. Nicht durch Doppellinien getrennte Ansätze verwenden die gleichen Datensätze. TLS = Terrestrisches Laserscanning, PPW = Photogrammetrische Punktwolke, BV = Bildverarbeitung, KON = Darstellung eines Erfassungskonzepts

Zur Thematik Baufortschrittskontrolle finden sich zahlreiche Übersichtsstudien [Rankohi & Waugh, 2014; Kopsida et al., 2015; Son et al., 2015; Omar & Nehdi, 2016], die unterschiedliche Schwerpunkte setzen. Eine Einteilung der Verfahren in die Themengebiete Datenerfassung, Informationsgewinnung, Ableitung des Baufortschritts sowie Visualisierung wird in Kopsida et al. [2015] vorgenommen. Eine Unterscheidung anhand der angewandten Technologien wird in Omar & Nehdi [2016] getroffen. Diese umfassen neben Methoden zur 3D-Erfassung mit Bild- und Laserscannersystemen auch IT-Hilfsmittel, die zur Unterstützung des manuellen Erfassungsprozesses eingesetzt werden können, Geolokalisierungsmethoden, wie z.B. RFID- oder GPS-Tracking, sowie AR-Anwendungen. Eine Ergänzung mit Arbeiten bezüglich Rohrleitungssystemen (MEP), also im Wesentlichen zylindrische Objekte, findet sich in Son et al. [2015]. Ausschließlich bildbasierte Systeme, die auf Bildern, Zeitrafferbildsequenzen oder Videos basieren, werden in Yang et al. [2015] betrachtet, wobei auch auf die Detektion und das Tracking von Bauarbeitern und Baustellenfahrzeugen eingegangen wird.

Die Genauigkeit und Anwendbarkeit von Laserscanning und photogrammetrischen Ansätzen in Baustellenszenarien werden u.a. in Golparvar-Fard et al. [2011a] und Dai et al. [2013] untersucht. In der ersten Studie werden stark vereinfachte Testdaten verwendet und der Test für reale Daten ist auf einen sehr kleinen Ausschnitt einer Baustelle begrenzt. Außerdem wird kein Maßstab an die photogrammetrischen Messungen angebracht und somit nur relative Genauigkeitsaussagen ermittelt. In der zweiten Studie wird für Laserscanner eine Genauigkeit, die um den Faktor zehn besser ist, ermittelt.

Die in Tabelle 1.1 aufgeführten Methoden werden im Folgenden, nach den verwendeten Erfassungsarten sortiert, genauer beschrieben. Zusätzlich werden auch Systeme für AR-Anwendungen

auf Baustellen vorgestellt. Abschließend werden Arbeiten hinsichtlich der Art ihrer Nutzung von Kameras verglichen.

Laserscanning (TLS)

Die meisten Ansätze zum Abgleich von Soll- und Ist-Zustand basieren auf der Überprüfung von geometrischen Abweichungen. Die Abstände von Modell und Punktwolke sowie die abgedeckte Fläche werden in Bosché et al. [2008, 2009] herangezogen, um zu testen, ob simulierte Punkte und real aufgenommene Punkte übereinstimmen. Die simulierten Punkte sind gesampelte Modellpunkte, die mit Hilfe der bekannten Standorte der Laserscanner generiert wurden, und die als as-planned-Punkte bezeichnet werden. Die Entscheidung, ob ein Bauteil als gebaut eingestuft wird, basiert auf einem Schwellwert für die abgedeckte Fläche und einem Distanzschwellwert für die Entfernung entlang des Strahls zwischen as-planned-Punkt und as-built-Punkt. Um den aufwändigen Prozess der Simulierung der as-planned-Punktwolke zu vermeiden, wird in Bosché [2010] die Abgleichalgorithmik abgewandelt, sodass nun für jeden Scanpunkt der nächste Punkt auf der Modelloberfläche gesucht wird. Dieses Verfahren wird auch in Turkan et al. [2012] und in Turkan et al. [2013] angewandt und erweitert, um den Fortschritt mit Hilfe des Prozessplans zu verfolgen bzw. um den Prozessfortschritt hinsichtlich des Fertigstellungswertes zu beurteilen. Eine Erweiterung der Verfahren, um neben gebauten Bauteilen auch sekundäre/temporäre Objekt zu detektieren, ist in Turkan et al. [2014] zu finden. Die untersuchten Objekte sind Bewehrungsstreben, Schalungsteile sowie Schalungsstützen. Bewehrung und Schalung werden von dem fertiggestellten Betonteil unterschieden, indem überprüft wird, ob sich die Mehrzahl der Punkte innerhalb, auf oder außerhalb der Bauteiloberfläche befindet. Schalungsstützen werden detektiert, indem die Punktdichte, in den vom Modell als frei gekennzeichneten Bereichen, analysiert wird. Erreicht diese einen bestimmten Wert, wird davon ausgegangen, dass Schalungsstützen vorliegen. Auf der Analyse des Auftretens von Punkten basiert auch das Vorgehen von Zhang & Arditi [2013]. Bauteile werden detektiert, indem das Verhältnis zwischen der Anzahl der Punkte, die innerhalb des Volumens des zu überprüfenden Objekts liegen, und der Anzahl der Punkte, die innerhalb des Volumens einer verkleinerten Version dieses Objekts liegen, analysiert wird. Die Studie verwendet einen sehr rudimentären Testdatensatz, weshalb die Aussagekraft über die Anwendbarkeit auf realen Baustellen nur gering ist.

Aus den Punktwolken können zunächst auch Objekte, insbesondere Ebenen und Zylinder, rekonstruiert werden und anschließend ein Abgleich zwischen den rekonstruierten Flächen und den Modellflächen durchgeführt werden. Diesen Ansatz verfolgen Maalek et al. [2015a,b]. Sie schlagen vor, aus den Punktwolken zunächst ein as-built-Modell zu rekonstruieren, indem planare und linienhafte Strukturen detektiert werden. Dazu wird ein Verfahren auf Basis der Hauptkomponentenanalyse (Principal Component Analysis (PCA)) eingesetzt.

Eine weitere Möglichkeit des Abgleichs besteht in der Klassifikation der Punkte. In Kim et al. [2013b] werden zunächst Punkte detektiert, die zu Betonteilen gehören. Die Klassifikation erfolgt anhand der HSV-Farbwerte mit Support Vector Machines (SVM). Anschließend werden Bauteile ebenfalls mit SVM unter Verwendung von Lalonde-Merkmalen klassifiziert. Dabei werden lineare Objekte, also Säulen und Balken, flächige Objekte und andere, davon abweichende Objekte, unterschieden. Ein Objekt gilt als bestätigt wenn die Klassifikation mit dem as-planned-Objekt übereinstimmt.

Photogrammetrie - Punktwolken (PPW)

Verwendung von photogrammetrischen Punktwolken für die Baufortschrittskontrolle können nach Kenntnis des Autors alle der Gruppe von Golparvar-Fard et al. zugerechnet werden. Die Methodik zur Bestimmung des Baufortschritts wird in Golparvar-Fard et al. [2011b,c, 2012] beschrieben. Die Autoren nehmen die Verwendung von ungeordneten Bildreihen an, da die große Zahl von Bildern,

die von allen Projektbeteiligten auf der Baustellen aufgenommen werden, für die automatische Baufortschrittskontrolle verwendet werden können. In den Studien wird jedoch nicht angegeben, ob wirklich auf solche Bildsequenzen zurückgegriffen wurde, oder ob gesondert Bilder aufgenommen wurden, die die ganze Szene abdecken. Die Methode basiert auf einem Voxelgitter, in dem freie, belegte und verschattete Voxel anhand der Punktwolke und den Kamerapositionen markiert werden. Zur Überprüfung des Baufortschritts wird auf gleiche Weise ein Voxelgitter berechnet, in dem alle zum entsprechenden Zeitpunkt geplanten Modellteile eingetragen werden. Auf Basis der Kamerapositionen wird überprüft, ob die jeweiligen Teile sichtbar sein können oder nicht. Ob ein Objekt bzw. eine Änderung des Objektzustandes, also ein detektierter Baufortschritt, vorliegt, wird anhand der bedingten Wahrscheinlichkeit für ein gebautes Bauteil in einem bestimmten Planungszustand beurteilt. Der dazu benötigte Schwellwert wird unter Verwendung eines SVM-Ansatzes in Abhängigkeit von Material und Art der Bauteile trainiert. Die Koregistrierung mit dem Modell erfolgt wie in Abschnitt 1.3.1 beschrieben. Der in der Studie verwendete Datensatz zeigt einen Bauzustand, in dem Objekte in der Baugrube aufgenommen werden. Es wird nicht diskutiert, wie das Verfahren für wachsende Gebäude funktioniert und wie es ggf. anzupassen ist.

Zu den Arbeiten von Golparvar-Fard et al. [2011a,b,c, 2012] finden sich viele ergänzende Arbeiten, die den Abgleich in ein umfassenderes Konzept zur Baufortschrittskontrolle einbetten [Han et al., 2015a; Lin et al., 2015] bzw. um Analyse- und Visualisierungstools [Karsch et al., 2014], Materialerkennung [Han & Golparvar-Fard, 2015a] oder Regeln zur Anwendung von Bauprozesswissen [Han et al., 2015b] erweitern.

Bildverarbeitung (BV)

Ansätze, die auf Bildverarbeitung beruhen, werden in den meisten Fällen für Bilder von fest installierten Kameras eingesetzt. Das Modell kann dann in das Bild projiziert werden, um den as-built- und den as-planned-Zustand abzugleichen. Für Bilder, die in kurzen Abständen aufgenommen werden, können die Änderungen der Intensitätswerte als Indikator für einen Baufortschritt dienen. Ibrahim et al. [2009] und Lukins & Trucco [2007] untersuchen Änderungen in Bildern, die in einem 15 Minuten Intervall aufgenommen werden. Die Bauteile des Modells werden in das Bild projiziert und starke Änderungen der gefilterten und normalisierten Pixelintensitäten in diesen Bildbereichen detektiert. Dieser Ansatz leidet jedoch darunter, dass Änderungen häufig andere Ursachen haben als die eigentliche Errichtung des Bauteils. Bei Lukins & Trucco [2007] wird das Vefahren um eine Adaboost-Klassifizierung erweitert, die mit Haar-Merkmalen trainiert wird, um Gebäudeelemente zu verifizieren. Die genannten Ansätze werden in Zhang et al. [2009] in ein Gesamtkonzept für die Baufortschrittskontrolle eingebunden, in dem die Detektion von Bauteilen mit Zeitplan, Arbeitspaketen und Kostenpositionen verknüpft wird. Die Verwendung von Canny-Kantendetektion und einem Watershed-Algorithmus zur Detektion von Stützen wird in Wu et al. [2010] untersucht. Das Testszenario zeigt eine Baugrube mit wenigen Störobjekten, in der sich die Stützen klar vom Grund abheben und kein Verdeckungen vorliegen. Die Arbeit von Kim et al. [2013a] beruht ebenfalls auf der Erkennung von Bauteilelementen anhand von Bildverarbeitungsoperatoren, wobei die nötigen Parameter über eine kleine Zahl von Bildern des gleichen Szenarios eingestellt werden. Rebolj et al. [2008] präsentieren ein Konzept zur automatisierten Baufortschrittskontrolle. Der Abgleich erfolgt zwischen einem segmentierten Bild des as-built-Zustandes und einem aus dem Modell generierten synthetischen Bild.

Es finden sich auch Verfahren, die ebenfalls mit 2D-Bildinformationen arbeiten, aber nicht auf fest installierten Kameras beruhen. Eine Methode zur Detektion von Euroform Schalungsteilen wird von Lee et al. [2010] vorgeschlagen. Dazu wird ein Histogrammabgleich im HSV-Farbraum verwendet. Zur Bestimmung des Soll-Histogramms muss der Nutzer ein Referenzteil im Bild markieren. Neben Turkan et al. [2014] ist dies die einzige dem Autor bekannte Studie zur Erkennung von Schalungsteilen. Eine kombinierte Auswertung von Bildern und 3D-Punktwolke findet sich

bei Son & Kim [2010], die ein Stereo-Kamerasystem nutzen. Die Bauwerkskomponenten werden mit Bildverarbeitungsmethoden detektiert und die 3D-Positionen der Pixel genutzt, um einen Abgleich mit dem Modell durchzuführen. In diesem Ansatz werden Stahlstrukturen aufgrund eines Schwellwertverfahrens auf den Farbwert im HSV-Farbraum detektiert.

Systeme zur Augmented Reality und Visualisierung

Weitere Ansätze beschäftigen sich mit der Anreicherung von Baustellenbildern mit Prozessinformationen, also den Informationen, die entweder im BIM vorhanden sind oder durch die Ergebnisse der Baufortschrittskontrolle generiert werden. Dazu können, wie in Zollmann et al. [2014] gezeigt, der as-planned Zustand und die Informationen zum Baufortschritt mit Bildern des aktuellen Bauzustandes überlagert werden. Weitere Möglichkeiten zur Visualisierung und Interaktion bestehen in der 4D-Navigation durch die Bilder, der Markierung von verdeckten Objekten oder der Annotation von Objekten [Karsch et al., 2014]. Das in Bae et al. [2013] vorgestellte System erlaubt dem Nutzer eigene Bilder in einen bestehenden Block einzubinden, diese zu annotieren oder 3D-Polygone einzuzeichnen. Auch im Zuge des Projekts, in dem die vorliegende Arbeit entstand, wurde ein Tool (*progressTrack Viewer*) zur Visualisierung entwickelt [Braun et al., 2016a], Details dazu werden in Abschnitt 5.1 dargestellt.

Einsatz von Kameras auf Baustellen

Eine Übersichtsstudie, die sich Methoden und Technologien zum Einsatz von Kameras auf Baustellen widmet, findet sich bei Yang et al. [2015]. Für die Baufortschrittskontrolle werden in der Arbeit von Golparvar-Fard et al. [2011b,c, 2012] handgetragene Kameras zur Erfassung von as-built-Punktwolken verwendet. Wie für viele andere Forschungsfelder findet auch für die Bauüberwachung der Einsatz von UAVs große Beachtung. Irizarry & Costa [2016] führten dazu eine Studie durch und befragten Projektbeteiligte, wie UAV-Bilder Anwendung finden können. Dabei wurden sowohl die Logistik, die Überwachung des Baufortschritts, die Dokumentation, Sicherheitsaspekte und die Erkennung von logistischen Problemen genannt. Die Studie bezieht sich dabei nur auf die manuelle Auswertung der Bilder bzw. Videos durch Experten. Dies wird bereits als Gewinn für die Organisation auf der Baustelle angesehen. Auch für AR-Anwendung wird auf den Einsatz von UAVs gesetzt [Kluckner et al., 2011; Ham et al., 2016]. Die in Lin et al. [2015] und Han et al. [2015a] beschriebenen Konzepte zur Baufortschrittskontrolle sind für die Anwendung von UAVs motiviert, unterscheiden sich aber im Wesentlichen nicht von den Ansätzen zur handgetragenen Kamera in Golparvar-Fard et al. [2012]. Es wird die bessere Möglichkeit zur Automatisierung der Baufortschrittskontrolle durch den Einsatz von UAV herausgestellt. Dies kann z.B. durch die automatische Berechnung von Flugpfaden erreicht werden [Freimuth & König, 2015]. Nach Kenntnis des Autors gibt es keine Arbeiten, die sich mit dem Einsatz von Krankameras für die Aufnahme des as-built Zustandes auf Baustellen befassen. Die Komponenten für die Einrichtung von Netzwerk-Kameras für eine Echtzeit-Beobachtung der Baustelle, die so auch zur Verwendung als Krankamera geeignet wären, werden in Leung et al. [2008] beschrieben.

1.3.3 Beitrag dieser Arbeit

Diese Arbeit untersucht die photogrammetrische Erfassung von Baustellen während der Rohbauphase und den Abgleich mit einem Soll-Zustand zur Baufortschrittskontrolle. Dazu leistet sie die folgenden Beiträge:

- Vergleich verschiedener bildbasierter Erfassungsarten. Bisherige Arbeiten stützen sich, wie oben beschrieben, meist auf Laserscanning oder in geringerem Maße auf handgetragene Kameras. In dieser Arbeit wird außerdem die Erfassung mit Multikopter sowie Krankameras untersucht.

- Entwicklung und Anwendung eines Konzepts zur fortlaufenden Koregistrierung von Bildern auf einer Baustelle. Dafür werden aufeinanderfolgende Aufnahmen einer sich über den Bauzeitraum verändernden Szene zueinander und mit dem Modell koregistriert.
- Entwicklung eines zweistufigen Verfahrens zur Bestimmung des Zustandes eines Bauteils. Die erste Stufe ist die Überprüfung der Sichtbarkeit der Bauteile mit Hilfe eines Belegungsgitters. Die zweite Stufe zur Erkennung des Bauteilzustandes umfasst die Analyse der Punktwolke in der Umgebung des Bauteils in einem rasterbasierten Verfahren.
- Anwendung und Evaluierung der Verfahren über die gesamte Rohbauphase auf drei Baustellen auf Basis einer detaillierten Ground Truth. Im Gegensatz zu anderen Arbeiten im Bereich Baufortschrittskontrolle werden somit die in dieser Arbeit entwickelten Methoden an einer großen Zahl von Zuständen bei sich stark unterscheidendem Bauzustand getestet. Andere Untersuchungen stützen sich häufig nur auf einzelne Bauzustände, oft das Erdgeschoss oder Kellergeschoss, teilweise auch nur auf einen Ausschnitt der Baustelle.

In Bezug auf die genannten Beiträge ergeben sich folgende Forschungsfragen:

1. Wie kann eine photogrammetrische Erfassung die Dokumentation des Bauzustandes unterstützen, welche Aufnahmetechniken eignen sich für die Baufortschrittskontrolle in unterschiedlichen Szenarien und wie gut eignen sich die verschiedenen Erfassungsarten für die vorgeschlagenen Verfahren zur fortlaufenden Koregistrierung und zur Erkennung des Bauzustands?
2. Welche Rekonstruktionsgenauigkeiten und Abdeckungsraten als Anteil der rekonstruierten Bauteilflächen können erreicht werden?
3. Können Bilder von aufeinanderfolgenden Aufnahmen einer Baustelle bei sich veränderndem Szeneninhalt koregistriert werden und mit welcher Genauigkeit kann die Koregistrierung von Gebäudemodell und Bildern, bzw. den aus ihnen generierten Punktwolken, erfolgen?
4. Wie zuverlässig können gebaute und nicht gebaute Bauteile mit dem entwickelten Abgleichverfahren erkannt werden und kann zwischen den verschiedenen Zuständen beim Stahlbetonbau unterschieden werden?

1.4 Aufbau der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 werden grundlegende Techniken und Konzepte beschrieben. Zunächst wird das bereits zu Beginn vorgestellte Konzept BIM ausführlicher dargestellt. Außerdem werden die verwendeten Techniken zur Erstellung der Punktwolke aus Bildern gezeigt. Anhand eines SfM-Ansatzes wird das Vorgehen zur Orientierung der Bildaufnahmen erklärt. Anschließend wird das verwendete Multi-View-Stereo-Verfahren zur Generierung einer dichten Punktwolke beschrieben. Der letzte Abschnitt behandelt die anfallenden Koregistrierungsaufgaben.

Kapitel 3 befasst sich mit Konzepten zur photogrammetrischen Baufortschrittskontrolle, wobei der Fokus in diesem Kapitel auf der Erfassung der Baustelle liegt. Begonnen wird mit der Darstellung des allgemeinen Ablaufs der Baufortschrittskontrolle, wobei die in Abbildung 1.1 gezeigten Komponenten detaillierter dargestellt werden. Anschließend werden die verschiedenen Aufnahmestrategien vorgestellt: eine handgetragene Kamera, ein UAV sowie fest installierte Kameras am Kranausleger. Es folgt ein Vergleich anhand von acht Kategorien, die für jedes Verfahren beschrieben werden. Das Konzept zur fortlaufenden Koregistrierung zwischen Modell und Punktwolken unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte wird im letzten Abschnitt dargestellt.

Das Kapitel 4 beschreibt die Methodik zum Abgleich von Soll-Modell und Ist-Zustand. Die ersten beiden Abschnitte widmen sich der dafür notwendigen Aufbereitung der Punktwolken und

des Bauwerkmodells. Anschließend werden die möglichen Bauteilzustände und ihre Kombinationen definiert. Es folgt die Beschreibung der durchgeführten Sichtbarkeitsabfragen und der Bewertungskriterien, die zur Analyse der Punktwolken herangezogen werden. Das Vorgehen zur Ableitung von Bauteilzuständen aus den generierten Informationen wird im letzten Abschnitt dargestellt.

In Kapitel 5 werden die Testszenarien vorgestellt. Es werden drei Baustellen untersucht, bei denen jeweils eine der drei Erfassungsarten angewendet wurde. Für jede der drei Baustellen werden jeweils die Modelldaten, die Bilddaten und die ergänzenden Messdaten gezeigt. Im letzten Abschnitt dieses Kapitels werden die unterschiedlichen Varianten der Ground Truth beschrieben, die erstellt wurden, um verschiedene Aspekte zu bewerten

Die Ergebnisse aus den Experimenten werden in Kapitel 6 vorgestellt, aufgegliedert in drei Abschnitte. Die ersten beiden befassen sich mit der Genauigkeit der Punktwolke bzw. der Koregistrierung, im letzten werden die Ergebnisse des Soll-Ist-Abgleichs ausführlich dargestellt.

Die Diskussion und Bewertung der erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 7. Der erste Abschnitt widmet sich der geometrischen Genauigkeit, der zweite der Abgleichalgorithmik und der dritte den Erfassungskonzepten.

Die Arbeit schließt mit Zusammenfassung und Ausblick in Kapitel 8. Die Zusammenfassung greift die oben genannten Forschungsfragen auf. Im Ausblick werden Vorschläge zur Verbesserung als auch zur Erweiterung der hier durchgeführten Methoden und Versuche gemacht.

2 Grundlagen

Die vorliegende Arbeit behandelt Verfahren zur photogrammetrischen Erfassung von Baustellen durch Punktwolken und zum Abgleich von Bauwerkmodellen (BIM). Dabei spielen das Bauwerkmodell, die Generierung der Punktwolken und die Zuordnung der Daten eine grundlegende Rolle. Im ersten Abschnitt wird das Konzept des Building Information Modeling (BIM) behandelt. Im darauffolgenden Abschnitt werden die Grundlagen zur Berechnung von 3D-Punktwolken aus photogrammetrischen Aufnahmen beschrieben. Dabei wird auf Structure-from-Motion (SfM) und die dichte Rekonstruktion von Punktwolken mit einem Multi-View-Stereo-Verfahren eingegangen. Schließlich wird der ICP-Algorithmus dargestellt und begründet, weshalb in Kapitel 3 eine Alternative entwickelt wird.

2.1 Building Infomation Modeling (BIM)

Wie in der Einführung beschrieben, ist die Baufortschrittskontrolle auf Basis eines 4D-Modells ein Werkzeug, um Informationen über den Bauverlauf und den aktuellen Zustand der Baustelle für ein BIM möglichst automatisiert zur Verfügung zu stellen. Außerdem wurde auf die Bestrebungen zur Etablierung der Planung und Ausführung von Bauvorhaben mit BIM eingegangen (siehe Abschnitt 1.2). Im folgenden Abschnitt werden nun die wichtigsten Konzepte der BIM-Methodik beschrieben.

In dem vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur zusammen mit der *planen-bauen 4.0 - Gesellschaft zur Digitalisierung des Planens, Bauens und Betreibens mbH* herausgegebenen Stufenplan für die Einführung von BIM wird das Building Information Modeling folgendermaßen definiert [BMVI, 2015]: „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.“

BIM ist die Erschaffung eines, alle Planungen umfassenden, digitalen Gebäudemodells und die Nutzung der in diesem Modell hinterlegten Informationen über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes [Borrmann, 2013; Borrmann et al., 2015]. Mit einem BIM wird eine durchgängig digitale Planung umgesetzt. Die dauerhafte konsistente Speicherung über den Lebenszyklus hinweg soll insbesondere den Informationsverlust beim Übergang vom Bauen zum Betreiben verhindern. Abbildung 2.1 zeigt die Phasen im Leben eines Gebäudes, wobei die Länge der Pfeile die relative Dauer repräsentiert.

Bei der Erstellung eines BIM wird häufig von einer 5D-Planung gesprochen, denn neben der 3D-Geometrie sind auch der zeitliche Ablauf sowie die Kosten modelliert. Eine essentielle Eigenschaft eines BIM ist die objektbasierte Modellierung und die damit einhergehende Beschreibung der Objekte mit Attributen, wie z.B. dem Material. Wichtig ist festzuhalten, dass eine 3D-Modellierung noch kein BIM ist, eine 3D-Planung jedoch zwingend erforderlich für ein BIM ist. Eastman et al. [2011] definieren folgende Arten der Planung, die kein BIM sind, um zu verdeutlichen, wann man

nicht von BIM sprechen kann: (i) 3D-Planung ohne oder mit wenigen Objektattributen, (ii) Modelle, die die Änderung in der Geometrie oder in den Attributen von einmal definierten Objekten nicht unterstützen, (iii) Modelle, die aus vielen 2D-Plänen zusammengesetzt sind, und (iv) Modelle, bei denen es zu Inkonsistenzen kommt, da Auswirkungen von Änderungen nicht überall mitgeführt werden.

Ein BIM führt die Fachplanungen aller Planungsbeteiligten zusammen. Dies setzt voraus, dass Informationen in einem für alle interpretierbaren Format vorliegen. Damit soll der Zugriff auf die Daten für jeden möglich und z.B. nicht auf die Verwendung eines bestimmten Software-Produkts beschränkt sein. Bei der Zusammenführung von unterschiedlichen Planungen muss das Modell auf mögliche Konflikte hin überprüft und diese ggf. aufgelöst werden. Dies stellt wiederum zusammen mit der vollständigen 3D-Planung sicher, dass aus dem BIM abgeleitete 2D-Pläne zueinander widerspruchsfrei sind. Die gesamtheitliche, umfassende Modellierung erlaubt eine Vielzahl von Analysen und Simulationen, z.B. die Berechnung von Kosten, Simulation von Bauabläufen, Projektvisualisierungen oder Kollisionskontrollen.

Ein Ziel des Einsatzes von BIM ist es, den Hauptplanungsaufwand gegenüber dem konventionellen Planungsprozess vorzuziehen, da Planungsänderungen während der Entwurfs- und Ausführungsplanung deutlich kostengünstiger umsetzbar sind als während der Ausführung. Dies ist möglich, da das BIM bereits frühzeitig die Grundlage für Simulationen und Berechnungen zur Verfügung stellt [MacLeamy, 2004; Borrmann et al., 2015]. In einem BIM werden die Objekte parametrisch modelliert, d.h. gewünschte Änderungen am Gebäude können über die Änderung der Objekt-Parameter eingepflegt werden. Auch die Beziehungen zwischen Modellteilen sind in einem BIM modelliert, sodass auch die Auswirkungen von Änderungen auf andere Bereiche erkennbar sind.

Die Basis für die Nutzung eines BIM durch alle Beteiligten ist die Verwendung eines standardisierten und herstellerunabhängigen Austauschformats. Dieses wird durch die *Industry Foundation Classes* (IFC) zur Verfügung gestellt. Die IFC wird über die Organisation *buildingSMART* veröffentlicht und ist frei zugänglich. Mit der IFC können Gebäude mit ihren Objekten, deren Attributen und Beziehungen und deren Geometrie beschrieben werden. Die gemeinsame Repräsentation von Punktwolken in IFC ist momentan noch nicht gegeben, wird aber z.B. in Krijnen et al. [2015] vorgeschlagen.

Abbildung 2.1 zeigt die Phasen über die Lebensdauer eines Gebäudes und wie sich die Baufortschrittskontrolle darin einfügt. Die auf photogrammetrischen Daten basierende Baufortschritts-



Abbildung 2.1: Lebensyzklus eines Gebäudes. Das BIM deckt die gesamte Lebensdauer eines Gebäudes ab. Die Baufortschrittskontrolle liefert einen Beitrag zur Informationsgewinnung während der Bauphase.

kontrolle, wie sie in dieser Arbeit entwickelt wird, dient der Informationsgewinnung während der Bauphase. Die Bilder und die daraus abgeleitete 3D-Punktwolke der Baustelle dokumentieren den jeweiligen Bauzustand. Die Ergebnisse aus dem Soll-Ist-Abgleich mit den geplanten Zuständen im BIM können dazu beitragen, die Baulogistik mit dem Ist-Zustand abzustimmen, und somit helfen, den Zeitplan möglichst optimal anzupassen und die Kostenkontrolle zu verbessern. Auch kann eine 3D-Rekonstruktion aus der Punktwolke des momentanen Zustandes als Eingangsinformation für Simulationen genutzt werden. Durch die Speicherung der gewonnenen Daten trägt die photogrammetrische Baufortschrittskontrolle zur Datenbereitstellung über den Bauprozess für die spätere Nutzung in der Betriebsphase und bei Abbruch oder Renovierung bei.

2.2 Bildbasierte Erstellung von 3D-Punktwolken

Im folgenden Abschnitt wird die Erstellung einer dichten Punktwolke aus einem Satz von Bildern dargestellt. Der Begriff dichte Punktwolke soll veranschaulichen, dass hier für jedes Bildpixel ein 3D-Punkt bestimmt wird. Im Gegensatz dazu wird bei einer spärlichen Punktwolke nur ein 3D-Punkt für jedes korrespondierende Bildmerkmal berechnet. Solche Bildmerkmale werden mit Hilfe von Operatoren, die z.B. Ecken detektieren, gewonnen. Das Vorgehen zur Erstellung einer dichten Punktwolke setzt sich aus den folgenden Aufgaben zusammen:

- Bestimmung der Bildorientierungen entweder nur relativ zueinander oder bereits absolut in einem gegebenen Referenzrahmen
- Dichte Rekonstruktion der Szene durch ein Multi-View-Stereo-Verfahren

Das hier eingesetzte Verfahren nutzt Structure-from-Motion (SfM) für die Bildorientierung. Anschließend werden dichte Punktwolken durch ein Multi-View-Stereo-Verfahren auf Basis der Fusion von Disparitätsbildern berechnet. Die Kameraparameter können im Zuge der Bildorientierung geschätzt oder im Vorhinein mit Hilfe eines Kalibrierkörpers bestimmt werden. Auf diesen Punkt wird in Abschnitt 2.2.1 und 3.3 genauer eingegangen.

2.2.1 Bildorientierung - Structure-from-Motion

Im Allgemeinen bezeichnet Structure-from-Motion ein Verfahren, mit dem aus einer ungeordneten Bildmenge die äußere Orientierung aller Bilder sowie die 3D-Struktur der Szene als spärliche 3D-Punktwolke gewonnen wird. Zusätzlich können auch die Kameraparameter der inneren Orientierung I_k geschätzt werden. Der Maßstabsfaktor der Szene kann im Allgemeinen nicht bestimmt werden, dafür sind Passpunkte im Objektkoordinatensystem oder ein kalibriertes Stereokamerasystem notwendig. Das SfM-Verfahren umfasst die folgenden grundlegenden Schritte:

(i) Merkmalsdetektion

(ii) Bildmatching

(iii) Berechnung der relativen Orientierung durch Essentielle Matrix oder Fundamentalmatrix

(iv) Berechnung der 3D-Koordinaten der Merkmale

(v) Bündelblockausgleichung

Als SfM-System wird hier eine bestimmte Implementierung der oben genannten Schritte bezeichnet. Die Umsetzung eines SfM-Verfahrens wird in einer Vielzahl von Arbeiten behandelt, weshalb hier keine vollständige Übersicht gegeben wird. In Pollefeys et al. [2004] und Snavely et al. [2006] werden mögliche Vorgehensweisen beschrieben. Koutsoudis et al. [2015] geben eine

Übersicht über verfügbare Systeme aus Anwendersicht. Ein System, das auch schon das Multi-View-Stereo mit einschließt, wird in Fuhrmann et al. [2014] vorgestellt. Im Folgenden wird die generelle Vorgehensweise bei einem Structure-from-Motion-Verfahren am Beispiel des hier eingesetzten Systems Visual-SfM (VSfM) gezeigt [Wu, 2013]. Dieses System wird in ein Verfahren zur Registrierung von fortlaufenden Baustellenaufnahmen eingebettet, das in Abschnitt 3.3 beschrieben wird.

Merkmalsdetektion

Der erste Schritt in einem SfM-Verfahren ist die Detektion von Bildmerkmalen und die Berechnung ihrer Deskriptoren. Dies kann z.B. der SIFT-Operator (Scale Invariant Feature Transform) sein [Lowe, 2004]. Dieser setzt sich aus einem Detektor und einem Deskriptor zusammen. Mit dem Detektor werden Merkmale identifiziert, die in möglichst vielen Skalen und aus möglichst vielen Blickrichtungen erkennbar sind. Der Deskriptor beschreibt diese Merkmale möglichst invariant zu deren Eigenschaften, das sind Ort, Skala und Orientierung, im jeweiligen Bild. In Visual-SfM wird eine Implementierung auf der Grafikkarte (GPU) eingesetzt [Wu, 2007]. Weitere bekannte Detektoren (a) und Deskriptoren (b) sind z.B. Harris-Corner (a) [Harris & Stephens, 1988], Förstner-Punkte (a) [Förstner & Gülch, 1986], Brief-Features (b) [Calonder et al., 2010] oder SURF-Merkmale (a + b) [Bay et al., 2006]. Im Folgenden wird die Berechnung der SIFT-Merkmale nach Lowe [2004] beschrieben:

SIFT-Detektor: Zur Detektion von Merkmalen erfolgt eine Faltung des Bildes mit einem Gauss-Kernel mit unterschiedlichen Standardabweichungen. Durch die Bildung von Differenzen der im Skalenraum benachbarten Gauss-gefilterten Bilder (Difference of Gaussian = DoG) wird ein Laplace-Filter (Laplacian of Gaussian = LoG) approximiert. Dies wird für verschiedene sogenannte Oktaven durchgeführt, die jeweils eine heruntergesampelte Version des Bildes verwenden. So werden Bilder erzeugt, die jeweils einen bestimmten Skalenbereich abdecken. Als Merkmale werden die Pixel extrahiert, die ein Minimum bzw. Maximum zu ihren 26 Nachbarn bilden. Jedes Pixel hat 8 Nachbarn in der aktuellen Skala und jeweils 9 in den beiden angrenzenden Skalen. Um Merkmale entlang von Kanten zu eliminieren, wird mit Hilfe der Hesse-Matrix die Hauptkrümmung bestimmt. Diese weist einen hohen Wert quer über die Kante auf, aber einen kleinen entlang der Kante. Um Kantenpunkte zu eliminieren, müssen also Punkte verworfen werden, bei denen das Verhältnis zwischen den Hauptkrümmungen groß ist. Die Orientierung des Merkmals wird anhand eines Histogramms der Gradientenrichtungen in der Nachbarschaft des Merkmals bestimmt. Als Richtung werden der Histogrammeintrag mit dem höchsten Wert sowie alle weiteren mit mindestens 80% dieser Höhe behalten.

SIFT-Deskriptor: Für den Deskriptor werden die Gradientrichtungen und -stärken in der Nachbarschaft des Merkmalspunktes in der Skala berechnet, in der das Merkmal detektiert wurde, und in Orientierungshistogramme eingetragen. Um Rotationsvarianz herzustellen, werden die Werte anhand der Richtung des Merkmalspunktes ausgerichtet. Der finale Deskriptorvektor besteht dann aus einem Histogrammarray aus 4 mal 4 Histogrammen mit je 8 Einträgen. Dieser Vektor wird normiert, um eine Invarianz gegenüber Helligkeitsunterschieden herzustellen. Für die Zuordnung homologer Punkte wird die euklidische Distanz zwischen den Diskriptorvektoren berechnet. Im einfachsten Fall wird jedem Punkt der nächste Nachbar im Merkmalsraum zugeordnet.

Bildmatching

Nach der Merkmalsdetektion müssen Korrespondenzen zwischen den verfügbaren Bildern gesucht werden. Bei der Baustellenüberwachung handelt es sich um ein Szenario, das unter die Kategorie „lange Basislinie“ fällt. Szenarien mit „kurzer Basislinie“ sind im Gegensatz dazu z.B. Videosequenzen, bei denen Merkmale getrackt werden können. Im ersten Fall können vermeintliche Matches

überall im Bild vorhanden sein. Liegen Bilder in geordneten Sequenzen vor, kann das Bildmatching auch nur zwischen den aufeinanderfolgenden Bildpaaren erfolgen. Ist dies nicht der Fall, müssen Matches zwischen allen Kombinationen an Bildpaaren gesucht werden. Für alle Bildpaare wird dann versucht, die essentielle Matrix $\mathbf{E}$ bzw. die Fundamentalmatrix $\mathbf{F}$ zu bestimmen. Die essentielle Matrix, mit Freiheitsgrad 5, kann mit dem 5-Punkt-Algorithmus [Nister, 2004; Hartley & Zisserman, 2004] aus mindestens 5 Korrespondenzen berechnet werden. Zur Bestimmung der Fundamentalmatrix, mit Freiheitsgrad 7, werden mindestens 7 Korrespondenzen benötigt. Die Matrizen erlauben die Projektion eines 2D-Punkts von Bild 1 auf die Epipolarlinie in Bild 2.

Es gilt für die Fundamentalmatrix mit homogenen Koordinaten $\underline{\boldsymbol{x}}$:

$$\underline{\boldsymbol{x}}_2^\intercal \mathbf{F} \underline{\boldsymbol{x}}_1 = 0 \tag{2.1}$$

Es gilt für die essentielle Matrix mit normierten Bildkoordinaten, d.h. bei bekannter Kameramatrix $\mathbf{K}$ (siehe Formel 2.16):

$$\bar{\underline{\boldsymbol{x}}}_2^\intercal \mathbf{E} \bar{\underline{\boldsymbol{x}}}_1 = 0 \tag{2.2}$$

Für den Zusammenhang zwischen Fundamentalmatrix und essentieller Matrix gilt dann:

$$\mathbf{E} = \mathbf{K}_2^\intercal \mathbf{F} \mathbf{K}_1 \tag{2.3}$$

Sind die Fundamentalmatrix oder die essentielle Matrix bestimmt, kann daraus die Projektionsmatrix $\mathbf{P}$ (siehe Formel 2.6) durch Singulärwertzerlegung berechnet werden [Hartley & Zisserman, 2004; Ma et al., 2003].

3D-Rekonstruktion

Die Rekonstruktion der Szene und die Bestimmung der Kameraorientierungen starten mit der Wahl eines initialen Bildpaars, wobei die Lage eines der Bilder das vorläufige Koordinatensystem definiert. Das erste Bildpaar sollte eine große Anzahl von korrespondierenden Punkten (Matches) aufweisen, aber auch eine ausreichend große Basislinie besitzen, um verlässliche 3D-Koordinaten zu erhalten [Snavely et al., 2006]. Anschließend werden sequentiell weitere Bilder hinzugefügt, indem geeignete 2D-3D-Korrespondenzen zwischen dem Modell und den neu hinzugefügten Bildern gesucht werden, was als Perspective-n-Point-Problem bezeichnet wird [Gao et al., 2003; Lepetit et al., 2008; Urban et al., 2016]. Merkmale, die in mehr als einem Bildpaar vorkommen, werden hierbei durch die Sequenz getrackt.

Bündelblockausgleichung

Die zu schätzenden Parameter der Kameraorientierungen und der 3D-Koordinaten der Punkte werden durch eine Bündelblockausgleichung (BBA) optimiert. Dies geschieht fortlaufend, das heißt, dass der wachsende Bildblock immer wieder nach dem Hinzufügen einer oder mehrerer Bilder ausgeglichen wird. In der Regel wird jedoch nicht jedes Mal nach Hinzufügen eines einzelnen Bildes eine BBA über alle Bilder durchgeführt, da dieser Schritt sehr rechenintensiv ist und sich außerdem die Kameraorientierung und die 3D-Punkte während der Rekonstruktion stabilisieren [Wu, 2013]. Daher ist es ausreichend, die BBA jeweils nach dem Hinzufügen einer bestimmten Anzahl von Bildern oder der Vergrößerung des Gesamtmodells um ein bestimmtes Verhältnis anzuwenden. Dieses Vorgehen wird in Wu [2013] dadurch ergänzt, dass nur über die zuletzt hinzugefügten Bilder eine partielle BBA berechnet wird und Punkte mit großem Rückprojektionsfehler herausgefiltert werden.

Mit einer BBA werden die unbekannten Orientierungen der Kameras und Positionen aller 3D-Punkte geschätzt, indem die Verbesserungen auf die beobachteten Bildkoordinaten minimiert werden. Damit eine BBA konvergiert, sind hinreichend genaue Näherungswerte notwendig.

Die Abbildungsgeometrie einer Lochkamera mit zusätzlichen Verzeichnungskorrekturen Δx und Δy wird in der Photogrammetrie mit Hilfe der Kollinearitätsgleichungen beschrieben:

$$\begin{aligned} x &= x_0 - c_k \frac{r_{11}(X-X_0) + r_{21}(Y-Y_0) + r_{31}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta x = x' + \Delta x \\ y &= y_0 - c_k \frac{r_{12}(X-X_0) + r_{22}(Y-Y_0) + r_{32}(Z-Z_0)}{r_{13}(X-X_0) + r_{23}(Y-Y_0) + r_{33}(Z-Z_0)} + \Delta y = y' + \Delta y \end{aligned} \tag{2.4}$$

Die Formeln enthalten die Bildkoordinaten x und y, die Objektkoordinaten eines 3D-Punktes X, Y und Z sowie des Kamerazentrums X_0, Y_0 und Z_0, die Brennweite c_k, die Bildhauptpunktskoordinaten x_0 und y_0 sowie die Komponenten der Rotationsmatrix r_{ii}.

Diese Zusammenhänge können auch mit Hilfe von homogenen Bild- und Objektkoordinaten $\underline{\boldsymbol{x}}$ und $\underline{\boldsymbol{X}}$ in Epipolargeometrie mit Hilfe der Projektionsmatrix $\mathbf{P}$ und der Kameramatrix $\mathbf{K}$ dargestellt werden:

$$\underline{\boldsymbol{x}} = \mathbf{P}\underline{\boldsymbol{X}} \tag{2.5}$$

$$\mathbf{P} = \mathbf{K}\,[\mathbf{R}|\boldsymbol{t}] = \mathbf{K}\,[\mathbf{R}|-\mathbf{R}\boldsymbol{O}] \quad \text{mit} \quad \mathbf{R} = \mathbf{R}_{\mathbf{Obj}\rightarrow\mathbf{Kam}} \tag{2.6}$$

$\boldsymbol{O}$ ist der Vektor zum Kamerazentrum im Objektkoordinatensystem. Die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_{\mathbf{Kam}\rightarrow\mathbf{Obj}}$ für die Drehung vom Kamera- in das Objektsystem sei folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Kam}\rightarrow\mathbf{Obj}} = \mathbf{R}_\omega \cdot \mathbf{R}_\varphi \cdot \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} = \mathbf{R}^{\mathsf{T}}_{\mathbf{Obj}\rightarrow\mathbf{Kam}} \tag{2.7}$$

$$\mathbf{R}_{\mathbf{Kam}\rightarrow\mathbf{Obj}} = \begin{bmatrix} \cos\kappa\cos\varphi & -\cos\varphi\sin\kappa & \sin\varphi \\ \cos\omega\sin\kappa + \cos\kappa\sin\omega\sin\varphi & \cos\kappa\cos\omega - \sin\kappa\sin\omega\sin\varphi & -\cos\varphi\sin\omega \\ \sin\kappa\sin\omega - \cos\kappa\cos\omega\sin\varphi & \cos\kappa\sin\omega + \cos\omega\sin\kappa\sin\varphi & \cos\omega\cos\varphi \end{bmatrix} \tag{2.8}$$

Diese Rotationsmatrix wird aus den folgenden Rotationsmatrizen für Drehungen um die x-Achse mit dem Winkel ω, um die y-Achse mit dem Winkel φ und um die z-Achse mit dem Winkel κ berechnet:

$$\mathbf{R}_\omega = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega \\ 0 & \sin\omega & \cos\omega \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\varphi = \begin{bmatrix} \cos\varphi & 0 & \sin\varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_\kappa = \begin{bmatrix} \cos\kappa & -\sin\kappa & 0 \\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.9}$$

Die innere Orientierung einer Kamera I_k umfasst ein Korrektur- und Verzeichnungsmodell mit den folgenden Parametern [Luhmann, 2010]:

Radiale Verzeichnung mit den drei Parametern A_1, A_2 und A_3 sowie dem linearen Anteil R_0:

$$\Delta r'_{rad} = A_1 r'^3 + A_2 r'^5 + A_3 r'^7 + r(A_1 R_0^2 + A_2 R_0^4 + A_3 R_0^6) \tag{2.10}$$

mit

$$r' = \sqrt{x'^2 + y'^2} \qquad \Delta x_{rad} = x' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \qquad \Delta y_{rad} = y' \frac{\Delta r'_{rad}}{r'} \tag{2.11}$$

Radial-asymmetrisch und tangentiale Verzeichnung mit den zwei Parametern B_1 und B_2:

$$\Delta x_{tan} = B_1(r'^2 + 2x'^2) + 2B_2 x' y' \tag{2.12}$$

$$\Delta y_{tan} = B_2(r'^2 + 2y'^2) + 2B_1 x' y' \tag{2.13}$$

Affinität und Scherung mit den beiden Parametern C_1 und C_2:

$$\Delta x_{aff} = C_1 x' + C_2 y' \tag{2.14}$$

$$\Delta y_{aff} = 0 \tag{2.15}$$

Die Korrekturen werden an die auf den Bildhauptpunkt bezogenen Koordinaten einer idealen Lochkamera angebracht, woraus sich dann die gemessenen Koordinaten ergeben (siehe Kollinearitätsgleichungen 2.4). Die Parameter können im Vorhinein im Zuge einer Testfeldkalibrierung mit Hilfe eines Testfeldes kalibriert werden oder als Simultankalibrierung bei den eigentlichen Messaufnahmen mitgeschätzt werden (siehe auch Abschnitte 2.2.1 und 3.3). Anhand dieser Parameter kann ein verzeichnungsfreies Bild $\mathbf{I}^{\mathbf{v}}$ mit quadratischen Pixeln erstellt werden, welches wiederum die Grundlage für die Rektifizierung bildet.

Die Kameramatrix $\mathbf{K}$ beschreibt den Übergang vom Kamera- ins Bildkoordinatensystem und ist folgendermaßen definiert:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} c_k & sk & x_0 \\ 0 & c_k\,(1+m) & y_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2.16}$$

Radiale und tangentiale Verzeichnungsparameter sind hierbei nicht berücksichtigt. Diese müssen, wie oben beschrieben, als Korrekturfunktion an die Bildkoordinaten angebracht werden. Eine lineare/invertierbare Gleichung kann mit nur einem radialen Parameter aufgestellt werden [Pollefeys et al., 2004]. Zusätzlich entsprechen die Koeffizienten C_1 und C_2 dem Maßstabsunterschied m zwischen der Kammerkonstante in x- und y-Richtung sowie der Scherung sk.

2.2.2 Dichte Rekonstruktion mit Multi-View-Stereo

Für die Berechnung von dichten Punktwolken sind eine Vielzahl an Rekonstruktionsalgorithmen entwickelt worden. Nach Seitz et al. [2006] können diese Verfahren anhand folgender Vorgehensweisen kategorisiert werden: (i) Berechnung einer Kostenfunktion für ein 3D-Volumen, aus der die beste Oberfläche bestimmt wird, (ii) iterative Erstellung einer Oberfläche durch Minimierung einer Kostenfunktion, (iii) Extraktion und Matching von Merkmalen und anschließende Anpassung einer Oberfläche an die rekonstruierten Merkmale, (iv) Berechnung eines Satzes an Disparitätsbildern, die entweder durch Zwänge konsistent gehalten werden oder in der weiteren Prozessierung fusioniert werden.

Das hier verwendete Verfahren entspricht der letzten Kategorie (iv) und folgt im Wesentlichen der Vorgehensweise von Rothermel et al. [2012]. Der Ablauf wird weiter unten genauer in den drei Schritten (i) Erstellung verzeichnungsfreier Bilder und Rektifizierung, (ii) Semi-Global Matching (SGM) und (iii) Fusion von Disparitätsbildern dargestellt.

Weitere Verfahren zur Rekonstruktion von dichten Punktwolken sind in Furukawa & Ponce [2010] (PMVS - Patched based multi view stereo), Pierrot-Deseilligny & Paparoditis [2006] (aus der Software MicMac), Irschara et al. [2012], Goesele et al. [2007], Strecha et al. [2003] oder Tola et al. [2011] zu finden. Zahlreiche Arbeiten [Seitz et al., 2006; Kersten & Lindstaedt, 2012; Ahmadabadian et al., 2013; Remondino et al., 2014] widmen sich dem Vergleich dieser Verfahren, sowohl anhand von Testobjekten als auch an Bauwerken, häufig für die Rekonstruktion von historisch bedeutsamen Gebäuden, ohne dass dabei ein eindeutiger Favorit benannt werden kann.

Rektifizierung

Die Rektifizierung dient dazu, ein Bildpaar künstlich in eine Geometrie zu bringen, bei der korrespondierende Pixel in der gleichen Bildzeile liegen. Dafür müssen die Parameter der inneren Orientierung sowie der äußeren Orientierung, bis auf eine Basislinie, gleichgesetzt werden. Es müssen nur die Stereobildpaare rektifiziert werden, die im weiteren Ablauf für das dichte Stereomatching genutzt werden sollen. Das sind die Bilder, die zum einen eine Überlappung mit anderen Bildern und zum anderen eine genäherte Stereogeometrie aufweisen, d.h. genähert in die gleiche Richtung blicken. Die Selektion von Bildpaaren erfolgt nach den folgenden Kriterien:

- maximal erlaubte und minimal nötige Basislinienlänge b
- maximaler Winkel zwischen den Blickrichtungen der Kameras, was die Selektion von Bildpaaren verhindert, die in unterschiedliche Richtungen blicken
- maximale Abweichung von einem rechten Winkel zwischen Basislinie und der Blickrichtung der Kameras, was die Selektion von Bildpaaren verhindert, die hintereinander liegen
- maximaler Winkel zwischen Basislinie und x- oder y- Achse des Kamerakoordinatensystems, was die Selektion von Bildpaaren verhindert, die zu stark zueinander verkantet sind

Für jedes Bild werden anhand dieser Kriterien alle möglichen Matchbilder ausgewählt. Die Parameter können einfach anhand des jeweiligen Szenarios ausgewählt werden. Dabei wird zusätzlich ausgeschlossen, dass ein Bild zwei oder mehr Matchbilder erhält, die selbst wiederum einen Abstand haben, der unterhalb der minimalen Basislinie liegt. Werden solche Bilder identifiziert, wird das Bild ausgewählt, das in Summe die geringste Winkelabweichung in den drei aufgeführten Winkelkriterien hat.

Semi-Global Matching

Zur Berechnung von dichten Punktwolken sollen für die Bildpaare jeweils alle Pixelkorrespondenzen bestimmt werden. Für jedes korrespondierende Pixel kann dann die Disparität d, also der Abstand in Zeilenrichtung zwischen den beiden Pixeln in den rektifizierten Bildern, bestimmt werden. Werden die Disparitätswerte für jedes Pixel eines Bildes eingetragen, entsteht ein Disparitätsbild $\mathbf{D}$, auch Tiefenkarte genannt. Hirschmüller [2008] führte zur Berechnung der Tiefenkarte das Semi-Global Matching ein: Beim SGM wird eine globale Kostenfunktion (siehe Formel 2.17) minimiert, um die Disparitäten für das ganze Bild zu bestimmen. Die Optimierung wird durchgeführt, indem der Energieterm E minimiert wird. Diese Kostenfunktion umfasst im Datenterm die Kosten C für das pixelweise Matching sowie zwei Glattheits-Terme, die die Änderung der Disparität zwischen zwei benachbarten Pixeln bestrafen. Die Berechnung der pixelweisen Kosten kann z.B. mit dem Verfahren von Birchfield-Thomasi [Birchfield & Tomasi, 1999] oder auf Basis der Mutual Information [Viola & Wells III, 1997] erfolgen.

$$E(\mathbf{D}) = \sum_{\boldsymbol{p}} \left(C\left(\boldsymbol{p}, \mathbf{D}_{\boldsymbol{p}}\right) + \sum_{\boldsymbol{p}_N \in N_{\boldsymbol{p}}} P_1 T\left[|\mathbf{D}_{\boldsymbol{p}} - \mathbf{D}_{\boldsymbol{p}_N}| = 1\right] + \sum_{\boldsymbol{p}_N \in N_{\boldsymbol{p}}} P_2 T\left[|\mathbf{D}_{\boldsymbol{p}} - \mathbf{D}_{\boldsymbol{p}_N}| > 1\right] \right) \quad (2.17)$$

In Formel 2.17 aus Hirschmüller [2008] sind $\boldsymbol{p}_N$ die Pixel in der Nachbarschaft von $\boldsymbol{p}$ und $T[]$ ein Operator der 1 wird, wenn die Bedingung innerhalb der eckigen Klammern zutrifft, und in allen anderen Fällen 0. Der Strafterm P_1 wird addiert, wenn die Disparität der Nachbarpixel um 1 Pixel abweicht. Ändert sich die Disparität um mehr als 1 Pixel, wird der Strafterm P_2 addiert. Es gilt immer $P_2 > P_1$. Mit den Straftermen wird modelliert, dass sich i.d.R. die Disparitäten entlang von Oberflächen nur langsam ändern, aber auch Kanten möglich sind. Durch die zusätzlichen Kosten, die sich aus den Straftermen ergeben, können fehlerhafte Pixelkorrespondenzen, die sich aus geringen Kosten in C ergeben, bestraft werden. Die Kosten werde rekursiv entlang von g 1D-Pfaden durch das Bild aggregiert, da die globale Optimierung über das gesamte Bild NP-vollständig ist [Boykov et al., 2001; Hirschmüller, 2008]. Die Kosten für eine bestimmte Disparität in einem bestimmten Pixel berechnen sich aus der Summe der Kosten der Pfade mit minimalen Kosten, die in diesem Pixel mit der entsprechenden Disparität enden. In der Arbeit von Rothermel et al. [2012] werden die Kosten nicht für den gesamten möglichen Disparitätsbereich berechnet, sondern für einen eingeschränkten Bereich, der aus dem Matching in einer höheren Bildpyramidenebene bestimmt wurde. Diese tSGM genannte Adaption wird in dieser Arbeit zur Berechnung der Disparitätsbilder verwendet.

Fusion von Disparitätsbildern

Das hier beschriebene Vorgehen zur Fusion von Disparitätsbildern folgt im Wesentlichen der Arbeit von Rothermel et al. [2012]. Jedes verfügbare Bild der Szene wird einmal als Referenzbild $\mathbf{I_R}$ ausgewählt. Nach den vorhergehenden Schritten liegen für jedes rektifizierte Referenzbild $\mathbf{I^r_R}$ die Disparitätsbilder $\mathbf{D^r_{M,i}}$ der n ausgewählten Stereobildpaare vor. Die Werte aus allen Disparitätsbildern werden auf das entsprechende Pixel im verzeichnungsfreien Bild $\mathbf{I^v_R}$ rückprojiziert (siehe Abbildung 2.2). Das heißt, es werden für jedes der k Pixel $\boldsymbol{p_j} = \begin{bmatrix} x_{R,j} & y_{R,j} \end{bmatrix}^\top$ in $\mathbf{I^r_R}$ die Werte aus den Disparitätsbildern $\mathbf{D^r_{M,i}}$ interpoliert und abgegriffen.

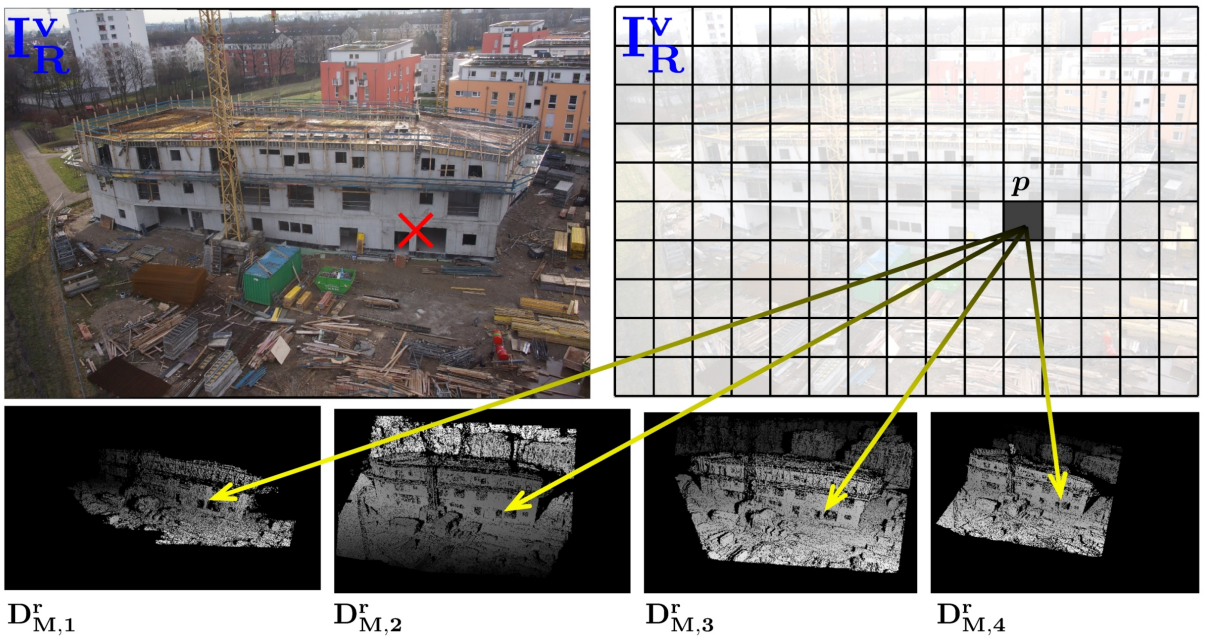


Abbildung 2.2: Fusion von Disparitätsbildern: Die Abbildung zeigt das Vorgehen bei der Fusion der Disparitätsbilder. Das Bild oben links zeigt das verzeichnungsfreie Referenzbild, die Gitterstruktur daneben zeigt vereinfacht die Pixel dieses Bildes. Für das hier gezeigte Referenzbild liegen $i = 4$ Matchbilder $\mathbf{I_{M,i}}$ vor, aus denen 4 Disparitätsbilder berechnet werden. Für jedes der Pixel $\boldsymbol{p}$ des Referenzbildes wird nun die Position in den Disparitätsbildern bestimmt und der extrahierte Wert eingetragen. Die Position des Beispielpixels ist im Bild oben links mit einem roten Kreuz markiert.

Sind mehr als ein Stereobildpaar vorhanden, liegt eine Überbestimmung für die Entfernung des 3D-Punkts vor, was die Fusion der Disparitätswerte notwendig macht. Für die Triangulierung und Einfärbung eines 3D-Punktes mit dem entsprechenden RGB-Wert wird von den Bildkoordinaten x_R und y_R im verzeichnungsfreien Referenzbild ausgegangen. Mit der bekannten Basislinie b kann die Länge des Bildstrahls D für jede Disparität-Basislinien-Kombination berechnet werden (siehe Formel 2.18). Um Ausreißer zu finden, wird die Tiefe für eine um jeweils σ_{disp} vergrößerte und verringerte Disparität berechnet (Formel 2.19). Damit erhält man für jedes Stereobildpaar ein Intervall $[D^{min}_{i,j}, D^{max}_{i,j}]$. Alle sich überlappenden Intervalle werden zu einem Cluster zusammengefügt. Das größte Cluster wird dann zur Berechnung der Entfernung D herangezogen und alle nicht zu diesem Cluster gehörenden Disparitäten werden verworfen. Der ausgeglichene Wert $\hat{D}$ berechnet sich in einer vermittelnden Ausgleichung nach dem funktionalen Modell aus Formel 2.20. Das Prinzip der Clusterbildung zur Fusionierung der Tiefenwerte ist in Abbildung 2.3 dargestellt.

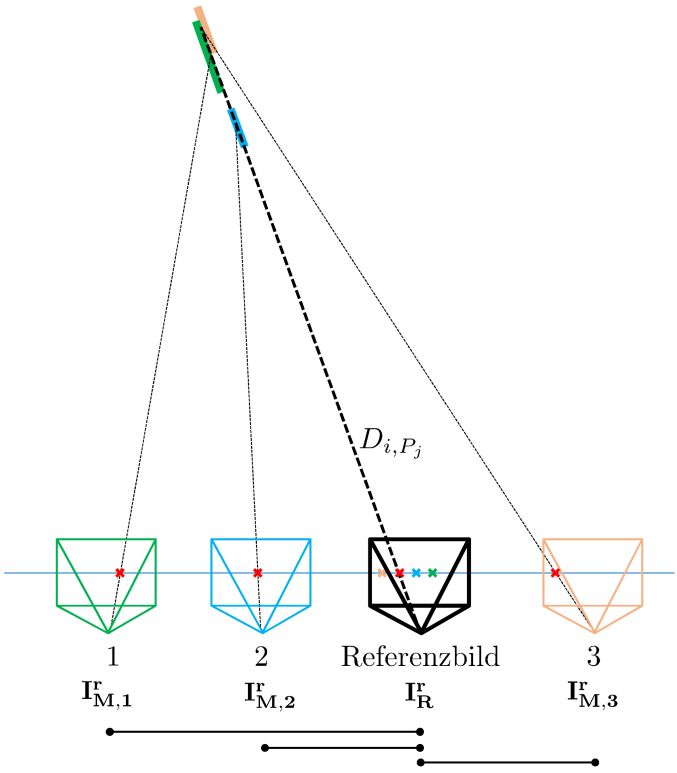


Abbildung 2.3: Clusterbildung der fusionierten Tiefenwerte: Für jedes Pixel im Referenzbild liegt für jedes Stereobildpaar ein Disparitätswert vor. Anhand von Formel 2.19 wird ein Bereich entlang des Strahls definiert, hier jeweils in grün, blau und orange für das jeweilige Bild markiert. Überlappende Bereiche werden zu einem Cluster zusammengefügt, nicht überlappende Bereiche als Ausreißer aussortiert. Die Kreuze im Referenzbild zeigen jeweils die Pixelposition des Punktes in den Matchbildern, der Abstand zur Pixelposition im Referenzbild ist die Disparität.

Die Länge des Bildstrahls, also die Entfernung des 3D-Punktes, berechnet sich folgendermaßen:

$$D_{i,j} = \frac{b_i \sqrt{(x_{R,j}^2 + y_{R,j}^2 + c_k^2)}}{d_{i,j}} \tag{2.18}$$

Die Grenzwerte für das Intervall eines Stereobildpaares werden folgendermaßen bestimmt:

$$D_{i,j}^{min} = \frac{b_i \sqrt{(x_{R,j}^2 + y_{R,j}^2 + c_k^2)}}{d_{i,j} + 0.5 \cdot \sigma_{disp}} \qquad D_{i,j}^{max} = \frac{b_i \sqrt{(x_{R,j}^2 + y_{R,j}^2 + c_k^2)}}{d_{i,j} - 0.5 \cdot \sigma_{disp}} \tag{2.19}$$

Die Beobachtungsgleichungen mit den Verbesserungen $\hat{v}_{d_{i,j}}$ auf die beobachteten Disparitäten lauten:

$$d_{i,j} + \hat{v}_{d_{i,j}} = b_i \cdot \frac{\sqrt{(x_{R,j}^2 + y_{R,j}^2 + c_k^2)}}{\hat{D}_j} \tag{2.20}$$

Die partiellen Ableitungen nach der Unbekannten D_j lauten dann:

$$\frac{\partial \mathring{d}_{i,j}}{\partial \mathring{D}_j} = -b_i \cdot \frac{\sqrt{(x_{R,j}^2 + y_{R,j}^2 + c_k^2)}}{\mathring{D}_j} \tag{2.21}$$

Die Koordinaten aller Punkte $\boldsymbol{X}$ werden dann aus der Kameraposition $\boldsymbol{O_R} = \begin{bmatrix} X_0 & Y_0 & Z_0 \end{bmatrix}^\intercal$ des Referenzbildes, dem Richtungseinheitsvektor $\boldsymbol{q_j}$ vom Kamerazentrum zum entsprechenden Pixel $\boldsymbol{p_j}$, sowie $\hat{D}_j$ berechnet (siehe Formel 2.22). Die Genauigkeit der Punktkoordinaten wird mithilfe des Fehlerfortpflanzungsgesetzes aus der geschätzten Standardabweichung $\sigma_{\hat{D}_j}$ sowie den Standardabweichungen der äußeren Orientierung (aus der BBA) des Referenzbildes bestimmt.

$$\boldsymbol{X_j} = \begin{bmatrix} X_j \\ Y_j \\ Z_j \end{bmatrix} = \mathbf{R_{Kam \rightarrow Obj}} \cdot (\boldsymbol{q_j} \cdot D_j) + \begin{bmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{bmatrix} \tag{2.22}$$

Die so erzeugten Punktwolken aller Referenzbilder können zu einer Punktwolke eines Aufnahmezeitpunkts vereint werden, wenn alle Bilder in einem gemeinsamen Koordinatensystem orientiert sind. Die Punktwolken werden vor der Verwendung für den Baufortschrittsabgleich noch gefiltert und aufbereitet, was in Abschnitt 4.1 beschrieben wird.

2.3 Koregistrierung

2.3.1 Grundlagen und Aufgaben

Die Koregistrierung zwischen Punktwolken aus Bildern ist verknüpft mit der Aufgabe, den Maßstab in eine SfM-Punktwolke einzubringen. In einem Baustellenszenario bieten sich dazu folgende Vorgehensweisen an:

- Verwendung des Modells: Hierzu müssen korrespondierende Punkte in Modell und Bild identifiziert und gemessen werden. Es können dann die Bildpositionen und -orientierungen bezüglich des Modells sowie der Maßstab bestimmt werden. In diesem Fall muss jedoch gesichert sein, dass die Bauteile auch wirklich an der Sollposition des Modells gebaut wurden. Dieses Vorgehen kann erst angewendet werden, wenn bereits ausreichend geeignete Bauteile gebaut sind.
- Vermessungstechnische Einmessung von Markern: Sehr genaues Verfahren, das aber verhältnismäßig aufwändig ist. Die Marker müssen in den Bildern, manuell oder automatisch, gemessen werden.
- Direkte Georeferenzierung der Kameras: Für die direkte Georeferenzierung werden entsprechende Navigationsinstrumente, also ein GNSS-Empfänger und eine inertiale Messeinheit (IMU = Inertial Measurement Unit) benötigt. Sie müssen in der Kamera oder dem Kameraträger, also z.B. ein UAV, integriert sein. Eine entsprechend hohe GNSS/IMU-Genauigkeit muss gewährleistet sein.
- Verwendung spezieller, kalibrierter Objekte, wie z.B. des von Rashidi et al. [2014] vorgeschlagenen farbcodierten Würfels mit bekannter Seitenlänge.

2.3.2 ICP in Baustellenszenarien

Der Iterative-Closest-Point-Algorithmus (ICP) [Besl & McKay, 1992] dient zur Koregistrierung von mehreren Punktwolken oder zwischen Punktwolken und geometrischen Modellen. Für letztere Variante kann entweder das Modell zu einer Punktwolke gesampelt werden, oder es wird anstelle des nächsten Punktes der kürzeste Abstand zu einer Modellfläche gesucht. Für den Erfolg des ICP-Algorithmus ist eine gut Vororientierung notwendig. Dies bedeutet, dass die zu registrierenden Punktwolken bereits genähert richtig zueinander gelagert sein müssen.

ICP ist ein iteratives Verfahren. Die folgenden Schritte werde so lange durchgeführt, bis der Fehler e^2 bei der Transformation der beiden Punktmengen einen bestimmten Schwellwert unterschreitet [Lichti & Skaloud, 2010; Besl & McKay, 1992]:

- Initialisierung der Transformationsparameter zwischen der Punktmenge $\mathcal{P}_1$ und der Punktmenge $\mathcal{P}_2$ als verschiebungs- und rotationsfrei.
- Zu jedem Punkt $\boldsymbol{X_{1,i}}$ in $\mathcal{P}_1$ wird der nächstliegende Punkt $\boldsymbol{X_{2,i}}$ in $\mathcal{P}_2$ bestimmt. Wird die Koregistrierung zu Modellflächen durchgeführt, wird der orthogonale Abstand von den Punkten in $\mathcal{P}_1$ zur nächstliegenden Objektfläche bestimmt.
- Minimierung von

$$e^2 = \sum_i ||\mathbf{R}\boldsymbol{X_{1,i}} - \boldsymbol{X_{2,i}}||^2 = \sum_i \left(\boldsymbol{X_{1,i}}^\intercal \boldsymbol{X_{1,i}} + \boldsymbol{X_{2,i}}^\intercal \boldsymbol{X_{2,i}} - \boldsymbol{X_{2,i}}^\intercal \mathbf{R} \boldsymbol{X_{1,i}}\right) \tag{2.23}$$

  indem der Term $\boldsymbol{X_{2,i}}^\intercal \mathbf{R} \boldsymbol{X_{1,i}}$ maximiert wird, wobei $\mathbf{R}$ die Rotationsmatrix für die Drehung der Punkte aus $\mathcal{P}_1$ zu $\mathcal{P}_2$ ist.
- Anbringen der Transformationsparameter an $\mathcal{P}_2$. Wenn e^2 kleiner dem Konvergenzkriterium ist, dann erfolgt der Abbruch, ansonsten eine weitere Iteration.

Im Folgenden wird dargelegt, weshalb in dieser Arbeit der gängige ICP-Ansatz weder für die Koregistrierung von aufeinanderfolgenden Punktwolken noch für die Koregistrierung von Modell und Punktwolke herangezogen wird, sondern der in Abschnitt 3.3 vorgestellte Ansatz.

Die fortlaufende Baufortschrittskontrolle soll ab Baubeginn durchgeführt werden. Zu diesem Zeitpunkt sind jedoch noch keine Bauteile vorhanden, mit denen eine Koregistrierung durchgeführt werden könnte. Somit müssen die Orientierungen der Bilder im Baustellenkoordinatensystem auf andere Weise bestimmt werden. Neben dieser praktischen Einschränkung gibt es auch eine konzeptionelle Einschränkung des ICP, die im Folgenden dargelegt wird. Bei der Verwendung von ICP geht man für die beiden zu registrierenden Punktwolken bzw. für die Punktwolke und die Modellebenen davon aus, dass in beiden Elementen die gleiche Szene dargestellt wird. Genau diese Annahme kann für Baustellenszenarien aus folgenden Gründen nicht gelten: Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass man das für die Koregistrierung benötigte korrekte Modell, sowohl in zeitlicher als auch in geometrischer Hinsicht, zur Verfügung hat. Zeitlich heißt, man müsste wissen, welche Objekte nun wirklich schon fertiggestellt sind, geometrisch heißt, man müsste wissen, ob die Objekte wirklich korrekt gebaut wurden. Geometrische Unterschiede können sich daraus ergeben, dass Objekte an anderen Stellen oder in anderer Form als geplant errichtet wurden. Außerdem können die Objekte zum Zeitpunkt der Erfassung einen Zustand aufweisen, der nahe am fertig errichteten Zustand, jedoch nicht modelliert ist, z.B. Schalung. Des Weiteren kann das Modell einen zu geringen Detailgrad aufweisen. Da der Modellzustand überprüft werden soll, sprechen die genannten Gründe dagegen das zu überprüfende Modell, sowohl in zeitlicher wie auch geometrischer Hinsicht, als Referenz für die Koregistrierung zu verwenden. Zwei Beispiele sollen das Problem verdeutlichen:

- Registrierung von Punktwolken unterschiedlicher Zeitschritte: Als vereinfachtes Beispiel wird angenommen, dass ein Stockwerk mit vier gebauten Wänden vorliegt, sowie die Schalung für die Deckenplatte. Es wird ein zweiter Zeitschritt angenommen, bei dem die Deckenplatte gebaut ist. Die Punktwolken der beiden Zustände unterscheiden sich nur darin, dass die Punkte der Deckenplatte um exakt die Dicke der Deckenplatte verschoben sind. Bei Anwendung von ICP würden nun die Schalungsoberfläche und die Oberfläche der betonierten Decke zur Deckung kommen.

- Registrierung Punktwolke und Modell: Auch hier ist die Annahme wieder ein Stockwerk mit vier gebauten Wänden und gebauter Deckenplatte. Weicht nun auf einer Seite die Lage der Oberfläche der Wand von der geplanten Lage im Modell ab, z.B. weil die Wand zu dick ist, so würde die Punktwolke fälschlicherweise in Richtung der Modellfläche verschoben. Dies gilt, wenn man davon ausgeht, dass die anderen drei Wandflächen sowie die Deckenfläche in Modell und Realität übereinstimmen.

Das folgende synthetische Beispiel (Abbildung 2.4 und 2.5 auf der folgenden Seite) für das zweite Szenario zeigt zwei mögliche Fehlerquellen: (i) Die Punktwolke kann sich an das Modell anpassen, sodass vorhandene Abweichungen nicht detektiert werden. (ii) Andersherum können Abweichungen entstehen, die eigentlich gar nicht existieren, hervorgerufen von Abweichungen an anderen Stellen.

Aus einem einfachen Modell wird eine Punktwolke $\mathcal{P}_2$ generiert, die auf das Modell transformiert werden soll. Zwei der Säulen werden dabei um 20 mm verschoben, um einen Unterschied zwischen der Planung und der Ausführung dieser Bauteile zu simulieren. Vor Anwendung des ICP ist unter den gegebenen Umständen die Vororientierung perfekt, da Modell und Punktwolke an den korrekten Positionen liegen (Abbildung 2.4). Nach Anwendung von ICP (unter Verwendung der Funktion in Cloud Compare [EDF R&D Telecom ParisTech, 2015]) ist dies nicht mehr der Fall, da die Abweichungen eine Verschiebung des Modells bewirken. Die Abweichungen der Punkte von den Modellflächen sind in Abbildung 2.5 dargestellt.

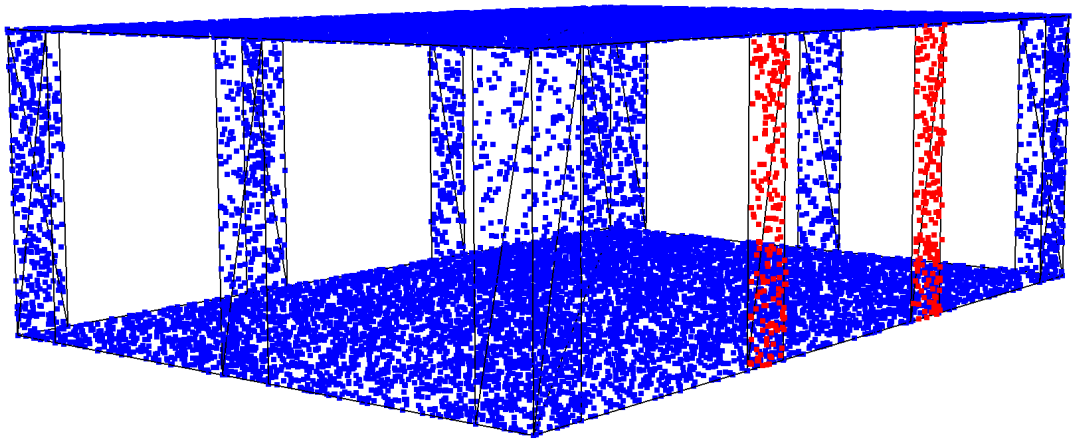


Abbildung 2.4: Abstand zwischen Punktwolke und Modellflächen vor ICP. Alle Flächen liegen genau auf den Modellflächen, außer die beiden Flächen mit den roten Punkten, bei denen as-planned und as-built nicht übereinstimmen. Distanz der blauen Punkte 0 mm, Distanz der roten Punkte 20 mm

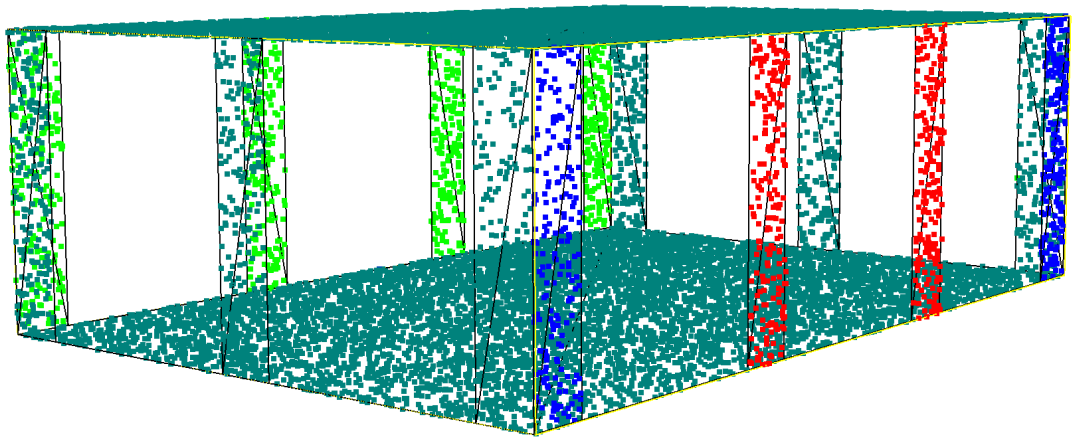


Abbildung 2.5: Abstand zwischen Punktwolke und Modellflächen nach ICP. Alle parallel zu den nicht übereinstimmenden Flächen liegenden Flächen weisen nun fälschlicherweise einen Abstand zwischen Modellflächen und der Punktwolke auf: Distanz der Punkte: blau -3.5 mm, grün 0 mm, hellgrün 3.5 mm, rot 16.5 mm.

3 Konzepte zur photogrammetrischen Baufortschrittskontrolle

3.1 Ablauf der Baufortschrittskontrolle

Der folgende Abschnitt beschreibt den grundlegenden Ablauf der Baufortschrittskontrolle. Abbildung 3.1 zeigt eine detaillierte Übersicht des bereits in Kapitel 1 angesprochenen Vorgehens (vergleiche Abbildung 1.1). Kernstück ist der zeitliche und geometrische Abgleich des Soll-Zustandes eines Gebäudes mit dem aktuellen Ist-Zustand zu einem Zeitpunkt T_i. Der Soll-Zustand (as-planned) wird durch das BIM definiert, in dem, wie in Abschnitt 2.1 beschrieben, das 4D-Gebäudemodell mit Zeitplan und Geometrie sowie weitere Informationen wie Objektattribute und Kosten hinterlegt sind. Der Ist-Zustand (as-built) wird durch eine mit dem Gebäudemodell koregistrierte 3D-Punktwolke repräsentiert. Die 3D-Punktwolke wird durch photogrammetrische Verfahren aus Bildaufnahmen der Baustelle gewonnen.

Verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung der Baustelle werden im folgenden Abschnitt 3.2 diskutiert. Aus den gewonnenen Bilddaten wird anhand der in Abschnitt 2.2 beschriebenen Pro-

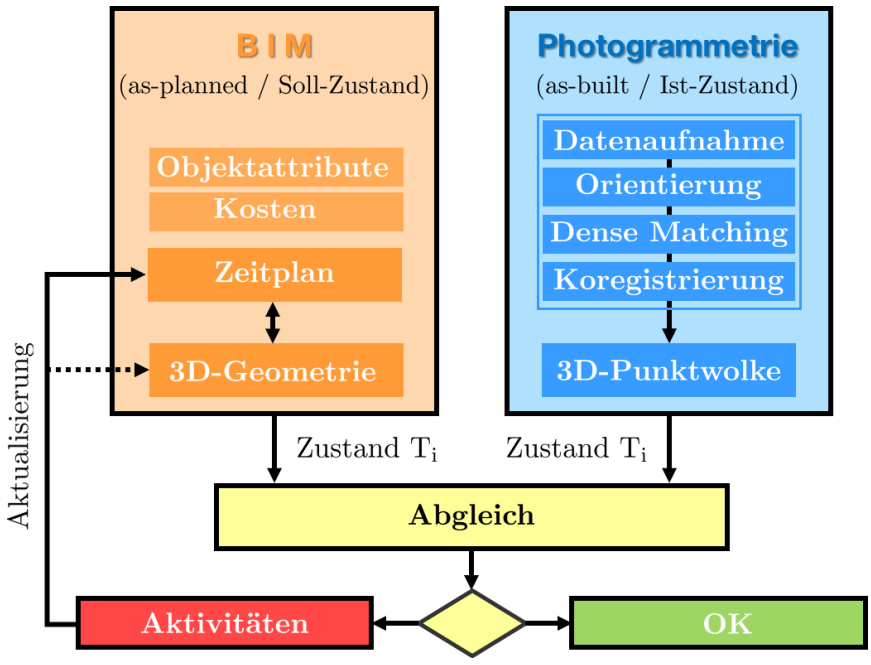


Abbildung 3.1: Ablaufdiagramm der Baufortschrittskontrolle

zessierungskette, die die Schritte Bildorientierung und Dense Matching umfasst, eine dichte 3D-Punktwolke generiert. Für den Abgleich muss die Punktwolke mit dem Gebäudemodell koregistriert werden. Das hierzu entwickelte Konzept wird in Abschnitt 3.3 dargestellt. Um einen zeitlichen Abgleich zu ermöglichen, muss der entsprechende Soll-Zustand aus dem BIM für den jeweiligen Erfassungszeitpunkt extrahiert werden. Zeitlicher Abgleich bedeutet, dass nicht nur kontrolliert wird, ob ein Bauteil zu einem bestimmten Zeitpunkt vorhanden oder nicht vorhanden ist, sondern auch, ob es entsprechend der Definition im Zeitplan rechtzeitig oder verspätet errichtet wurde. Neben der Aktualisierung des BIM anhand der as-built-Informationen ist die Erkennung der zeitlichen Abweichungen ein wesentliches Ziel der Baufortschrittskontrolle. Werden nämlich Abweichungen vom Zeitplan erkannt, sollen Aktivitäten ausgelöst werden, um die Planung aufgrund der neuen, vom ursprünglichen Plan abweichenden Gegebenheiten anzupassen und zu optimieren. Sofern es die Genauigkeit der Messungen zulässt, können erkannte Abweichungen in der Geometrie in das BIM zurückgeführt werden.

Ein Abgleich kann zu jedem Zeitpunkt einer Datenaufnahme T_i durchgeführt werden. Die Häufigkeit der Aufnahme des Ist-Zustandes entscheidet wie genau Aussagen über die zeitlichen Zustände getroffen werden können. In den Tabellen 3.1 und 3.2 ist dargestellt, welche Aussage über den Bauzeitpunkt eines Bauteils in Abhängigkeit von den Aufnahmezeitpunkten T_i, dem wahren Bauzeitpunkt und dem geplanten Bautermin t getroffen werden kann. Für den wahren Bauzeitpunkt können die Fälle (1) zu früh, (2) wie geplant und (3) zu spät unterschieden werden. Für den Termin der Beobachtung lassen sich vier Fälle unterscheiden. Fall I ist eine Beobachtung vor dem geplanten Bautermin, Fall II ist eine Beobachtung am Tag des geplanten Bautermins, was bei größeren Abständen der Aufnahmezeitpunkte nur für wenige Bauteile zutrifft. Fall III und IV sind Beobachtungen nach dem geplanten Bautermin. Fall III ist die nächstliegende Beobachtung nach dem Bautermin, Fall IV ist eine spätere Beobachtung, die auf jeden Fall hinter dem wahren Bauzeitpunkt liegt.

		Beobachtung T_i getätigt	I y Tage vor t		II an t	III z Tage nach t		IV $k+z$ Tage nach t
	Bauteil gebaut	II existiert	$m \geq y$	$m < y$		$n \leq z$	$n > z$	$z < n \leq k+z$
1	m Tage zu früh	ja / nein	(a)	-	(a)	-	-	-
		ja	-	→	(b)	-	-	-
		nein	-	→	(h) →	(c)	-	-
2	zum Termin t	ja	-	-	(b)	-	-	-
		nein	-	-	(h) →	(c)	-	-
3	n Tage zu spät	ja	-	-	(d)	(e)	(f)	(g)
		nein	-	-	(h) →	(c)	(f)	(g)

Tabelle 3.1: Zeitliche Zusammenhänge bei der Detektion von Bauteilen in Abhängigkeit von Bau- und Beobachtungszeitpunkt. Ein Bauteil soll zu Zeitpunkt t gebaut werden. Entweder wird das Bauteil pünktlich zum Zeitpunkt t fertiggestellt oder der wahre Bauzeitpunkt liegt m Tage vor oder n Tage hinter dem geplanten Fertigstellungstermin. Eine Beobachtung der Baustelle kann y Tage vor dem geplanten Fertigstellungstermin t, genau zu diesem Termin oder z Tage nach diesem Termin erfolgen. Da nicht sicher ist, dass ein zu spät gebautes Bauteil bei der ersten Beobachtung nach dem Sollfertigstellungstermin bereits fertiggestellt ist, wird in der Tabelle zusätzlich der Beobachtungstermin $k+z$ Tage später dargestellt. Diese Beobachtung k Tage nach dem Beobachtungstermin aus Spalte III ist die erste Beobachtung, nachdem das verspätete Bauteil fertiggestellt wurde. Es wird zusätzlich pro Bauzeitpunkt jeweils unterschieden, ob es eine Beobachtung am Sollfertigstellungstermin, also zum Termin aus Spalte II, gibt oder nicht. Erläuterungen zu den jeweils möglichen Aussagen (a) bis (h) zu den jeweiligen Zeitpunkten sind in Tabelle 3.2 zu finden.

	mögliche Aussagen	möglicher Zeitraum für Fertigstellung	wird zu
(a)	zu früh, min y Tage	$[t-(y+l);t-y[$	
(b)	pünktlich, max y Tage zu früh	$[t-y;t]$	
(c)	max z Tage zu spät, max y Tage zu früh	$[t-y;t+z]$	
(d)	zu spät	$]t;\infty[$	(e) oder (f)
(e)	zu spät, max z Tage	$]t;t+z]$	
(f)	zu spät, min z Tage	$]t+z;\infty[$	(g)
(g)	zu spät, min z Tage, max $z+k$ Tage	$]t+z;t+z+k]$	
(h)	zu Fertigstellungstermin t keine Aussage	$]t-y;\infty[$	(g) oder (c)

Tabelle 3.2: Mögliche Aussagen über den Bauzeitpunkt für die verschiedene Kombinationen aus Bau- und Beobachtungszeitpunkt, die in Tabelle 3.1 dargestellt sind. Die jeweilige Bedeutung von t, m, n, k, y, z ist den Erläuterungen zu dieser Tabelle zu entnehmen. Der Buchstabe l steht für den Zeitraum zwischen der Aufnahme I und dem davorliegenden Aufnahmezeitpunkt.

3.2 Aufnahmestrategien

Im Folgenden werden drei mögliche Erfassungsarten auf Baustellen vorgeschlagen und ihre Vor- und Nachteile anhand der Kriterien (a) Aufnahmegeometrie, (b) benötigtes Equipment, (c) Abdeckungsgrad, (d) Flexibilität, (e) Automatisierung, (f) Störung des Bauablaufs und (g) Sicherheit beurteilt. Der Vergleich der Erfassungsarten wurde bereits in Tuttas et al. [2016] veröffentlicht.

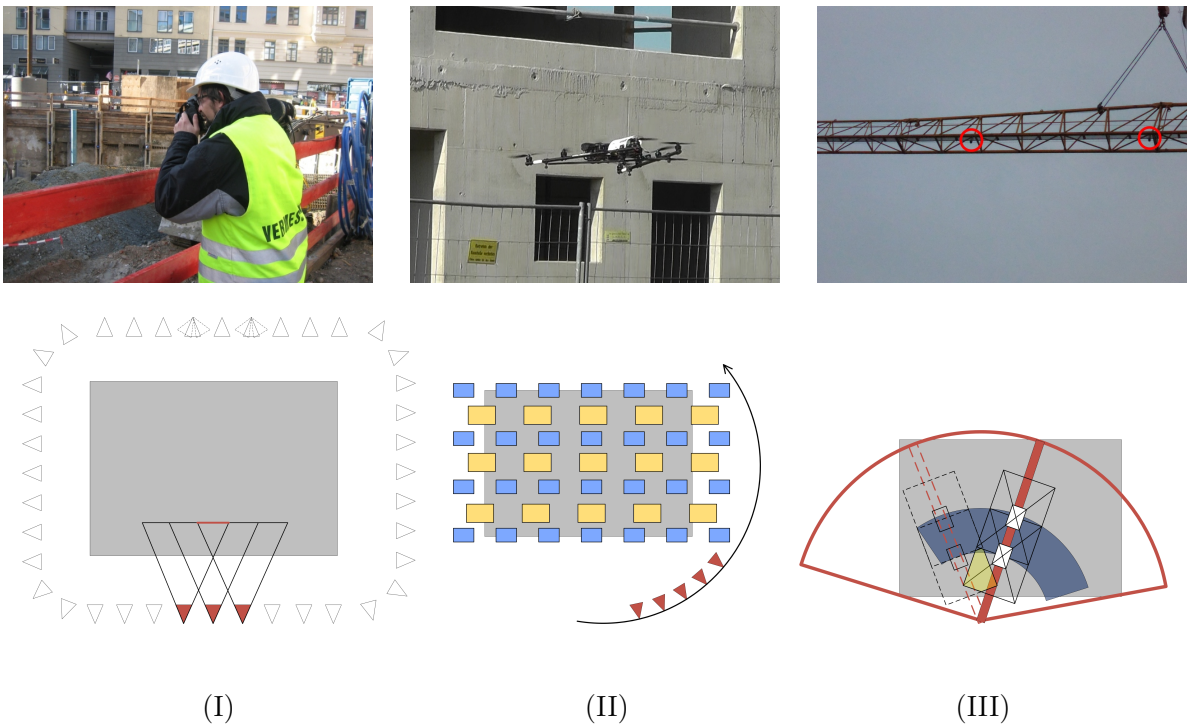
Es werden nur die im Zuge der vorliegenden Arbeit eingesetzten Erfassungsarten detailliert vorgestellt. Nicht näher betrachtet werden Videokameras oder fest installierte stationäre Kameras. Letztere müssten in großer Zahl montiert werden, um eine ausreichende Abdeckung für die Berechnung einer 3D-Punktwolke der ganzen Baustelle zu erhalten. Alternativ können Bilder stationärer Kameras über Bildverarbeitungsmethoden ausgewertet werden, indem eine Änderungsdetektion auf Basis verschiedener Bildverarbeitungsoperatoren durchgeführt wird. Beispiele hierfür aus anderen Arbeiten finden sich in Abschnitt 1.3.2.

Die folgende Grafik (Abbildung 3.2) zeigt die drei Erfassungsarten sowie eine schematische Darstellung der angestrebten Aufnahmegeometrie. In den folgenden Abschnitten ist diese jeweils unter Punkt a) beschrieben. Die oben genannten Kriterien zur Bewertung werden unter den Punkten b) bis h) diskutiert.

3.2.1 Handgetragene Kamera

a) Aufnahmegeometrie

Die grundlegende Aufnahmegeometrie sieht vor, dass die Baustelle rundherum mit Bildern aufgenommen wird (Abbildung 3.2 I). Für die Erstellung der dichten Punktwolke sind Bilder in genäherter Stereogeometrie aufzunehmen, wobei die Überlappung so groß sein sollte, dass jeder Objektpunkt in mindestens drei Bildern zu sehen ist. Zusätzlich sollten Bilder in Vor- und Rückwärtsblick aufgenommen werden, um den Bildorientierungsprozess zu unterstützen. Es muss gegebenenfalls auch darauf geachtet werden, dass zur Koregistrierung benötigte Bereiche mit Kontrollinformationen aufgenommen werden (siehe Abschnitt 3.3). Des Weiteren können Bilder genutzt werden, die zur Dokumentation der Baustelle von anderen Projektbeteiligten erstellt wurden. Es kann der Ansatz verfolgt werden, dass ausschließlich diese zuletzt genannten Bilder für die Rekonstruktion des as-built-Zustandes genutzt werden. Alternativ dazu können die Aufnahmen nach dem oben genannten Erfassungsschema ausreichend für die Dokumentationsaufgaben sein.



(I) (II) (III)

Abbildung 3.2: Erfassungsarten und ihre Aufnahmegeometrie in Draufsicht. Der graue Bereich markiert den Baustellenbereich. (I) handgetragene Kamera: Die Aufnahmestandpunkte mit den rot markierten Dreiecken sollen darauf hinweisen, dass jeder Punkt in mindestens 3 Bildern enthalten sein sollte. Die gestrichelten Dreiecke stehen für zusätzliche Schrägaufnahmen an den Standpunkten, die für eine bessere Verknüpfung der Bilder im Bildblock sorgen; (II) UAV-Erfassung: Die roten Dreiecke zeigen die Schrägaufnahmen, die blauen und gelben Rechtecke zeigen die Bilder in Nadirsicht aus zwei unterschiedlichen Höhenlagen. (III) Krankamera: Kamerakonfiguration für ein Stereosystem wie es im Experiment in dieser Arbeit (siehe Abschnitt 5.2.3) verwendet wird. Die Überlappung zwischen den Stereokameras ist blau markiert, die Überlappung von zwei Bildern der gleichen Kamera ist gelb markiert.

b) Equipment

Für diese Erfassung ist nur eine einzelne Kamera und keine weitere Ausrüstung notwendig.

c) Abdeckungsgrad

Die Aufnahmegeometrie muss dem jeweiligen Bauzustand angepasst werden. So wird während des Baus der Kellergeschosse entlang der Baugrube nach unten fotografiert. Mit dem Anwachsen des Gebäudes wird nach dem unter a) beschriebenen Schema im geeigneten Abstand zur Fassade fotografiert. Nach einer bestimmten Stockwerkszahl kann die Verwendung von Hochformatbildern, mit einer gleichzeitigen Verkürzung des Abstandes zwischen den Aufnahmestandorten, oder eine zweite Reihe Querformatbilder notwendig sein. Je stärker die Kamera nach oben geneigt werden muss, desto schlechter wird die Geometrie für die Rektifizierung und das Stereomatching. Sofern die Fassade nicht flach ist, sondern obere Stockwerke nach hinten versetzt sind, erhöht sich auch die Verschattung von Objekten durch den darunterliegenden Gebäudebereich. Zusätzlich können temporäre Objekte wie z.B. ein Gerüst die Abschattung vergrößern. Auch hierbei verstärkt sich der Effekt für nach oben blickende Aufnahmen. Weitere Objekte, die das zu beobachtende Gebäude, insbesondere das Erdgeschoss, verdecken können, sind Baustelleneinrichtungen (z.B. Baucontainer oder Bauzaun), gelagertes Material (z.B. Fertigbauteile) oder Fahrzeuge zur Anlieferung von Baumaterial (z.B. Betonmischer). Je nach Umgebung der Baustelle können Bilder von umliegenden

erhöhten Positionen, z.B. benachbarten Häusern, gemacht werden, um so die nicht einsehbaren Bereiche zu verringern. Auch die Plattformen im Kranmast können als Aufnahmeposition genutzt werden, wobei in diesem Fall die Basislinien zwischen zwei Aufnahmen auf die Mastbreite, ein typischer Wert ist 1 m, bzw. den Abstand zwischen zwei Plattformen, mit typischen Werten von 2.5 m, 5 m oder 10 m je nach verwendeten Mastsegmenten, beschränkt sind. Im ungünstigsten Fall kann diese Erfassungsmethode gar nicht eingesetzt werden, nämlich wenn das umgebende Gerüst vollständig eingehüllt ist.

d) Flexibilität

Bei Aufnahmen mit einer handgetragenen Kamera kann man auf die momentanen Gegebenheiten auf der Baustelle spontan reagieren und die Aufnahmepositionen sowie -reihenfolge anpassen.

e) Automatisierungsgrad

Die Aufnahme mit einer handgetragenen Kamera kann nicht automatisiert werden.

f) Störung des Bauablaufs

Die Erfassung kann von Bereichen erfolgen, die nicht zur eigentlichen Baustelle gehören. In diesem Fall wird der Bauablauf nicht beeinträchtigt. Zusätzlich kann es für die vollständige Erfassung auch notwendig sein, Aufnahmen von Bereichen mit Bautätigkeit aus zu machen. In diesem Fall liegt es im Verantwortungsbereich des Fotografen die Arbeitsgänge nicht zu behindern.

g) Sicherheitsaspekte

Es liegt im Verantwortungsbereich des Fotografen für seine Sicherheit zu sorgen und sich entsprechend umsichtig auf der Baustelle zu bewegen. Für andere Beteiligte sind bei dieser Erfassungsart keine sicherheitsrelevanten Aspekte zu beachten.

h) Erfassungsaufwand

Die Erfassungsdauer für die umlaufenden Bilder liegt bei ungestörten Aufnahmebedingungen bei etwa 5 min pro 25 m Fassadenlänge. Dies ist ein Erfahrungswert aus dem in dieser Arbeit durchgeführten Experiment. Eine deutliche Verlängerung der Erfassungszeit ergibt sich, wenn der Kran oder andere erhöhte Objekte aufgesucht werden müssen (siehe auch Tabelle 5.1).

3.2.2 Flugzeuggetragene Kamera

Im Kontext dieser Arbeit wird unter flugzeuggetragener Kamera die Verwendung eines UAV-Systems mit einem Gesamtgewicht unter 5 kg und unter Einhaltung der in Deutschland gültigen Regularien verstanden. Diese Regularien umfassen u.a. folgende Punkte [BMVI, 2016]:

- Maximale Flughöhe $h = 100\,\text{m}$
- Sichtkontakt zum Fluggerät muss immer gegeben sein
- Allgemeine Aufstiegsgenehmigung für Fluggeräte unter 5 kg notwendig
- Aufstieg nur bei Einwilligung des Grundstücksbesitzers
- Kein Überflug von Menschenansammlungen

a) Aufnahmegeometrie

Eine mögliche Aufnahmegeometrie für eine UAV-Erfassung ist in Abbildung 3.2 II zu sehen. Hierbei wird die Baustelle in Nadirsicht in zwei unterschiedlichen Flughöhen überflogen. Der Flug mit der größeren Flughöhe dient dabei der Stabilisierung des Bildblocks. Zusätzlich erfolgt eine Erfassung in Schrägsicht durch einen Flug rund um die Baustelle. Freimuth & König [2015] stellen

eine Methode zur automatischen Berechnung von Flugpfaden für UAV auf Baustellen auf Basis eines BIM vor. Hierbei wird ein gewisser Sicherheitsabstand zu allen Modellteilen definiert. Ein so geplanter Flugpfad kann jedoch trotzdem Hindernisse aufweisen. Das sind vor allem nicht im BIM modellierte oder bewegliche Objekte wie das Gerüst oder der Kran. Außerdem muss der aktuelle Bauzustand korrekt bekannt sein, um die Flugplanung jeweils anhand des tatsächlichen Zustands durchzuführen. Das hier vorgeschlagene Aufnahmekonzept umfasst deshalb einen automatischen Streifenflug, dessen Höhe dem aktuellen Bauzustand angepasst werden muss, sowie eine manuelle Steuerung bei der Aufnahme der Schrägsichtbilder.

b) Equipment

Für die Erfassung mit UAV sind ein Fluggerät, eine Kamera, eine Fernsteuerung und ein geschulter Pilot notwendig. Ein UAV mit geeigneter Ausstattung ist im Preisbereich von 1000 € bis 10000 € anzusiedeln. Weitere Kosten fallen für eine Flugplanungssoftware und Batterien an.

c) Abdeckungsgrad

Prinzipiell sind von einem UAV alle Bereiche einsehbar, die nicht im Inneren des Gebäudes liegen. Jedoch ergeben sich auch hier Einschränkungen. Das UAV muss einen gewissen Sicherheitsabstand zum Kran und zu umliegenden Gebäuden einhalten. Bei innerstädtischen Szenarien ist die Baustelle häufig von Straßen umgeben, deren Überflug nicht erlaubt ist, was die Erfassungsmethode deutlich einschränkt oder sogar unmöglich macht.

d) Flexibilität

Der hohen Flexibilität an Aufnahmepositionen, da prinzipiell jeder Punkt erreichbar ist, stehen verschiedene Einschränkungen gegenüber. Dem Einsatz des UAV sind zur Vermeidung von Störungen im Bauablauf und aufgrund von Sicherheitsaspekten Grenzen gesetzt. Details hierzu sind in den folgenden Punkten f) und g) beschrieben. Ab einer gewissen Gebäudehöhe muss der Pilot seinen Standort häufig wechseln, damit der Sichtkontakt zum UAV gewährleistet ist, was zusätzliche Starts und Landungen notwendig machen kann. Starker Wind oder Regen können den Einsatz des UAV unmöglich machen. Auch die begrenzte Flugdauer schränkt die Flexibilität eines UAV ein. Die maximale Flughöhe von 100 m bedeutet dagegen nur bei sehr hohen Bauwerken eine Einschränkung.

e) Automatisierungsgrad

Sieht man von Regulierungen ab, die einen überwachenden Piloten vorschreiben, ist ein autonomer Flug auf einem vorberechneten Pfad prinzipiell möglich. Dabei sollte das UAV über ein Kollisionsvermeidungssystem verfügen. Wie oben genannt, wird auch untersucht, ob ein Flugpfad nicht nur autonom abgeflogen, sondern auch automatisch berechnet werden kann [Freimuth & König, 2015]. Sofern ein vorgefertigter Pfad abgeflogen wird und ein Pilot zur Überwachung und für ein eventuelles Eingreifen notwendig ist, kann man von einem semi-automatischen Vorgang sprechen. Wird ein Flugpfad nach Einschätzung des Piloten geflogen, um auf den aktuellen Zustand der Baustelle spontan reagieren zu können, so ist die Aufnahme gänzlich manuell.

f) Störung des Bauablaufs

Viele der Bilddaten können durch Schrägaufnahmen beim Umfliegen der Baustelle erfasst werden. Weitere Bilder können in einer Flughöhe aufgenommen werden, die größer ist als die Höhe des größten Krans. In diesen Fällen kann die Erfassung unabhängig von der Bautätigkeit erfolgen. Sofern der Flugpfad Bereiche berührt, in denen Kranfahrten stattfinden, oder Bauarbeiter überflogen werden, muss die Flugplanung mit der Bauleitung abgesprochen und an die laufende Bautätigkeit angepasst werden. Während der Erfassung sollten aus Sicherheitsgründen keine Kranbewegungen stattfinden, um eine Kollision mit Zugseil und angehängten Lasten zu vermeiden. In Bauphasen,

in denen ständige Kranfahrten nötig sind, muss der Flug entsprechend in Baupausen terminiert oder die Kranfahrten kurzzeitig gestoppt werden, was zu einer Störung des Bauablaufs führt.

g) Sicherheitsaspekte

Die Erfassung mit UAV weist die größten Einschränkungen hinsichtlich der Sicherheitsaspekte auf. Es muss darauf geachtet werden, dass das Fluggerät weder für die Bauarbeiter noch für Personen im umliegenden Bereich eine Gefahr darstellt. Insbesondere ist darauf zu achten, dass eine Kollision mit dem Kranturm bzw. -ausleger oder eine Berührung mit dem Hubseil und etwaigen anhängenden Lasten ausgeschlossen wird. Bei der Flugplanung können die Bereiche von Kranturm und -ausleger unter Berücksichtigung der Positioniergenauigkeit des Fluggerätes ausgespart werden. Die Hakenflasche, der Haken am Ende des Zugseils zum Anhängen der Lasten, sollte während der Befliegung ganz nach oben gezogen sein. Um einen ausreichend großen Sicherheitsabstand zu gewährleisten, muss die Positioniergenauigkeit des UAV berücksichtigt werden, für die auch die Windverhältnisse zu beachten sind. Für Bilder zur reinen Dokumentation kann es ausreichen, Aufnahmen nur von Bereichen außerhalb der Bautätigkeit oder Kranfahrten zu machen. Zur Erstellung einer vollständigen 3D-Punktwolke ist aber meistens auch eine Befliegung innerhalb dieser Bereiche notwendig.

h) Erfassungsaufwand

Nach abgeschlossener Flugplanung und bei automatischem Abflug eines Flugplans entspricht der zeitliche Erfassungsaufwand der Flugdauer, die zum Abfliegen des Pfades benötigt wird. Zusätzlich ist ggf. Zeit für das Aufsuchen weiterer Startpositionen und für den Akkuwechsel einzuplanen. Neben dem eigentlichen Erfassungsaufwand ist auch der zeitliche Aufwand für die Flugplanung zu berücksichtigen. Dabei müssen die in den Punkten e), f) und g) genannten Besonderheiten bei Flügen auf Baustellen beachtet werden. Der Aufwand dafür ist umso größer, je größer und komplexer eine Baustelle ist. Des Weiteren muss die Flugplanung mit Anwachsen des Gebäudes sowie bei eventuellen Änderungen in der Baustelleneinrichtung angepasst oder neu erstellt werden.

3.2.3 Krangetragene Kamera

a) Aufnahmegeometrie

Die Einrichtung von Kränen auf einer Baustelle wird so geplant, dass jeder Punkt der Baustelle erreichbar ist, d.h. dass die Ausleger sämtliche Bereiche überstreichen. Dies bedeutet, dass mit mehreren senkrecht nach unten blickenden Kameras die gesamte Baustelle erfasst werden kann. Zusätzlich überstreicht der Kranausleger auch Bereiche, in denen keine Bautätigkeit stattfindet, um z.B. Baumaterial aufzunehmen. Diese Bereiche können genutzt werden, um Passpunkte anzubringen. Abbildung 3.2 III zeigt das Grundprinzip anhand eines einzelnen Stereobildpaars. Im Folgenden wird berechnet, wie viele Kameras benötigt werden, um eine komplette Abdeckung sowie eine ausreichenden Überlappung für eine 3D-Rekonstruktion zu ermöglichen.

Es wird zunächst von einer Kamera an der Auslegerspitze ausgegangen. Um mit dieser eine Längsüberlappung von q_L an der Bodenlinie der Auslegerspitze, markiert durch die gestrichelte Linie in Abbildung 3.3, zu erreichen, ist für eine Kamera mit Brennweite c_k und Sensorhöhe s_y das Winkelinkrement α nötig:

$$\alpha = asin\left((1 - q_L) \cdot \frac{s_y \cdot h}{c_k \cdot r_K}\right) \tag{3.1}$$

Die x-Achse des Kamerakoordinatensystems liegt dabei parallel zum Ausleger. Die Auslegerspitze beschreibt einen Kreis mit dem Radius r_K in einer Höhe h über dem Boden.

Im Beispiel in Abbildung 3.3 wird von Kameras mit einer Kammerkonstante $c_k = 3.7\,\text{mm}$ und einer Sensorhöhe $s_y = 2.9\,\text{mm}$ ausgegangen, da diese Konfiguration in den hier durchgeführten

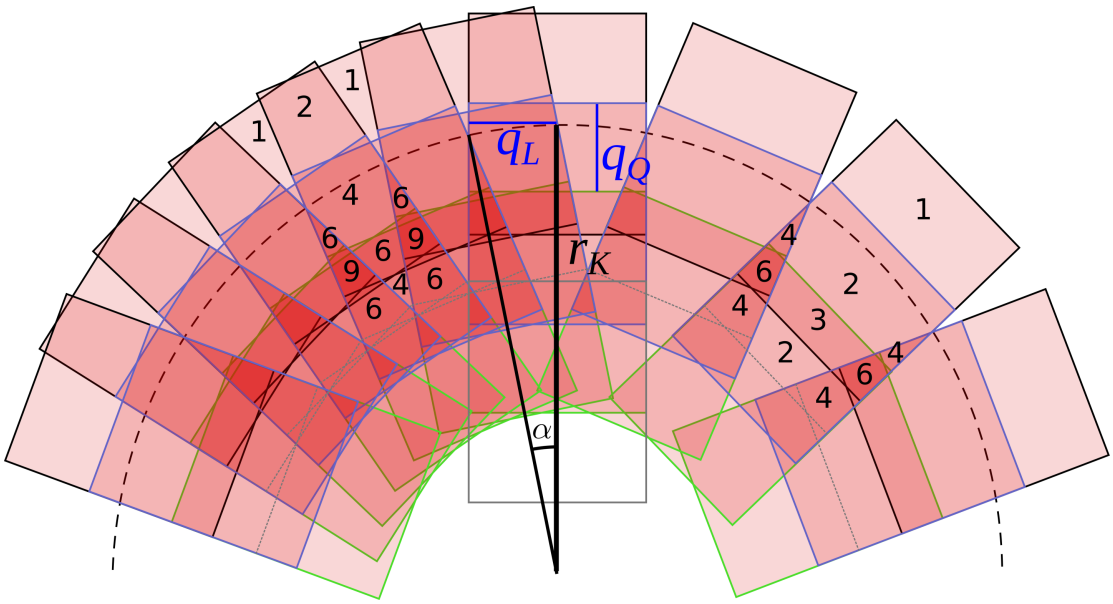


Abbildung 3.3: Darstellung des Abdeckungsbereichs von Krankameras. Die Abbildung zeigt den Überlappungsbereich von drei Kameras auf dem Ausleger mit einer Querüberlappung q_Q von 60 % entlang des Auslegers. Die Bodenspur der Kranspitze ist als gestrichelte Linie eingezeichnet. Das benötigte Winkelinkrement α, um entlang dieser Bodenspur eine bestimmte Längsüberlappung q_L zu erhalten, kann mit Gleichung 3.1 bestimmt werden. Die linke Seite zeigt eine Überlappung von 50 %, die rechte Seite eine lückenlose Abdeckung ohne Überlappung. Die Zahlen in den Feldern geben die Anzahl der sich überlagernden Bilder an.

Experimenten verwendet wurde (siehe Abschnitt 5.2.3). Die Länge des Auslegers r_K ist 42 m. Die Bodenabdeckung ist für eine Höhe $h = 21$ m bei einer Längsüberlappung von $q_L = 0.5$ auf der linken Seite der Grafik bzw. einer lückenlosen Abdeckung ohne Längsüberlappung auf der rechten Seite der Grafik dargestellt. Das resultierende Winkelinkrement für den Fall mit Längsüberlappung ist $\alpha = 11.3\,°$, was 32 Kamerapositionen entspricht. Für den Fall ohne Längsüberlappung liegt der Wert bei $\alpha = 23\,°$, was 16 Kamerapositionen entspricht. Bei einer Höhe von $h = 5$ m oberhalb der aktuellen Gebäudeoberseite steigen die Werte für die Anzahl der notwendigen Positionen auf 135 im ersten bzw. 67 im zweiten Fall an.

Um die gesamte Baustelle abzudecken, müssen mehrere Kameras entlang des Auslegers angebracht werden. Mit dem Anwachsen des Gebäudes steigt die notwendige Anzahl von Kameras. Abbildung 3.4 zeigt ein Schema zur benötigten Anzahl von Kameras bei unterschiedlichen Gebäudehöhen.

b) Equipment

Die notwendigen Komponenten für die Installation von Krankameras werden anhand der in dieser Arbeit verwendeten Kameras beschrieben. Die Krankamera setzt sich aus einem wasserdichten Gehäuse, einem Einplatinencomputer zur Ansteuerung der Kamera und zur Zwischenspeicherung der Bilddaten sowie der eigentlichen Kamera zusammen. Eine zusätzliche Mobilfunkeinheit zur drahtlosen Datenübertragung ist nicht zwangsweise nötig, erleichtert jedoch den Datenzugang. Die Bilder können so direkt von der Krankamera auf einen Server geladen und über das Internet abgerufen werden. Zur Stromversorgung wird ein Stromkabel zum Kranmittelpunkt gelegt. Zusätzlich wird ein Netzwerkkabel benötigt, um die Kamera anzusteuern und gegebenenfalls die Daten zu übertragen, wenn dies nicht drahtlos geschehen kann.

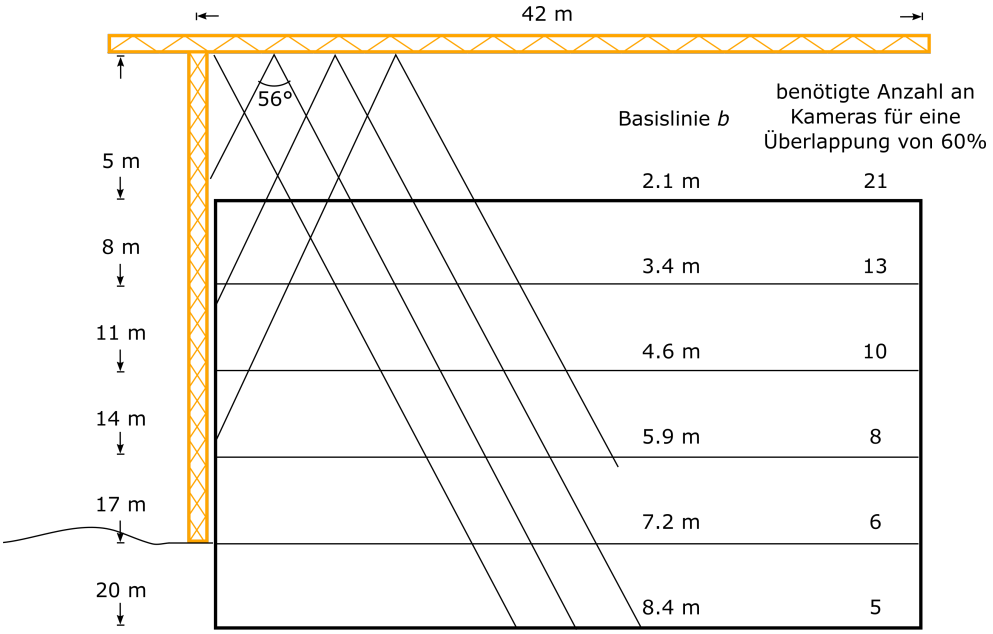


Abbildung 3.4: Seitenansicht der Aufnahmegeometrie von Krankameras: Schematische Darstellung für die Abdeckung verschiedener Gebäudehöhen durch Krankameras. Die für eine Überlappung q_Q von 60 % notwendige Anzahl an Kameras sowie der daraus resultierende Abstand entlang der Auslegerachse sind für verschiedene Gebäudehöhen in der Zeichnung angegeben.

c) Abdeckungsgrad

Um die oben beschriebene Abdeckung zur Erfassung der Baustelle zu erhalten, muss eine Kranbewegung erfolgen. Dies kann in einer geplanten Bewegung erfolgen, bei der der Kran eine komplette Umdrehung durchführt und jeweils in einem bestimmten Winkelinkrement für die Bilderfassung anhält. Ein anderes Aufnahmemodell sieht vor, dass die Kameras in einer bestimmten Taktrate aufnehmen und die Abdeckung aufgrund der durch die Bautätigkeit anfallenden Kranbewegungen erreicht wird. Hierbei kann jedoch eine komplette Abdeckung nicht garantiert werden. Außerdem werden in diesem Fall bei Standphasen des Krans Bilder mit identischem Bildausschnitt aufgenommen, die anschließend wieder aussortiert werden müssen.

Es ist darauf zu achten, dass sich die Laufkatze bei der Bildaufnahme nicht unterhalb der Kamera befindet. Die Laufkatze dient der Positionsveränderung des Hubseils, bewegt sich auf der Unterseite des Auslegers und kann so in den Sichtbereich der Kameras gelangen.

d) Flexibilität

Dieser Ansatz weist aufgrund der festgelegten Position und des festgelegten Bewegungsbereichs der Kräne die geringste Flexibilität auf. Aufgrund der starren Befestigung und der schweren Erreichbarkeit der Kameras am Ausleger kann nur mit großem Aufwand etwas an der Kamerakonfiguration geändert werden.

e) Automatisierungsgrad

Die Aufnahmen mit einer Krankamera können komplett automatisiert durchgeführt werden. Dafür muss im Steuercomputer ein entsprechendes Programm ablaufen, das die Aufnahmen auslöst.

f) Störung des Bauablaufs

Wird die Abdeckung der Baustelle mit Bildern durch die Kranbewegung aufgrund der Bautätigkeit hergestellt, ist der Bauablauf in keiner Weise gestört. Wird eine vorgegebene Kranfahrt

zur Erfassung benötigt, so ist der Kran für die Zeit einer Umdrehung nicht für die Bautätigkeiten verfügbar.

g) Sicherheitsaspekte

Sofern Kameras und Zubehör sturmsicher am Kran befestigt sind, gibt es keinerlei sicherheitsrelevante Aspekte zu beachten.

h) Erfassungsaufwand

Wird die Kamera am Kran autonom betrieben, also mit Auslösung durch den Steuercomputer, fällt für die eigentliche Erfassung, solange keine Fehler auftreten, kein zeitlicher Aufwand an. Im Gegensatz zu den anderen Aufnahmearten ist hier jedoch der Installationsaufwand anzusetzen. Bei einer Fehlfunktion der Kamera muss diese zur Reparatur vom Ausleger geholt und wieder montiert werden.

3.2.4 Vergleich

Die folgende Tabelle 3.3 gibt eine Übersicht über die vorgestellten Erfassungsarten. Für jedes der oben beschriebenen Kriterien wird eine relative Bewertung der drei Möglichkeiten vorgenommen. Die Tabelle zeigt, dass keine Erfassungsart eindeutig präferiert werden kann. Anhand der örtlichen Gegebenheiten der jeweiligen Baustelle muss entschieden werden, welche Art der Erfassung die beste ist.

Erfassungsart a)	Equipment b)	Abdeckung c)	Flexibilität d)	Automatisierung e)	Störung f)	Sicherheit g)	Aufwand h)
handgetragen	+	-	+	-	+	o	-
UAV	o	+	o	o	-	-	o
Krankamera	-	o	-	+	o	+	+

Tabelle 3.3: Überblick über die Erfassungsarten und relative Bewertung (+, o, -), welche Erfassungsart den anderen bei Betrachtung eines bestimmten Kriteriums vorzuziehen ist.

3.3 Fortlaufende Koregistrierung

Die fortlaufende Koregistrierung für die Baufortschrittskontrolle umfasst sowohl die Aufgabe der

- Koregistrierung der Bilder bzw. der aus ihnen rekonstruierten Punktwolke mit dem BIM, als auch die
- Koregistrierung von Bildern bzw. Punktwolken aus aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkten

Dafür muss eine einheitliche Koordinatenreferenz auf der Baustelle definiert werden, die als Baustellenkoordinatensystem (BKS) bezeichnet wird. Zur Realisierung des Systems werden photogrammetrische Marker auf der Baustelle installiert oder in den Bildern identifizierbare natürliche Merkmale ausgewählt und diese mit tachymetrischer Vermessung sowie ggf. mit Nivellement zueinander eingemessen. Außerdem muss die Transformation zwischen dem Koordinatensystem der Vermessungspunkte und den Planungskoordinaten vorliegen bzw. bestimmt werden. Gegebenenfalls wird als weitere Transformation die Umrechnung von geographischen Koordinaten in lokale Koordinaten benötigt, wenn GNSS-Empfänger eingesetzt werden.

Im Folgenden wird eine Methode zur fortlaufenden Koregistrierung der Bilder untereinander und zum Modell vorgeschlagen, die bereits in Tuttas et al. [2017] veröffentlicht wurde. Dabei soll der manuelle Messaufwand möglichst gering gehalten werden, indem photogrammetrische Marker einmalig tachymetrisch eingemessen und nur in einem einzigen Zeitschritt in den Bildern gemessen werden müssen. Der Ansatz vermeidet explizit die Anwendung von ICP, da die Annahmen, die diesem Algorithmus zugrunde liegen, in einem Baustellenszenario, wie in Abschnitt 2.3.2 gezeigt wird, unter Umständen nicht zutreffen.

Das Grundprinzip besteht darin, Bilder von nachfolgenden Aufnahmezeitpunkten anhand der vorhergehenden Bilder zu registrieren. Auch in Karsch et al. [2014]; Han & Golparvar-Fard [2015b] wird ein solches Vorgehen vorgeschlagen. In den beiden genannten Arbeiten wird ein Referenzbild ausgewählt, das mit Hilfe von manuell gemessenen Verknüpfungspunkten im Modell mit diesem koregistriert wird. Im Gegensatz dazu werden hier Passpunkte zum Zeitpunkt der ersten Baustellenaufnahme gemessen und damit vermieden, dass das Gebäudemodell für die Registrierung verwendet wird. Die Gründe dafür sind dieselben, die auch gegen die Verwendung des ICP-Verfahrens sprechen, also das Fehlen von Bauteilen am Baubeginn und die nicht vorhandene Kenntnis über den exakten Modellzustand. Es wird nämlich erst im nach der Koregistrierung durchgeführten Soll-Ist-Abgleich der aktuelle Zustand ermittelt. Während in Karsch et al. [2014] die Bewertung der Genauigkeit der Koregistrierung anhand der Kamerapositionen durchgeführt wird, werden hier die Registrierungsfehler zwischen Punktwolke und Modell analysiert.

Neben der Erfassungsart spielen auch Lage und Umgebung der Baustelle für die Koregistrierung eine Rolle. Im Folgenden wird zwischen einem innerstädtischen Szenario und einem Szenario mit freier Umgebung unterschieden. Beide Szenarien werden wiederum nach den oben genannten Erfassungsarten unterteilt. Daraus ergeben sich die folgenden Möglichkeiten:

a) innerstädtisch - terrestrisch (handgetragen) → Abschnitt 5.2.1

b) innerstädtisch - Vogelperspektive: (UAV) oder Kran → Abschnitt 5.2.3

c) freie Umgebung - terrestrisch (handgetragen)

d) freie Umgebung - Vogelperspektive: UAV oder (Kran) → Abschnitt 5.2.2

Die Szenarien sind schematisch in Abbildung 3.5 gezeigt. Es können natürlich auch Mischformen auftreten, z.B. die Kombination von terrestrischen Aufnahmen mit Aufnahmen aus der Luft oder eine nur teilweise von Gebäuden umgebene Baustelle.

Ein wichtiges Unterscheidungsmerkmal der hier definierten Szenarien ist die Passpunktkonfiguration. Die Nutzung der Passpunkte wird im folgenden Abschnitt erläutert. Bei terrestrischer Aufnahme ist die Hauptblickrichtung horizontal. Aus diesem Grund sind die Passpunkte vorzugsweise an vertikalen Strukturen anzubringen. Bei einer Erfassung von oben (Kran oder UAV) sind Nadiraufnahmen vorhanden, so dass hier die Passpunkte am Boden angebracht werden können. Die schwierigste Konfiguration in Hinblick auf das Anbringen von Passpunkten ist in Szenario (c) zu sehen. Hier müssen entweder temporäre Objekte als Passpunktträger genutzt werden oder die Aufnahmegeometrie muss so angepasst werden, dass auch Passpunkte am Boden in den Bildblock integriert werden können.

Zu den in Abschnitt 3.2.1 bis 3.2.3 gezeigten Erfassungsarten muss je nach Szenario Folgendes beachtet werden, um Passpunkte und unveränderte Szenenbereiche zu erfassen: Bei Szenario (a) ist darauf zu achten, dass die umgebenden, sich nicht verändernden Gebäude immer mit erfasst werden. Bei Szenario (b) sind die umgebenden Straßenbereiche mit aufzunehmen. Bei Szenario (d) ist ein größerer Bereich zu erfassen als der, in dem die eigentliche Bautätigkeit stattfindet. Dabei sollte darauf geachtet werden, nicht ausschließlich Bereiche mit Vegetation auszuwählen. Dort sind

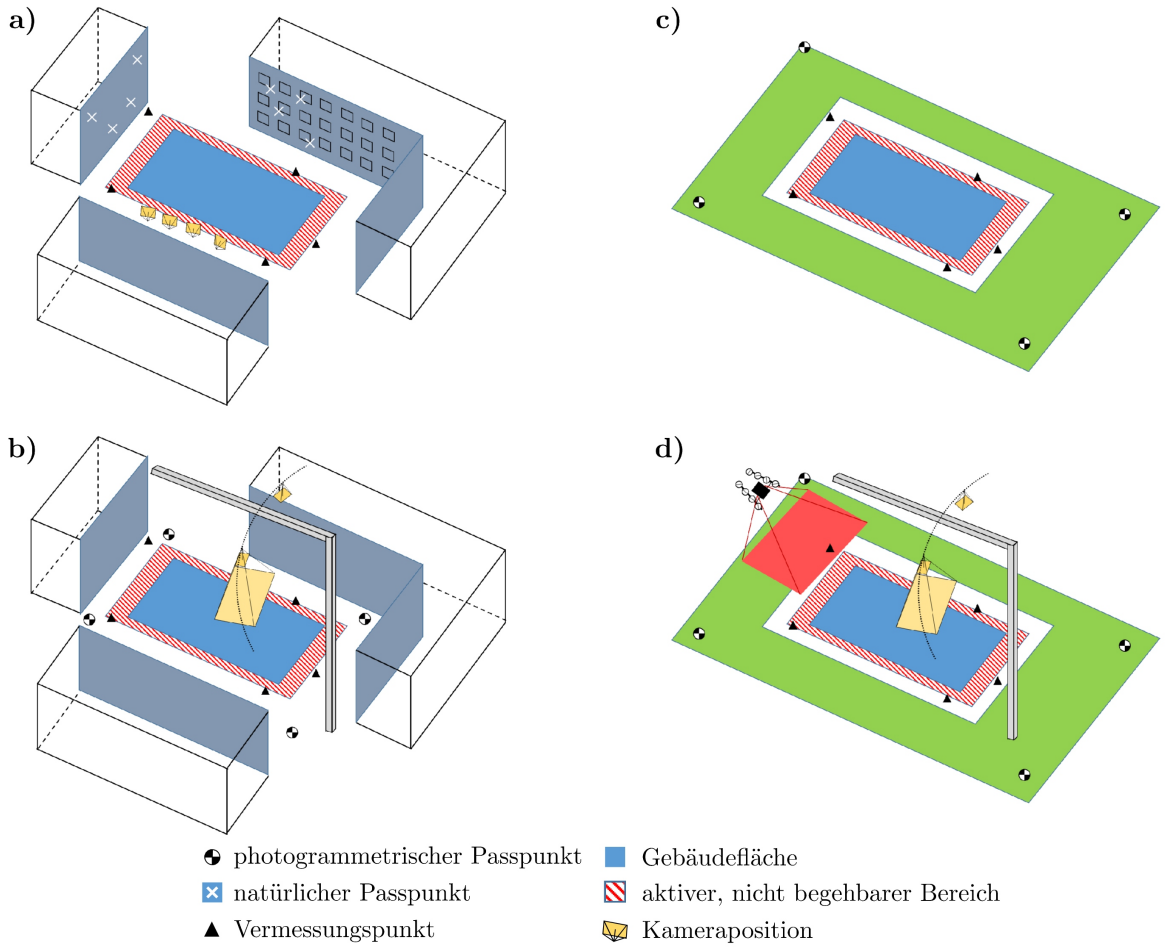


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung von möglichen Aufnahmeszenarien: a) innerstädtisch - terrestrisch, b) innerstädtisch - Vogelperspektive, c) freie Umgebung - terrestrisch, d) freie Umgebung - Vogelperspektive

in der Regel keine Merkmale zu bestimmen, die zu einem späteren Zeitpunkt erneut detektiert oder gemessen werden können.

Der Koregistrierungsansatz setzt sich, wie in Abbildung 3.6 gezeigt, aus drei Hauptschritten zusammen:

(I) Installation der photogrammetrischen Passpunkte und Bestimmung ihrer Koordinaten im Baustellenkoordinatensystem (BKS) durch Einmessung über das lokale Vermessungsnetz.

(II) Berechnung einer initialen Bündelblockausgleichung (BBA), die die Passpunkte einschließt.

(III) Aufnahme von Bildblöcken zu den erforderlichen Zeitpunkten und Verknüpfung mit den Bildern des vorhergehenden Bildblocks.

Ein Aufnahmezeitpunkt ist mit $\mathcal{A}_i$ benannt. Die ersten beiden Schritte beziehen sich nur auf den ersten Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}_1$, Schritt drei auf alle darauf folgenden Aufnahmezeitpunkte $\mathcal{A}_2$ bis $\mathcal{A}_t$. Für die genannten Schritte sind folgende Aufgaben notwendig:

(I) Die photogrammetrischen Passpunkte müssen so positioniert werden, dass sie in den Bildern des initialen Bildblocks sichtbar sind und sowohl mit Tachymeter als auch mit Nivellement

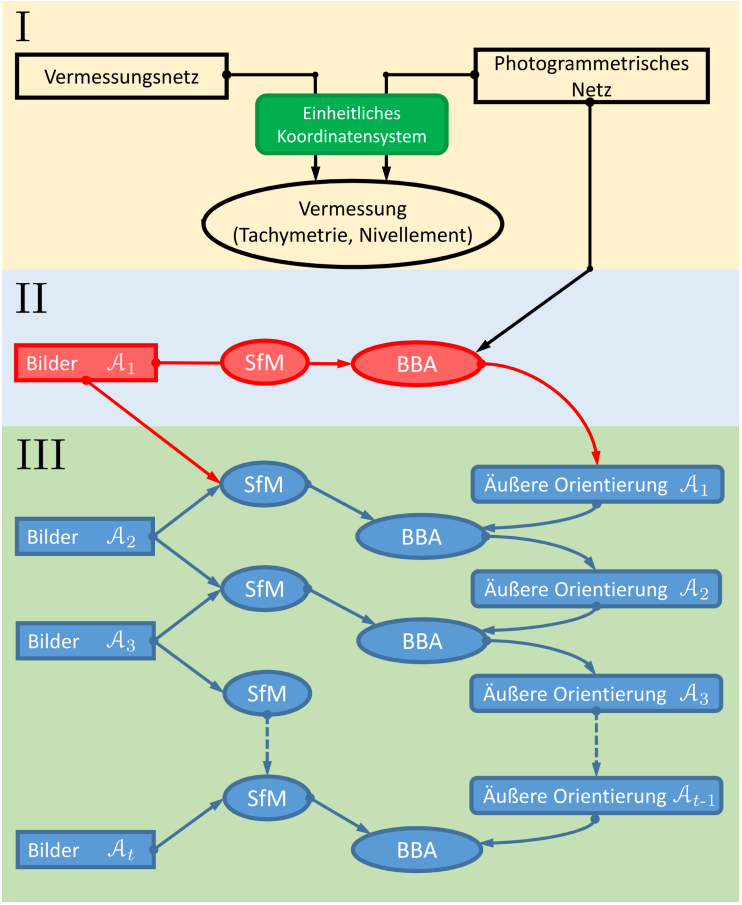


Abbildung 3.6: Ablaufdiagramm des Koregistrierungsansatzes – I: Vermarkung von photogrammetrischen Merkmalen und Einmessung im Baustellenkoordinatensystem; II: Initiale Bündelblockausgleichung (BBA), die die photogrammetrischen Merkmale als Passpunkte sowie Verknüpfungspunkte aus dem SfM-Prozess einschließt; III: Fortlaufende Registrierung von Bildern basierend auf den äußeren Orientierungen des vorhergehenden Schritts.

eingemessen werden können. Idealerweise werden die Passpunktmarker so angebracht, dass sie über die gesamte Dauer des Bauvorhabens sichtbar sind. Sie sind so anzubringen, dass die Marker weder entfernt noch zerstört werden. Aus diesem Grund bietet sich eine Anbringung außerhalb des aktiven Baubereichs an. Obwohl die Passmarken nur für den initialen Block zwingend notwendig sind, stellen sie auch eine Sicherung des Koordinatenrahmens dar und können erneut verwendet werden, falls die Koregistrierung von zwei aufeinanderfolgenden Zeitschritten fehlschlägt. Nach der Installation werden die Passmarken über die vorhandenen Vermessungspunkte eingemessen.

(II) In diesem Schritt werden die eigentlichen Bildaufnahmen für die initiale BBA getätigt. Um eine stabile Bestimmung der Kamerapositionen im BKS zu erreichen, sollten die photogrammetrischen Passpunkte möglichst gleichmäßig um die Baustelle und somit innerhalb des Bildblocks verteilt sein. Es sind auch Bildbereiche aufzunehmen, die sich im Zuge des Bauprozesses bis zur nächsten Aufnahme nicht ändern. In diesem Schritt müssen die Bildkoordinaten der Passpunkte einmalig in allen Bildern gemessen werden.

(III) Dieser Schritt umfasst die wiederholte Aufnahme der Bilder, die den Bauprozess dokumentieren. Dabei ist darauf zu achten, dass neben der sich verändernden Baustelle auch stets



a)



b)



c)

Abbildung 3.7: Beispiele für Pass- und Verknüpfungspunkte: a) Photogrammetrische Passmarke und Vermessungspunkt, b) Positionen von SIFT-Merkmalen für zwei unterschiedliche Match-Bilder, gekennzeichnet in weiß bzw. grün, c) Fensterecken, gekennzeichnet mit roten Kreisen, als Beispiel für natürliche Passpunkte. Die Positionen von Zielzeichen sind mit grünen Rechtecken gekennzeichnet.

unveränderte Bereiche mit aufgenommen werden, um die fortlaufende Koregistrierung zu ermöglichen.

In den Schritten II und III wird jeweils ein SfM (siehe Abschnitt 2.2.1) für die Bestimmung der Verknüpfungspunkte und der äußeren Orientierung der Bilder eingesetzt. Anschließend wird eine abschließende BBA durchgeführt, bei der die Passpunktkoordinaten mit eingeführt werden.

Im oben beschriebenen Verfahren kommen folgende Punktarten zum Einsatz:

- Passpunkte - Vermessungsnetz
- Passpunkte - Photogrammetrische Passmarke und/oder natürliche Punkte
- Verknüpfungspunkte - basierend auf Punktkorrespondenzen, z.B. von SIFT-Merkmalen (siehe Abschnitt 2.2.1)

Abbildung 3.7a zeigt zwei Passpunkte in einem UAV-Bild, das aus etwa 25 m Höhe aufgenommen wurde. Die photogrammetrische Passmarke ist klar erkennbar und messbar. Die ungefähre Position des Vermessungspunktes ist erkennbar, das eigentliche Meißelzeichen jedoch nicht. Abbildung 3.7b zeigt beispielhaft die Verteilung von automatisch detektierten Verknüpfungspunkten, deren Positionen weiß bzw. grün gekennzeichnet sind, bezüglich zwei verschiedener Matchbilder. Die Verknüpfungspunkte sind ein Produkt des SfM-Verfahrens, da hier bereits Merkmalsdetektion und -matching durchgeführt werden. Abbildung 3.7c zeigt natürliche Passpunkte in einem innerstädtischen Szenario. Für diese Art von Passpunkten müssen Merkmale ausgewählt werden, die

eindeutig in Bildern aus unterschiedlichen Aufnahmerichtungen erkannt werden können. Zusätzlich müssen sie mit geodätischen Verfahren, d.h. mit Vorwärtsschnitt, reflektorloser Messung mit einer Totalstation oder Laserscanning, einmessbar sein. Wird ein Laserscanner verwendet, müssen die Punkte eindeutig in der Punktwolke identifizierbar sein.

Im Folgenden werden die Prozessierungsschritte zur Auswertung der Daten beschrieben. Die Vermessung (Schritt I in Abbildung 3.6) liefert die Koordinaten der Passpunkte. Unabhängig vom Szenario wird SfM zu jedem Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}_i$ durchgeführt, welches die Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte, deren 3D-Koordinaten und die äußere Orientierung der Bilder in einem beliebigen Koordinatensystem liefert. Für die initiale BBA (Schritt II in Abbildung 3.6) werden die Bilder des ersten Aufnahmezeitpunkts $\mathcal{A}_1$ mit SfM ausgewertet. Um diese Bilder dann im BKS zu prozessieren, werden zur Näherungswertebestimmung mindestens ein Bild mit bekannter Orientierung und Position sowie ein weiteres Bild mit bekannter Position benötigt. Wenn mindestens drei Passpunkte im Bild sichtbar sind, können die Position und die Orienterung der Bilder durch einen Rückwärtsschnitt bestimmt werden.

Die initiale BBA (Formel 3.2) zu Aufnahme $\mathcal{A}_1$ benötigt die folgenden Eingangswerte, wobei n, n_P und n_{PP} die Anzahl der Bilder, Verknüpfungspunkte bzw. Passpunkte bezeichnen:

$\boldsymbol{x}_{ij}$: Bildkoordinaten von Punkt j in Bild i. Die Bildkoordinaten umfassen sowohl die gemessenen Bildkoordinaten der Passpunkte als auch die im SfM bestimmten Bildkoordinaten der Verknüpfungspunkte im initialen Bildblock.

$\boldsymbol{X}_P$: Koordinaten aller 3D-Punkte, die im Zuges des SfM bestimmt wurden. Über die Näherungswerte der Bildorientierungen müssen auch Näherungswerte für die Koordinaten dieser Punkte im BKS bereitgestellt werden.

$\boldsymbol{X}_{PP}$: Koordinaten der photogrammetrischen Passpunkte.

$\boldsymbol{t}_i$: Translationsparameter von Bild i, Näherungswerte für die Werte im BKS werden aus den SfM-Ergebnissen und den per Rückwärtsschnitt bestimmten Orientierungen berechnet.

$\mathbf{R}_i$: Rotationsparameter von Bild i, Näherungswerte für die Werte im BKS werden aus den SfM-Ergebnissen und den per Rückwärtsschnitt bestimmten Orientierungen berechnet.

I_k: Innere Orientierung von Kamera k. Die Parameter können zuvor an einem Kalibrierfeld bestimmt werden. Alternativ können sie direkt in der BBA durch eine Simultankalibrierung geschätzt werden.

Die initiale Bündelblockausgleichung ist gegeben durch die folgende Formel, wobei zu schätzende Parameter mit ˆ gekennzeichnet sind:

$$min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_P+n_{PP}} \|\mathbf{x}_{ij} - f(\hat{\mathbf{X}}_{j,P}, \mathbf{X}_{j,PP}, \hat{\boldsymbol{t}}_{i,t_0}, \hat{\mathbf{R}}_{i,t_0}, I_k)\|^2 \tag{3.2}$$

Die Beobachtungsgleichungen f sind die in Formel 2.4 gezeigten Kollinearitätsgleichungen.

In dieser Ausgleichung wird die Position aller Kameras im BKS bestimmt. Somit kann daraus eine dichte Punktwolke berechnet werden, die mit dem Gebäudemodell koregistriert ist und somit für den Soll-Ist-Abgleich verwendet werden kann. Das vorgeschlagene Verfahren sieht vor, die Bilder der kommenden Baustellenaufnahmen im gleichen Koordinatensystem zu registrieren. Die Passpunkte sollen jedoch nicht mehr in den neuen Aufnahmen gemessen werden müssen. Stattdessen werden Korrespondenzen zwischen den Bildern des vorangegangenen Aufnahmedatums, deren äußere Orientierungen bereits im Zielkoordinatensystem vorliegen, und den neuen Aufnahmen gesucht. Dafür werden die Bilder des vorangegangenen Aufnahmezeitpunkts $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ und des

aktuellen Aufnahmezeitpunkts $\mathcal{A}_t$ zusammen in einem SfM-Prozess ausgewertet. Sofern genügend korrespondierende Merkmale, die zu beiden Zeitpunkten existieren, in einer ausreichenden Anzahl von Bildern vorliegen, kann die äußere Orientierung aller Bilder in einem gemeinsamen Koordinatensystem bestimmt werden. Da die äußeren Orientierungen von $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ im BKS vorliegen, können somit auch die Kamerapositionen von $\mathcal{A}_t$ in diesem System bestimmt werden. Um einen Drift des BKS von Schritt $\mathcal{A}_1$, in dem das Koordinatensystem definiert wurde, zu vermeiden, werden jeweils in der abschließenden BBA von $\mathcal{A}_t$ die äußeren Orientierungen von $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ festgehalten, sofern diese in der vorangegangenen BBA mit einer ausreichend niedrigen Standardabweichung geschätzt wurden. Die Eingangswerte für eine BBA (Formel 3.3) ab dem Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}_2$ sind folgende:

$\boldsymbol{x}_{ij}$: Bildkoordinate von Punkt j in Bild i des SfM-Prozesses mit Bildern aus $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ und $\mathcal{A}_t$.

$\boldsymbol{X}_P$: Koordinaten aller 3D-Punkte, die im Zuge des SfM bestimmt wurden.

$\boldsymbol{t}_{i,t-1}$: Festgehaltene Translationsparameter von Bild i aus der abschließenden BBA für $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$.

$\mathbf{R}_{i,t-1}$: Festgehaltene Rotationsparameter von Bild i aus der abschließenden BBA für $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$.

$\boldsymbol{t}_{i,t}$: Translationsparameter von Bild i, Näherungswerte können aus den SfM-Ergebnissen und den bekannten äußeren Orientierungen im BKS aus $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ bestimmt werden.

$\mathbf{R}_{i,t}$: Rotationsparameter von Bild i, Näherungswerte können aus den SfM-Ergebnissen und den bekannten äußeren Orientierungen im BKS aus $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ bestimmt werden.

I_k: Innere Orientierung von Kamera k.

Die weiteren BBA ab dem Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}_2$ berechnen sich folgendermaßen, wobei zu schätzende Parameter mit $\hat{}$ gekennzeichnet sind:

$$min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_P} \|\mathbf{x}_{ij} - f(\hat{\mathbf{X}}_{j,P}, \boldsymbol{t}_{i,t-1}, \mathbf{R}_{i,t-1}, \hat{\boldsymbol{t}}_{i,t}, \hat{\mathbf{R}}_{i,t}, I_k)\|^2 \tag{3.3}$$

Die Beobachtungsgleichungen f sind die in Formel 2.4 gezeigten Kollinearitätsgleichungen.

Sollten verschiedene Bereiche der Baustelle von Bildern abgedeckt werden, die zueinander nicht über korrespondierende Merkmale verbunden werden können, teilt sich das oben vorgestellte Vorgehen in mehrere Untergruppen, d.h. Bildblöcke, auf, die einzeln prozessiert werden. Das in Abbildung 3.6 gezeigte Schema wird somit mehrfach für den Übergang zwischen zwei Zeitschritten $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$ und $\mathcal{A}_t$ durchgeführt. Um die gewünschte Registrierung aller Bilder im BKS zu erhalten, muss jedoch ein initialer Block vorhanden sein, in dem alle Bilder gemeinsam registriert wurden und sich alle Unterblöcke mit diesem initialen Block verbinden lassen.

Falls das Koregistrierungsverfahren für aufeinanderfolgende Zeitschritte scheitert, können Bilder unter folgenden Voraussetzungen dennoch orientiert werden: (i) Sofern innerhalb eines Teil-Bildblocks eine ausreichende Anzahl noch existierender Passpunkte sichtbar ist, können diese gemessen werden und so das BKS wiederhergestellt werden. (ii) Korrespondierende Merkmale können auch in weiter zurückliegenden Aufnahmeschritten $\mathcal{A}_{t\text{-}2}$ bis $\mathcal{A}_1$ gesucht werden. Diese haben ggf. eine größere Anzahl von Bildern, die mehr Überlappungsbereiche zum aktuellen Zeitschritt aufweisen als der vorhergehende Zeitschritt $\mathcal{A}_{t\text{-}1}$.

Die durch die fortlaufende Koregistrierung bestimmten äußeren Orientierungen im BKS werden für die Generierung einer dichten Punktwolke (Abschnitt 2.2.2) sowie für die Überprüfung von Sichtbarkeiten auf der Baustelle (Abschnitt 4.4) verwendet.

4 Methoden zum Soll-Ist-Abgleich

4.1 Aufbereitung der Punktwolken - Filterung

Zur Punktwolkenerstellung werden die Einzelpunktwolken aller Referenzbilder $\mathbf{I_R}$ zusammengefügt. Durch diese Fusion können große Punktwolken mit mehreren 100 Mio. Punkte entstehen, die folgende Eigenschaften aufweisen, die eine Filterung nötig machen:

- Rauschen: In den meisten Fällen werden Bauteilflächen entweder frontal von vorne, z.B. Säulen, Stützen, oder von oben, z.B. Decken, aufgenommen und weisen somit in Normalenrichtung der entsprechenden Ebenen ein Rauschen auf, dessen Stärke von dem Basis-Höhen-Verhältnis und der Anzahl der beteiligten Aufnahmen abhängig ist.
- Ausreißer: Ausreißer können durch Fehlzuordnungen im Dense-Matching (vgl. Abschnitt 2.2.2) insbesondere im Bereich homogener Flächen hervorgerufen werden. Solche Flächen sind häufig in Bereichen mit Himmel oder mit schlechter Beleuchtung zu finden. Letzteres ist in Baustellenszenarien vor allem für die von außen einsehbaren inneren Teile des Gebäudes gegeben.
- Hohe Punktdichte: Jedes Bild wird einmal als Referenzbild $\mathbf{I_R}$ ausgewählt und hat n Matchbilder $\mathbf{I_{M,i}}$. $\mathbf{I_R}$ ist aber selbst auch Matchbild, wenn seine Matchbilder als Referenzbild ausgewählt werden. Dadurch können Oberflächen, die in vielen Referenzbildern zu sehen sind, bei der Fusion eine sehr hohe Punktdichte erhalten, wodurch die Punktwolkengröße in manchen Bereichen stark ansteigt, ohne dass dabei die Oberflächenrepräsentation verbessert wird.

Die Ziele der Filterung der Punktwolke sind somit:

- Verringerung der Zahl an Ausreißern und des Rauschens
- Verringerung der Datenmenge
- Erzeugung einer einheitlichen, maximalen Punktdichte

Die zusammengesetzten Punktwolken aller Referenzbilder eines Aufnahmezeitpunktes $\mathcal{A}_i$ werden zur Filterung zunächst in eine Octree-Struktur mit einer minimalen Kantenlänge von 1 m eingetragen. Alle Octree-Voxel in denen mehr als ein Punkt vorliegt, werden weiter gefiltert. Dafür werden alle Punkte eines Voxels entnommen und dieses erneut bis zu einer minimalen Kantenlänge l_f geteilt. Diese ist die endgültige Filtergröße. Enthält ein Voxel dieser Größe nur genau einen Punkt wird dieser verworfen. In Voxel mit mehreren Punkten wird nur einer behalten. Die Filtergröße muss deshalb größer als die erwartete minimale Punktdichte sein. Ist mehr als ein Punkt vorhanden, wird der beste Punkt nach folgenden Kriterien ausgewählt: Als Erstes wird überprüft, wie viele Bilder zur Rekonstruktion der Punkte beigetragen haben, d.h. wie viele Matchbilder bei der Rekonstruktion durch das entsprechende Referenzbild vorlagen. Es wird der Punkt mit den meisten Matchbildern ausgewählt. Liegen mehrere Punkte mit der gleichen Zahl an Matchbildern vor, so wird der Punkt mit der kleinsten geschätzten Standardabweichung σ_D ausgewählt.

Bei großen Punktwolken mit über 50 Mio. Punkten wird die Punktwolke vor diesem Prozess in kleinere Einheiten geteilt.

Die drei oben genannten Ziele der Filterung werden in diesem Filterprozess aus folgenden Gründen erreicht. Es wird eine, zumindest maximale, einheitliche Punktdichte erreicht, da mit einem festen Raster gefiltert wird, in dem jeweils nur ein Punkt pro Voxel erhalten bleibt. Die Zahl der Ausreißer wird verringert, da unsichere Punkte verworfen werden. Punkte werden verworfen, weil sie entweder als einziger Punkt in einer Voxelzelle vorliegen oder nicht als bester Punkt innerhalb eines Voxels ausgewählt werden. Die Datenmenge wird reduziert, da nur ein Punkt pro Voxel ausgewählt wird.

4.2 Aufbereitung der Modelldaten

Für den Abgleich von as-built zu as-planned muss die Gebäudegeometrie bereitgestellt werden. Für die hier durchgeführten Experimente wird die Gebäudegeometrie aus dem BIM in einer Dreiecksrepräsentation extrahiert. Jedes im BIM definierte Bauteil ist durch einen individuellen IFC-Identifikator (z.B. *0_oLFh3JH0GfDgRvv7L6$4*) gekennzeichnet. Um die Bauteilzugehörigkeit zu erhalten, wird für jedes Dreieck der IFC-Identifikator des entsprechenden Bauteils abgespeichert.

Der Abgleich der Modellgeometrie mit der Punktwolke erfolgt nicht für das Bauteil als Ganzes, sondern auf Basis sogenannter Bauteilflächen (BF). Erst anschließend wird aus der Kombination der Bewertungen der entsprechenden Bauteilflächen die Bewertung für das ganze Bauteil abgeleitet. Jedes Bauteil besteht aus mehreren Bauteilflächen. Bauteilflächen sind die Ebenen, aus denen ein Bauteil zusammengesetzt ist. Diese Definition ist zunächst nur für Bauteile gültig, die nur aus planaren Oberflächen bestehen. In der Dreiecksrepräsentation werden gekrümmte Flächen durch ebene Dreiecke angenähert, wobei hier jedes Dreieck gleichzeitig eine BF ist. Je mehr Dreiecke für die Darstellung der Fläche verwendet werden, desto besser kann die wahre Oberfläche angenähert werden, desto kleinteiliger wird aber auch das Bauteil zerlegt. Eine Säule mit rechteckigem Grundriss wird hingegen genau durch sechs BF beschrieben. In den hier durchgeführten Experimenten ist nur ein sehr kleiner Anteil der Flächen gekrümmt.

Zur weiteren Verfeinerung des Abgleichs wird jede BF in ein gleichmäßiges Raster $\mathfrak{R}$ mit quadratischen Zellen der Größe l_r eingeteilt. Abbildung 4.1 zeigt die Schritte vom Gesamtgebäude a) über die Dreiecksvermaschung b) und den BF c) zu den Rasterzellen d). Die Erstellung und Anwendung des Rastergitters $\mathfrak{R}$ wurde bereits in Tuttas et al. [2015] gezeigt.

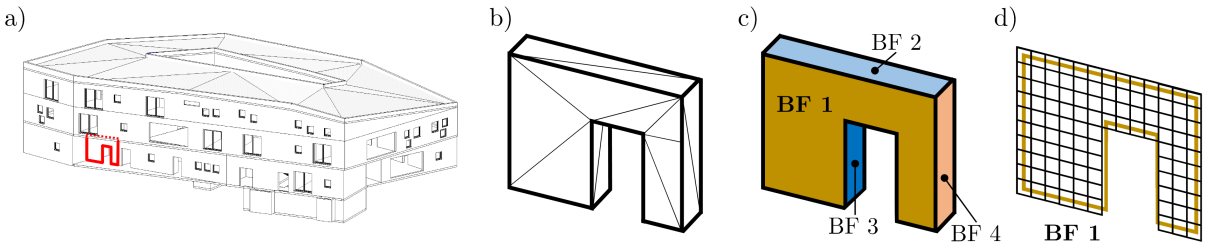


Abbildung 4.1: Aufbereitung der Modelldaten: a) komplettes Gebäude, b) extrahiertes Bauteil in Dreiecksrepräsentation, c) Bauteil aufgeteilt in Bauteilflächen (BF) aus zusammengefassten Dreiecken, d) Rasterung von Bauteilfläche 1

Die wesentlichen Gründe für die Zerlegung in BF sind, dass (i) häufig nur einzelne oder nur eine einzige BF pro Bauteil in der Punktwolke sichtbar sind und (ii) dass sich Objekte in speziellen Situationen aus unterschiedlichen Zuständen der einzelnen BF zusammensetzen können. Die möglichen Kombinationen werden im folgenden Abschnitt 4.3 detailliert beschrieben.

4.3 Bauteilzustände

Um den Zustand eines Bauteils zu bestimmen, werden verschiedene Bauteilzustände definiert, die sich entweder auf einzelne Rasterzellen $\mathfrak{R}_{i,j}$ (siehe Abbildung 4.5), eine Bauteilfläche oder das ganze Bauteil beziehen. Die Zusammenhänge sind in Abbildung 4.2 dargestellt.

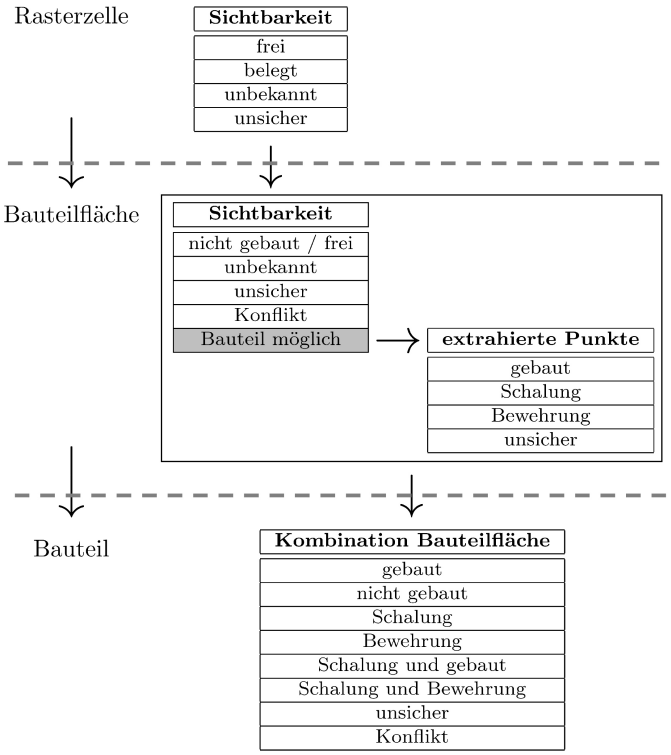


Abbildung 4.2: Mögliche Bauteilzustände und ihre Abhängigkeiten

Die möglichen Zustände der Rasterzellen leiten sich von den Zuständen einer Sichtbarkeitsanalyse ab (siehe Abschnitt 4.4). Jeder Rasterzelle wird einer der folgenden Zustände zugewiesen:

frei: Das Zentrum der Rasterzelle befindet sich in einem Bereich, der bei der Sichtbarkeitsanalyse als *frei* markiert wurde.

belegt: Das Zentrum der Rasterzelle befindet sich in einem Bereich, der bei der Sichtbarkeitsanalyse als *belegt* markiert wurde.

unbekannt: Das Zentrum der Rasterzelle kann in keiner Aufnahme gesehen werden, bzw. es konnte an dieser Stelle kein Punkt rekonstruiert werden.

unsicher: Es ist keine eindeutige Aussage aus der Sichtbarkeitsanalyse möglich. Welche Werte als *unsicher* angesehen werden, ist abhängig von den Grenzwerten S_{frei} und S_{bel} (siehe dazu Abschnitt 4.4).

Nicht gebaute Bauteile können anhand von freien Bereichen erkannt werden. Umgekehrt gilt jedoch nicht, dass für alle nicht gebauten Bauteile Rasterzellen mit dem Status *frei* vorliegen. Um freie Rasterzellen zu erhalten, müssen hinter dem entsprechenden Bauteil andere Objekte liegen, die rekonstruiert werden können. Ist dies nicht der Fall, erhalten die nicht gebauten Bauteile den Zustand *unbekannt*. Wird die Baustelle von oben betrachtet, können meistens Objekte unterhalb der nicht vorhandenen Bauteile rekonstruiert werden. Bei terrestrischen Aufnahmen in horizontaler Blickrichtung sind jedoch nicht immer Objekte im Hintergrund vorhanden. Sind temporäre Objekte an den entsprechenden Stellen, können auch belegte Zellen für nicht gebaute Bauteile vorliegen.

Die Zustände der Rasterzellen werden anschließend für eine Bauteilfläche zusammengeführt, um so die Sichtbarkeit dieser Fläche zu bewerten. Es ergeben sich somit folgende Zustände für eine Bauteilfläche:

nicht gebaut / frei: Sind die Rasterzellen der BF als *frei* bewertet, so kann die BF als *nicht gebaut* markiert werden.

unbekannt: Sind die Rasterzellen der BF als *unbekannt* bewertet, so kann die BF als *unbekannt* markiert werden.

Bauteil möglich: Sind die Rasterzellen als *belegt* markiert oder besteht eine Kombination aus belegten und unbekannten Rasterzellen, so ist das Vorhandensein der BF möglich. Wird eine BF als möglicherweise gebaut eingestuft, wird sie mit *Bauteil möglich* markiert, und es werden Punkte, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, in einer Pufferzone um die BF extrahiert und bewertet.

Konflikt: Es können Rasterzellen auftreten die aufgrund der Sichtbarkeitsanalyse als *frei* bewertet werden, für die jedoch Punkte extrahiert werden können und sie so aufgrund der Punktzahl laut Formel 4.3 als „belegt“ gelten. Es ist zwischen diesem „belegt“ und dem Zustand *belegt* aus der Sichtbarkeitsanalyse zu unterscheiden. Solche Rasterzellen werden mit dem Status *Konflikt* gekennzeichnet. Grund für das Auftreten dieser Situation ist die Diskretisierung durch Voxelgitter und Rasterzellen mit unterschiedlichen Gittergrößen.

unsicher: Haben alle Rasterzellen einer BF den Status *unsicher* oder kann keiner der zuvor genannten Zustände zugeordnet werden, so wird die BF als *unsicher* markiert.

Für alle Bauteilflächen, die als *Bauteil möglich* eingestuft wurden, werden anhand der extrahierten Punkte folgende Zustände überprüft:

gebaut: Die extrahierten Punkte bestätigen das Vorhandensein der Bauteilfläche.

Schalung: Die extrahierten Punkte bestätigen das Vorhandensein von Schalungsteilen.

Bewehrung: Die extrahierten Punkte bestätigen das Vorhandensein von Bewehrungsstäben.

unsicher: Die extrahierten Punkte sind nicht ausreichend, um eine Aussage über den Bauzustand der Bauteilfläche zu geben.

Der Zustand eines ganzen Bauteils wird aus den Zuständen der zu ihm gehörenden Bauteilflächen abgeleitet. Folgende Zustände können für ein Bauteil auftreten:

gebaut: Die Kombination der Bauteilflächenzustände bestätigt das Vorhandensein des Bauteils.

nicht gebaut: Die Kombination der Bauteilflächenzustände bestätigt das Fehlen des Bauteils.

Schalung: Die Kombination der Bauteilflächenzustände bestätigt das Vorhandensein von Schalungsteilen.

Bewehrung: Die Kombination der Bauteilflächenzustände bestätigt das Vorhandensein von Bewehrungsstäben.

Schalung und gebaut: Es treten BF mit *Schalung* und *gebaut* auf. Dies ist ein gültiger Zustand in den in Abbildung 4.3 gezeigten Situationen.

Schalung und Bewehrung: Es treten BF mit *Schalung* und *Bewehrung* auf. Dies ist ein gültiger Zustand in den in Abbildung 4.3 gezeigten Situationen.

unsicher: Das Bauteil beinhaltet mit *unsicher* gekennzeichnete BF.

Konflikt: Das Bauteil beinhaltet mit *Konflikt* gekennzeichnete BF, oder es treten sich widersprechende Zustände auf.

Die möglichen Kombinationen von Zuständen werden in Abbildung 4.3 gezeigt. In dieser Darstellung werden jeweils die beiden Hauptebenen BF 1 und BF 2 eines rechteckigen Bauteils betrachtet, d.h. die beiden Bauteilseiten mit den größten Flächen. Die Farbgebung mit der die drei Zustände *belegt*, *unbekannt* und *frei* unterschieden werden, korrespondiert mit der Farbgebung bei der Darstellung der Sichtbarkeitsanalyse in Abbildung 4.4. Die roten Punkte repräsentieren die rekonstruierten Punkte in als *Bauteil möglich* eingestuften BF. Punkte direkt auf der BF stellen ein gebautes Bauteil dar, Punkte innerhalb des Volumens Bewehrung, Punkte auf und vor der BF Schalungsteile. Punkte, die nicht entlang der BF auftreten, stehen für andere Objekte. Im einfachsten Fall tritt für beide Bauteilflächen der gleiche Zustand auf. Diese Fälle sind in Abbildung 4.3 unter a), c) und e) für *gebaut*, *Schalung* und *Bewehrung* gezeigt. Ist eine Seite als *unbekannt* eingestuft, so erhält das Bauteil den Status der bekannten Fläche, dies ist in b), d) und f) gezeigt. Horizontale Bauteile, dies sind vor allem Deckenflächen, sind häufig nur von oben einsehbar, weshalb hier oft Punkte nur auf der Oberseite auftreten und die Unterseite *unbekannt* ist. Diese Fälle sind unter m) und n) für *gebaut* und *Bewehrung* gezeigt. Die Fälle, bei denen Punkte im Bereich des Volumens eines noch nicht gebauten Bauteils auftreten und die Punkte von anderen temporären Objekten stammen, zeigen k), l), q) und r). Neben den eben genannten Fällen, in denen nur ein Zustand auftritt, ggf. in Kombination mit dem Zustand *unbekannt*, gibt es weitere Fälle mit anderen Kombinationen, die im Folgenden beschrieben werden:

- g): Der Zustand *Schalung* liegt auch bei einer einseitig errichteten Schalung vor, bei der die rückseitige BF den Zustand *frei* aufweist.
- h): Der Zustand *Bewehrung und Schalung* liegt vor, wenn die Schalung um die vorhandenen Bewehrungsstäbe bereits auf einer Seite errichtet ist, auf der anderen aber noch fehlt.
- i): Hier wird ein Zustand dargestellt, bei dem durch eine BF hindurch auf die Rückseite einer bereits errichteten Schalungswand geblickt wird. In diesem Fall wird die hintere Bauteilfläche als *gebaut* bewertet, da die rückseitige Fläche der Schalung genau der Oberfläche des Bauteils entspricht.
- j): Der Zustand *gebaut und Schalung* kann auftreten, wenn von einem bereits fertig gestellten Bauteil die Schalung nur teilweise abgebaut wurde.
- o): Für Deckenflächen wird nur eine bodenseitige Schalung errichtet, die der unteren Bauteiloberfläche entspricht. Somit kann durch die obere BF hindurch auf eine als *gebaut* eingestufte BF geblickt werden.
- p): Sind die Bewehrungsstäbe einer Deckenfläche bereits vorhanden, so wird die obere BF als Bewehrung eingestuft. Je nach Dichte der Bewehrungsstäbe und Bodenpixelauflösung können in diesem Fall auch Punkte für die untere BF vorliegen.

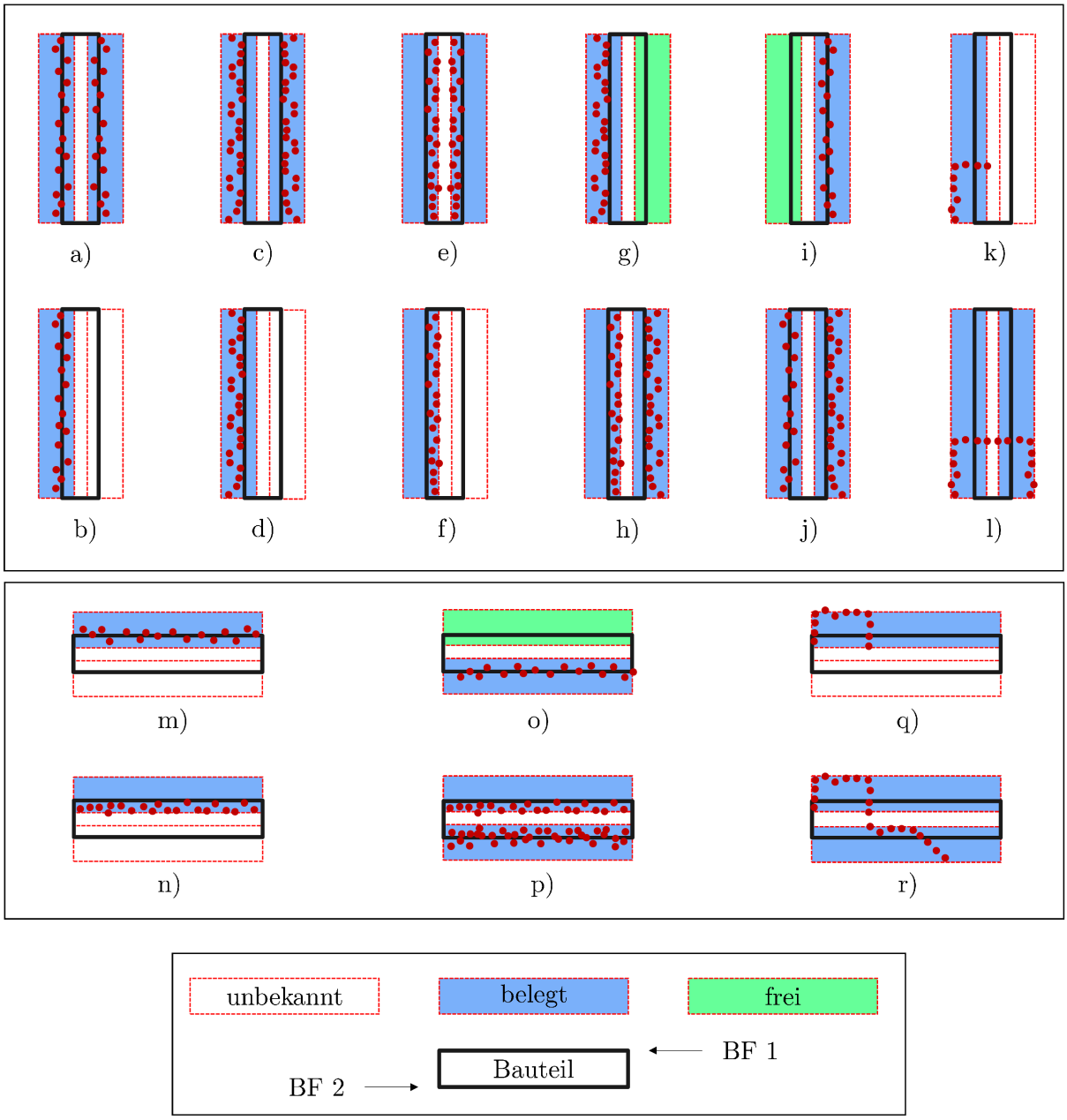


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung von unterschiedlichen Bauteilzuständen unter verschiedenen Kombinationen von Bauteilflächenzuständen für vertikale Bauteile a) bis l) und für horizontale Bauteile m) bis r). Folgende Zustände können auftreten, bei denen entweder beide Bauteilflächen BF 1 und BF 2 den gleichen Zustand aufweisen oder eine der beiden den Zustand *unbekannt* aufweist: a), b) und m) *Bauteil gebaut*, c) und d) *Schalung* sowie e), f) und n) *Bewehrung*. Zustände, die aufgrund weiterer Kombinationen auftreten können, sind g) *Schalung*, h) und p) *Schalung und Bewehrung*, i) und o) *Schalung* sowie j) *Bauteil gebaut und Schalung*. Außerdem können wie bei k), l), q) und r) anderweitige Objekte vorhanden sein. Die roten Punkte repräsentieren die rekonstruierten Punkte. Die Farbgebung, die so auch in Abbildung 4.4 verwendet wird, gibt die Zustände aus der Sichtbarkeitsanalyse wider.

Bauteilzustand	Säulen BF 1	Säulen BF 2	Abb. 4.3	Decken BF 1	Decken BF 2	Abb. 4.3
nicht gebaut	*frei* und	*frei*	-	*frei* und	*frei*	-
	frei und	*unbekannt*				
gebaut	*gebaut* und	*gebaut*	a)	*gebaut* und	*unbekannt*	m)
	gebaut und	*unbekannt*	b)			
Schalung	*Schalung* und	*Schalung*	c)	*frei* und	*gebaut*	o)
	Schalung und	*unbekannt*	d)			
	Schalung und	*frei*	g)			
	frei und	*gebaut*	i)			
Bewehrung	*Bewehrung* und	*Bewehrung*	e)	*Bewehrung* und	*unbekannt*	n)
	Bewehrung und	*unbekannt*	f)			
Schalung und gebaut	*gebaut* und	*Schalung*	j)	-		-
Schalung und Bewehrung	*Bewehrung* und	*Schalung*	h)	*Bewehrung* und	*gebaut*	p)
				Bewehrung und	*Bewehrung*	
andere Objekte / *unsicher*	*unsicher* und	*unbekannt*	k)	*unsicher* und	*unbekannt*	q)
	unsicher und	*unsicher*	l)	*unsicher* und	*unsicher*	r)

Tabelle 4.1: Übersicht über die Bauteilzustände, die nach dem Ablauf in Abbildung 4.2 möglich sind, und die Kombinationsmöglichkeiten für Bauteilflächenzustände (BF 1 und BF 2), wie sie in Abbildung 4.3 dargestellt sind. Die Farbcodierung links in der Tabelle ist bei der Darstellung der Ergebnisse und der Ground Truth (Abbildungen 6.5, 6.6, 6.8 und 6.9) wiederzufinden.

Eine Übersicht der Kombinationen findet sich in tabellarischer Form in Tabelle 4.1. Einige Beispiele für Sonderfälle sind in Abbildung 5.15 gezeigt.

4.4 Sichtbarkeitsanalyse

Die Sichtbarkeitsanalyse dient der Erkennung von Bereichen, (i) in denen Bauteile vorhanden sein können, (ii) in denen keine Bauteile vorhanden sind und (iii) in denen keine Aussagen getroffen werden können. In Abbildung 4.4 wird der Zusammenhang zwischen den Kamerapositionen, den Sichtstrahlen und den daraus folgenden Aussagen über die Sichtbarkeit der Bauteile schematisch dargestellt. Das Vorgehen wurde bereits in Tuttas et al. [2015] veröffentlicht. Mit Hilfe der Sichtbarkeitsabfragen können den Rasterzellen folgende Zustände zugewiesen werden:

- *unbekannte* Rasterzellen: Rasterzellen, für die auf Basis der Punktwolke und der Sichtbarkeitsabfragen keine Aussage getroffen werden kann. Das sind die Zellen, die nicht im Sichtbereich der aufgenommenen Bilder liegen. Dafür verantwortlich sind hauptsächlich Abschattungen, d.h. die entsprechende Rasterzelle ist hinter bereits gebauten Bauteilen oder temporären Objekten verborgen, wie es für Bauteil 4 in Abbildung 4.4 der Fall ist. Außerdem tritt dieser Zustand auf, wenn ein Bereich der Baustelle nicht oder ungenügend erfasst wurde. Eine ungenügende Erfassung liegt vor, wenn das entsprechende Bauteil zwar in einem Bild vorhanden ist, jedoch aufgrund fehlender Matchbilder nicht rekonstruiert werden konnte.

- *freie* Rasterzellen: Rasterzellen, die aufgrund der Sichtbarkeitsabfragen als nicht vorhanden bestimmt werden. Diese Rasterzellen werden von Sichtstrahlen zu rekonstruierten Punkten durchlaufen, wie bei Bauteil 3 in Abbildung 4.4 dargestellt. Bauteile, die aus freien Rasterzellen bestehen, werden daher als *nicht gebaut* erkannt.

- *belegte* Rasterzellen: Diese Rasterzellen treten in Bereichen mit 3D-Punkten auf, wie es in Abbildung 4.4 für Bauteil 1 und 2 der Fall ist.

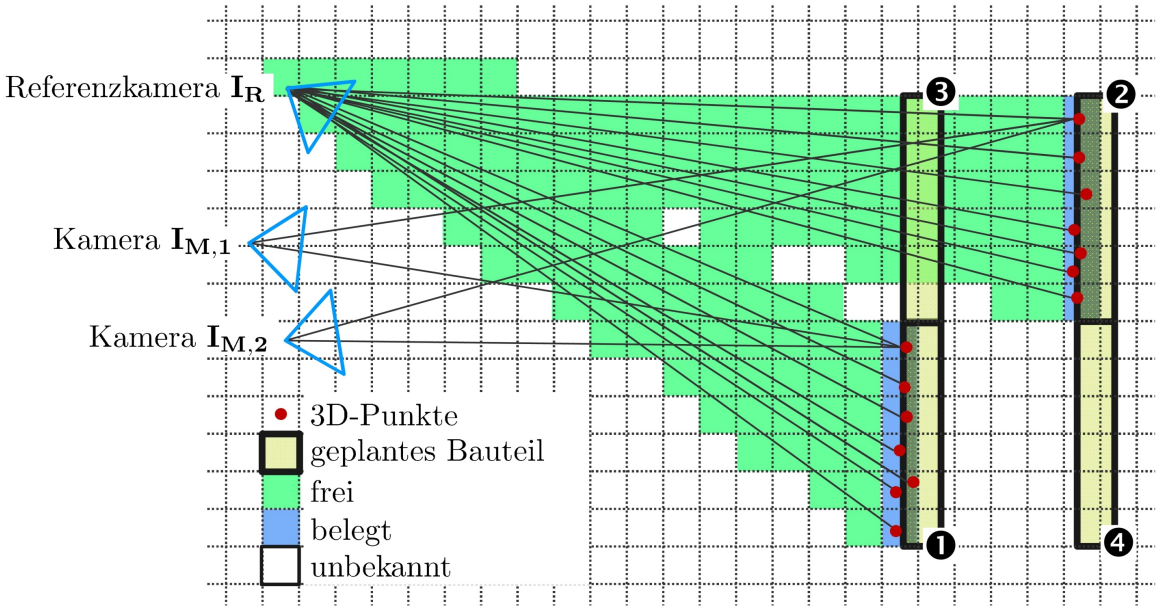


Abbildung 4.4: Beispiel für die Sichtbarkeitsanalyse als Profil durch das Voxelgitter $\mathfrak{V}$. Es sind die Sichtstrahlen einer Referenzkamera sowie zwei weiterer Kameras zu 3D-Punkten gezeigt. Die Voxelzellen sind anhand ihres Zustands *frei*, *belegt* und *unbekannt* farblich markiert. In diesem Fall bekommen die der Kamera zugewandten Bauteilflächen die Zustände *Bauteil möglich* (1+2), *nicht gebaut / frei* (3), und *unbekannt* (4). Die hier gezeigten 3D-Punkte existieren nur, wenn sie in mindestens 2 Bildern vorkommen, somit wird bei der Sichtbarkeitsanalyse keine Einzelkamerasichtbarkeit berücksichtigt.

Die Sichtbarkeitsabfragen werden mit der *octomap-Programmbibliothek* [Hornung et al., 2013] durchgeführt. In diesem Ansatz werden mehrfache Beobachtungen s in einem Belegungsgitter $\mathfrak{V}$ nach der Vorgehensweise von Moravec & Elfes [1985] integriert. Für jede Messung s_i und jedes Voxel $n \in \mathfrak{V}$ wird das Belegungsgitter nach folgender Formel, unter Verwendung einer Log-Odd-Notation, aktualisiert:

$$L(n|s_{1:i}) = \max\left(\min\left(L(n|s_{1:i-1}) + L(n|s_i), cl_{max}\right), cl_{min}\right) \tag{4.1}$$

mit

$$L(n) = \ln\left(\frac{P(n)}{1-P(n)}\right) \text{ und } P(n) = \left(\frac{1}{\exp\left(L(n)\right)} + 1\right)^{-1} \tag{4.2}$$

Jedes Mal, wenn ein Sichtstrahl durch ein Voxel n hindurchgeht, was als *Miss* bezeichnet wird, oder dort endet, was als *Hit* bezeichnet wird, entspricht dies einer Messung s_i. Der Wert $L(n|s_{1:i})$ des jeweiligen Voxels wird mit den Formeln 4.1 und 4.2 aus den Wahrscheinlichkeiten $P_{Miss}(n|s_i)$ und $P_{Hit}(n|s_i)$ berechnet. Die Schwellwerte cl_{min} and cl_{max} als Log-Odd-Werte setzen einen Wert für $L(n)$ fest, der nicht unter- bzw. überschritten werden kann. Diese Schwellwerte dienen dazu, dass der Status von temporär belegten Zellen durch eine ausreichende Zahl neuer Messungen, die diese Zellen als frei markieren, zu *frei* geändert werden kann und umgekehrt. Dabei gilt zu Beginn die Annahme, dass für jedes Voxel beide Zustände gleich wahrscheinlich sind.

Die Eingangsdaten, um die Sichtbarkeitsanalyse mit *octomap* durchführen zu können, sind gefilterte Punktwolken und die Kamerapositionen. Um die Sichtstrahlen zu definieren, wird jedem

3D-Punkt $\boldsymbol{X_j}$ die Position der Referenzkamera $\mathbf{I_R}$ zugeordnet, von der er rekonstruiert wurde. Die Berechnung der Sichtbarkeiten wird in einem Voxelgitter mit der Kantenlänge o durchgeführt. Für jedes Voxel, durch das mindestens ein Sichtstrahl führt, wird die Wahrscheinlichkeit für *belegt* berechnet. Anschließend wird anhand dieses Wertes jeder Rasterzelle $\mathfrak{R}_{i,j}$ einer der oben definierten Zustände zugewiesen. Dafür wird der Wert des Voxels, in dem der Mittelpunkt der Rasterzelle liegt, ausgewertet. Die Zustände *belegt* oder *frei* werden dann anhand der Schwellwerte S_{bel} und S_{frei} bestimmt. Es kann eine Entscheidung zwischen diesen beiden Zuständen erzwungen werden, indem beide Schwellwerte auf 0.5 gesetzt werden. Werden für die beiden Schwellwerte unterschiedliche Werte gesetzt, wird zusätzlich der Zustand *unsicher* eingeführt. Die Schwellwerte werden dann anhand der minimalen Anzahl von nötigen Strahlen pro Voxel bestimmt:

- Eine freie Rasterzelle muss in einer Voxelzelle liegen, die von zwei Strahlen durchlaufen wird, in der aber kein Strahl endet.
- Eine belegte Rasterzelle muss in einer Voxelzelle liegen, in der mindestens ein Strahl endet und die höchstens von einem Strahl durchlaufen wird.

Als *unbekannt* werden in sämtlichen Fällen alle Rasterzellen markiert, durch die kein Sichtstrahl führt und in denen kein Sichtstrahl endet.

4.5 Bewertungskriterien

Neben den Sichtbarkeitsabfragen werden weitere Parameter zur Beurteilung des Bauteils aus den rekonstruierten Punkten berechnet. Für alle BF, die aufgrund der Sichtbarkeitsanalyse als *Bauteil möglich* eingestuft wurden, werden die rekonstruierten Punkte mit einem Abstand kleiner l_v vor und mit einem Abstand kleiner l_h hinter der Bauteiloberfläche extrahiert. Vor der BF ist der Bereich, der im Raum vor der Bauteilfläche liegt. Hinter der BF ist der Bereich, der im Volumen des Bauteils liegt. Der Abfragebereich für eine BF ist in Abbildung 4.5 gezeigt. Die Abbildung zeigt ebenfalls das Voxelgitter $\mathfrak{V}$ für die Sichtbarkeitsabfragen sowie das Rastergitter $\mathfrak{R}$ auf der Oberfläche der BF.

Für jede Rasterzelle $\mathfrak{R}_{i,j}$ werden die Belegung sowie der mittlere Punktabstand auf folgende Weise bestimmt:

- Belegung:
  Jede Rasterzelle wird auf Basis der Punktdichte als „belegt“ oder „nicht belegt“ eingestuft. Es ist zwischen dieser Belegung anhand der Punktdichte und der Belegung aus der Sichtbarkeitsanalyse, die mit *belegt* gekennzeichnet ist, zu unterscheiden. Um als „belegt“ zu gelten, müssen für diese Rasterzelle mindestens die Anzahl Punkte S_{Punkte} extrahiert worden sein. Die Anzahl der Punkte berechnet sich aus der Rastergröße l_r (siehe Abschnitt 4.2) und der Filtergröße l_f (siehe Abschnitt 4.1) zu:

$$S_{Punkte} = \left\lfloor \left(\frac{1}{2} \frac{l_r}{l_f} \right)^2 \right\rfloor \tag{4.3}$$

- Mittelwert der Abstände:

$$\mu_{i,j} = \frac{\sum |dl_k|}{n_{Punkte}} \tag{4.4}$$

  wobei n_{Punkte} Punkte in der Rasterzelle vorliegen.

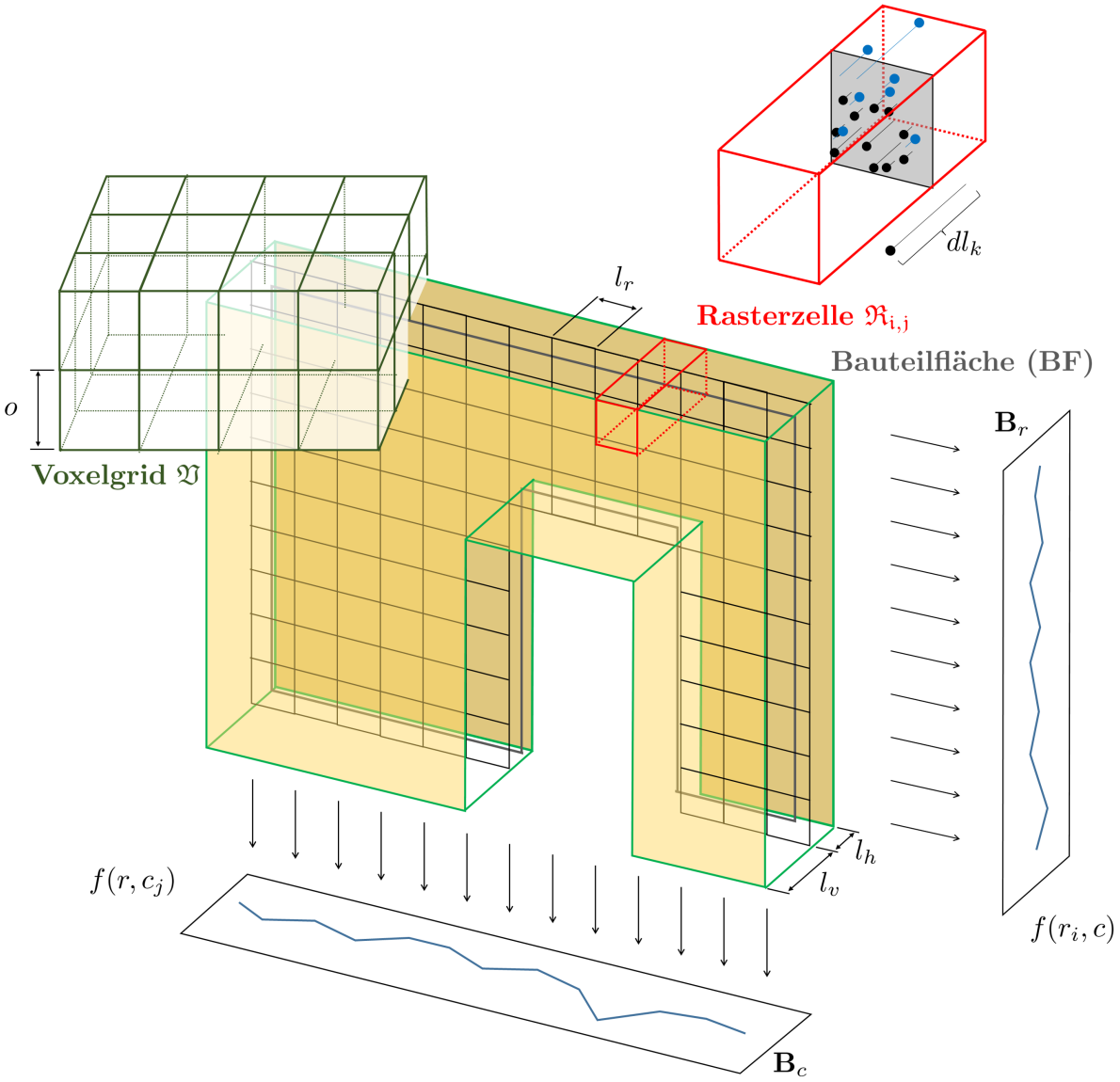


Abbildung 4.5: Rasterzellen, Voxelgitter und Punktextraktion: Für eine Bauteilfläche sind die Rasterzellen mit Pufferzone zur Punktextraktion, das Voxelgitter aus der Sichtbarkeitsanalyse, sowie die Profile in Zeilen- und Spaltenrichtung dargestellt.

Auf Basis der Rasterzellen werden die Profile $f(r_i, c)$ und $f(r, c_i)$ aus den Mittelwerten $\mu_{i,j}$ in Zeilen- und Spaltenrichtung (r,c) sowie die Belegungsrate berechnet:

- Ein Profil für eine Zeile bzw. Spalte wird auf folgende Weise berechnet, wobei nur Zellen berücksichtigt werden, die als „belegt“ gekennzeichnet wurden:

$$f(r_i, c) = \frac{\sum_{j=1}^{n_{Spalten}} \mu_{i,j}}{n_{Spalten,i}} \qquad f(r, c_j) = \frac{\sum_{i=1}^{n_{Zeilen}} \mu_{i,j}}{n_{Zeilen,j}} \tag{4.5}$$

  wobei $n_{Spalten,i}$ die Anzahl der „belegten“ Spalten in Zeile i und $n_{Zeilen,j}$ die Anzahl der „belegten“ Zeilen in Spalte j sind. Die Profile dienen der Beurteilung, wie gut das Bau-

teil durch die Punkte repräsentiert ist. Sie dienen außerdem als Merkmal, um zwischen Schalungsteilen, Bauteilen und Bewehrung unterscheiden zu können, da sich diese, wie in Abbildung 4.3 gezeigt, durch unterschiedliche Verteilung der Punkte entlang der BF auszeichnen. Für jede Bauteilfläche wird aus den Profilwerten für Zeilen- und Spaltenrichtung je ein Profilbild $\mathbf{B}_r$ bzw. $\mathbf{B}_c$ generiert. Die Bilder sind mit der Rastergröße l_b in Richtung senkrecht zur Bauteilfläche gerastert. $\mathbf{B}_r$ hat die Größe $n_{Zeilen} \times (l_v + l_h)/l_b$, $\mathbf{B}_c$ hat die Größe $n_{Spalten} \times (l_v + l_h)/l_b$. Zur Erklärung der Bezeichnungen siehe Abbildungen 4.5 und 4.7. Ein Eintrag in $f(r, c_j)$ und $f(r_i, c)$ wird nur berücksichtigt, wenn er aus mindestens einem Viertel aller möglichen Rasterzellen pro Zeile bzw. pro Spalte berechnet wurde. Die Einträge im Profilbild werden mit der Länge des Profils skaliert, sodass die Summe aller Einträge 1 beträgt, wenn alle Rasterzellen „belegt“ sind. Sind nicht alle Rasterzellen „belegt“ ist der Wert kleiner 1.

- Der Prozentsatz p_{fl} gibt an, wie viele Rasterzellen $\mathfrak{R}$ aufgrund von Formel 4.3 als „belegt“ gekennzeichnet wurden.

Des Weiteren werden aus der Gesamtmenge der extrahierten Punkte einer BF folgende Informationen bestimmt:

- RMS-Fehler (Root Mean Square) und Normalenrichtung aus einer Ebenenanpassung an die extrahierten Punkte. Die Ebenenanpassung wird unter der Verwendung von RANSAC durchgeführt.
- Verteilung der Farbwerte aller Punkte im HSV-Farbraum (Hue = Farbwert, Saturation = Sättigung, Value = Hellwert). Dieses Merkmal dient der Erkennung von Objekten mit auffälliger Farbgebung.

4.6 Ableitung von Bauteilzuständen

Anhand der Sichtbarkeitsanalyse und der Bewertungskriterien werden die Bauteilzustände wie in Abbildung 4.2 gezeigt, abgeleitet. Der Übergang der Bewertung von Rasterzellen zu Bauteilflächen wird in Abschnitt 4.6.1 beschrieben, der Übergang von der Bewertung einzelner BF zur Bewertung des ganzen Bauteils wird in Abschnitt 4.6.2 dargestellt.

4.6.1 Bauteilflächen

Zunächst werden die aus der Sichtbarkeitsanalyse gewonnenen Informationen genutzt, um für jede BF einen Zustand abzuleiten. Dafür wird der Anteil der Rasterzellen mit einem bestimmten Zustand an den gesamten Rasterzellen eines Bauteils bestimmt. Die Werte sind in Tabelle 4.2 als $p^S_{bel,fre,unb,uns}$ bezeichnet und liegen für die vier Zustände *belegt*, *frei*, *unbekannt*, *unsicher* aus der Sichtbarkeitsanalyse vor. Zusätzlich wird der Anteil der Rasterzellen bestimmt, die sowohl als *frei* gekennzeichnet sind, als auch, aufgrund der Punktextraktion nach Formel 4.3, als „belegt“ eingestuft wurden. Diese Rasterzellen werden mit dem Label *Konflikt* gekennzeichnet und ihr Anteil mit p^S_{kon} bezeichnet. Eine BF wird immer als *Konflikt* eingestuft, wenn mehr als S_K Prozent der Rasterzellen einen Konflikt aufweisen. Für diesen Schwellwert wird ein kleiner Wert, jedoch nicht 0, gewählt, da an den Rändern der Bauteile aufgrund der Diskretisierung durch die Raster- und Voxelzellen Konflikte entstehen können. Liegt kein Konflikt vor und ist der Anteil der Rasterzellen eines Zustandes an den gesamten Rasterzellen einer BF größer als der Schwellwert $S_{\mathfrak{R}}$ so wird der BF der entsprechende Zustand (*nicht gebaut / frei*, *unbekannt* oder *unsicher*) zugewiesen. Eine BF kann dann als *Bauteil möglich* eingestuft werden, wenn für diese BF innerhalb der Pufferzone Punkte extrahiert wurden, kein *Konflikt* vorliegt und mindestens $1 - S_{\mathfrak{R}}$ der Rasterzellen als *belegt*

Zustand	Bedingung
Konflikt	$p^S_{kon} > S_K$ oder „Es wurden keine Punkte extrahiert“ und $p^S_{bel} > \max\left(p^S_{fre}, p^S_{unb}, p^S_{uns}\right)$
nicht gebaut / frei	$p^S_{fre} > S_\Re$ oder $p^S_{fre} + p^S_{unb} > S_\Re$ und $p^S_{fre} > p^S_{unb}$
unbekannt	$p^S_{unb} > S_\Re$ oder $p^S_{fre} + p^S_{unb} > S_\Re$ und $p^S_{unb} > p^S_{fre}$
unsicher	$p^S_{fre} + p^S_{unb} + p^S_{uns} > S_\Re$, *falls* $p^S_{unb} + p^S_{fre} < S_\Re$ oder „Es wurden keine Punkte extrahiert“ und $p^S_{bel} < \max\left(p^S_{fre}, p^S_{unb}, p^S_{uns}\right)$
Bauteil möglich	alle anderen Fälle, das heißt: $p^S_{bel} > 1 - S_\Re$ und $p^S_{kon} < S_K$ und „Es wurden Punkte extrahiert“

Tabelle 4.2: Bestimmung der Bauteilflächenzustände: Bedingungen für die Ableitung der BF-Zustände. Neben dem Ergebnis der Sichtbarkeitsanalyse wird zusätzlich berücksichtigt, ob innerhalb der Grenzen $l_h < dl_k < l_v$ Punkte extrahiert werden konnten.

bestimmt wurden. In Tabelle 4.2 sind die Bedingungen für die Ableitung von BF-Zuständen aus den Zuständen der Rasterzellen zusammengefasst.

Jede Bauteilfläche k, die als *Bauteil möglich* eingestuft wurde, wird anhand der in Abschnitt 4.5 genannten Kriterien bewertet. Über die Bestätigung einer BF wird anhand der Kombination der folgenden fünf Bewertungskriterien ($w_1 ... w_5$) entschieden:

w_1: Mittelwert μ aller Punktabstände

w_2: Abweichung Δn der Normalenvektoren $\boldsymbol{n}$ von Bauteilfläche und angepasster Ebene

w_3: RMS der Ebenenanpassung

w_4: Prozentsatz der belegten Rasterzellen p_{fl}

w_5: Bewertung der Profile $f(r_i, c)$ und $f(r, c_j)$

Die aus diesen Bewertungskriterien abgeleiteten Gewichtungen G_i werden wie die Sichtstrahlen bei der Sichtbarkeitsanalyse mit Hilfe der Log-Odd-Notation kombiniert (vgl. Formel 4.1 und 4.2):

$$\begin{aligned} L(k|G_{1:i}) &= \max\left(\min\left(L(k|G_{1:i-1}) + L(n|G_i), cl_{max}\right), cl_{min}\right) \qquad i = 1...5 \\ \text{mit} \quad L(k) &= \ln\left(\frac{P(k)}{1-P(k)}\right) \text{ und } P(k) = \left(\frac{1}{\exp\left(L(k)\right)} + 1\right)^{-1} \end{aligned} \tag{4.6}$$

Die Gewichte werden für die ersten vier Kriterien anhand der in Formel 4.7 gezeigten Bewertungsfunktion ermittelt. Diese Gewichtungsfunktion liefert für jedes Kriterium ein Gewicht G_i im Bereich [0...1] für die aus den extrahierten Punkten ermittelten Werte w_1 bis w_4. Dazu werden die Maximal- und Minimalwerte $P_{w,max}$ und $P_{w,min}$, sowie ein Grenzwert $g_{w_1} ... g_{w_4}$, bei dem die Funktion den Wert 0.5 annimmt, festgelegt. Werte größer 0.5 unterstützen die Annahme, dass das Bauteil existiert, Werte kleiner 0.5 sprechen dagegen. Zusätzlich gibt es einen Additionsterm $k_{min,i}$, der festlegt, ab wann $P_{w,min}$ angenommen wird. Die Bewertungsfunktion aus Formel 4.7

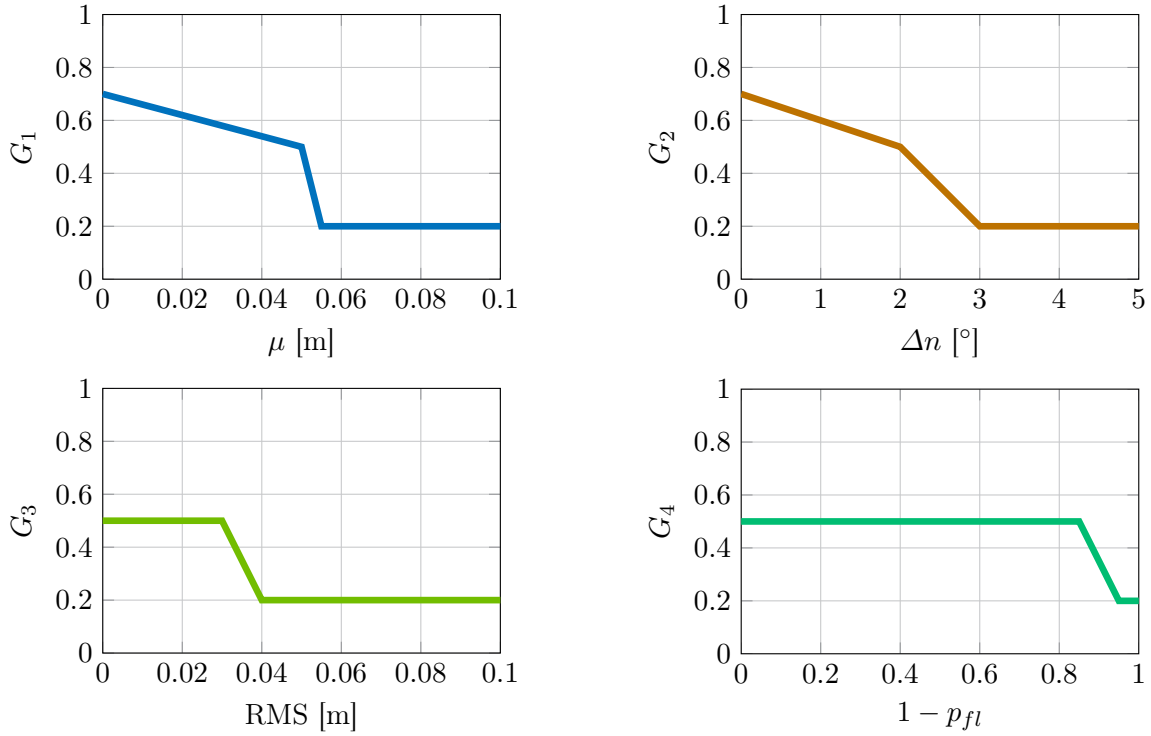


Abbildung 4.6: Bewertungsfunktionen für die Kriterien w_1 bis w_4

ist folgendermaßen aufgebaut: Im Annahmebereich bis zum Grenzwert g_w fallen die Werte für G linear von $P_{w,max}$ auf 0.5, im anschließenden Ablehnungsbereich fallen die Werte für G bis zur Stelle $g_w + k_{min}$ auf den Wert $P_{w,min}$. Im Bereich ab $g_w + k_{min}$ ist der Wert für G immer $P_{w,min}$.

$$G(w_i, g_w) = \begin{cases} w_i \cdot m_1 + P_{w,max} & \text{falls: } w_i < g_{w_i} \\ w_i \cdot m_2 + 0.5 - m_2 \cdot g_{w_i} & \text{falls: } g_{w_i} < w_i < g_{w_i} + k_{min,i} \\ P_{w,min} & \text{falls: } w_i > g_{w_i} + k_{min,i} \end{cases} \qquad i = 1...4 \tag{4.7}$$

$$\text{mit} \quad m_1 = \frac{0.5 - P_{w,max}}{g_w} \quad m_2 = \frac{0.5 - P_{w,min}}{k_{min,i}} \tag{4.8}$$

Der Verlauf der vier Gewichtungsfunktionen für die Kriterien w_1 bis w_4 wird in Abbildung 4.6 dargestellt. Die dabei verwendeten Parameter sind in Tabelle 4.3 aufgeführt. Nur die Bewertungsfunktionen w_1 und w_2 können dazu beitragen, dass ein Bauteil als erkannt angenommen wird. Es wird modelliert, dass die extrahierten Punkte um so stärker für das Vorhandensein der entsprechenden BF sprechen, je kleiner die Abweichungen von der Modellebene in Abstand und Normalenrichtung sind. Ein großer RMS-Wert w_3 bzw. eine geringe Abdeckung w_4 sprechen gegen das Vorhandensein des BF. Jedoch kann auch ein kleiner RMS-Wert bzw. eine große Abdeckung der Fläche bei anderen Objekten auftreten, weshalb der maximale Wert dieser Kriterien 0.5 nicht überschreiten kann.

Zur Wahl der Parameter ist Folgendes anzumerken: Da hier nur das Vorhandensein eines Bauteils geprüft wird, nicht aber kleine geometrische Abweichungen erkannt werden sollen, werden die erlaubten Abweichungen größer als die laut DIN-Norm für Toleranzen im Hochbau [DIN 18202, 2013] für Maßabweichungen zulässigen Toleranzen gewählt. Dies ist auch der Tatsache geschuldet, dass die Rekonstruktionsgenauigkeit sowie die Koregistrierungsgenauigkeit (siehe Abschnitt 7.1) es nicht ermöglichen, Abweichungen im Bereich 1 cm und kleiner zu erkennen oder zu überprüfen.

	w_1	w_2	w_3	w_4
g_{w_i}	5 cm	2 °	3 cm	$1-S_{p_{fl}}$
$k_{min,i}$	0.5 cm	1 °	1 cm	0.1
$P_{w,max}$	0.7	0.7	0.5	0.5
$P_{w,min}$	0.2	0.2	0.2	0.2

Tabelle 4.3: Parameter der Bewertungsfunktionen

Das Kriterium w_5, die Profile in x- und y-Richtung der BF, wird nicht anhand einer Gewichtungsfunktion ausgewertet. Um den Wert G_5 zu bestimmen, erfolgt stattdessen ein Korrelation mit den drei in Abbildung 4.7 gezeigten Templates. Template 1 (T1) repräsentiert den Bereich innerhalb des Bauteils. Liegen nur dort Punkte vor, ist das Vorhandensein von Bewehrungsstäben möglich. Template 2 (T2) repräsentiert den Bereich um die Modellebene. Es steht also für das Vorhandensein des Bauteils. Template 3 (T3) steht für Objekte im Bereich vor dem Bauteil. Liegen dort Punkte vor, ist das Vorhandensein eines Schalungsteils möglich. Die Größe der Bereiche wird in Abhängigkeit des Toleranzwertes für den Abstand g_{w_1} gewählt.

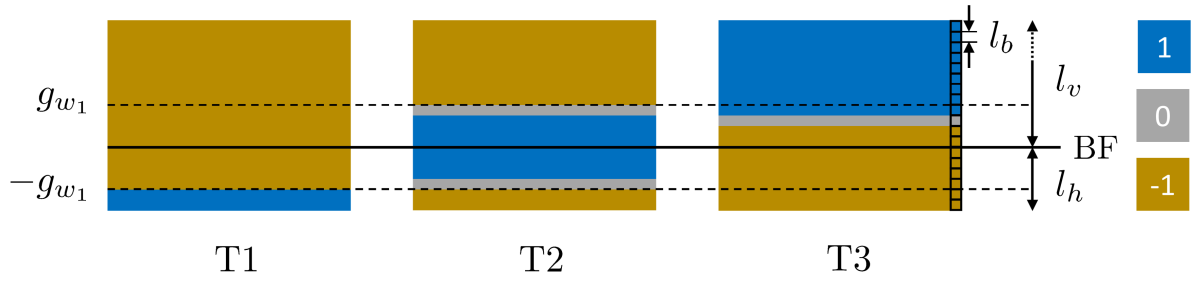


Abbildung 4.7: Templates zur Bewertung der Quer- und Längsprofile (Bewertungskriterium w_5) in Abhängigkeit vom Grenzwert für den Abstand g_{w_1}. Die Abstände l_v und l_h zeigen die Größe des Pufferbereichs (siehe Abbildung 4.5). Die Rastergröße l_b entspricht der Rastergröße von $\mathbf{B}_r$ und $\mathbf{B}_c$.

Es werden nun alle Profile mit einer Mindestlänge von l_{prof} mit den Templates korreliert. Die Mindestlänge ist notwendig, da kurze Profile nur unzuverlässig bewertet werden können. Grund dafür ist die dann geringe Anzahl von Rasterzellen, die zur Bewertung herangezogen werden können. Diese weisen außerdem jeweils ein höheres Gewicht auf, denn je kürzer das Profil ist, desto höher ist die Gewichtung eines einzelnen Profilelements. Hat nur eines der beiden Profile einer BF eine ausreichende Länge, wird dieses nur verwendet, solange das kürzere Profil mindestens die Länge $l_{prof}/2$ hat. Dies hat den Hintergrund, dass die Annahmen für die Profilbewertung für flächige Bauteile getroffen wurden. Mit dieser Begrenzung wird sichergestellt, dass keine linienförmigen Bauteile auf diese Weise bewertet werden. Zur Bewertung selber wird aber in diesem Fall ausschließlich das längere Profil herangezogen. Der maximale Wert 1 wird erreicht, wenn das Profil vollständig mit Einträgen besetzt ist und die Einträge alle im Annahmebereich eines der Templates liegen. Im Annahmebereich hat das Template nur Einträge gleich 1 (siehe Abbildung 4.7). Die Profile werden anschließend anhand des Templates, das den größten Wert aufweist, kategorisiert. Haben T1 oder T3 den größten Wert, so wird der Wert G_5 auf 0.5 gesetzt. Das Profil wird so bei der Berechnung des Bestätigungswertes $P(k)$ als neutral angesehen und $P(k)$ nur aus den Kriterien w_1 bis w_4 bestimmt. Hat T2 den größten Wert, so wird eine Bewehrung bzw. Schalung ausgeschlossen. Das Ergebnis der Profilbewertung wird dann vom Wertebereich [-1 1]

auf den Wertebereich [0 1] der Gewichtungsfunktionen für die Bewertungskriterien w_1 bis w_4 umskaliert. Dieser Wert wird als G_5 in Formel 4.6 eingeführt, um eine finale Bewertung aus allen Kriterien zu bestimmen. Man erhält den finalen Wert $P(k)$ für jede BF k, die in der Sichtbarkeitsanalyse als *Bauteil möglich* eingestuft wurde. Je höher der Wert, desto stärker sprechen die oben eingeführten Kriterien für das Vorliegen eines Bauteils. Im Folgenden werden vier Klassen der Bestätigungsstärke unterschieden:

A $P(k) > 0.85$ Hierbei wurde das Bauteil auch durch den Profiltest bestätigt, ansonsten kann dieser Wert nicht erreicht werden

B $0.6 < P(k) < 0.85$ Bestätigung des Bauteils

C $0.4 < P(k) < 0.6$ Mögliche Bestätigung des Bauteils, muss bei der Kombination der BF für ein ganzes Bauteil durch weitere erkannte BF bestätigt werden

D $P(k) < 0.4$ Bauteil nicht bestätigt

Hat bei der Profilbewertung T1 den höchsten Wert, erhält die BF den Zustand *Bewehrung*, solange die Bestätigung in Klasse C oder D liegt. Hat T3 den größten Wert, wird für diese BF geprüft, ob ein Schalungsteil vorliegt. Auch dies erfolgt nur, wenn die Bestätigung in Klasse C oder D liegt.

Zur Prüfung, ob wirklich ein Schalungsteil vorliegt, werden die Farbinformationen aus den Bildern bzw. den daraus abgeleiteten 3D-Punkten herangezogen. Schalungsteile zeichnen sich häufig durch eine orange Farbgebung aus, die sie von den grauen Betonbauteilen abgrenzen. Das hier vorgestellte Merkmal, ist somit nur einsetzbar, wenn dieser farbliche Unterschied, wie beim reinen Stahlbetonbau, gewährleistet ist. Werden z.B. Wände in Ziegelbauweise erstellt, müssen diese von der Betrachtung ausgeschlossen werden. Diese Information kann aus dem BIM entnommen werden.

Die Farbwerte der extrahierten Punkte einer BF, die möglicherweise ein Schalungsteil beinhaltet, werden zunächst vom RGB- in den HSV-Farbraum transformiert. Verwendet werden nur der Farbwert und die Sättigung. Es wird ein Merkmalsraum HSD aus diesen beiden Werten und dem Punktabstand *dl* gebildet (siehe Abbildung 4.8a). Zur Kontrolle, ob ein Schalungsteil vorliegt, wird überprüft, ob der Bereich vor dem Bauteil, von +1 cm bis +15 cm, im roten Bereich der Farbskala

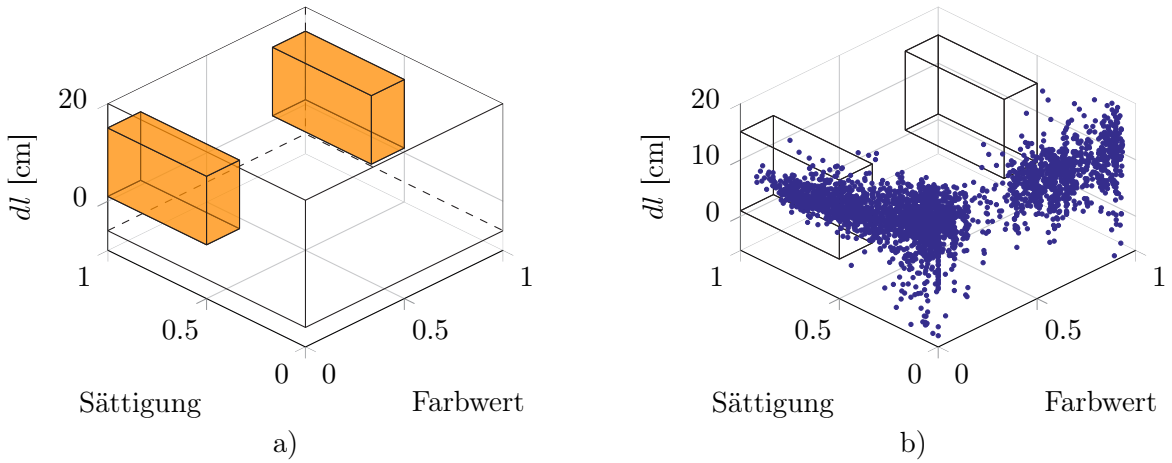


Abbildung 4.8: HSD-Merkmalsraum (Sättigung, Farbwert, Punktdistanz), a) orangener Bereich zeigt den Annahmebereich für Schalung, b) Verteilung für ein reales Schalungsteil

mit mindestens einer Sättigung von 0.5 belegt ist. Der rote Bereich hat im HSV-Farbraum einen Farbwert kleiner 1/6 oder größer 5/6. Der entsprechende Bereich ist in der Abbildung orange markiert. In diesem müssen mindestens 10 % der Punkte liegen, damit von einer Schalung ausgegangen werden kann. In Abbildung 4.8b ist die Belegung des Merkmalsraums für ein reales Schalungsteil gezeigt.

4.6.2 Gesamtes Bauteil

Jeder BF ist im vorherigen Schritt ein Zustand zugeordnet worden. Die gegebenenfalls voneinander abweichenden Zustände der einzelnen BF eines Bauteils müssen nun für das gesamte Bauteil zu einem endgültigen Bauteilzustand zusammengeführt werden. Die möglichen Kombinationen der Zustände wurden in Abschnitt 4.3 beschrieben (siehe Abbildung 4.2 und Tabelle 4.1). Abbildung 4.9 zeigt das dreistufige Vorgehen zur Prüfung bezüglich der verschiedenen Kombinationen eines Bauteils.

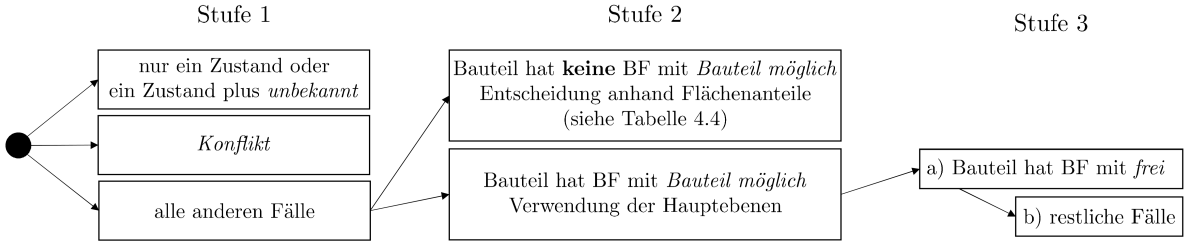


Abbildung 4.9: Bestimmung des Bauteilzustandes als Kombination aus den Zuständen der BF

Stufe 1 ist die Zuweisung von Bauteilzuständen in den folgenden einfachen Fällen:

- Alle BF eines Bauteils weisen den gleichen Zustand auf. Dem Bauteil wird genau dieser Zustand zugewiesen.
- Alle BF weisen den Zustand *unbekannt* und genau einen weiteren Zustand auf. Dem Bauteil wird dieser weitere Zustand zugewiesen.
- Weist eine BF den Status *Konflikt* auf und deckt dabei mindestens 5 % der Fläche des Bauteils ab, so wird dem Bauteil der Zustand *Konflikt* zugewiesen.

In Stufe 2 wird geprüft, ob BF beteiligt sind, die als *Bauteil möglich* eingestuft wurden. Ist dies nicht der Fall, sondern treten nur Kombinationen aus *unbekannt*, *frei* und *unsicher* auf, werden die Flächen $F_{Zustand}$ jedes Zustandes herangezogen. Anhand dieser wird, wie in Tabelle 4.4 gezeigt, entschieden. Es wird dem Bauteil der Zustand zugewiesen, der den größten Flächenanteil aufweist, solange die Fläche des Zustandes größer ist als die Fläche der anderen beiden Zustände zusammen, ansonsten gilt das Bauteil als *unsicher*. Da ein nicht vorhandenes Bauteil auch teilweise *unbekannt* sein kann, wird auch erlaubt, dass dem Bauteil der Zustand mit dem größten Flächenanteil zugewiesen wird, sofern die Flächen mit den Zuständen *frei* und *unbekannt* jeweils einzeln größer sind als die Fläche mit dem Status *unsicher*.

Sind BF mit *Bauteil möglich* beteiligt, werden Hauptebenen bestimmt. Dies sind die BF mit dem größten Flächenanteil, die charakteristisch für ein Bauteil sind. Kann bei der Betrachtung aller BF eines Bauteils kein eindeutiges Ergebnis abgeleitet werden, wird auf Basis dieser Hauptebenen ein Zustand bestimmt. Um die Hauptebenen zu bestimmen, werden die BF absteigend nach ihrer

falls	und falls	dann
$F_{frei} > F_{unbekannt} + F_{unsicher}$		*frei*
$F_{unbekannt} > F_{frei} + F_{unsicher}$		*unbekannt*
$F_{frei} > F_{unsicher} \wedge F_{unbekannt} > F_{unsicher}$	$F_{frei} > F_{unbekannt}$	*frei*
	$F_{unbekannt} > F_{frei}$	*unbekannt*
sonst		*unsicher*

Tabelle 4.4: Entscheidungsregeln für nicht bestätigte Bauteile anhand der Fläche

Fläche F sortiert. Anschließend wird die Differenz zur folgenden Fläche $\Delta F_i = F_i - F_{i+1}$ und die Gesamtfläche bis zur i-ten Fläche $F_{ges,i}$ berechnet. Die BF mit der größten Fläche ist die erste Hauptebene. Anschließend werden so lange die nächstkleineren BF hinzugefügt, bis die folgenden drei Bedingungen zutreffen:

$$\Delta F_i \neq 0 \quad \wedge \quad F_{ges,i} > 2/3 \cdot F_{ges} \quad \wedge \quad F_{i+1} < 1/10 \cdot F_{ges,i} \tag{4.9}$$

Treffen bei Ebene i alle drei Bedingungen zu, wird diese als letzte den Hauptebenen zugeordnet, alle weiteren Ebenen werden nicht weiter berücksichtigt. Außerdem werden die Ebenen bestimmt, die parallel zueinander sind und sich gegenüberliegen. Zusätzlich wird überprüft, ob es sich um vertikale oder horizontale Ebenen handelt. Die Entscheidung erfolgt anhand der z-Komponente des Normalenvektors. Weicht der Normalenvektor mehr als 45° von der Horizontalen ab, so wird das Bauteil als vertikal eingestuft. Bei einem normierten Normalenvektor gilt folglich für die z-Komponente einer vertikalen Ebene: $-0.707 < n_z < 0.707$. Horizontale Ebenen werden zusätzlich aufgrund ihrer Ausrichtung unterschieden, also ob es sich um eine Bodenfläche, für den Fall $n_z < -0.707$, oder um eine Deckenfläche, für den Fall $n_z > 0.707$, handelt.

Als Nächstes werden in Stufe 3a) die Bauteile geprüft, die sowohl den Status *frei* als auch einen der Status *bestätigt* oder *Schalung* oder *Bewehrung* aufweisen. Hier muss überprüft werden, ob einer der in Tabelle 4.1 definierten Sonderfälle vorliegt. Ist die freie Fläche F_{frei} sehr groß, d.h. über 90 % der Gesamtfläche, so wird davon ausgegangen, dass die nicht als *frei* eingestuften BF zu anderen Objekten gehören, und das Bauteil wird als *nicht gebaut* eingestuft. Ist nur eine einzige BF als *bestätigt* eingestuft und ist diese aus Kategorie C, entsprechend der Eingruppierung aus Abschnitt 4.6.1, so wird nach der Bewertung gemäß Tabelle 4.4 vorgegangen. Für alle weiteren Fälle wird zwischen vertikalen Elementen, z.B. Säulen, und horizontalen Elementen, z.B. Deckenplatten, unterschieden. Dafür wird überprüft, welcher der beiden Kategorien die Hauptebenen zugeordnet sind. In den meisten Fällen sind die Hauptebenen nur einer Kategorie zugeordnet, sodass eine eindeutige Zuweisung erfolgen kann. Für Deckenflächen wird geprüft, ob der Fall o) aus Abbildung 4.3 zutrifft, bei dem die obere Deckenfläche als *frei* markiert ist. Alternativ zu dem dort gezeigten Fall mit *gebaut* kann die untere Fläche auch *Schalung* oder *Bewehrung* sein. Tritt diese Kombination eindeutig bei allen Boden- und Deckflächen oder für die Hauptebenen auf, wird das Bauteil entsprechend als *Schalung* oder *Schalung und Bewehrung* eingestuft. Befinden sich Flächen *frei* und gleichzeitig *bestätigt* an Boden oder Decke wird das Bauteil als *Konflikt* markiert. Bei den vertikalen Flächen wird anhand der größten Hauptebene und der ihr gegenüberliegenden Fläche entschieden. Dabei wird nach den Fällen g) und i) aus Abbildung 4.3 für *Schalung* geprüft. Außerdem kann *frei* auch in Kombination mit *Bewehrung* auftreten, dann wird auf *Bewehrung* entschieden.

Zuletzt werden in Stufe 3b) die verbleibenden Fälle anhand der Hauptebenen geprüft. Nicht mehr auftreten können Fälle mit dem Zustand *frei*, sowie alle Fälle, in denen keine BF *bestätigt*, *Schalung* oder *Bewehrung* beteiligt ist. Das heißt, es bleiben die Fälle aus Kombinationen mit mindestens einer BF der drei zuletzt genannten Zustände sowie eventuell zusätzliche BF *unbekannt*

und/oder *unsicher*. In diesen Fällen wird je nach Kombination der drei Zustände *bestätigt*, *Schalung* oder *Bewehrung*, auf einen dieser Zustände oder einer Mischform aus diesen, entschieden.

Nach diesem Schritt ist jedem Bauteil ein Zustand zugewiesen worden. Im folgenden Kapitel werden die drei Testbaustellen vorgestellt, auf denen diese Vorgehensweise getestet wurde.

5 Experimente

5.1 Modelldaten

Im Folgenden werden drei Testszenarien vorgestellt, deren as-built Informationen in den, in diesem Abschnitt gezeigten Gebäudemodellen gespeichert sind. Die Modelle umfassen alle Elemente des Rohbaus, d.h. die Stahlbetonwände, sowie Trockenbauelemente. Nicht enthalten sind Ausbauelemente wie Fenster, Türen oder Leitungen. Alle Elemente sind über ihren IFC-Identifikator mit dem Prozessplan verbunden, sodass für jeden beliebigen Zeitpunkt das entsprechende as-planned-Modell generiert werden kann. Abbildung 5.1 zeigt das im Zuge des DFG-Projekts [DFG, 2012] entwickelte Programm, in dem Modell, Bauteilliste, Prozessplan, die Bilder sowie die Ergebnisse der Baufortschrittskontrolle visualisiert werden können. Details zu diesem *progressTrack Viewer* genannten Programm sind u.a. in Braun et al. [2016a] zu finden.

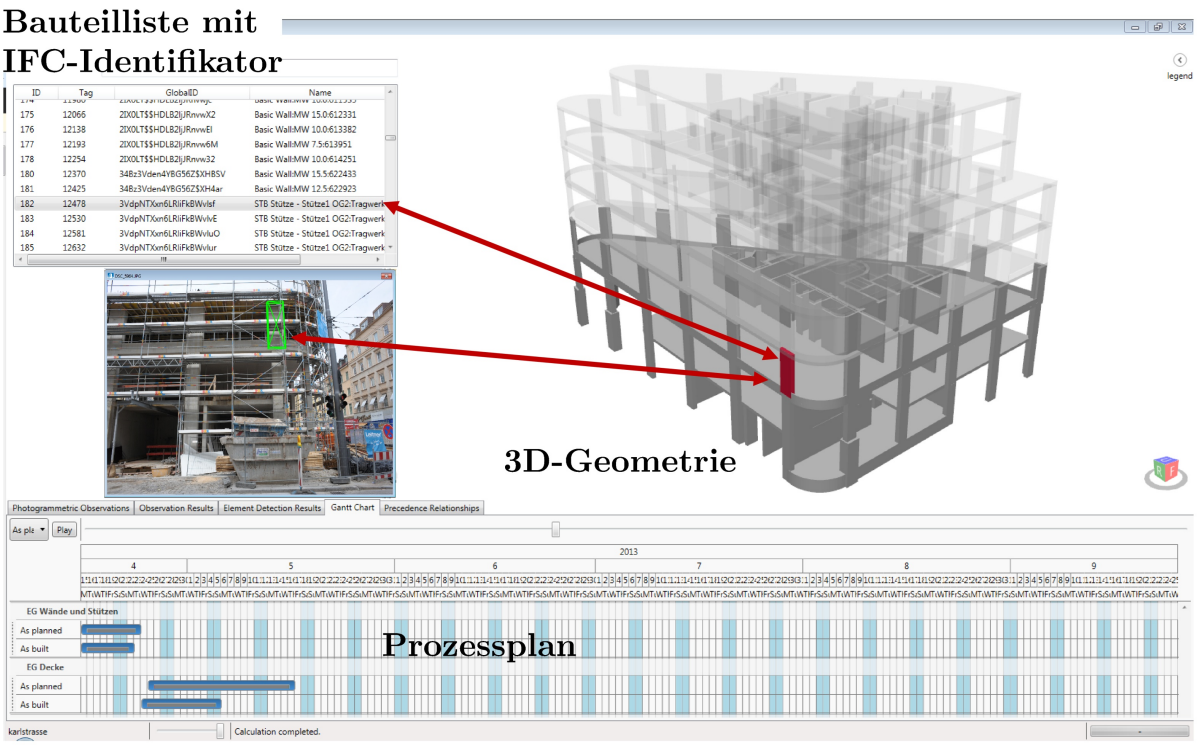


Abbildung 5.1: Building Information Model mit 3D-Modell, Prozessplan, Bauteilliste und Fenster mit Rückprojektion des gewählten Bauteils in ein orientiertes Bild für $\mathcal{T}^{KS}$ im *progressTrack Viewer* (siehe auch Braun et al. [2016b,a]).

5.1.1 Testszenario 1 (KS)

Das in Abbildung 5.2 gezeigte Modell Karlstraße (KS) für $\mathfrak{T}^{KS}$ umfasst 661 Bauteile, die in 6218 Bauteilflächen und 19186 Dreiecke aufgeteilt werden.

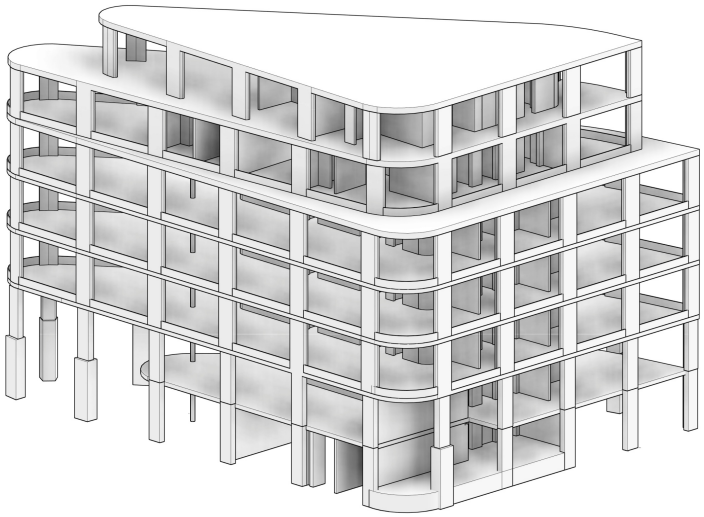


Abbildung 5.2: Modell KS für $\mathfrak{T}^{KS}$

5.1.2 Testszenario 2 (HFK)

Das in Abbildung 5.3 gezeigte Modell Haus für Kinder (HFK) für $\mathfrak{T}^{HFK}$ umfasst 285 Bauteile, die in 4558 Bauteilflächen und 15622 Dreiecke aufgeteilt werden.

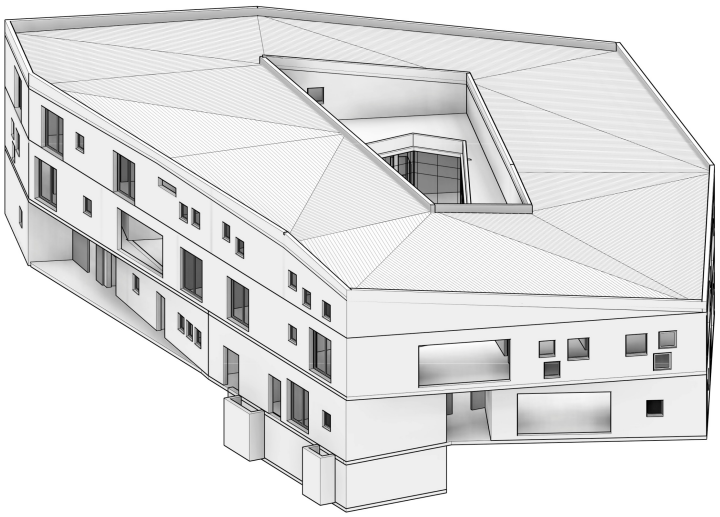


Abbildung 5.3: Modell HFK für $\mathfrak{T}^{HFK}$

5.1.3 Testszenario 3 (TTUM)

Das in Abbildung 5.4 gezeigte Modell TranslaTUM (TTUM) für $\mathfrak{T}^{TTUM}$ umfasst 1319 Bauteile, davon 521 in den 3 Kellergeschossen, die in 24282 Bauteilflächen und 76782 Dreiecke aufgeteilt werden.

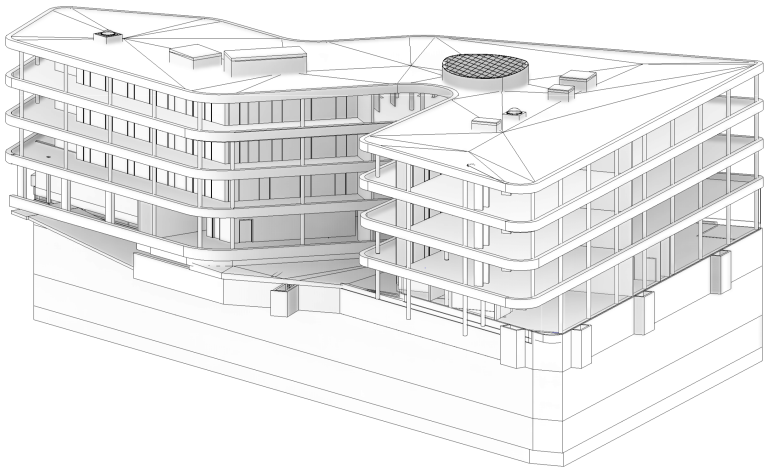


Abbildung 5.4: Modell TTUM für $\mathcal{T}^{TTUM}$

5.2 Bilddaten

5.2.1 Testszenario 1 (KS)

Aufnahmesystem

In diesem Testszenario wurde eine handgetragene Spiegelreflexkamera Nikon D3 (c_k = 24 mm, Sensorgröße 36 x 24 mm, 4256 x 2832 Pixel) verwendet.

Bilddaten

Tabelle 5.1 gibt eine Übersicht über die Aufnahmezeitpunkte mit Anzahl der Bilder, die jeweils von der Straßenebene, vom Kran und von anderen erhöhten Aufnahmepositionen gemacht wurden. Außerdem ist in der Tabelle die Aufnahmedauer und der beobachtete Bauabschnitt angegeben. In Abbildung 5.5 wird für fünf der Aufnahmezeitpunkte jeweils ein Übersichtsbild gezeigt. Eine typische Kameraanordnung ist für den Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ in Abbildung 5.6 dargestellt.

Datum	Anzahl Bilder (Str. / Kran / erhöht)	Aufnahmedauer in min (Str. / Kran / erhöht)	Bauphase	Name
15.05.2013	130 / 43 / 62 (2)	15 / 20 / 25	1. Obergeschoss	$\mathcal{A}^{KS}_{0515}$
12.06.2013	22 / 34 / 15 (1)	5 / 20 / 10	2. Obergeschoss	$\mathcal{A}^{KS}_{0612}$
27.06.2013	35 / 26 / 19 (3)	10 / 20 / 15	3. Obergeschoss	$\mathcal{A}^{KS}_{0627}$
17.07.2013	36 / 19 / 5 (1)	15 / 20 / 10	3. Obergeschoss (Decke)	$\mathcal{A}^{KS}_{0717}$
06.08.2013	48 / 17 / 17 (3)	15 / 15 / 20	4. Obergeschoss (Decke)	$\mathcal{A}^{KS}_{0806}$
04.09.2013	50 / 16 / 9 (1)	15 / 20 / 10	6. Obergeschoss	$\mathcal{A}^{KS}_{0904}$

Tabelle 5.1: Aufnahmezeitpunkte in $\mathcal{T}^{KS}$. Die Anzahl der Bilder und die Aufnahmedauer sind einzeln für die Aufnahmen aus der Umrundung der Baustelle auf Straßenebene (Str.), vom Kran sowie von anderen erhöhten Aufnahmepositionen angegeben. Der Wert in Klammern hinter der Bildanzahl für die erhöhten Positionen gibt die Anzahl verschiedener Aufnahmeorte an.



15. Mai 2013



12. Juni 2013



27. Juni 2013



17. Juli 2013



6. August 2013

Abbildung 5.5: Aufnahmen von $\mathcal{T}^{KS}$

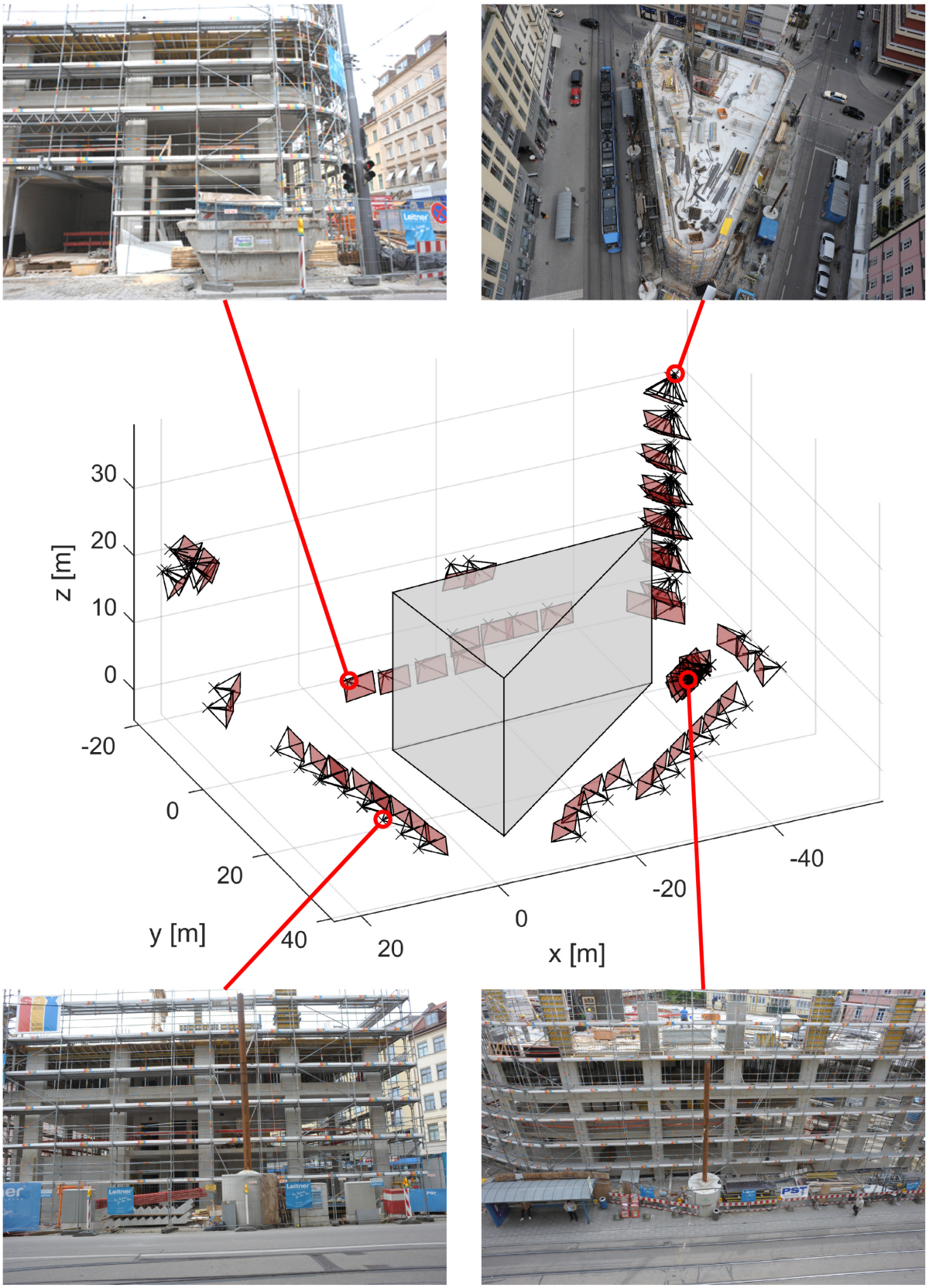


Abbildung 5.6: Kameraanordnung an $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$. Der graue Block repräsentiert ein Grobmodell des fertigen Gebäudes.

5.2.2 Testszenario 2 (HFK)

Aufnahmesystem

Das Aufnahmesystem auf dieser Baustelle war eine UAV-getragene Kamera Sony Nex-7 (c_k = 18 mm, Sensorgröße 23.5 x 15.6 mm, 6000 x 4000 Pixel). Das UAV im Einsatz an $\mathcal{A}^{HFK}_{0226}$ zeigt Abbildung 5.7.



a) b)

Abbildung 5.7: UAV-Erfassung, a) Kranstellung, b) UAV vor Gebäude bei Schrägsichtaufnahme

Bilddaten

Tabelle 5.2 gibt eine Übersicht über die Aufnahmezeitpunkte mit Anzahl der Bilder, die Flugdauer und den beobachteten Bauabschnitt. Die Zeiten umfassen die Flugdauer, ohne die Zeiten für Flugvorbereitungen, wie Einbau des Akkus oder Prüfung des Fluggerätes. Von der Flugdauer entfallen ca. 2 Minuten auf den Start- und Landevorgang, die nicht für die eigentliche Bilderfassung genutzt werden können. Für einen Akkuwechsel zwischen den Flügen sind ca. 3 Minuten anzusetzen. Hinzu kommt ggf. die Zeit für einen Wechsel des Start- und Landepunkts. Die Nadirflüge erfolgten jeweils in einer kurzen Baupause, bei der, wie in Abbildung 5.7a zu erkennen, die Kräne parallel zum Flugpfad ausgerichtet wurden. Die Schrägsichtaufnahmen folgten anschließend, da die Flüge außerhalb des aktiven Bereichs der Kranbewegung stattfanden.

In Abbildung 5.8 wird für alle fünf Aufnahmezeitpunkte jeweils ein Übersichtsbild gezeigt. Eine typische Kameraanordnung ist für den Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}^{HFK}_{1212}$ in Abbildung 5.9 dargestellt.

Datum	Anzahl Bilder Nadir / Schrägsicht	Anzahl Flüge	Flugdauer in min	Bauphase	Name
20.10.2014	49 / 54	3	25	Erdgeschoss	$\mathcal{A}^{HFK}_{1020}$
20.11.2014	63 / 28	3	21	1.Obergeschoss	$\mathcal{A}^{HFK}_{1120}$
12.12.2014	68 / 42	4	30	2.Obergeschoss	$\mathcal{A}^{HFK}_{1212}$
16.01.2015	67 / 45	4	29	Dach	$\mathcal{A}^{HFK}_{0116}$
26.02.2015	77 / 31	3	28	Rohbau abgeschlossen	$\mathcal{A}^{HFK}_{0226}$

Tabelle 5.2: Aufnahmezeitpunkte in $\mathcal{T}^{HFK}$



20. Oktober 2014



20. November 2014



12. Dezember 2014



16. Januar 2015



26. Februar 2015

Abbildung 5.8: Aufnahmen von $\mathcal{T}^{HFK}$

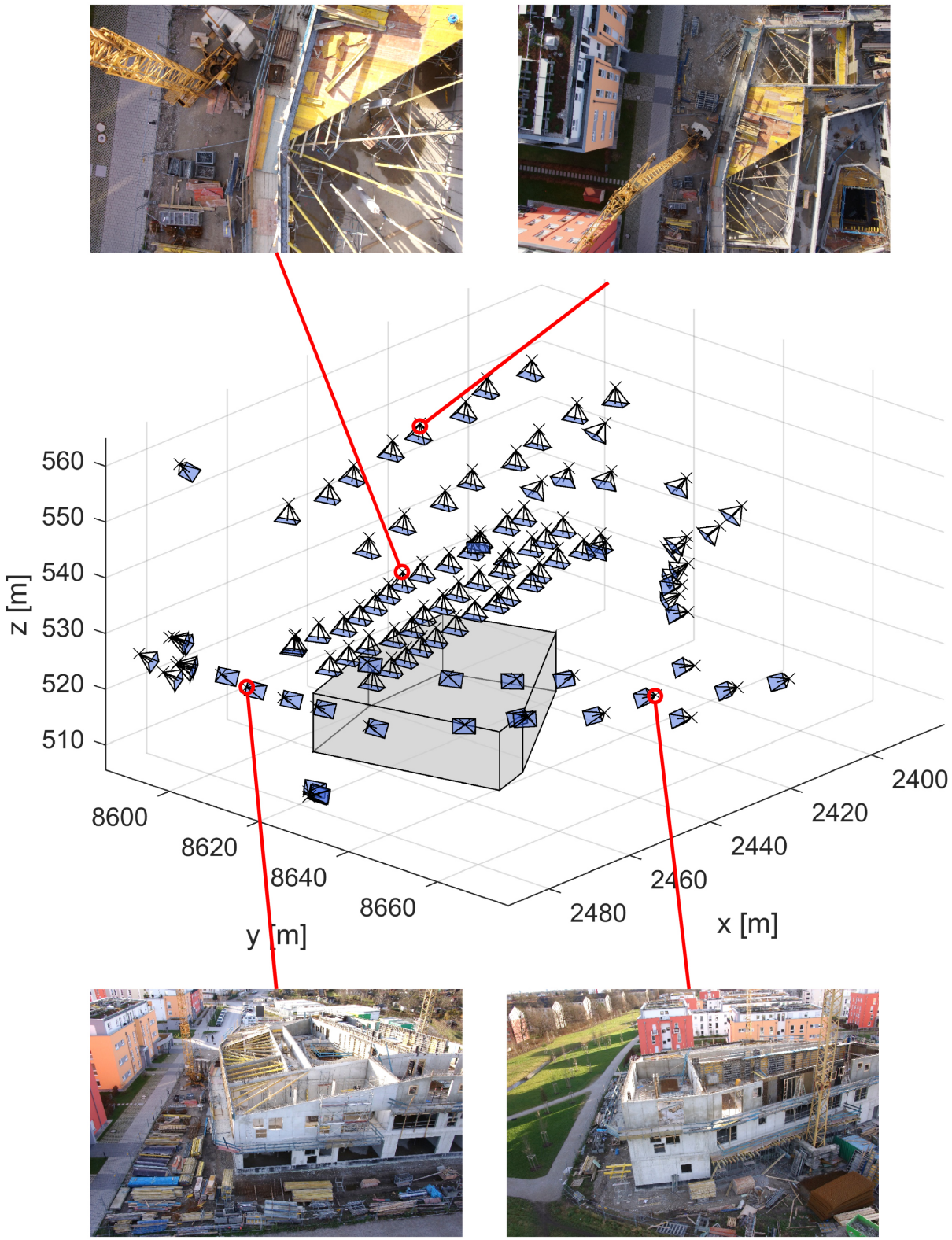


Abbildung 5.9: Kameraanordnung an $\mathcal{A}_{1212}^{HFK}$. Der graue Block repräsentiert ein Grobmodell des fertigen Gebäudes.

5.2.3 Testszenario 3 (TTUM)

Aufnahmesystem

Für die Krankameras musste ein System gewählt werden, das dauerhaft bei allen Wetterbedingungen funktionstüchtig ist. Außerdem muss eine Möglichkeit zur Datenübertragung der Bilder gegeben sein, und die Kameras müssen mit Strom versorgt werden. Die Grundkomponente der verwendeten Krankameras ist ein wasserdichtes Gehäuse, in dem sich ein Einplatinencomputer befindet. Dieser ist über die CSI-Schnittstelle (Camera Serial Interface) mit dem Kameramodul verbunden. Zur Stromversorgung ist eine 12 V Versorgung notwendig, die über die Versorgung der Krankabine sichergestellt wird. Zum Ansprechen und zur Steuerung der Kamera ist eine Verbindung zum Computer über ein Netzwerkkabel notwendig. Dieses kann auch zur Bilddatenübermittlung verwendet werden. Dafür muss direkt am Kran eine Kabelverbindung hergestellt werden. Alternativ erfolgte eine Datenübertragung per Mobilfunk. Dafür ist ein LTE-Stick mit dem Computer verbunden. Über die mobile Internetverbindung können die Bilder auf einen Server hochgeladen werden und sind so überall über das Internet abrufbar. Bereits zur Überwachung des Aushubs auf dieser Baustelle sind Kameras verwendet worden, die Details hierzu sind in Bügler et al. [2017] zu finden.

Die Kameras sind mit einem Abstand von $b = 8\,\text{m}$ (siehe Abbildung 5.10) am Ausleger des Krans befestigt. Die Konfiguration entspricht der Darstellung in Abbildung 3.2 III. Die Kameras ($c_k = 3.6\,\text{mm}$, Sensorgröße: $3.9\,\text{x}\,2.9\,\text{mm}$, $2592\,\text{x}\,1944$ Pixel) wurden während der Errichtung des Krans angebracht. Der Ausleger lag komplett montiert in der Baugrube und war zugänglich, während der Turm aufgebaut wurde. In dieser Zeit wurden die Kameras montiert und die Strom- und Netzwerkkabel zum Kranmittelpunkt gelegt. Anschließend wurde der Ausleger mit den montierten Kameras mit einem Autokran auf den Turm gehoben (siehe Abbildung 5.10c).

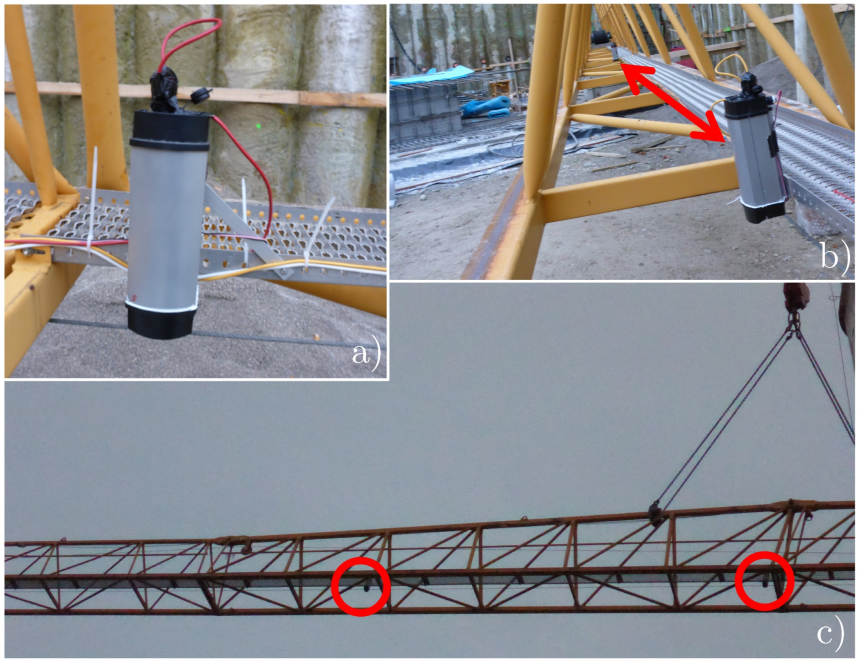


Abbildung 5.10: Befestigung der Krankameras: a) Befestigung der Kamera am Trittbrett; b) Ausleger in der Baugrube, der Pfeil zeigt die Basislinie, die die beiden Kameras bilden; c) Anheben des Auslegers mit einem Autokran zur Montage am Kranturm, die beide Kameras sind mit roten Kreisen gekennzeichnet.

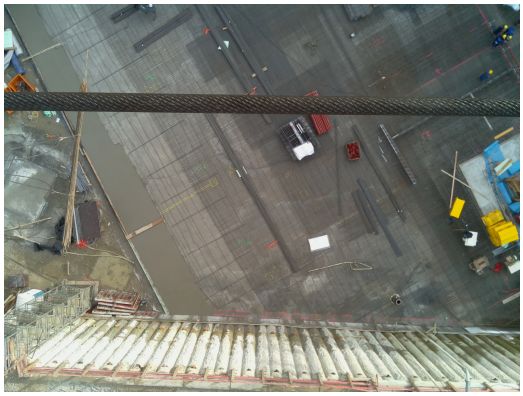
Bilddaten

Eine Übersicht über die Aufnahmezeitpunkte mit Anzahl der Bilder und den beobachteten Bauabschnitten ist in Tabelle 5.3 gegeben. In einer Zeile sind jeweils Aufnahmen im gleichen Monat bei gleichem Bauabschnitt zusammengefasst. Unter Anzahl der Bilder ist die Menge der tatsächlich verwendeten Bilder angegeben. Insgesamt standen in der Regel pro Aufnahmezeitpunkt und Kamera 100 bzw. 200 (ab $\mathcal{A}_{0227}^{TTUM}$) Bilder zur Verfügung. Von diesen wurden alle aussortiert, die den gleichen Bildausschnitt zeigen. Solche Bilder entstehen, wenn wie hier mit einer festen Taktrate aufgenommen wird, und der Kran sich nicht bewegt. In den meisten Fällen wurde so ca. die Hälfte der Bilder eines Aufnahmezeitpunktes aussortiert.

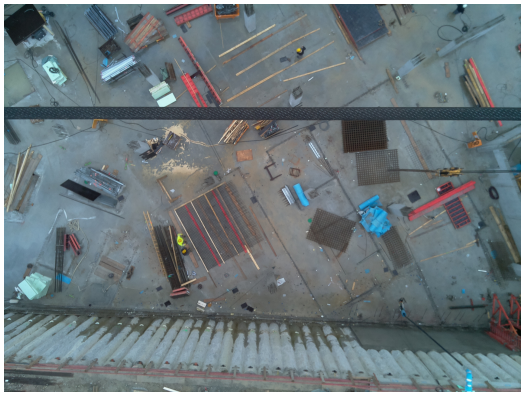
Abbildung 5.11 zeigt den Baufortschritt von November bis März anhand von Bildern an fünf Aufnahmezeitpunkten aus der nahezu gleichen Position. Gleichzeitig geben die Bilder einen Eindruck über die Größe des Bereichs, der mit einer Aufnahme, bei der gegebenen Kranhöhe und mit dem hier verwendeten Kameratyp, abgedeckt werden kann. Es ist zu erkennen, wie sich die erfassbare Bodenfläche mit Anwachsen des Gebäudes verringert (siehe auch Abbildung 3.4). Eine typische Kameraanordnung ist für den Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$ in Abbildung 5.12 dargestellt. Auf den Bildern aus Abbildung 5.11 ist jeweils das Hubseil des Krans zu erkennen, was auf die mittige Anbringung der Kameras zurückzuführen ist. Die Bereiche, die das Seil in Bild 1 und Bild 2 verdeckt, können beim Stereomatching nicht rekonstruiert werden.

Datum	Anzahl Bilder	Bauphase	Name
24.11.2014	57 + 43	Baugrube, Fundament	$\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$
04.12.2014	28 + 28		$\mathcal{A}_{1204}^{TTUM}$
14.01.2015	37	3. Untergeschoss	$\mathcal{A}_{0114}^{TTUM}$
21.01.2015	46	2. Untergeschoss	$\mathcal{A}_{0121}^{TTUM}$
11/13/18/20/27.02.2015	41/55/40/46/103		$\mathcal{A}_{02xx}^{TTUM}$
02/06/09.03.2015	103/96/65		$\mathcal{A}_{03xx}^{TTUM}$
11/13/16/18.03.2015	86/72/66/92	1. Untergeschoss	$\mathcal{A}_{03xx}^{TTUM}$

Tabelle 5.3: Aufnahmezeitpunkte in $\mathcal{T}^{TTUM}$



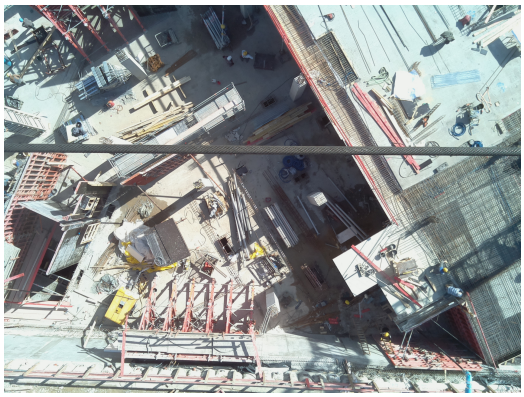
24. November 2014



14. Januar 2015



2. März 2015



9. März 2015



18. März 2015

Abbildung 5.11: Aufnahmen von $\mathfrak{T}^{TTUM}$

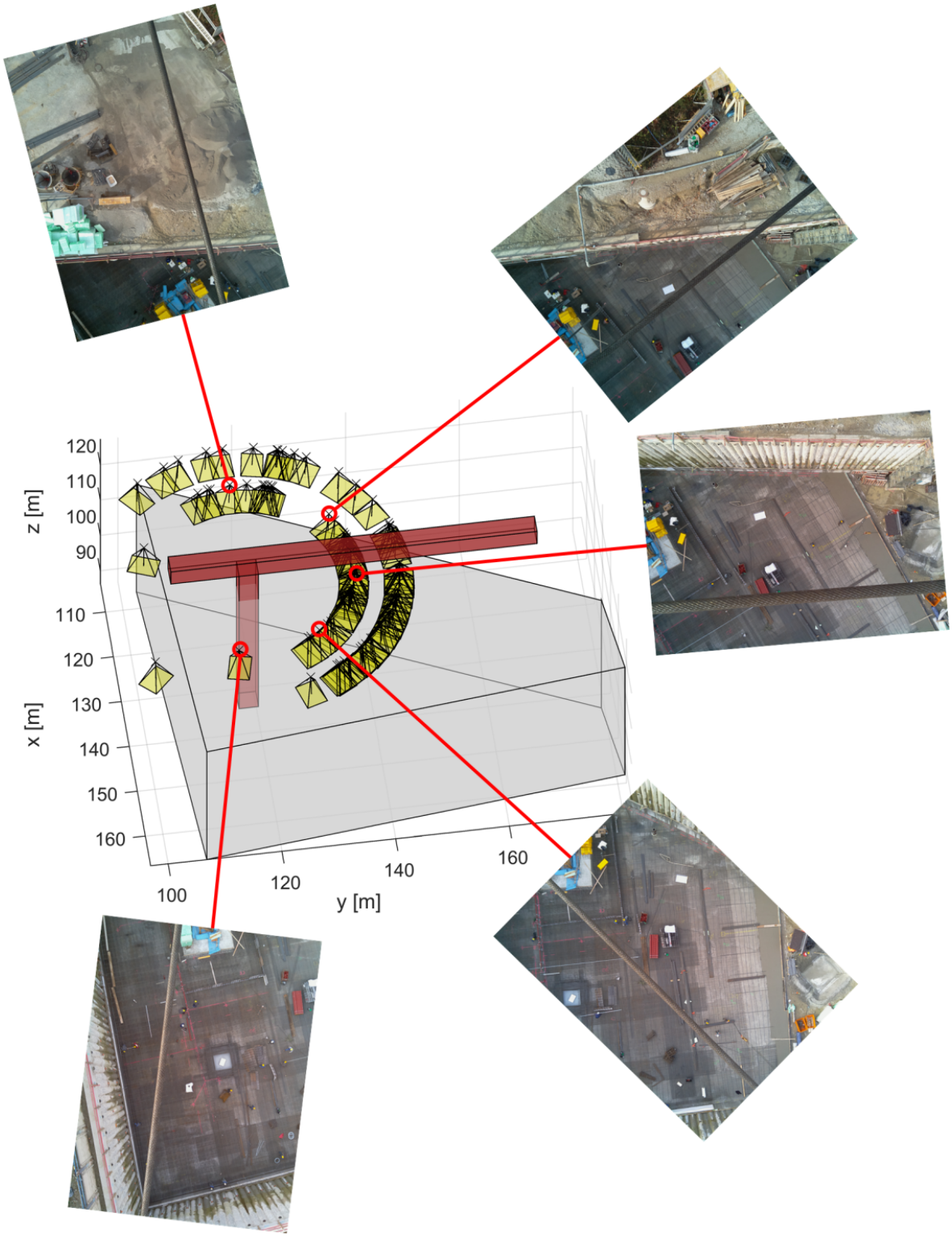


Abbildung 5.12: Kameraanordnung an $\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$. Der graue Block repräsentiert ein Grobmodell des fertigen Gebäudes.

5.3 Ergänzende Messdaten

5.3.1 Testszenario 1 (KS)

In dem Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ wurde nach Aushub der Baugrube eine Laserscanning Messung durchgeführt. Diese umfasste auch die umliegenden Gebäude. In dem sehr hoch auflösenden Laserscan (siehe Abbildung 5.13) wurden die Koordinaten verschiedener Fassadenmerkmale, wie z.B. der in Abbildung 3.7c gezeigten Fensterecken, manuell gemessen. Diese Koordinaten wurden als Passpunkte für die initiale Bündelblockausgleichung verwendet. Zusätzlich wurde auf vier Betonpfeilern je ein drehbares Zielzeichen montiert, die für die Registrierung der Einzelscans zueinander verwendet wurden. Diese konnten aber auch bei späteren photogrammetrischen Aufnahmen genutzt werden. Die vier Zielzeichen werden außerdem für die Evaluation der fortlaufenden Koregistrierung eingesetzt (siehe auch Tabelle 6.6). Die Positionen von drei der Zielzeichen sind in Abbildung 3.7c markiert.

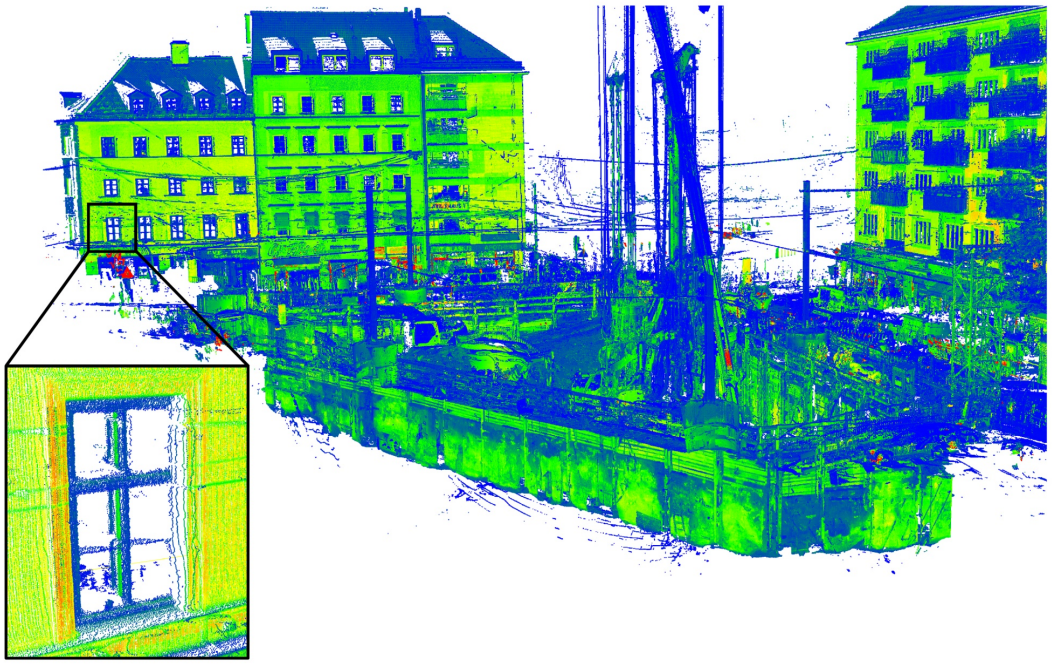
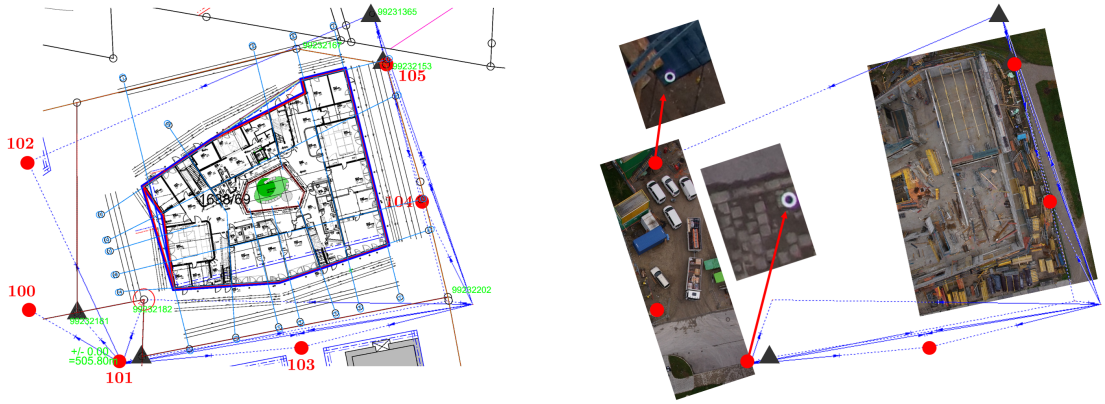


Abbildung 5.13: Laserscan von $\mathfrak{T}^{KS}$ mit Detailansicht eines Fensters, das als natürlicher Passpunkt verwendet wurde (vgl. Abbildung 3.7c), die Farbwerte codieren den Intensitätswert (blau niedrig, gelb hoch)

5.3.2 Testszenario 2 (HFK)

Im Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ wurde ein photogrammetrisches Passpunktnetz erstellt, um die Koregistrierung, wie in Abschnitt 3.3 beschrieben, durchführen zu können. Abbildung 5.14 zeigt die Positionen der sechs um die Baustelle verteilten photogrammetrischen Passmarken (Punkt 100 - 105) als rote Kreise. Die schwarzen Dreiecke zeigen die Vermessungspunkte, deren Koordinaten in dem Koordinatensystem vorliegen, in dem das Gebäude geplant und gebaut wurde (Baustellenkoordinatensystem BKS). Zur Verknüpfung der beiden Punkttypen wurden Tachymetermessungen für die Lagekoordinaten sowie ein Nivellement für die Höhenbestimmung durchgeführt. Für Letzteres stand eine Anschlusshöhe zur Verfügung. Abbildung 5.14a zeigt das Lagenetz sowie einen 2D-Plan des Gebäudes, in Abbildung 5.14b ist das Vermessungsnetz mit einem UAV-Bild sowie Nahaufnahmen der Passpunkte (siehe auch Abbildung 3.7a) überlagert.



a) b)

Abbildung 5.14: Passpunktnetz in $\mathcal{T}^{HFK}$: Netz mit photogrammetrischen Passpunkten (rote Kreise) und Vermessungspunkten (schwarze Dreiecke): überlagert a) mit 2D-Plan und b) mit Bilddaten.

5.3.3 Testszenario 3 (TTUM)

Passpunkte wurden am Boden auf der Süd- und Westseite der Baustelle eingemessen. Nur in diesen Bereichen überdeckte die Krankamera sich nicht verändernde Bereiche. Die Einmessung mit Tachymeter und Nivellier erfolgte am 26.02.2016.

5.4 Ground-Truth-Daten

Die Ground Truth umfasst die Klassen der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Zustände für Bauteile *gebaut*, *nicht gebaut*, *Schalung*, *Bewehrung*, *Schalung und gebaut* und *Schalung und Bewehrung*. Der Zustand *unsicher* tritt in der Ground Truth nicht auf, zusätzlich wird aber die Klasse *teilweise gebaut* eingeführt.

Zur Erstellung der vollständigen Ground Truth $\mathcal{G}_V$ wird zunächst jedem Bauteil eine der oben genannten Klassen zugewiesen. Die Ground Truth gilt für alle dem Bauteil zugehörigen BF nur in eingeschränkter Form. Sofern ein Bauteil noch nicht gebaut oder fertig gebaut ist, trifft dieser Zustand auch für alle BF zu, bei allen Mischzuständen, d.h. *Schalung und gebaut* oder *Schalung und Bewehrung*, und den in Kapitel 4.3 gezeigten Kombinationen und Sonderfällen von BF-Zuständen ist dies jedoch nicht mehr der Fall.

Zusätzlich wird eine Ground Truth $\mathcal{G}_V^{\Delta}$ erstellt, die nur die Bauteile berücksichtigt, die sich bezogen auf die letzte Aufnahme verändert haben. Das heißt, es werden die Bauteile berücksichtigt, die im vorangegangenen Aufnahmezeitpunkt nicht den Status *gebaut* hatten, aber im aktuellen Aufnahmezeitpunkt einen Bauzustand haben, also *(teilweise) gebaut*, *Schalung*, *Bewehrung* oder einen Mischzustand. Um auch falsche Klassifizierungen zu berücksichtigen, werden bei dieser Bewertung zusätzlich folgende Elemente hinzugenommen: (i) Objekte, die im Ground Truth des aktuellen Aufnahmezeitpunkts als *nicht gebaut* markiert sind, aber als *gebaut*, *Schalung*, *Bewehrung* oder ein Mischzustand klassifiziert wurden, (ii) Bauteile, die in der Ground Truth des aktuellen Aufnahmezeitpunkts als *gebaut* markiert sind, aber als *frei* klassifiziert wurden.

Zusätzlich wird eine Ground Truth $\mathcal{G}_S$ nur mit den sichtbaren Bauteilen erstellt. Zur Bestimmung der nicht sichtbaren, d.h. unbekannten Teile wird von den rekonstruierten Punktwolken ausgegangen. Dafür werden alle Bauteile als sichtbar eingestuft, für die auf mindestens 5% der Gesamtfläche eines Bauteils sowie für eine der BF auf mindestens 15% der Fläche Punkte ex-

trahiert wurden, unabhängig davon ob die Punkte wirklich zum Bauteil, zur Schalung oder zur Bewehrung gehören oder zu einem anderen Objekt. Dieses Vorgehen wurde gewählt, da die wahren nicht sichtbaren Teile nicht eindeutig bestimmt werden können. Gründe dafür sind, dass ein gewisser Prozentsatz eines Bauteils sichtbar sein muss, um es bewerten zu können, dass ein Bauteil nur in einem Bild vorkommt oder dass es in mehreren Bildern vorkommt, aber mit dem hier verwendeten Rekonstruktionsverfahren keine Punkte berechnet werden konnten. Das Bauteil ist dann im Sinne der hier vorgestellten Methoden nicht sichtbar. Dieser Ground-Truth-Typ beruht ebenfalls auf den ganzen Bauteilen und nicht auf BF, d.h. es existiert kein wahrer Wert für eine nicht sichtbare BF, wenn eine BF des Bauteils einen anderen Zustand aufweist, da dann das ganze Bauteil als sichtbar eingestuft wird und den entsprechenden Zustand zugewiesen bekommt.

Die Ground Truth mit den sichtbaren Teilen kann, genauso wie oben für $\mathcal{G}_V^{\Delta}$ beschrieben, auch als Ground Truth $\mathcal{G}_S^{\Delta}$ für die Änderungen seit dem letzten Aufnahmezeitpunkt generiert werden.

Zur Bewertung der Sichtbarkeitsanalyse wird aus $\mathcal{G}_V$ eine weitere Ground Truth $\mathcal{G}_{BF}$ für die Bauteilflächen geschaffen. Diese Ground Truth umfasst nur die vier Klassen *frei*, *unbekannt*, *Bauteil möglich* (BM) und *frei mit extrahierten Punkten* (FEP) und dient der Bewertung der Sichtbarkeitsanalyse. Für jede Bauteilfläche werden die rekonstruierten Punkte nach Klassen sortiert extrahiert. Alle BF der Bauteile, die in $\mathcal{G}_V$ als *nicht gebaut* gekennzeichnet sind, erhalten, unabhängig davon ob sie *unbekannt* oder *frei* sind, die Klasse *frei*. Eine Ausnahme bilden BF, die *nicht gebaut* sind, aber für die Punkte extrahiert wurden. Diese erhalten die Klasse *frei mit extrahierten Punkten*. Alle BF deren Bauteile in $\mathcal{G}_V$ nicht den Zustand *nicht gebaut* haben, erhalten nun entweder die Klasse *Bauteil möglich*, wenn Punkte extrahiert wurden, oder *unbekannt*, wenn keine Punkte extrahiert wurden.

Abbildung 5.15 enthält Beispiele für tatsächlich auftretende Fälle von Zuständen aus den Szenarien $\mathcal{T}^{KS}$ (a) und $\mathcal{T}^{HFK}$ (b-f). Diese belegen die Vielzahl an möglichen Variationen und Kombinationen von verschiedenen Zuständen. Durch die in dieser Arbeit modellierten Zustände können jedoch nicht alle Varianten abgedeckt werden. So sind durch die Mischzustände, wie *bewehrt und Schalung*, jene Fälle abgedeckt, bei denen jeder BF ein eindeutiger Zustand zugewiesen werden kann. Nicht abgedeckt sind hingegen die Fälle, bei denen bereits für eine BF mehrere Zustände vorkommen. In der Abbildung sind Zustände dieser Art gezeigt, wie z.B. die noch teilweise vorhandene Schalung bei einem bereits gebauten Bauteil aus Abbildung 5.15e oder die erst teilweise angebrachte Schalung für eine Deckenfläche aus Abbildung 5.15c. Solche Fälle treten jedoch im Verhältnis zu den modellierten Zuständen deutlich seltener auf. Deshalb gibt es in der Ground Truth dafür keine eigenen Klassen, dem Bauteil wird stattdessen die Klasse des überwiegenden Zustands zugeteilt. Für die eben genannten Beispiele bedeutet dies, dass im Fall aus Abbildung 5.15e dem Bauteil der Zustand *gebaut* und im Fall aus Abbildung 5.15c der Zustand *Schalung* zugewiesen wird.

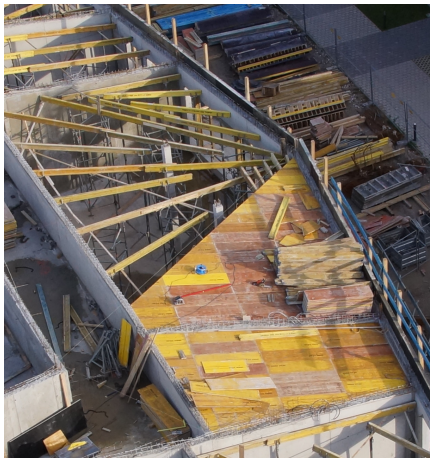
a)



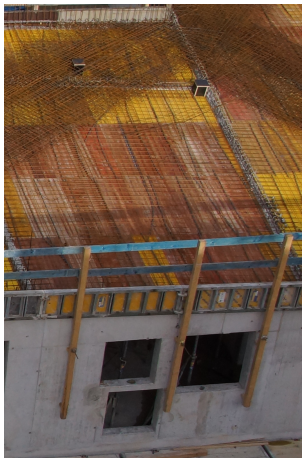
b)



c)



d)



e)



f)



Abbildung 5.15: Beispiel für verschiedene spezielle Bauteilzustände: a) vorne Bewehrung, dahinter Schalung, rechts gebaut mit noch teilweise vorhandener Schalung, b) einseitig angebrachte Schalung, c) Deckenschalung, teilweise vorhanden, d) Deckenschalung und Bewehrung, e) gebaut mit teilweise vorhandener Schalung, f) Bewehrung und einseitig angebrachte Schalung

6 Ergebnisse

Alle hier vorliegenden Ergebnisse beruhen auf Auswertungen, die nach Abschluss der Aufnahmen an dem jeweiligen Testszenario durchgeführt wurden. Dies bedeutet, dass jeweils auf alle verfügbaren Bilddaten zurückgegriffen werden konnte. Die entwickelten Methoden, insbesondere zur Koregistrierung, sind so angelegt, dass sie sukzessiv zum Baufortschritt ausgeführt werden können. Die in Kapitel 6.1 und 6.2 gezeigten Ergebnisse für die Szenarien $\mathfrak{T}^{KS}$ und $\mathfrak{T}^{HFK}$ wurden bereits in Tuttas et al. [2017] veröffentlicht. Weitere Teile der im Folgenden aufgeführten Ergebnisse wurden bereits in Tuttas et al. [2014a,b, 2015, 2016] dargestellt.

6.1 Punktwolken

Die drei Szenarien sind exemplarisch jeweils durch eine Punktwolke in den Abbildungen 6.1, 6.2 und 6.3 dargestellt. Alle Punktwolken sind mit einem Filter $l_f = 1\,\text{cm}$ bearbeitet worden. Die Tabellen 6.1, 6.2 und 6.3 zeigen die geschätzte Präzision für die gefilterten Punkte aller Aufnahmezeitpunkte, die wie in Abschnitt 2.2 beschrieben berechnet worden sind. Es werden jeweils der Mittelwert, der Median sowie die Standardabweichung der pro Punkt geschätzten Standardabweichung σ_D für den Tiefenwert D und des 3D-Punktfehlers angegeben. Es wird außerdem unterschieden, aus wie vielen Strahlen die Punkte rekonstruiert wurden.

Bei $\mathfrak{T}^{KS}$ liegt der Mittelwert bei ca. 3 cm für den geschätzten 3D-Punktfehler und bei ca. 1 cm für die Tiefengenauigkeit. Bei $\mathfrak{T}^{HFK}$ liegt der Mittelwert bei ca. 1 cm für den geschätzten 3D-Punktfehler und bei ca. 0.8 cm für die Tiefengenauigkeit. Bei $\mathfrak{T}^{TTUM}$ liegt der Mittelwert bei ca. 5 cm für den geschätzten 3D-Punktfehler und bei ca. 1 cm für die Tiefengenauigkeit.

Strahlen	Mittelwert		Median		Stabw.		Punktanzahl
	3D	σ_D	3D	σ_D	3D	σ_D	
alle	2.6	1.2	1.4	0.7	2.9	1.5	59 555 741
3	2.9	1.1	1.4	0.6	3.1	1.5	33 638 156
4	2.2	1.4	1.4	0.9	2.4	1.5	21 837 548
5	3.0	1.3	1.7	0.8	3.3	1.3	3 227 209
6	3.5	1.3	2.9	1.1	3.6	1.1	852 557
>6	1.3	0.7	1.3	0.6	0.2	0.1	271

Tabelle 6.1: Qualität der dichten Punktwolke bei $\mathfrak{T}^{KS}$: Mittelwert, Median und Standardabweichung (Stabw.) von pro Punkt geschätztem 3D-Punktfehler (3D) und Tiefengenauigkeit (σ_D), alle Werte in cm.

Strahlen	Mittelwert 3D	Mittelwert σ_D	Median 3D	Median σ_D	Stabw. 3D	Stabw. σ_D	Punktanzahl
all	1.0	0.4	0.8	0.3	0.7	0.4	242 590 539
3	1.0	0.3	0.8	0.2	0.7	0.4	120 087 989
4	1.0	0.5	0.9	0.3	0.6	0.5	86 094 624
5	1.0	0.4	0.8	0.3	0.6	0.5	26 682 896
6	0.8	0.2	0.6	0.2	0.4	0.2	6 874 435
>6	0.6	0.2	0.6	0.1	0.3	0.1	2 850 595

Tabelle 6.2: Qualität der dichten Punktwolke bei $\mathfrak{T}^{HFK}$: Mittelwert, Median und Standardabweichung (Stabw.) von pro Punkt geschätztem 3D-Punktfehler (3D) und Tiefengenauigkeit (σ_D), alle Werte in cm.

Strahlen	Mittelwert 3D	Mittelwert σ_D	Median 3D	Median σ_D	Stabw. 3D	Stabw. σ_D	Punktanzahl
alle	4.2	1.1	3.3	1.0	2.7	0.8	157 828 612
3	3.3	0.9	2.4	0.7	2.1	0.8	37 195 970
4	3.7	1.2	2.6	1.0	2.3	0.9	35 427 524
5	4.2	1.2	3.3	1.0	2.5	0.8	23 749 892
6	4.8	1.2	5.1	1.0	2.7	0.7	15 564 058
>6	5.2	1.1	7.4	1.0	3.1	0.6	45 891 168

Tabelle 6.3: Qualität der dichten Punktwolke bei $\mathfrak{T}^{TTUM}$: Mittelwert, Median und Standardabweichung (Stabw.) von pro Punkt geschätztem 3D-Punktfehler (3D) und Tiefengenauigkeit (σ_D), alle Werte in cm.

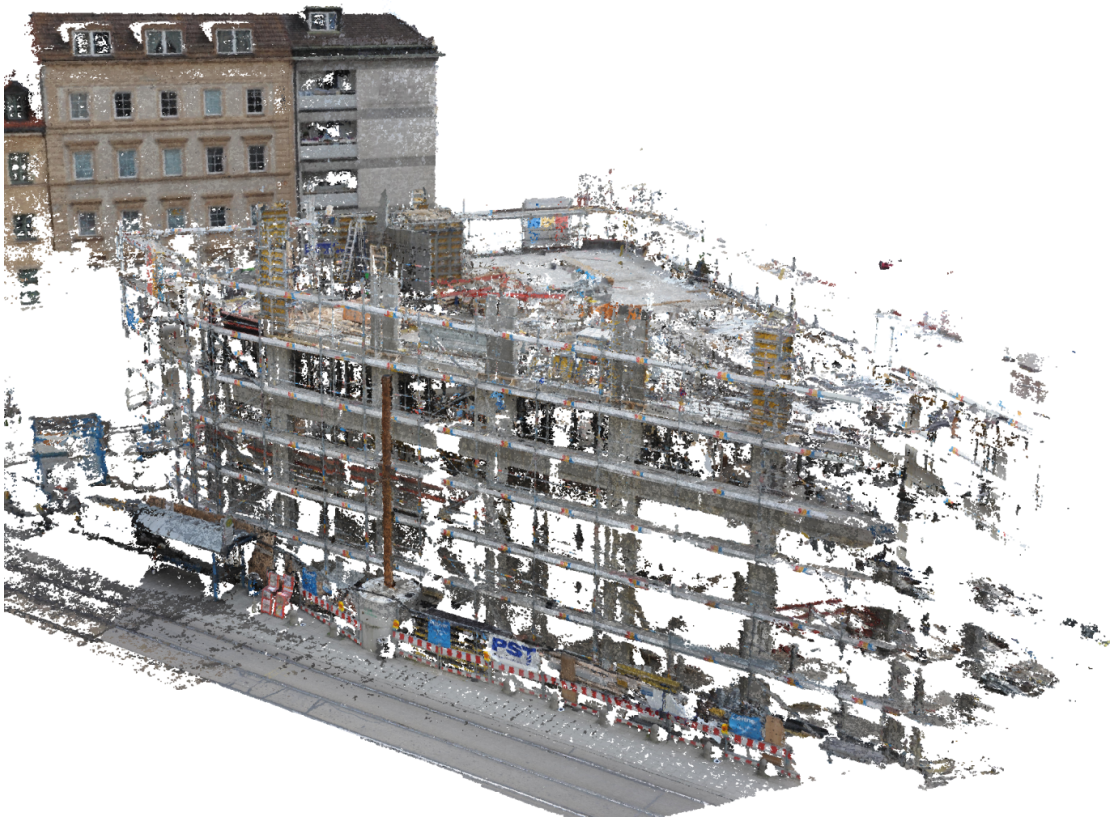


Abbildung 6.1: Punktwolke $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$

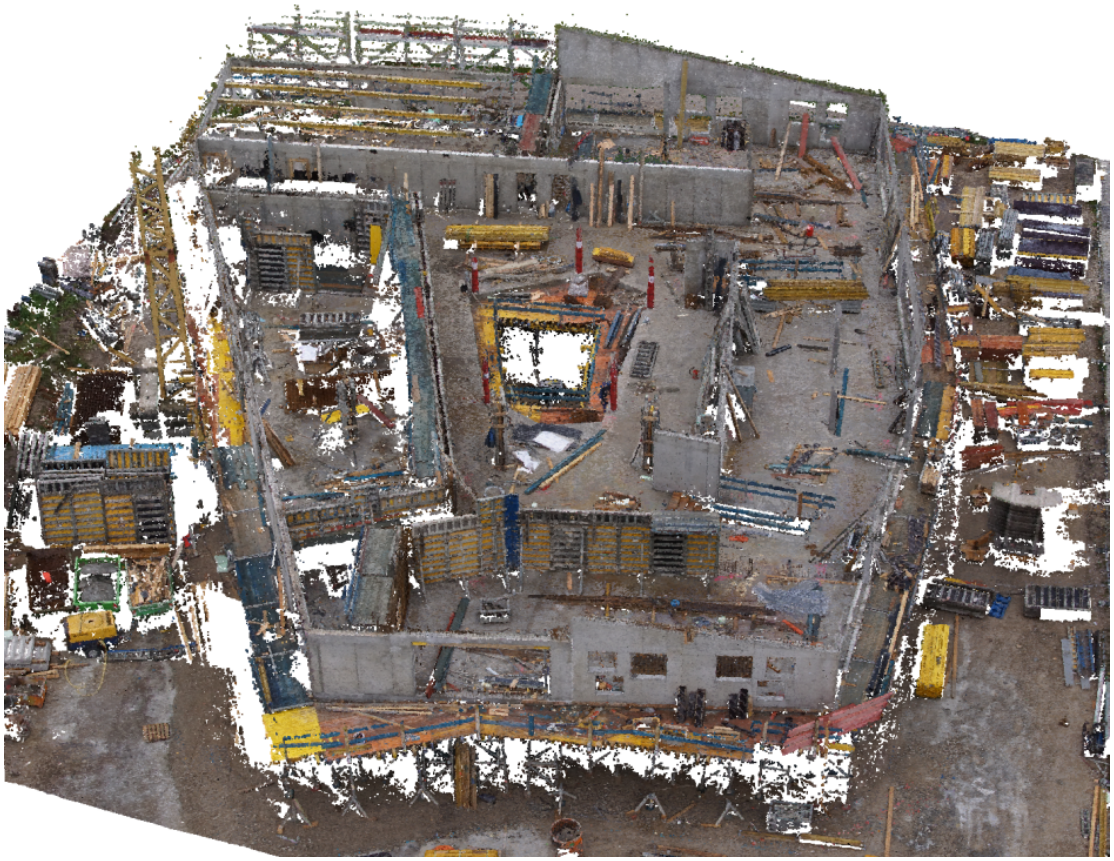


Abbildung 6.2: Punktwolke $\mathcal{A}_{1120}^{HFK}$



Abbildung 6.3: Punktwolke aus Kombination von $\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$ und $\mathcal{A}_{0318}^{TTUM}$

6.2 Koregistrierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Koregistrierung vorgestellt. Diese wurden bereits in Tuttas et al. [2017] veröffentlicht. Zunächst wird dargestellt, wie die fortlaufende Koregistrierung realisiert wurde und in welchen Fällen sie erfolgreich war. Dafür ist in Abbildung 6.4 für jedes der drei Testszenarien ein Zeitstrahl ($\mathcal{T}^{KS}$ = orange, $\mathcal{T}^{HFK}$ = blau, $\mathcal{T}^{TTUM}$ = braun) mit den Aufnahmezeitpunkten gegeben, in dem erfolgreiche Koregistrierungen in grün, teilweise erfolgreiche Koregistrierungen in gelb und gescheiterte aufeinanderfolgende Koregistrierungen in rot gekennzeichnet sind. Außerdem ist jeweils das Datum mit der initialen BBA blau markiert. In Szenario $\mathcal{T}^{KS}$ wurden zwei zusätzliche Aufnahmezeitpunkte $\mathcal{A}^{KS}_{0213}$ und $\mathcal{A}^{KS}_{0320}$ während des Baus der Kellergeschosse berücksichtigt. Diese liegen vor den in Abschnitt 5.2.1 gezeigten Aufnahmezeitpunkten und wurden nur zur Evaluierung des Koregistrierungsverfahrens aber nicht zum Modellabgleich herangezogen, da das Modell die Kellergeschosse nicht umfasst.

Der initiale Bildblock, also der Bildblock von dem die Koregistrierung ausgeht, ist nicht bei allen drei Fällen der erste Bildblock. Für eine baubegleitende Koregistrierung ist dies natürlich zwingend notwendig. Bei $\mathcal{T}^{KS}$ wurde dennoch mit $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ der Bildblock verwendet, der die in Kapitel 3.3 genannten Bedingungen für den initialen Bildblock erfüllt und somit als Ausgangspunkt für die fortlaufende Koregistrierung am besten geeignet ist. Der Grund dafür, dass hier erst ein späterer Bildblock verwendet wurde, ist, dass das Verfahren erst im Laufe der Beobachtung dieser Baustelle entwickelt wurde. Bei $\mathcal{T}^{HFK}$ ist dann der erste Bildblock, bestehend aus den Bildern der ersten beiden Aufnahmen, auch der initiale Block für die fortlaufende Koregistrierung. Bei $\mathcal{T}^{TTUM}$ konnte für den ersten Bildblock keine ausreichende Zahl an Passpunktbeobachtungen erreicht werden. Deshalb wurde der initiale Block aus den Bildern mehrerer Aufnahmezeitpunkte simuliert. Dies bedeutet, dass alle verfügbaren Bilder, in denen die Passpunkte enthalten waren, unabhängig vom Aufnahmezeitpunkt verwendet wurden und in diese Beobachtungen des ersten Bildblocks eingeführt wurden. Ein zweiter initialer Block war notwendig, da die fortlaufende Koregistrierung nach dem vierten Aufnahmezeitpunkt fehlschlug, und so zu einem späteren Zeitpunkt neu gestartet werden musste. Für diesen wurde der Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}^{KS}_{0227}$ des Tages der Einmessung der Passpunkte verwendet. Die Aufnahmezeitpunkte, die nicht koregistriert werden konnten, sind in Abbildung 6.4 grau markiert. Bei $\mathcal{T}^{KS}$ war die Aufnahme $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ als initialer Bildblock geeignet, da hier alle Bilder in einem zusammenhängenden Block ausgeglichen werden konnten. Weitere Aufnahmzeitpunkte konnten nur in mehreren Subblöcken mit diesem initialen Zustand koregistriert worden. Die Anzahl der dazu notwendigen Subblöcke ist jeweils als Zahl in den Statuskreisen der Abbildung angegeben. Aufgrund der Umstände bei $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{TTUM}$ wurde hier die fortlaufende Koregistrierung auch zeitlich rückwärts durchgeführt, was durch entsprechende Pfeile in Abbildung 6.4 gekennzeichnet ist. Des Weiteren treten in allen drei Szenarien auch teilweise erfolgreiche Zustände auf. Dies bedeutet, dass eine manuelle Messung von Passpunkten in einem kleinem Teil der Bilder notwendig war.

Um die Genauigkeit der Koregistrierung zu evaluieren werden zunächst aus allen Aufnahmezeitpunkten die BF ausgewählt, die laut der Ground Truth $\mathcal{G}_S$ *gebaut* sind. Von diesen werden wiederum die Ebenen selektiert, die mindestens $3\,\mathrm{m}^2$ groß sind und mindestens zu 80 % mit Punkten auf Basis der als „belegt“ gekennzeichneten Rasterzellen (vgl. Formel 4.3) bedeckt sind. Des Weiteren werden nur Ebenen berücksichtigt, die zu mindestens zwei Aufnahmezeitpunkten verfügbar sind. Es werden die Punkte, so wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, vor und hinter der BF extrahiert und eine Ebenenanpassung mit RANSAC (Inlier-Schwellwert 3 cm) durchgeführt. Anschließend wird der größte orthogonale Abstand zwischen der Modellebene und der aus den Punkten geschätzten Ebene berechnet. In den Tabellen 6.4 und 6.5 sind diese Werte unter max. Abstand angegeben. Außerdem wird der Winkel zwischen den Normalen der Ebenen angegeben. Um auch die Stabilität über die Aufnahmezeitpunkte zu überprüfen, wird die maximale Variation

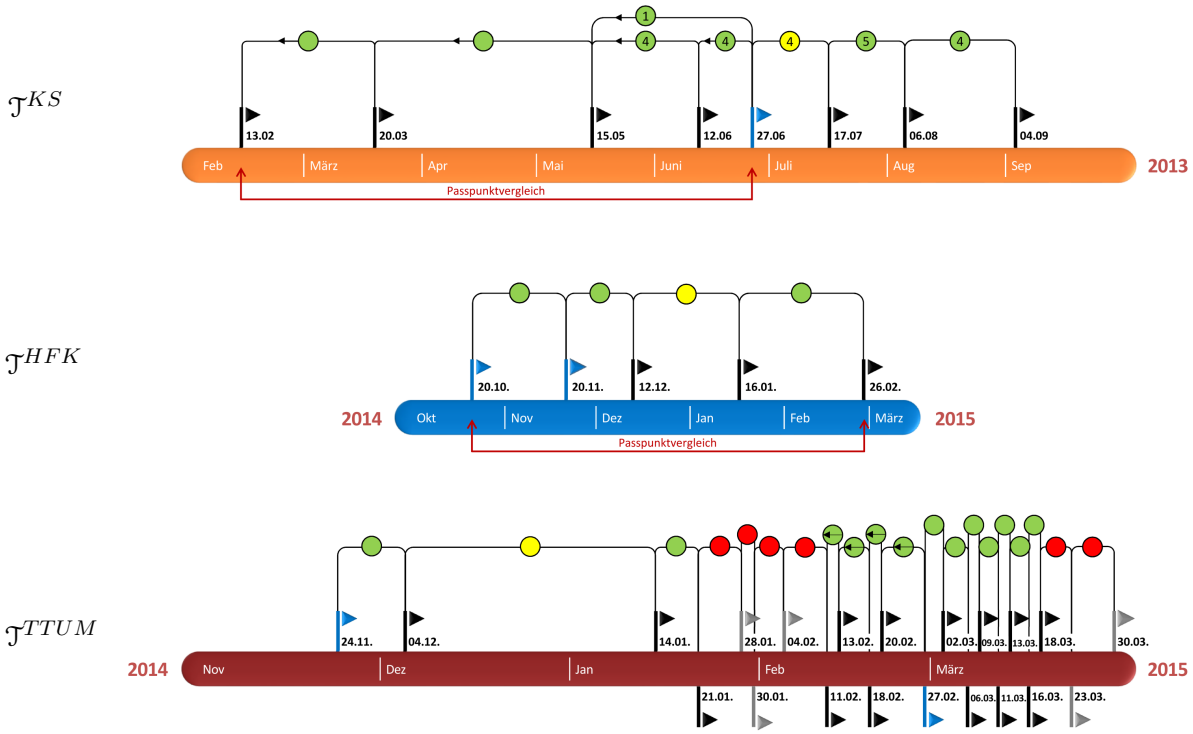


Abbildung 6.4: Zeitstrahl zur Darstellung der Koregistrierungsergebnisse für alle drei Testszenarien. Die farbigen Kreise zeigen den Erfolg der Verknüpfung der aufeinanderfolgenden Aufnahmezeitpunkte, grün steht für eine erfolgreiche, gelb für eine teilweise erfolgreiche und rot für eine fehlgeschlagene Verknüpfung. Die Pfeile zeigen die teilweise zeitlich rückwärts durchgeführte Koregistrierung an. Die blauen Marker zeigen die Aufnahmezeitpunkte mit den initialen Bildblöcken. Aufnahmezeitpunkte mit grauen Markern konnten nicht koregistriert werden. Nummern in den Kreisen geben die Anzahl der ggf. nötigen Subblöcke zur Registrierung aller Bilder an. Außerdem ist markiert, welche Aufnahmezeitpunkte für die Evaluation anhand der Passpunktkoordinaten herangezogen wurden.

der Ebenenabstände über alle Aufnahmezeitpunkte angegeben. Dieser Wert wird auch berechnet, da er unabhängig von einer möglichen Abweichung zwischen der Position einer Modellebene und der Position des tätsächlich gebauten Bauteils ist. Die Ergebnisse werden in Tabelle 6.4 für $\mathcal{T}^{KS}$ und in Tabelle 6.5 für $\mathcal{T}^{HFK}$ gezeigt. Bei $\mathcal{T}^{TTUM}$ konnte die Auswertung nicht in dieser Form durchgeführt werden, da keine Ebenen vorhanden sind, die den oben genannten Kriterien entsprechen. Für die anderen beiden Testszenarien liegen die berechneten Werte im unteren cm-Bereich. In $\mathcal{T}^{KS}$ liegen die RMS der Ebenenanpassungen im Bereich von 0.5 bis 1.5 cm und im Durchschnitt bei 1 cm. Der Mittelwert der maximalen Variation ist 2.9 cm, die mittlere Normalenabweichung ist 0.6°. Die maximale Abweichung einer Ebene ist ∼6 cm. Die mittlere betragsmäßige Abweichung beträgt 2.3 cm. In $\mathcal{T}^{HFK}$ liegen die RMS der Ebenenanpassungen im Bereich von 0.6 bis 1.4 cm und im Durchschnitt bei 1 cm. Der Mittelwert der maximalen Variation ist 2.2 cm, die mittlere Normalenabweichung ist 0.3°. Die maximale Abweichung einer Ebene ist ∼5 cm. Die mittlere betragsmäßige Abweichung beträgt 2.3 cm. In $\mathcal{T}^{TTUM}$ konnten durch einzelne Ebenenanpassungen deutlich größere Abweichungen im Bereich von 10 bis 20 cm festgestellt werden.

Ebene	max. Abstand [cm]						max. Variation	Normalenabweichung [°]						max.
	15.05.	12.06.	27.06.	17.7.	06.08.	04.09.	[cm]	15.05.	12.06.	27.06.	17.7.	06.08.	04.09.	[°]
1	2.4	-	1.2	-	-	-	1.2	0.503	-	0.470	-	-	-	0.503
2	0.7	-	-	1.8	-	-	1.0	0.285	-	-	0.651	-	-	0.651
3	-	0.3	-1.3	0.9	-2.1	-3.4	4.3	-	0.213	0.258	0.241	0.407	0.652	0.652
4	-	-0.7	-1.2	0.9	-1.1	-4.3	5.2	-	0.425	0.480	0.280	0.344	0.593	0.593
5	-	0.5	-1.1	-1.2	-1.4	-	2.0	-	0.141	0.431	0.153	0.049	-	0.431
6	-	0.8	-0.7	-0.6	-0.7	-5.5	6.4	-	0.476	0.069	0.295	0.083	0.247	0.476
7	-	1.2	-	-2.0	-4.2	-	5.4	-	0.357	-	0.527	0.878	-	0.878
8	-	-	2.1	2.6	3.5	2.9	1.4	-	-	0.507	0.321	0.357	0.621	0.621
9	-	-	2.0	2.7	3.2	1.7	1.5	-	-	0.564	0.382	0.498	0.670	0.670
10	-	-	1.5	2.8	-1.2	-1.5	4.4	-	-	0.762	0.124	0.364	0.457	0.762
11	-	-	0.9	-	3.5	2.0	2.6	-	-	0.499	-	0.444	0.318	0.499
12	-	-	0.8	-	3.9	3.0	3.1	-	-	0.078	-	0.470	0.267	0.470
13	-	-	-1.0	-	-	0.7	1.7	-	-	0.154	-	-	0.236	0.236
14	-	-	1.1	-	-	2.7	1.6	-	-	0.308	-	-	0.681	0.681
15	-	-	-	-1.9	-4.5	-3.8	2.6	-	-	-	0.384	0.559	0.532	0.559
16	-	-	-	-3.0	-3.2	-	0.2	-	-	-	0.890	0.890	-	0.890
17	-	-	-	-1.7	2.3	-	4.0	-	-	-	0.581	0.628	-	0.628
18	-	-	-	1.9	-	-3.5	5.4	-	-	-	0.658	-	0.810	0.810
19	-	-	-	1.3	-	-1.4	2.7	-	-	-	0.098	-	0.473	0.473
20	-	-	-	-0.7	-	-3.0	2.4	-	-	-	0.377	-	0.288	0.377
21	-	-	-	-	2.5	2.8	0.3	-	-	-	-	0.469	0.868	0.868
22	-	-	-	-	-3.6	-1.5	2.1	-	-	-	-	0.830	0.248	0.830
23	-	-	-	-	-5.7	-2.7	3.0	-	-	-	-	0.629	0.444	0.629
24	-	-	-	-	-5.5	-2.6	2.9	-	-	-	-	0.649	0.667	0.667
25	-	-	-	-	-0.9	1.4	2.3	-	-	-	-	0.254	0.444	0.444
26	-	-	-	-	-1.9	2.5	4.4	-	-	-	-	0.701	0.668	0.701

Tabelle 6.4: Koregistrierungsgenauigkeit für $\mathfrak{T}^{KS}$. Die Tabelle zeigt die Abweichungen in der Lage und der Normalenrichtung für 26 Ebenen zur entsprechenden Modellebene. Außerdem wird die Variation der Abstandswerte aus den verschiedenen Aufnahmezeitpunkten angegeben. Es wurden nur Ebene ausgewählt, die in mindestens zwei Aufnahmezeitpunkten zu sehen waren. Fehlt der Wert für eine Ebene zu einem Zeitpunkt, war sie da noch nicht gebaut, nicht sichtbar oder nicht erfasst.

Ebene	max. Abstand [cm]					max. Variation	Normalenabweichung [°]					max.
	20.10.	20.11.	12.12.	16.01.	26.02.	[cm]	20.10.	20.11.	12.12.	16.01.	26.02.	[°]
1	1.9	-2.0	1.6	2.5	2.7	4.7	0.150	0.206	0.124	0.195	0.218	0.218
2	0.9	-	-	2.6	4.2	3.2	0.196	-	-	0.221	0.311	0.311
3	-	-1.6	3.0	2.3	3.3	4.9	-	0.142	0.223	0.048	0.142	0.223
4	-	-3.4	1.8	-1.2	1.0	5.2	-	0.446	0.443	0.176	0.259	0.446
5	-	3.2	-	2.5	1.9	1.4	-	0.189	-	0.217	0.113	0.217
6	-	-	-1.5	-2.4	-1.9	0.8	-	-	0.014	0.069	0.056	0.069
7	-	-	3.1	1.3	1.2	2.0	-	-	0.269	0.151	0.022	0.269
8	-	-	1.2	-1.4	2.3	3.7	-	-	0.328	0.357	0.235	0.357
9	-	-	3.7	3.8	4.3	0.6	-	-	0.218	0.264	0.210	0.264
10	-	-	2.7	1.8	3.7	1.9	-	-	0.044	0.387	0.273	0.387
11	-	-	-	3.4	4.2	0.8	-	-	-	0.338	0.213	0.338
12	-	-	-	2.3	2.7	0.4	-	-	-	0.217	0.397	0.397
13	-	-	-	2.1	1.9	0.2	-	-	-	0.299	0.352	0.352
14	-	-	-	2.1	1.1	0.9	-	-	-	0.203	0.339	0.339
15	-	-	-	2.3	1.6	0.7	-	-	-	0.309	0.180	0.309
16	-	-	-	-1.9	1.7	3.6	-	-	-	0.232	0.305	0.305

Tabelle 6.5: Koregistrierungsgenauigkeit für $\mathfrak{T}^{HFK}$. Die Tabelle zeigt 16 Ebenen, die zu mindestens zwei Aufnahmezeitpunkten zu sehen waren. Weitere Erläuterung siehe Tabelle 6.4.

Als weiteres Genauigkeitsmaß wird die Veränderung der Passpunktkoordinaten, die bei der Berechnung der initialen BBA eingeführt wurden, nach einer gewissen Zahl von Aufnahmezeitpunkten überprüft. Dafür werden die Koordinaten in einem weiteren Zeitschritt gemessen und in der BBA nach Formel 6.1 neu mitgeschätzt (siehe auch Formeln 3.2 und 3.3):

$$min \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n_P+n_{PP}} \|\mathbf{x}_{ij} - f(\hat{\mathbf{X}}_{j,P}, \hat{\mathbf{X}}_{j,PP}, \boldsymbol{t}_{i,t-1}, \mathbf{R}_{i,t-1}, \hat{\boldsymbol{t}}_{i,t_n}, \hat{\mathbf{R}}_{i,t_n}, I_k)\|^2 \tag{6.1}$$

In $\mathfrak{T}^{KS}$ wurden die vier in Abschnitt 5.3.1 genannten Zielzeichen, in den Bildern des ersten Aufnahmezeitpunkts $\mathcal{A}^{KS}_{0213}$ sowie in den Bildern vom $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ gemessen. Es erfolgte ein Vergleich der Koordinaten, die in der BBA von $\mathcal{A}^{KS}_{0213}$ geschätzt wurden, mit den Koordinaten, die in die initiale BBA zum Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ eingeführt wurden. Die Standardabweichungen, die Anzahl der Strahlen bei der erneuten Punktbestimmung sowie die Abweichungen sind in Tabelle 6.6 angegeben. Der 3D-Punktfehler bei diesen Punkten liegt zwischen 3 und 6 cm.

P-Nr.	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	sx [mm]	sy [mm]	sz [mm]	Strahlen	2D [mm]	3D [mm]
1	50.0	22.2	−8.8	0.7	1.2	0.6	65	54.7	55.4
2	30.8	21.8	−8.4	1.2	1.0	0.8	62	37.7	38.6
3	55.2	−1.3	−18.6	1.1	1.0	0.7	68	55.2	58.2
4	23.8	−3.2	−17.4	0.9	1.0	0.7	55	24.0	29.6

Tabelle 6.6: Abweichungen der Passpunktkoordinaten dX, dY und dZ in $\mathfrak{T}^{KS}$ zwischen den bei $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ eingeführten Passpunkten und den geschätzten Koordinaten bei $\mathcal{A}^{KS}_{0213}$. Angegeben sind die geschätzte Standardabweichung (sx, sy, sz), die Anzahl der Strahlen, aus denen der Punkt bestimmt wurde, der 2D-Lagefehler (2D) sowie der 3D-Punktfehler (3D). Der RMS der Koordinatendifferenzen liegt bei 4.7 cm.

In $\mathfrak{T}^{HFK}$ sind Koordinatendifferenzen nach der gleichen Vorgehensweise bestimmt worden. In diesem Szenario wurden die in Abschnitt 5.3.2 gezeigten Passpunkte verwendet. Es erfolgte ein Vergleich der Koordinaten, die in der BBA von $\mathcal{A}^{HFK}_{0226}$ geschätzt wurden, mit den Koordinaten, die in die initiale BBA zum Aufnahmezeitpunkt $\mathcal{A}^{HFK}_{1020}$ eingeführt wurden. Die Standardabweichungen, die Anzahl der Strahlen bei der erneuten Punktbestimmung sowie die Abweichungen sind in Tabelle 6.7 angegeben, die Punktnummern sind in Abbildung 5.14 gegeben. Für die meisten Punkte liegt der maximale 2D-Fehler unter 2 cm und der Fehler in der z-Komponente bei maximal 3 cm.

P-Nr.	dX [mm]	dY [mm]	dZ [mm]	sx [mm]	sy [mm]	sz [mm]	Strahlen	2D [mm]	3D [mm]
100	−16.7	−6.3	−31.0	2.0	2.1	6.2	11	17.9	35.8
101	−4.7	−2.7	−12.4	1.8	2.5	4.7	18	5.5	13.5
102	−19.0	2.3	−4.8	2.2	3.4	6.4	12	19.1	19.7
103	−11.5	3.0	−20.8	2.2	2.6	4.0	16	11.9	23.9
104	12.9	13.6	6.8	1.4	1.4	2.5	22	18.7	19.9
105	−30.1	2.7	33.1	3.5	3.8	5.5	12	30.2	44.8

Tabelle 6.7: Abweichungen der Passpunktkoordinaten dX, dY und dZ in $\mathfrak{T}^{HFK}$zwischen den bei $\mathcal{A}^{HFK}_{1020}$ eingeführten Passpunkten und den geschätzten Koordinaten bei $\mathcal{A}^{HFK}_{0226}$. Angegeben sind die geschätzte Standardabweichung (sx, sy, sz), die Anzahl der Strahlen, aus denen der Punkt bestimmt wurde, der 2D-Lagefehler (2D) sowie der 3D-Punktfehler (3D). Der RMS der Koordinatendifferenzen liegt bei 2.8 cm.

Für Testszenario $\mathfrak{T}^{TTUM}$ wurden die Abweichungen der Passpunkte nicht bestimmt, weil hier die initiale BBA, wie weiter oben in diesem Abschnitt beschrieben, bereits alle Bilder mit den Passpunkten berücksichtigt, da die Bildkonfiguration an einzelnen Aufnahmezeitpunkten die Neuberechnung der Passpunkte nicht ermöglichte.

6.3 Sichtbarkeit und Detektion

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse, anhand der Bauteilflächen (BF), sowie die Ergebnisse der Bauteilerkennung, anhand der ganzen Bauteile, dargestellt. In den Konfusionsmatrizen werden jeweils die wahren Werte aus der jeweils verwendeten Ground Truth (siehe Abschnitt 5.4) in den Spalten und die Klassifikationsergebnisse in den Zeilen angegeben. Die Ergebnisse werden einmal bezüglich der Bauteilanzahl und einmal bezüglich der Fläche der Bauteile erstellt. Die sich daraus ergebenden Unterschiede werden anschließend interpretiert und diskutiert. Es werden folgende Kennwerte berechnet:

- Anzahl und Fläche der Elemente pro Klasse und deren Anteil an der Gesamtzahl bzw. -fläche.
- Gesamtgenauigkeit, also die Anzahl/Fläche aller richtig klassifizierten Bauteile im Verhältnis zu allen Elementen bzw. der Gesamtfläche.
- Korrektheit (abgekürzt mit UA = user's accuracy), also pro Klasse die Anzahl/Fläche der richtig klassifizierten Bauteile im Verhältnis zu allen dieser Klasse in der Klassifikation zugeordneten Bauteilen.
- Vollständigkeit (abgekürzt mit PA = producer's accuracy), also pro Klasse die Anzahl/Fläche der richtig klassifizierten Bauteile im Verhältnis zu allen dieser Klasse in der Ground Truth zugeordneten Bauteilen.

6.3.1 Sichtbarkeitsanalyse

Als Erstes werden die Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse anhand der Ground Truth $\mathcal{G}_{BF}$ (siehe Abschnitt 5.4) bewertet. Die für die Sichtbarkeitsanalyse relevanten Parameter und die im Folgenden verwendeten Werte sind in Tabelle 6.8 aufgeführt. Die Parameter sind die Größe der Rasterung des Voxelgitters $\mathfrak{V}$ und des Rastergitters $\mathfrak{R}$, also die Seitenlängen o und l_r, außerdem die Einstellungen für die Integration der Sichtstrahlen in *octomap*, nämlich die Wahrscheinlichkeit für Treffer und Durchgang durch ein Voxel $P_{Miss}(n|s_i)$ und $P_{Hit}(n|s_i)$, sowie cl_{min}, cl_{max} als Schwellwerte für die maximal zulässigen Werte. Dazu kommen die Schwellwerte S_{frei} und S_{bel} für die Entscheidung, ob ein Voxel *belegt*, *frei* oder *unsicher* ist, sowie die Schwellwerte $S_{\mathfrak{R}}$ und S_K für die Entscheidung über den Zustand einer BF.

Parameter	**Wert**
o	15 cm
l_r	5 cm
$P_{Miss}(n\|w_i)$, $P_{Hit}(n\|w_i)$	0.40 , 0.70
cl_{min}, cl_{max}	0.12 , 0.97
S_{frei}, S_{bel}	0.50 , 0.50
$S_{\mathfrak{R}}$	0.90
S_K	0.10

Tabelle 6.8: Parameter der Sichtbarkeitsanalyse und verwendete Werte

Da die Sichtbarkeitsanalyse vor allem der Bestimmung von sicher nicht sichtbaren und nicht vorhandenen Bauteilen dienen soll, wird generell eine hohe Korrektheit einer hohen Vollständigkeit vorgezogen. Dies bedeutet, dass ein größerer Anteil an richtigen Aussagen über die Bauteile der Vollständigkeit der Erkennung dieser Zustände vorgezogen wird. Daher werden folgende Eigenschaften als günstig eingestuft:

- möglichst hohe Werte für die Korrektheit der Klassen *frei* und *unbekannt*, und dabei eine
- möglichst geringe Zahl an BF, die als *unsicher* und *Konflikt* klassifiziert sind, wobei FEP (siehe Abschnitt 5.4) und Konflikt unkritisch sind, und eine
- möglichst hohe Vollständigkeit bei der Klasse *Bauteil möglich*.

Die folgenden Tabellen 6.9 bis 6.13 zeigen die Ergebnisse für den in Tabelle 6.8 gezeigten Parametersatz. Tabelle 6.9 zeigt das Klassifikationsergebnis für das Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ für die Bewertung anhand der Anzahl der BF.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	FEP	∑	%	UA %
frei	15 233	159	6	18	15 416	41.3	98.8
unbekannt	6 777	9 480	133	5	16 395	43.9	57.8
Bauteil möglich (BM)	0	0	2 467	279	2 746	7.4	100
unsicher	283	895	0	0	1 178	3.2	
Konflikt	411	952	114	96	1 573	4.2	
Σ	22 704	11 486	2 720	398	37 308	100	
%	60.86	30.79	7.29	1.07	100		
PA %	67.09	82.54	90.7	70.1			

Tabelle 6.9: Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Anzahl; FEP = frei mit extrahierten Punkten, BM = Bauteil möglich

Zur besseren Übersicht und Interpretation wird im Folgenden eine vereinfachte Variante der Bewertungstabelle verwendet. In dieser wird die Spalte FEP weggelassen, da im Sinne der Sichtbarkeitsanalyse für diesen Fall alle Klassifikationsergebnisse zulässig sind. Die Bewertung eines solchen Bauteils wird später erfolgen. Die zweite Vereinfachung ist, dass die Werte von *frei*, die als *unbekannt* klassifiziert wurden, auf 0 gesetzt werden (siehe rote Markierung in den Tabellen). Dies hat den Grund, dass in der Ground Truth nicht eindeutig festgelegt werden kann, ob ein nicht vorhandenes Bauteil sichtbar wäre, d.h. ob sicher Strahlen zu einem dahinterliegenden Objekt hindurchlaufen. Für den oben in Tabelle 6.9 gezeigten Fall ergibt sich die vereinfachte Tabelle 6.10.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	∑	%	UA %
frei	15 233	159	6	15 398	51.1	98.9
unbekannt	0	9 480	133	9 613	31.9	98.6
Bauteil möglich (BM)	0	0	2 467	2 467	8.2	100
unsicher	283	895	0	1 178	3.9	
Konflikt	411	952	114	1 477	4.9	
Σ	15 927	11 486	2 720	30 133	100	
%	52.9	38.1	9	100		
PA %	95.6	82.5	90.7			90.2

Tabelle 6.10: Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Anzahl.

Die folgenden Tabellen zeigen die Bewertung, wenn anstelle der Anzahl die Fläche der BF bewertet wird. Tabelle 6.11 zeigt das Ergebnis der Auswertung für Szenario $\mathcal{T}^{KS}$, das eine höhere Gesamtgenauigkeit als bei der Bewertung über die Anzahl (siehe Tabelle 6.10) aufweist. Dies ist zu erwarten, da z.B. sehr kleine Flächen häufiger einen *Konflikt* aufweisen, was sich unter Berücksichtigung der Anzahl stärker auswirkt. So sinkt hier z.B. unter Verwendung der Fläche der Prozentsatz für die Klasse *Konflikt* von 4.9 % auf 0.76 %.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	∑	%	UA %
frei	34 587.5	614.3	7.2	35 208.9	51.5	98.2
unbekannt	0.0	27 048.1	92.9	27 140.9	39.7	99.7
Bauteil möglich (BM)	0.0	0.0	3 072.5	3 072.5	4.5	100
unsicher	264.8	2 141.5	0.0	2 406.3	3.5	
Konflikt	8.0	61.0	448.3	517.3	0.8	
Σ	34 860.3	29 864.8	3 620.9	68 345.9	100.0	
%	51.0	43.7	5.3	100		
PA %	99.2	90.6	84.9			94.7

Tabelle 6.11: Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathcal{T}^{KS}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Fläche in m^2.

Die Ergebnisse für die anderen beiden Testszenarien in der vereinfachten Tabellenvariante sind in Tabelle 6.12 für $\mathcal{T}^{HFK}$ und in Tabelle 6.13 für $\mathcal{T}^{TTUM}$ zu finden. In beiden Fällen sind die Ergebnisse der flächenbasierten Bewertung angegeben.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	∑	%	UA %
frei	21 290.9	2 463.0	3.9	23 757.7	27.8	89.6
unbekannt	0.0	41 099.1	95.3	41 194.4	48.2	99.8
Bauteil möglich (BM)	0.0	0.0	14 318.6	14 318.6	16.8	100
unsicher	538.6	3 998.1	0.0	4 536.7	5.3	
Konflikt	8.3	21.2	1 623.6	1 653.2	1.9	
Σ	21 837.8	47 581.4	16 041.4	85 460.6	100.0	
%	25.6	55.7	18.8	100		
PA %	97.5	86.4	89.3			89.8

Tabelle 6.12: Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathcal{T}^{HFK}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Fläche in m^2.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	∑	%	UA %
frei	140 817.2	2 389.7	40.6	143 247.5	42.9	98.3
unbekannt	0.0	176 355.7	110.6	176 466.3	52.8	99.9
Bauteil möglich (BM)	0.0	0.0	6 778.0	6 778.0	2.0	100
unsicher	1 595.7	5 597.9	0.0	7 193.6	2.2	
Konflikt	7.4	2.7	304.8	315.0	0.1	
Σ	142 420.4	184 346.0	7 234.0	334 000.4	100.0	
%	42.6	55.2	2.2	100.0		
PA %	98.9	95.7	93.7			97

Tabelle 6.13: Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathcal{T}^{TTUM}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Fläche in m^2.

In Abschnitt 4.4 wird vorgeschlagen bei der Bewertung der Sichtbarkeit einer Rasterzelle immer eine Entscheidung zwischen *frei* und *belegt* zu erzwingen, so wie es bei den bisher gezeigten Ergebnissen der Fall ist, oder unter Verwendung der Schwellwerte S_{frei} und S_{bel} einen Bereich zu definieren, der als *unsicher* gilt. Die Auswirkungen der Wahl dieser Schwellwerte werden in Ta-

belle 6.14 gezeigt. Das Ergebnis wurde für die gleichen Parameterwerte wie in Tabelle 6.8 erzeugt, nur unter Verwendung der alternativen Werte 0.3077 bzw. 0.6087 für S_{frei} bzw. S_{bel}. Die Werte realisieren die in Abschnitt 4.4 formulierten Bedingungen für freie bzw. belegte Rasterzellen. Die Verwendung dieser Werte führt im Vergleich zu Tabelle 6.10 zu einer deutlich größeren Zahl, 5576 statt 283, an als *unsicher* eingestuften BF, bei einer nur unwesentlich geringeren Anzahl an Fehlklassifikationen für die anderen Klassen. Die Korrektheit für die *freien* Rasterzellen steigt nur um 0.5 % auf 99.4 %. Somit wird bei den weiteren Auswertungen auf den unsicheren Bereich bei der Sichtbarkeitsanalyse verzichtet.

↓ Klassifikation \→ GT	frei	unb.	BM	∑	%	UA %
frei	10 969	59	3	11 031	35.4	99.4
unbekannt	0	9 208	128	9 336	30	98.6
Bauteil möglich (BM)	0	0	2 501	2 501	8	100
unsicher	5 576	1 266	18	6 860	22	
Konflikt	410	953	70	1 433	4.6	
Σ	16 955	11 486	2 720	31 161	100	
%	54.4	36.9	8.7	100		
PA %	64.7	80.2	91.9			72.8

Tabelle 6.14: Vereinfachtes Klassifikationsergebnis Sichtbarkeit für das Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ für die BF aller Aufnahmezeitpunkte unter Verwendung der Anzahl wie in Tabelle 6.10, Ergebnisse für alternative Parameterwerte von S_{frei} und S_{bel}.

Als weitere Parametervariation wurde die Vergrößerung der Rastergröße l_r von 5 auf 10 cm getestet, um zu zeigen, dass diese kaum Auswirkung auf das Ergebnis hat. Bei allen drei Szenarien verschlechtern sich die Werte für die Gesamtgenauigkeit im Vergleich zu den in Tabelle 6.11, 6.12 und 6.13 gezeigten Ergebnisse nur geringfügig um ca. 1 % für KS und HFK und ca. 2 % für TTUM. Die UA für *frei* und *unbekannt* bleiben nahezu unverändert. Es ergibt sich ein etwas größerer Anteil an BF mit *Konflikt*, was darauf zurückzuführen ist, dass bei größeren Rasterzellen an den Bauteilrändern mehr Fehler auftreten können. Die deshalb etwas geringere Zahl an korrekten BF mit *Bauteil möglich* ist somit auch der Grund für die etwas geringere Gesamtgenauigkeit. Ansonsten kann jedoch die 10 cm Rasterung genauso gut für die folgende Bauteilbewertung herangezogen werden.

Für die Sichtbarkeitsanalyse kann somit je nach Szenario eine Gesamtgenauigkeit von 90 bis 95 % erreicht werden. Dabei werden bei der flächenbasierten Auswertung zwischen 2 und 7 % als *Konflikt* oder *unsicher* eingestuft, wird die Anzahl der BF herangezogen ist dieser Anteil höher.

Abschließend kann zur Bewertung der Erfassungsmethoden mit Hilfe der Ergebnisse der Sichtbarkeitsanalyse und der Ground Truth $\mathcal{G}_V$ bzw. $\mathcal{G}_V^{\Delta}$ auch eine Abschätzung der sichtbaren Fläche der Bauteile mit den Zuständen *(teilweise) gebaut*, *Schalung*, *Bewehrung* oder einem Mischzustand erfolgen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.15 in Bezug auf alle BF und in Tabelle 6.16 in Bezug auf die BF aller neugebauten Bauteile gegeben. Die Fläche der als sichtbar eingestuften BF betragen 15 %, 26 % bzw. 6 % für die drei Szenarien $\mathfrak{T}^{KS}$, $\mathfrak{T}^{HFK}$ und $\mathfrak{T}^{TTUM}$ bezogen auf alle Bauteile und 27 %, 42 % bzw. 14 % bezogen auf neue Bauteile. Die in der letzten Zeile „abgedeckt“ dargestellten Werte der tatsächlich mit Punkten abgedeckten Fläche, die zur Verifizierung der Bauteile verwendet werden kann, sind deutlich geringer.

6.3.2 Bewertung des gesamten Bauteils

Für die Bewertung des gesamten Bauteils werden die in Abschnitt 4.6.1 gezeigten Gewichtungsfunktionen verwendet. Die Werte der dafür benötigten Parameter w_1 bis w_4 wurden für die im Folgenden gezeigten Ergebnisse gesetzt, wie in Tabelle 4.3 angegeben. Die Werte wurden anhand

	KS		HFK		TTUM	
	Fläche [m^2]	von GF	Fläche [m^2]	von GF	Fläche [m^2]	von GF
Gesamtfläche (GF)	33407		63272		192976	
unbekannt (mit unsicher)	27369	82 %	42441	67 %	178150	92 %
Konflikt	1191	4 %	4535	7 %	3298	2 %
sichtbar (S)	4847	15 %	16296	26 %	11528	6 %
von (GF / S) abgedeckt	1800	5 % / 37 %	6857	11 % / 42 %	1869	1 % / 16 %

Tabelle 6.15: Sichtbare Bauteilflächen für alle Bauteile in allen Szenarien

	KS		HFK		TTUM	
	Fläche [m^2]	von GF	Fläche [m^2]	von GF	Fläche [m^2]	von GF
Gesamtfläche (GF)	7420		12051		19211	
unbekannt (mit unsicher)	5406	73 %	6122	51 %	15888	83 %
Konflikt	47	1 %	916	8 %	704	4 %
sichtbar (S)	1967	27 %	5013	42 %	2619	14 %
von (GF / S) abgedeckt	646	9 % / 33 %	2644	22 % / 53 %	376	2 % / 14 %

Tabelle 6.16: Sichtbare Bauteilflächen für neu errichtete Bauteile in allen Szenarien

der Abschätzungen der Punkt- und Koregistrierungsgenauigkeit gewählt, die Abweichungen von 2 bis 5 cm zwischen Bauteil- und Modellfläche erwarten lassen. Für die Mindestlänge der Profile l_{prof} wurde durchwegs der Wert 0.5 m verwendet. Der Wert für l_r wird bei den folgenden Auswertungen auf 10 cm statt auf 5 cm gesetzt (siehe Tabelle 6.8), da dies wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben, die Qualität der Sichtbarkeitsanalyse nur wenig verschlechtert, aber sich in besseren Kennwerten für die Gesamtbewertung äußert.

KS

Für $\mathfrak{T}^{KS}$ wurden an insgesamt 6 Aufnahmezeitpunkten jeweils 661 Bauteile, also insgesamt 3966 Bauteile, bewertet. Die Gesamtoberfläche aller Bauteile beträgt ca. 13123 m^2, also 78736 m^2 für alle Zeitpunkte. Die Ground Truth Klasse *teilweise gebaut* kommt in diesem Szenario nicht vor und wird deshalb in den Ergebnistabellen nicht aufgeführt. Die Ground Truth Klasse *Schalung und gebaut* kommt nur einmal vor, die Klasse *Schalung und Bewehrung* bei 5 Bauteilen. Da diese wenigen Bauteile entweder als *unbekannt* oder *unsicher* eingestuft wurden und auch keine anderen Bauteile als *Schalung und gebaut* oder *Schalung und Bewehrung* klassifiziert wurden, werden sie in den Ergebnistabellen für dieses Szenario nicht aufgeführt.

Für das hier behandelte Szenario werden sowohl die Ergebnisse aufgrund der Anzahl der Bauteile (Tabelle 6.17 und 6.19) als auch aufgrund ihrer Fläche (Tabelle 6.18 und 6.20) angegeben. Die ersten beiden Tabellen 6.17 und 6.18 zeigen das Ergebnis für die Summe über alle Bauteile an allen Zeitpunkten, also bezogen auf $\mathcal{G}_V$. Die beiden folgenden Tabellen 6.19 und 6.20 sind bezüglich $\mathcal{G}_V^{\Delta}$ gegeben, also nur bezogen auf die Bauteile, die sich laut Ground Truth zwischen zwei Aufnahmedaten verändert haben. Wie bei der Sichtbarkeitsanalyse sind für jede Klasse jeweils die Anzahl der Bauteile bzw. ihre Fläche gegeben und der Anteil an der Gesamtzahl bzw. -fläche. Die Korrektheit ist für alle Klassen außer *unbekannt*, *unsicher* und *Konflikt* angegeben. Die Vollständigkeit wird einmal bzgl. aller Bauteile berechnet und einmal ohne die als nicht sichtbar klassifizierten Bauteile der Klasse *unbekannt*, was mit einem (*) gekennzeichnet ist. Das Gleiche gilt für die Gesamtgenauigkeit, die in den Tabellen jeweils grau unterlegt ist. Für $\mathfrak{T}^{HFK}$ werden die Ergebnisse auf gleiche Weise dargestellt.

Insgesamt können ca. 50 % aller Bauteile korrekt bestimmt werden, wobei etwas mehr als 40 % der Bauteile nicht sichtbar sind. Berechnet man die Gesamtgenauigkeit aller bewerteten, also sichtbaren Bauteile, so erhält man einen Wert von über 90 %, wobei die flächenbasierte Bewertung mit 94.7 % einen noch etwas höheren Wert liefert. Die Korrektheit ist für gebaute und nicht gebaute Bauteile bei der flächenbasierten Bewertung mit 99.8% und 98.3% sehr hoch. Während die Vollständigkeit bei den nicht gebauten Bauteile ähnlich hoch ist, weisen die gebauten Flächen mit 74.3 % einen niedrigeren Wert auf. Die Klassifikationsergebnisse für die Schalungsteile erreichen nicht das Niveau der gebauten Teile. Die Erkennung der Bewehrung schlägt komplett fehl, diese Flächen weisen aber auch nur 0.5 % der Gesamtfläche auf. Berücksichtigt man nur die Bauteile, die sich seit dem vorherigen Aufnahmezeitpunkt verändert haben, so verringert sich die Gesamtgenauigkeit auf 84.5 % für die flächenbasierte Bewertung, basierend auf der Anzahl der Bauteile liegt sie sogar nur bei 47.7 %. Nicht gebaute Bauteile werden in diesem Fall nur berücksichtigt, wenn eigentlich gebaute Bauteile als *nicht gebaut* oder laut Ground Truth nicht gebaute Bauteile als *gebaut* klassifiziert wurden. Somit liegt in dieser Bewertung die Korrektheit und Vollständigkeit für *nicht gebaut* immer bei 0 %, da der Zustand *nicht gebaut* nur aufgeführt wird, wenn er in Kombination mit einer falschen Zuweisung auftritt. Der Flächenanteil dieser Fälle an der Gesamtfläche aller berücksichtigten Bauteile ist mit 1 % (siehe Tabelle 6.20) jedoch sehr klein.

Zur Visualisierung der Ergebnisse sind jeweils die Ground Truth $\mathcal{G}_V$ und die erkannten Bauteilflächen in Abbildung 6.8 für vier Aufnahmezeitpunkte gezeigt, jeweils ohne die Bauteile, die als *nicht gebaut*, *unbekannt* oder *unsicher* markiert sind. Die gebauten Bauteile sind blau, Schalungsteile orange und Bewehrung korallenrot gekennzeichnet. Die Farbgebung ist auch in Tabelle 4.1 gezeigt.

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	gebaut	Sch.	Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	1789	2	0	7	1798	45.4	99.5
gebaut	3	301	6	2	312	7.9	96.5
Schalung (Sch.)	0	1	5	1	7	0.2	71.4
Bewehrung (Bew.)	0	2	0	0	2	0.05	0.0
unbekannt	850	765	22	25	1662	42.0	
unsicher	29	83	6	16	134	3.4	
Konflikt	13	22	0	10	45	1.1	
$\sum$	2684	1176	39	61			
%	67.8	29.7	1.0	1.5			
PA %	66.7	25.6	12.8	0.0			52.9
PA % (*)	97.5	73.2	29.4	0.0			91.2

Tabelle 6.17: Ergebnis der Bauteilerkennung KS - Anzahl

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	gebaut	Sch.	Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	34880.9	8.5	0.0	64.4	34953.7	45.0	99.8
gebaut	23.8	4363.1	41.7	8.6	4437.1	5.7	98.3
Schalung (Sch.)	0.0	8.9	59.5	7.9	76.3	0.1	78.0
Bewehrung (Bew.)	0.0	13.1	0.0	0.0	13.1	0.02	0.0
unbekannt	9936.3	25757.7	256.9	114.9	36065.8	46.5	
unsicher	176.7	638.1	88.9	121.5	1025.1	1.3	
Konflikt	103.2	852.4	0.0	59.6	1015.2	1.3	
$\sum$	45120.8	31641.8	446.9	376.8			
%	58.2	40.8	0.6	0.5			
PA %	77.3	13.8	13.3	0.0			50.7
PA % (*)	99.1	74.2	31.3	0.0			94.7

Tabelle 6.18: Ergebnis der Bauteilerkennung KS - Fläche in [m^2]

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	gebaut	Sch.	Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	0	1	0	7	8	2.3	0.0
gebaut	1	58	3	2	64	18.5	90.6
Schalung (Sch.)	0	1	5	0	6	1.7	83.3
Bewehrung (Bew.)	0	0	0	0	0	0.0	0.0
unbekannt	0	171	18	25	214	61.8	
unsicher	0	27	3	14	44	12.7	
Konflikt	0	4	0	6	10	2.9	
$\sum$	1	262	29	54			
%	0.3	75.7	8.4	15.6			
PA %	0.0	22.1	17.2	0.0			18.2
PA % (*)	0.0	63.7	45.5	0.0			47.7

Tabelle 6.19: Ergebnis der Bauteilerkennung KS für neue Bauteile - Anzahl

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	gebaut	Sch.	Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	0.0	4.7	0.0	64.4	69.0	0.9	0.0
gebaut	10.7	2432.7	16.7	8.6	2468.6	30.7	98.5
Schalung (Sch.)	0.0	8.9	59.5	0.0	68.3	0.8	87.0
Bewehrung (Bew.	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
unbekannt	0.0	4784.2	186.6	114.9	5085.7	63.3	
unsicher	0.0	208.2	21.4	58.0	287.6	3.6	
Konflikt	0.0	22.8	0.0	32.8	55.6	0.7	
$\sum$	10.7	7461.4	284.2	278.6			
%	0.1	92.9	3.5	3.5			
PA %	0.0	32.6	20.9	0.0			31.0
PA % (*)	0.0	90.9	60.9	0.0			84.5

Tabelle 6.20: Ergebnis der Bauteilerkennung KS für neue Bauteile - Fläche in [m^2]

HFK

Für $\mathfrak{T}^{HFK}$ wurden an insgesamt 5 Aufnahmezeitpunkten jeweils 285 Bauteile, also insgesamt 1425 Bauteile, bewertet. Die Gesamtoberfläche aller Bauteile beträgt ca. 18992 m^2 also 94960 m^2 für alle Zeitpunkte. Die Ground Truth Klasse *teilweise gebaut* kommt in diesem Szenario bei 18 Bauteilen bzw. auf 1.5 % der Fläche vor. Zur Vereinfachung werden diese Teile der Klasse *gebaut* zugeteilt. Die meisten dieser Bauteile wurden als *gebaut* oder *unsicher* klassifiziert. Die beiden Klassen *Bewehrung* und *gebaut und Schalung* kommen nur zweimal vor und haben jeweils einen Flächenanteil von unter 1 %. Außerdem wurde kein Bauteil als eine dieser beiden Klassen zugehörig klassifiziert. Daher sind die Klassen in der Tabelle nicht aufgeführt.

Für dieses Szenario werden auch die Tabellen mit der anzahlbasierten und der flächenbasierten Bewertung, zum einen für alle Bauteile, in Tabelle 6.21 und 6.22, und zum anderen nur für die neu gebauten Bauteile, in Tabelle 6.23 und 6.24, angeführt. Man kann erkennen, dass der Abfall der Kennwerte von der flächenbasierten zur anzahlbasierten Auswertung in diesem Szenario stärker ausfällt als bei $\mathfrak{T}^{KS}$.

Wie bei $\mathfrak{T}^{KS}$ können hier in der flächenbasierten Auswertung ca. 50 % der Bauteile korrekt bestimmt werden. Auch hier sind etwas mehr als 40 % der Bauteile nicht sichtbar. Wird die Anzahl der Bauteile herangezogen, sinkt der Anteil der erkannten Bauteile auf ca. 30 % bei 60 % nicht sichtbaren Bauteilen. Für die flächenbasierte Auswertung fällt die Gesamtgenauigkeit ohne die nicht sichtbaren Bauteile mit 87 % etwas geringer aus als bei $\mathfrak{T}^{KS}$, wird die Anzahl der Bauteile herangezogen liegt der Wert nur bei 75 %. Die Vollständigkeit für gebaute Bauteile ist, wenn die flächenbasierte Auswertung herangezogen wird, mit 85.6 % höher als bei $\mathfrak{T}^{KS}$. Bei der anzahlbasierten Auswertung hingegen ist die Vollständigkeit niedriger. Für die Auswertung, bei der nur die

neuen Bauteile berücksichtigt werden, können 35 % der Bauteile und 53 % der sichtbaren Bauteile erkannt werden. Auch hier weist die anzahlbasierte Auswertung schlechtere Werte auf.

Zur Visualisierung der Ergebnisse sind jeweils die Ground Truth $\mathcal{G}_V$ und die erkannten Bauteilflächen in Abbildung 6.9 für vier Aufnahmezeitpunkte gezeigt, jeweils ohne die Bauteile, die als *nicht gebaut*, *unbekannt* oder *unsicher* markiert sind. Die gebauten Bauteile sind blau, Schalungsteile orange und Schalung + Bewehrung grün gekennzeichnet.

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	(teilw.) gebaut	Sch.	Sch. + Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	318	6	0	0	324	22.8	98.1
gebaut	1	97	1	0	99	7.0	98.0
Schalung (Sch.)	0	3	2	3	8	0.6	25.0
Sch. + Bewehrung (Bew.)	0	0	0	0	0	0.0	0.0
unbekannt	384	474	6	1	865	60.9	
unsicher	20	78	2	0	100	7.0	
Konflikt	8	12	3	2	25	1.8	
$\sum$	731	670	14	6			
%	51.4	47.1	1.0	0.4			
PA %	43.5	14.5	14.3	0.0			29.3
PA % (*)	91.6	49.5	25.0	0.0			75.0

Tabelle 6.21: Ergebnis der Bauteilerkennung HFK - Anzahl

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	(teilw.) gebaut	Sch.	Sch.+ Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	21906.4	197.0	0.0	0.0	22103.4	23.3	99.1
gebaut	52.6	20561.2	64.8	0.0	20678.5	21.8	99.4
Schalung (Sch.)	0.0	207.1	2313.2	233.9	2754.3	2.9	84.0
Sch. + Bewehrung (Bew.)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.00	0.0
unbekannt	8832.2	34437.8	134.2	46.4	43450.6	45.8	
unsicher	394.6	2769.6	68.0	0.0	3232.2	3.4	
Konflikt	63.4	278.8	87.2	2189.1	2618.5	2.8	
$\sum$	31249.1	58451.4	2667.5	2469.5			
%	33.0	61.6	2.8	2.6			
PA %	70.1	35.2	86.7	0.0			47.2
PA % (*)	97.7	85.6	91.3	0.0			87.1

Tabelle 6.22: Ergebnis der Bauteilerkennung HFK - Fläche in [m^2]

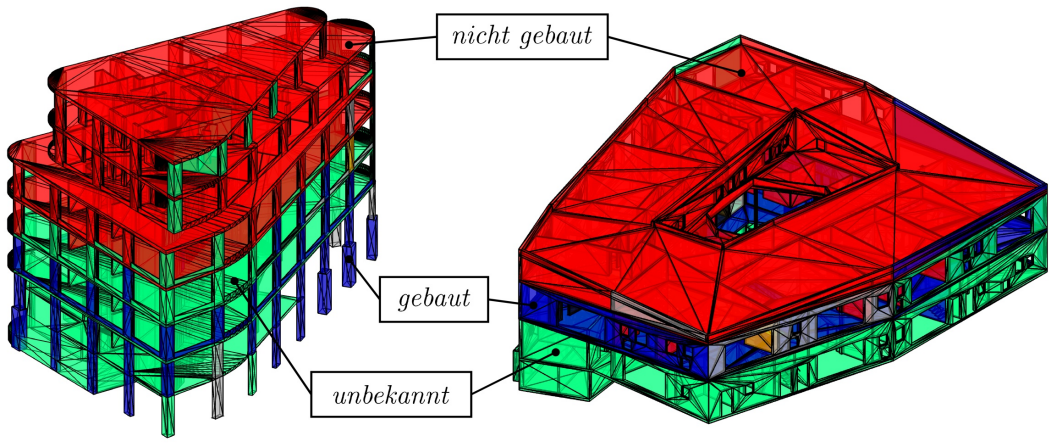
→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	(teilw.) gebaut	Sch.	Sch. + Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	0	4	0	0	4	2.5	0.0
gebaut	1	19	1	0	21	13.3	90.6
Schalung (Sch.)	0	2	1	3	6	3.8	16.7
Sch. + Bewehrung (Bew.)	0	0	0	0	0	0.0	0.0
unbekannt	0	72	6	1	79.0	50.0	
unsicher	0	36	2	0	38.0	24.0	
Konflikt	0	5	3	2	10	6.3	
$\sum$	1	138	13	6			
%	0.6	87.3	8.2	3.8			
PA %	0.0	13.8	7.7	0.0			12.7
PA % (*)	0.0	28.8	14.3	0.0			25.3

Tabelle 6.23: Ergebnis der Bauteilerkennung HFK für neue Bauteile - Anzahl

→ GT ↓ Klassifikation	nicht gebaut	(teilw.) gebaut	Sch.	Sch.+ Bew.	$\sum$	%	UA %
nicht gebaut	0.0	183.3	0.0	0.0	183.3	1.1	0.0
gebaut	52.6	5689.7	64.8	0.0	5807.0	35.8	98.0
Schalung (Sch.)	0.0	150.7	53.8	233.9	438.4	2.7	12.3
Sch. + Bewehrung (Bew.)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
unbekannt	0.0	5223.9	134.2	46.4	5404.6	33.3	
unsicher	0.0	1992.4	68.0	0.0	2060.4	12.7	
Konflikt	0.0	55.0	87.2	2189.1	2331.4	14.4	
$\sum$	52.6	13295.0	408.0	2469.5			
%	0.3	81.9	2.5	15.2			
PA %	0.0	42.8	13.2	0.0			35.4
PA % (*)	0.0	70.5	19.6	0.0			53.1

Tabelle 6.24: Ergebnis der Bauteilerkennung HFK für neue Bauteile - Fläche in [m^2]

In Abbildung 6.5 wird anhand jeweils eines Aufnahmezeitpunkts für die Szenarien $\mathfrak{T}^{KS}$ und $\mathfrak{T}^{HFK}$ das Ergebnis mit allen Zuständen gezeigt. Hier werden auch die Objekte mit den Klassen *nicht gebaut* in rot, *unbekannt* in hellgrün und *unsicher* in hellgrau gezeigt.

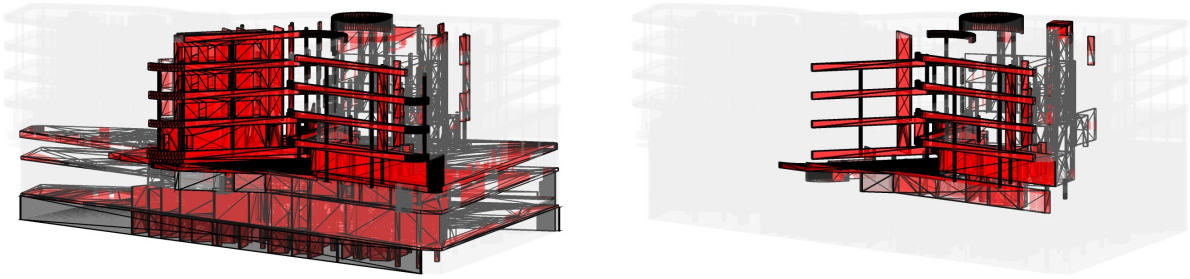


$\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ $\mathcal{A}^{HFK}_{1120}$

Abbildung 6.5: Ergebnis der Bauteilerkennung mit allen Zuständen für je einen ausgewählten Zeitpunkt von Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ und $\mathfrak{T}^{HFK}$. Die Klassen *nicht gebaut*, *gebaut* und *unbekannt* sind markiert. Die Farbgebung der weiteren Klassen ist in Tabelle 4.1 aufgeschlüsselt.

TTUM

Im Szenario mit der Krankamera $\mathfrak{T}^{TTUM}$ schlug die Bauteilerkennung weitestgehend fehl. Die Hauptgründe dafür sind, dass die zweite Kamera nach den ersten beiden Zeitschritten ausgefallen ist und dass die zu bewertenden Bauteile weitestgehend aus großen Bodenplatten, die nicht vollständig im Sichtfeld der Kameras lagen, oder aus Stützen, die mit der limitierten Kamerakonfiguration nicht ausreichend rekonstruiert werden konnten, bestanden. Dies hat zur Folge, dass die meisten Bauteile bei diesem Szenario als nicht sichtbar eingestuft wurden. Setzt man für ein sichtbares Bauteil, wie bei der Bestimmung der Ground Truth $\mathcal{G}_S$, an, dass eine seiner BF mindestens 15 % belegte Rasterflächen aufweisen muss, und weiterhin, dass die Fläche aller belegten Rasterzellen mindestens 5 % der Gesamtfläche des Bauteils betragen muss, so können für alle Zeit-



$\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$ $\mathcal{A}_{0318}^{TTUM}$

Abbildung 6.6: Ergebnis der Bauteilerkennung mit den Bauteilen mit dem Zustand *nicht gebaut* in rot für zwei ausgewählte Zeitpunkte von $\mathcal{T}^{TTUM}$

.

schritte insgesamt nur sechs Bauteile, davon drei Deckenplatten, als sichtbar angesehen werden. Hinzu kommt, dass bei den Aufnahmzeitpunkten $\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$ und $\mathcal{A}_{1204}^{TTUM}$ mit beiden Kameras zu Beginn des Bauvorhabens die Baugrube noch leer war (siehe auch Tabelle 5.3) und daher keine Bewertung des Abgleichverfahrens für gebaute Bauteile vorgenommen werden konnte. Die Gründe für die geringe Zahl an sichtbaren Bauteilen werden im folgenden Kapitel in Abschnitt 7.2 genauer diskutiert.

Die Detektion von nicht gebauten und unbekannten Bauteilen weist hingegen, wie in Abschnitt 6.3.1 gezeigt, das gleiche Genauigkeitsniveau auf wie bei den anderen Szenarien. In Abbildung 6.6 werden für zwei Zeitschritte die Ergebnisse mit den rot gekennzeichneten, nicht gebauten Bauteilen gezeigt. Man kann daran erkennen, dass der Bau zwischen dem ersten und dem letzten betrachteten Aufnahmezeitpunkt, $\mathcal{A}_{1124}^{TTUM}$ und $\mathcal{A}_{0318}^{TTUM}$, um zwei Kellergeschosse fortgeschritten ist. Auch der Abdeckungsbereich der Krankameras kann in der Abbildung abgeschätzt werden. Für die nicht vorhandenen Bauteile werden in diesem Szenario, unter Verwendung der gleichen Parameter wie für die anderen beiden Szenarien, folgende Ergebnisse in Bezug auf die ganzen Bauteile erreicht: Bei der flächenbasierten Auswertung liegt die Korrektheit für die nicht vorhandenen Bauteile bei 99.7 %. Die Vollständigkeit liegt bei Beurteilung aller Bauteile bei 13.3 % und bei Beurteilung nur der sichtbaren Bauteile bei 96.5 %. Wird die Anzahl der Bauteile herangezogen, liegen die Werte bei 99.5 %, 22.1 % und 97.6 %.

Parametervariationen

In Abbildung 6.7 sind für die Szenarien $\mathcal{T}^{HFK}$ und $\mathcal{T}^{KS}$ die Ergebnisse für 9 Parameterkombinationen gezeigt. Es werden die Grenzwerte der Bewertungsfunktionen w_1 bis w_3 variiert. Für den Distanzgrenzwert g_{w_1} wurden 3, 4 und 5 cm, für den Winkelgrenzwert g_{w_2} 1 und 2 ° und für den RMS-Grenzwert g_{w_3} 2 und 3 cm verwendet. Die Konfiguration 9, mit den jeweils größten Werten, ist für die oben gezeigten Ergebnisse verwendet worden und in der Abbildung durch die gestrichelte, rote Linie gekennzeichnet. Die Abbildung gibt die Korrektheit für die Klasse *gebaut* an, die in der Legende als *UA gebaut* bezeichnet ist. Außerdem wird die Vollständigkeit der Klasse *gebaut* ohne Einbeziehung der als *unbekannt* markierten Bauteile, in der Legende als *PA(*) gebaut* bezeichnet, sowie der Anteil der als nicht sichtbar eingestuften Bauteile, in der Legende als *unbekannt* bezeichnet, angegeben. Folgende Aussagen lassen sich anhand dieses Graphen treffen:

- Die Korrektheit liegt unabhängig von der Parameterwahl immer über 98 %.
- Die Vollständigkeit steigt für größere Grenzwerte an.
- Der Anteil der als nicht sichtbar eingestuften Bauteile liegt bei ca. 50 % und zeigt nur geringe Veränderungen aufgrund der Parameterwahl.
- Die Graphen zeigen bei beiden Szenarien ein ähnliches Verhalten. Nur der Sprung von 4 auf 5 cm für g_{w_1} zeigt für die Vollständigkeit einen deutlich größeren Anstieg bei $\mathcal{T}^{HFK}$ als bei $\mathcal{T}^{KS}$.

Die Variation der Rasterzellengröße zwischen $l_r = 5\,\text{cm}$ und $l_r = 10\,\text{cm}$, die in der Grafik nicht mit abgebildet ist, zeigte, dass die Verwendung größerer Rasterzellen etwas bessere Ergebnisse für die Vollständigkeit liefert. Für Konfiguration 9 steigt die Vollständigkeit bei $\mathcal{T}^{KS}$ um 13 %, bei $\mathcal{T}^{HFK}$ um 3 % auf die in der Abbildung 6.7 gezeigten Werte.

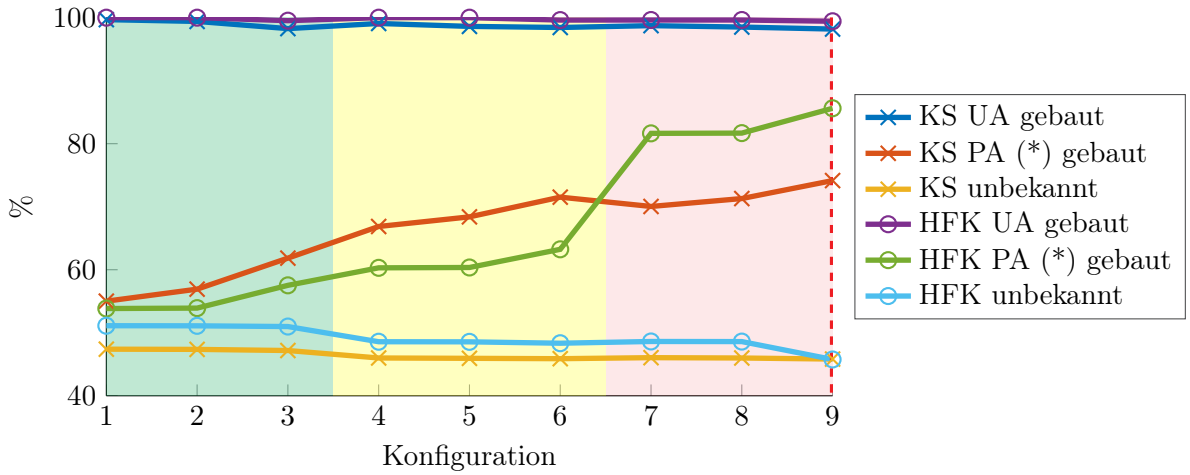


Abbildung 6.7: Analyse von Parametervariationen: Es werden Ergebnisse für eine unterschiedliche Wahl des Distanzgrenzwerts g_{w_1}, des Winkelgrenzwerts g_{w_2} und des RMS-Grenzwerts g_{w_3} der Bewertungsfunktionen gezeigt (siehe Abbildung 4.7 und Formel 4.6). Die Graphen zeigen jeweils für $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{HFK}$ die Korrektheit (UA), die Vollständigkeit der sichtbaren Bauteile (PA (*)), sowie den Prozentsatz an als *unbekannt* bewerteten Bauteilen für die flächenbasierte Bewertung aller Bauteile. Für g_{w_1} werden 3, 4 und 5 cm, für g_{w_2} 1 und 2 ° und für g_{w_3} 2 und 3 cm verwendet. Es werden die Ergebnisse von 9 verschiedenen Kombinationen gezeigt. Die Hintergrundfarbe zeigt den Wert für g_{w_1} an, die ersten drei Kombinationen im grünen Bereich sind für den Wert 3 cm, die Kombinationen im gelben Bereich sind für den Wert 4 cm und die Kombinationen im hellroten Bereich sind für 5 cm berechnet. Pro Bereich sind die Ergebnisse für die erste Konfiguration (also 1, 4 und 7) mit den Werten $g_{w_2} = 1°$ und $g_{w_3} = 2\,\text{cm}$ berechnet, die zweite Konfiguration (also 2, 5 und 8) mit den Werten $g_{w_2} = 1°$ und $g_{w_3} = 3\,\text{cm}$ und die dritte Konfiguration (also, 3, 6 und 9) mit den Werten $g_{w_2} = 2°$ und $g_{w_3} = 3\,\text{cm}$. Konfiguration 9 wurde für die in diesem Abschnitt gezeigten Ergebnisse verwendet (siehe Tabellen 6.18 und 6.22).

Bauzeitpunkt

Am Beispiel von $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ wird nun noch die Auswertung des möglichen Bauzeitpunkts, wie in den Tabellen 3.1 und 3.2 beschrieben, gezeigt. Zu diesem Bauzeitpunkt wurden 17 Bauteile zum ersten Mal als *gebaut* erkannt. Für diese Bauteile lieferte die Prozessabfrage die geplanten Fertigstellungstermine entweder 24.6.2013 (Fall A) oder 11.7.2013 (Fall B). Die Datenaufnahme erfolgte am 24.6.2013. Es konnten somit folgende mögliche Bauzeiträume bestimmt werden:

Fall A: Für diese Bauteile fällt die Beobachtung in die Kategorie III: Beobachtung $y = 3$ Tage nach dem geplanten Fertigstellungszeitpunkt. Somit gilt für diese Bauteile die Aussage (c) aus Tabelle 3.2 „höchstens 3 Tage zu spät, maximal 41 Tage zu früh“ gebaut. Die Aussage über die maximale Anzahl an Tagen, die die Bauteile zu früh gebaut sein könnten, muss aus den vorherigen Aufnahmezeitpunkten abgeleitet werden. An dem direkt davor liegenden Aufnahmezeitpunkt am 12.6.2013 wurden alle diese Bauteile als *nicht sichtbar* bzw. *unsicher* eingestuft, was keine Aussage über den Bauzeitpunkt zulässt. Deshalb muss auch der weiter davor liegende Aufnahmezeitpunkt am 15.5.2013 betrachtet werden, an dem alle Bauteile als *nicht gebaut* eingestuft wurden. Für den möglichen Fertigstellungstermin lässt sich also der Zeitraum 16.5.2013 bis 26.6.2013 bestimmen.

Fall B: Für diese Bauteile fällt die Beobachtung in die Kategorie I: Beobachtung $y = 15$ Tage vor dem geplanten Fertigstellungszeitpunkt. Somit gilt für diese Bauteile die Aussage (a) aus Tabelle 3.2 „mindestens 15 Tage zu früh“ gebaut. Am vorherigen Aufnahmezeitpunkt am 12.6.2013 wurden alle diese Bauteile als *nicht gebaut* eingestuft. Für den möglichen Fertigstellungstermin lässt sich also der Zeitraum 13.6.2013 bis 26.6.2013 bestimmen.

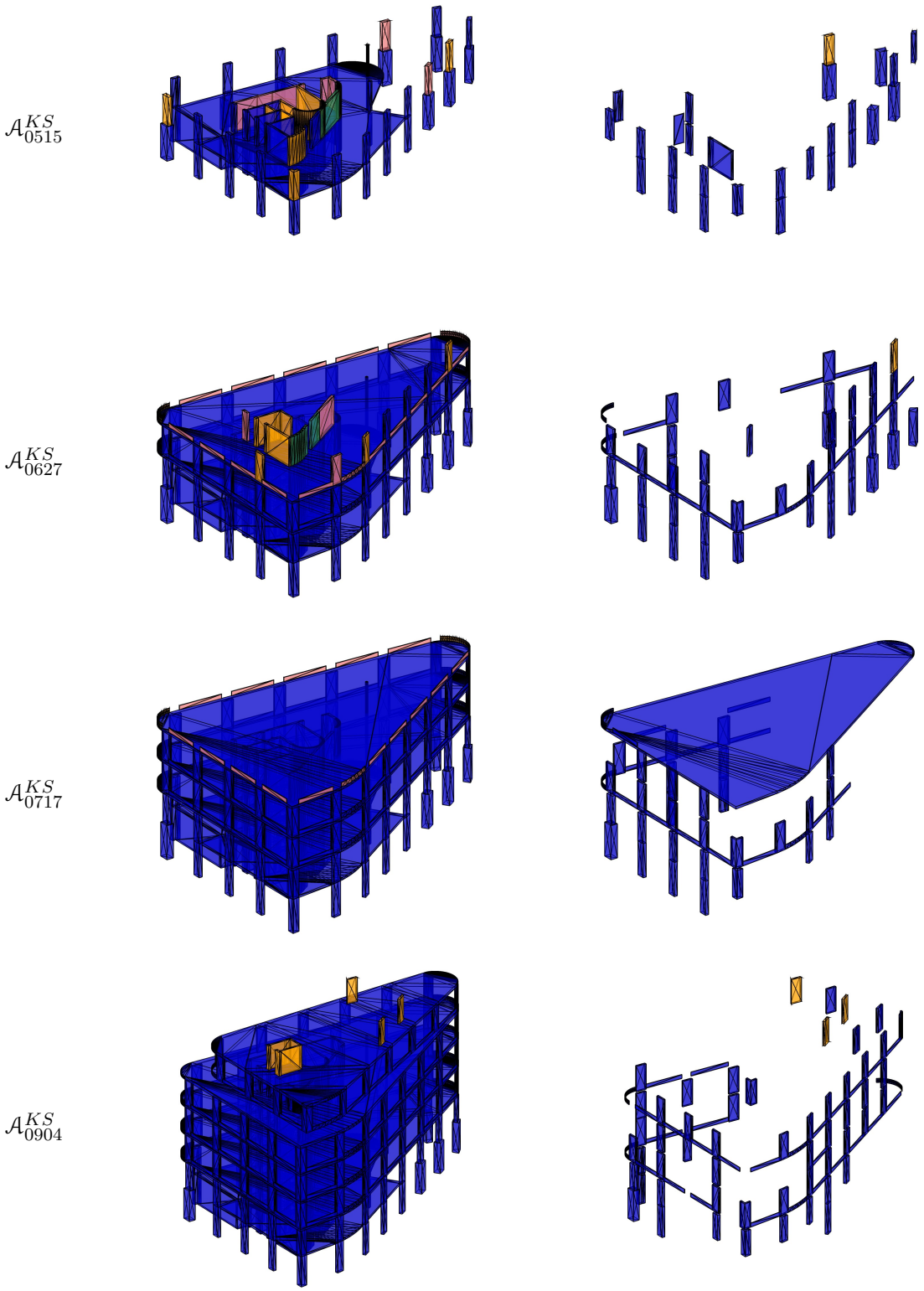


Abbildung 6.8: Ergebnis der Bauteilerkennung bei $\mathcal{T}^{KS}$, Auswahl von 4 Aufnahmezeitpunkten, links Ground Truth $\mathcal{G}_V$ ohne Bauteile mit dem Zustand *nicht gebaut*, rechts Klassifikationsergebnis ohne die Bauteile mit dem Zustand *nicht gebaut*, *unbekannt* und *unsicher*. Gezeigt sind die Klassen *gebaut* in blau, *Schalung* in orange, *Bewehrung* in korallenrot, *Schalung und gebaut* in magenta und *Schalung und Bewehrung* in grün. Die Farbgebung ist auch in Tabelle 4.1 aufgeschlüsselt.

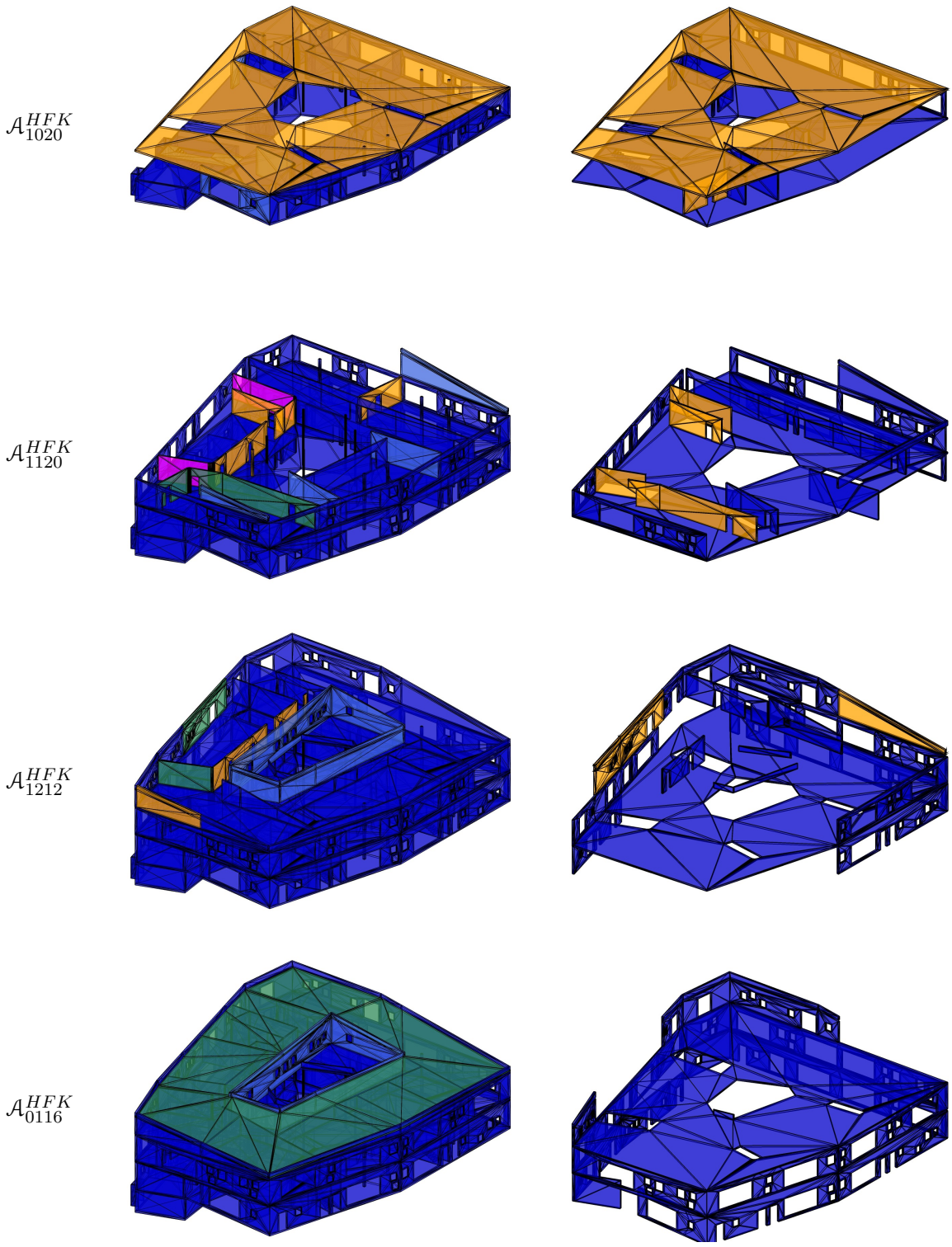


Abbildung 6.9: Ergebnis der Bauteilerkennung bei $\mathcal{T}^{HFK}$, Auswahl von 4 Aufnahmezeitpunkten, links Ground Truth $\mathcal{G}_V$ ohne Bauteile mit dem Zustand *nicht gebaut*, rechts Klassifikationsergebnis ohne die Bauteile mit dem Zustand *nicht gebaut*, *unbekannt* und *unsicher*. Gezeigt sind die Klassen *gebaut* in blau, *Schalung* in orange, *Schalung und gebaut* in magenta und *Schalung und Bewehrung* in grün. Die Farbgebung ist in Tabelle 4.1 aufgeschlüsselt.

7 Diskussion

Die beschriebenen Abgleichverfahren detektieren gebaute und nicht gebaute Bauteile zum Zeitpunkt der Datenaufnahme, wodurch die Abweichungen zum Soll-Zeitplan bestimmt werden können. Liefert der Abgleich ein falsches Ergebnis für ein Bauteil oder eine BF, so kann das folgende Gründe haben:

(i) Fehlerhafte Modellierung: geometrische Abweichungen, fehlende oder zusätzliche Bauteile

(ii) Fehlerhafte Bauausführung

(iii) Abweichungen zwischen Modell und as-built Punktwolke aufgrund von Ungenauigkeiten in der Koregistrierung

(iv) Abweichungen aufgrund von Ungenauigkeiten oder Fehlern in der 3D-Rekonstruktion

(v) Einschränkungen des Abgleichverfahrens und seiner Parameter

Die geometrischen Abweichungen aufgrund von Koregistrierung (iii) und 3D-Rekonstruktion (iv) werden in Abschnitt 7.1 betrachtet. Die Leistungsfähigkeit des Abgleichverfahrens und die Abhängigkeit der Ergebnisse von den verwendeten Parametern (v) wird in dem darauffolgenden Abschnitt 7.2 diskutiert. Das Kapitel schließt mit einer Bewertung der drei Erfassungsarten in Bezug auf die erzielten Ergebnisse (Abschnitt 7.3).

Fehler in der Modellierung (i) bzw. in der Bauausführung (ii) sind für das Abgleichverfahren nicht zu unterscheiden, da sie sich auf gleiche Weise in Form einer Abweichung von as-built und as-planned äußern. Beide Fälle sollten bei der Bewertung zu einem Zustand *nicht gebaut*, *unsicher* oder *Konflikt* führen, sodass die Aufmerksamkeit auf diese Bauteile zur manuellen Nachbetrachtung gelenkt wird. Kritisch ist der Fall, wenn sich ein Fehler im Modell und die entsprechende Bauausführung decken, da dann keine Unterschiede beim Soll-Ist-Abgleich aufdeckbar sind. Es kommt zu einer Bewertung *gebaut*, da nach dem fehlerhaften Modell gebaut wurde.

7.1 Bewertung der geometrischen Genauigkeit

Die Präzision einzelner Punkte der 3D-Punktwolke wurde in Abschnitt 6.1 dargestellt. In $\mathcal{T}^{HFK}$ ist der 3D-Punktfehler im Mittel mit 1 cm am niedrigsten, in $\mathcal{T}^{KS}$ liegt er bei 2.5 cm und in $\mathcal{T}^{TTUM}$ ist er mit 4 cm am größten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass für die Präzision der Punkte mit wenigen Strahlen zu gute Werte geschätzt werden, da sich für Punkte mit mehr Strahlen ähnliche Werte oder sogar eine schlechtere Präzision ergeben. Dies kann auf die geringe Zahl von Beobachtungen bei der Schätzung der Tiefengenauigkeit σ_D zurückgeführt werden. Deshalb werden bei der Filterung auch erst die Anzahl der Strahlen als Auswahlkriterium angewendet und erst anschließend bei Punkten mit gleicher Strahlenzahl die Genauigkeitswerte. Die genannten Werte wurde für die gefilterten Punktwolken berechnet, die Genauigkeit der Gesamtheit aller rekonstruierten Punkte ist schlechter einzuschätzen. Zu den Rekonstruktionsfehlern kommen Fehler aufgrund der

Koregistrierungsgenauigkeit. Diese liegt anhand der Untersuchungen der Passpunkte für die beiden Szenarien $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{HFK}$ bei 3 bis 5 cm. Die Analyse der Ebenenvariation, die als Maß für die kombinierte Genauigkeit von Rekonstruktion und Koregistrierung angesehen werden kann, ergab eine mittlere Abweichung im Bereich von 2 bis 3 cm.

Aufgrund des ermittelten Genauigkeitsniveaus von 2 bis 5 cm kann nicht davon ausgegangen werden, dass kleine Fehler in der Bauausführung, im Bereich der Bautoleranzen von 1 cm, aufgrund der rekonstruierten Punktwolken entdeckt werden können.

7.2 Bewertung des Abgleichverfahrens

Die Bestimmung der Sichtbarkeit einzelner BF dient als Grundlage für die weitere Bewertung der Bauteile. Die Auswertung zeigt, dass die Sichtbarkeitsanalyse mit über 90 % Gesamtgenauigkeit gute Ergebnisse liefert. Die Bestimmung ist auch dann zuverlässig, wenn bei der Entscheidung zwischen *frei* und *belegt* für die Rasterzellen keine Zwischenklasse für einen unsicheren Bereich eingeführt wird. Bei den drei Szenarien wurden jeweils die gleichen Parameter für die Berechnung verwendet. Diese liefern ähnlich gute Ergebnisse, sodass davon ausgegangen werden kann, dass das Verfahren und die gewählten Parameter ebenso in anderen Szenarien ohne Anpassung angewendet werden können. Aufgrund der Vielzahl von nicht sichtbaren Bauteilflächen ist die Sichtbarkeitsanalyse für den weiteren Abgleichvorgang notwendig.

Der Anteil der sichtbaren Fläche liegt nur bei maximal 42 % in Szenario $\mathcal{T}^{HFK}$. Die Werte in Bezug auf alle Bauteile sind kleiner als die in Bezug auf nur neu gebaute Bauteile, da im ersten Fall die bereits im Inneren errichteten Bauteile für jeden Aufnahmezeitpunkt mit in die Berechnung einbezogen werden und somit für eine große Zahl an nicht sichtbaren Bauteilen sorgen.

Der zweite Teil des Abgleichs zeigt, abhängig von den Aufnahmeszenarien, Unterschiede. Bei $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{HFK}$ zeigen die Ergebnisse der vorgestellten Methode eine vergleichbare Qualität, auf die Unterschiede wird im Folgenden eingegangen. Bei $\mathcal{T}^{TTUM}$ kommt es aufgrund von anderen Voraussetzungen zu deutlich schlechteren Ergebnissen. Die Gründe werden am Ende dieses Abschnitts diskutiert. Folgende Punkte fallen bei der Betrachtung der Ergebnisse von $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{HFK}$ auf:

(a) Die Korrektheit für *gebaut* und *nicht gebaut* liegt für alle Szenarien und Bewertungsarten immer über 90 %, in den meisten Fällen bei über 98 %.

(b) Es besteht eine große Zahl an nicht sichtbaren Bauteilen.

(c) Die Bewertung fällt in den meisten Fällen besser aus, wenn sie basierend auf der Fläche durchgeführt wird.

(d) Die Bestimmung des Zustands *Schalung* bzw. dessen Kombinationen sind nur teilweise möglich, die Detektion von *Bewehrung* schlägt fehl.

(e) Die Ergebnisse für die Gesamtgenauigkeit bei neugebauten Bauteile fallen schlechter aus.

(f) Nicht gebaute Bauteile weisen im Gegensatz zu gebauten Bauteilen einen viel kleineren Anteil an nicht sichtbaren Bauteilen auf.

Zunächst lässt sich festhalten, dass gebaute und nicht gebaute Bauteile, sofern sichtbar, zuverlässig erkannt werden können (a). Die Vollständigkeit, also der Anteil der als gebaut erkannten Bauteile an allen, laut Ground Truth gebauten Bauteilen ist aufgrund der großen Zahl an nicht sichtbaren Bauteilen (b) begrenzt. Je nach Klassifikationskriterium erreicht sie Werte von 15 bis 35 %. Die Erfassung der Baustelle muss daher verbessert werden, um höhere Detektionsraten zu

erreichen. Dies umfasst zum einen eine höhere Erfassungsfrequenz, z.B. wöchentlich statt monatlich, was insbesondere bei der Bewertung der neu errichteten Bauteile zu besseren Ergebnissen führen sollte, und zum anderen eine bessere Abdeckung aller Bauteile, sodass ein größerer Teil der Baustelle rekonstruiert werden kann. Letzteres kann z.B. durch Kombination der verschiedenen Erfassungsarten erreicht werden. Es muss aber auch berücksichtigt werden, dass bei der Bewertung mit allen Bauteilen viele im Gebäude liegende Elemente nicht mehr sichtbar sind, dies aber zu einem bestimmten Aufnahmezeitpunkt waren.

Die flächenbasierte Bewertung weist die besseren Werte auf (c), da größere Teile leichter zu detektieren sind und kleine Teile mit höherer Wahrscheinlichkeit komplett verdeckt werden. Nur für Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ bei Betrachtung aller Bauteile haben die Ergebnisse eine ähnliche Größenordnung. Hier fallen die vielen Deckenflächen, die einen Großteil der Gesamtfläche ausmachen, stark ins Gewicht, da sie in mehreren Fällen nicht sichtbar sind.

Die Ergebnisse für die Sonderzustände (d) fallen deutlich schlechter aus als die für die gebauten Bauteile. Diese Zustände sind deutlich seltener vorhanden und nur etwa die Hälfte ist in den Punktwolken sichtbar. Außerdem weichen auch Bauteile gleicher Kategorie in ihrer Charakteristik stark voneinander ab, z.B. die Schalung einer Decke oder einer Säule. Bei $\mathfrak{T}^{KS}$ sind nur 2.5 % der Bauteile und 1.1 % der Fläche, bei $\mathfrak{T}^{HFK}$ 1.4 % der Bauteile und 5.4 % der Fläche diesen Zuständen zuzuordnen. Der Anteil der Fläche bei $\mathfrak{T}^{HFK}$ ist verhältnismäßig groß, da zweimal eine Dachfläche einen Sonderzustand aufweist. Als mögliches Merkmal konnte die Detektion von orangefarbenen Elementen in bestimmten Bereichen vor einem Bauteil identifiziert werden, das sich in den richtig erkannten Schalungsteilen äußert. Die als *Schalung und Bewehrung* gekennzeichneten, aber als *Schalung* klassifizierten Bauteile könnten auch als korrekt gewertet werden. Ist nämlich die rückseitige Bewehrung als *unbekannt* klassifiziert und die gegenüberliegende Seite korrekt als *Schalung*, so sind diese beiden Zustände aufgrund der fehlenden Daten nicht zu unterscheiden. Die Korrektheit für *Schalung* bei der flächenbasierten Bewertung von neuen Bauteilen von $\mathfrak{T}^{HFK}$ aus Tabelle 6.24 würde sich dann von 12.3 % auf 65.6 % erhöhen. Die Annahme, dass sich die Bewehrung in innenliegenden Punkten äußert, konnte nicht bestätigt werden. Der Hauptgrund ist, dass aufgrund des geringen Durchmessers der Bewehrungsstäbe die Rekonstruktion der Bereiche mit Bewehrung häufig ein größeres Rauschen oder Fehler aufweist. Abbildung 7.1 zeigt ein Beispiel, bei dem sich die helle homogene Fläche hinter den Bewehrungsstäben, siehe Bildausschnitt in Abbildung 7.1b, bei der Rekonstruktion fehlerhafterweise als Zickzack-Muster, siehe Draufsicht auf die Punktwolke in Abbildung 7.1a, äußert.

Die Bewertung nur von neugebauten Bauteilen mit der Ground Truth $\mathcal{G}_V^{\Delta}$ weist eine schlechtere Gesamtgenauigkeit (e) auf als die Bewertung mit allen Bauteilen mit der Ground Truth $\mathcal{G}_V$. Es werden jedoch die Bauteile mit dem Zustand *nicht gebaut* nicht berücksichtigt. Diese weisen in allen Fällen höhere Erkennungsraten auf als Bauteile mit dem Zustand *gebaut*, bei der flächenbasierten Bewertung immer über 97 % für Korrektheit und Vollständigkeit. Da die nicht gebauten Bauteile auch einen großen Anteil an der Gesamtzahl der Bauteile haben, erhöht die Berücksichtigung dieser Bauteile die Werte für die Gesamtgenauigkeit deutlich gegenüber der Bewertung ausschließlich von bereits gebauten Bauteilen. Die Vollständigkeit und die Korrektheit der Bauteile mit den Klassen *gebaut* und *Schalung*, auf Basis der Bauteilfläche, sind bei $\mathfrak{T}^{KS}$ höher, wenn nur die neugebauten Bauteile bewertet werden, und bei $\mathfrak{T}^{HFK}$ höher, wenn alle Bauteile bewertet werden.

Die Bewertung der noch nicht vorhandenen Bauteile weist eine höhere Vollständigkeit auf als die Bewertung der gebauten Bauteile (f), weil noch nicht gebaute Teile nur selten durch andere Teile verdeckt werden. Dass dennoch auch nicht gebaute Teile *unbekannt* sind, liegt daran, dass hinter diesen Elementen Objekte rekonstruiert sein müssen, damit Sichtstrahlen dieses Objekt durchlaufen können. Werden Aufnahmen von oben gemacht, so trifft dies für einen großen Teil

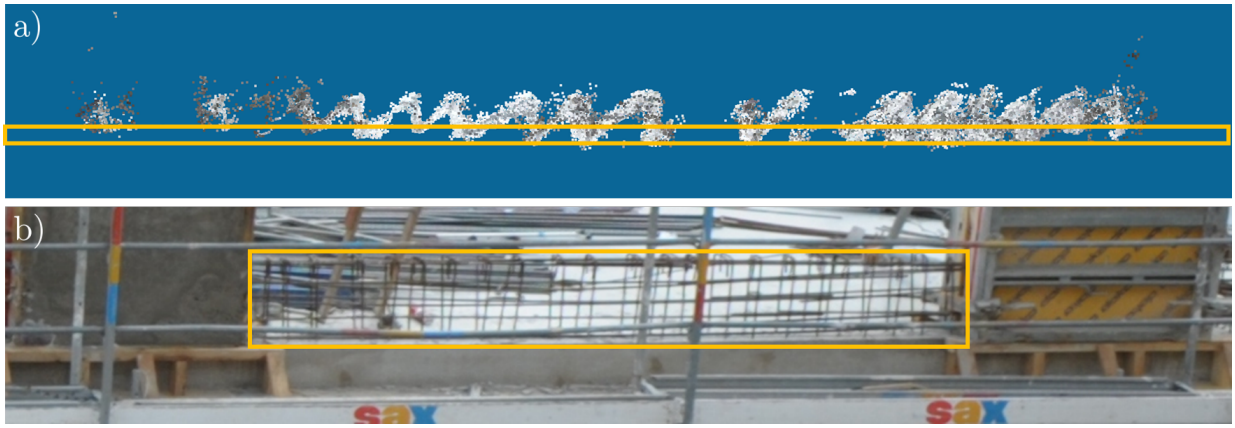


Abbildung 7.1: Rekonstruktion von Bewehrungsstäben bei Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$. Die Abbildung zeigt a) eine Draufsicht auf die Punktwolke eines bewehrten Bauteils und b) den dazugehörigen Bildausschnitt, der das Bauteil von vorne zeigt. Der Umriss des Bauteils ist jeweils in orange eingezeichnet.

der Bauteile zu. In Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ befinden sich außerdem auf allen Seiten Fassaden angrenzender Gebäude, die rekonstruiert werden können.

Die bisher gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf ganze Bauteile. Die gleiche Auswertung lässt sich auch bezüglich der BF vornehmen, aber ohne die Fälle, die erst aus der Kombination der BF abgeleitet werden können. Werden diese Ergebnisse verglichen, zeigt sich, wie erwartet, ein deutlicher Gewinn, wenn die Bewertung nach der Kombination für ganze Bauteile durchgeführt wurde. Während die Korrektheit der erkannten Bauteile nur leicht steigt, kann die Vollständigkeit deutlich gesteigert werden. Im Wesentlichen ist dies dem Effekt geschuldet, dass viele Bauteile nur von einer Seite sichtbar sind. Durch die Sichtbarkeitsanalyse kann jedoch bestätigt werden, dass eine BF nicht sichtbar statt nicht vorhanden ist. Somit kann dann in Kombination das gesamte Bauteil bestätigt werden. Die hohen Werte für die Korrektheit der erkannten Bauteile zeigen auch, dass es hierbei nicht zu Fehlinterpretationen kommt.

Anhand der Parametervariationen (Abbildung 6.7) kann Folgendes festgehalten werden. Werden Bauteile als *gebaut* oder *nicht gebaut* klassifiziert, so sind die Schwankungen aufgrund der Parameter gering und die Korrektheit liegt immer über 98 %. Unterschiede ergeben sich bei der Gesamtzahl der erkannten Bauteile. Es zeigte sich, dass die Vollständigkeit durch die Vergrößerung der Grenzwerte für die erlaubten Abweichungen von Abstand und Winkel sowie dem erlaubten RMS der Ebenenanpassung erhöht werden kann, bei gleichzeitig nur sehr kleinen Einbußen in der Korrektheit. Wichtig ist, dass gleiche Parameter das gleiche Verhalten in den Ergebnissen für beide Szenarien erzeugen, wodurch auf die Übertragbarkeit auf andere Baustellen geschlossen werden kann, bei denen ähnliche Genauigkeiten bei der Rekonstruktion und Koregistrierung erreicht werden.

Die Ergebnisse zeigen, dass es sinnvoll ist, die Auswertung sowohl anhand der Anzahl der Bauteile, als auch anhand ihrer Flächen durchzuführen. Durch einen Vergleich der Ergebnisse kann beurteilt werden, ob eher wenige große Flächen oder viele kleine nicht sichtbar oder nicht erkannt sind. Wird nur eines der beiden Ergebnisse betrachtet, kann das Bild über die Qualität des Abgleichverfahrens verzerrt sein.

Die Erprobung des Verfahrens in Szenario $\mathfrak{T}^{TTUM}$ liefert bei der Bewertung der Sichtbarkeitsanalyse und der Detektion von nicht gebauten Bauteilen eine ähnlich hohe Vollständigkeit und Korrektheit wie bei den anderen beiden Szenarien. Folgende Umstände führten jedoch dazu, dass

gebaute Bauteile nicht erkannt werden konnten, bzw. zum größten Teil nicht rekonstruiert wurden, und damit als *unbekannt* eingestuft wurden:

- Die Bilder konnten nicht kontrolliert aufgenommen werden, sondern waren an die Kranbewegungen gebunden.
- Durch den Ausfall der zweiten Kamera nach den ersten beiden Zeitschritten, lag keine Stereokonfiguration entlang des Auslegers mehr vor. Mit der verbliebenen Kamera lagen nur noch überlappende Bilder mit kürzeren, als die vorher möglichen, Basislinien vor. Somit verschlechterte sich die erreichbare Tiefengenauigkeit.
- Die Bauteile bestehen weitestgehend aus großen Bodenplatten, die nicht vollständig im Sichtfeld der Kameras lagen, oder aus Stützen, die mit der limitierten Kamerakonfiguration nicht rekonstruiert werden konnten.

In einem kontrollierten Szenario mit zwei Kameras im Überlappungsbereich sind deshalb bessere Ergebnisse für die Detektion von gebauten Bauteilen in den drei Kellergeschossen zu erwarten. Für höhere Bauwerksebenen müssen, wie in Abschnitt 3.2.3 gezeigt, deutlich mehr Kameras am Ausleger verwendet werden. Bei einer limitierten Anzahl von Kameras ist immer ein Kompromiss zwischen einem höheren Überlappungsbereich mit einer kürzeren Basislinie und größeren erreichbaren Rekonstruktionsgenauigkeiten mit längerer Basislinie zu finden, da sich aufgrund des Anwachsens des Gebäudes das Basis-Höhen-Verhältnis sowie der abgedeckte Bodenbereich auch bei konstanter Basislinie ständig veränderten. Die Rekonstruktion von vertikalen Flächen kann verbessert werden, indem die vorgeschlagene Kameraanordnung mit schrägblickenden Kameras ergänzt wird oder, abhängig von der Abdeckung durch den Kran, die Nadirkameras teilweise durch schrägblickende Kameras ersetzt werden. Aufgrund dieser Ergebnisse kann das Szenario nur als erster Test für den Einsatz von Krankameras gesehen werden, wobei die gemachten Erfahrungen in zukünftige Tests einfließen können.

7.3 Bewertung der Erfassungskonzepte

Die Vor- und Nachteile der einzelnen Erfassungskonzepte wurden bereits in Abschnitt 3.2 behandelt. In diesem Abschnitt werden die Erfassungskonzepte nun hinsichtlich der spezifischen Testszenarien bewertet. Durch den Einsatz in unterschiedlichen Szenarien können die Vor- und Nachteile nicht eins zu eins übertragen werden.

In Szenario $\mathcal{T}^{KS}$ war die handgetragene Erfassung für die Baustelle geeignet, da der Einsatz eines UAV hier nicht möglich war, weil die Baustelle vollständig von Straßen umgeben ist und Straßenbahnoberleitungen vorhanden sind. Die Größe der Baustelle erlaubte die Erfassung in relativ kurzer Zeit. Nicht rekonstruierte Bereiche an der Außenfassade sind im Wesentlichen auf fehlende Bilder in diesen Bereichen und die Verdeckung durch die Baustelleneinrichtung zurückzuführen. Ohne erhöhte Aufnahmepositionen ist die Erfassung der oberen Stockwerke nur teilweise möglich. Da das Aufsuchen erhöhter Positionen die Aufnahmezeit erheblich steigert und solche Aufnahmepositionen auch nicht auf jeder Baustelle vorhanden sind, würde hier die Anbringung von Kameras am Kran die Bodenaufnahmen gut ergänzen. Im Szenario $\mathcal{T}^{KS}$ überstreicht ein einzelner Kran die gesamte Baufläche.

In Szenario $\mathcal{T}^{HFK}$ bot sich auf Grund der freien Umgebung die Erfassung mit UAV an. Eine zusätzliche Erfassung mit Krankameras wäre in diesem Fall zur Erhöhung der Aufnahmefrequenz sinnvoll. Eine Erfassung mit einer handgetragenen Kamera wäre auch möglich gewesen, da die Umgebung der Baustelle immer gut zugänglich war. Erhöhte Aufnahmepositionen hatten hier jedoch aufgrund der fehlenden Bebauung auf drei der vier Gebäudeseiten nur begrenzt zur Verfügung gestanden.

In Szenario $\mathfrak{T}^{TTUM}$ wurden Krankameras eingesetzt. Mit Hilfe einer einzelnen Kamera konnte das Potenzial des Grundkonzepts gezeigt werden, da selbst mit dieser Kamera zumindest die nicht gebauten Bauteile detektiert werden konnten. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, sind mehr und ggf. synchronisierte Kameras notwendig. Während des Ausbaus der Kellergeschosse und auch noch mindestens des Erdgeschosses wäre hier eine handgetragene Erfassung eingeschränkt gewesen, da an zwei Seiten des Gebäudes eine undurchsichtige Einzäunung vorhanden war. Für eine UAV-Befliegung hätte es in diesem Fall einer erhöhten Abstimmung bedurft, da aufgrund eines angrenzenden Helikopterlandeplatzes ein Flug nur nach Freigabe der Leitstelle möglich gewesen wäre.

Anhand der hier durchgeführten Diskussion wird deutlich, dass keine Erfassungsart einen klaren Vorteil hat, sondern dass für jede Baustelle und gegebenenfalls sogar für jeden Bauabschnitt individuell entschieden werden muss, welche Herangehensweise gewählt wird. Es kann auch sinnvoll sein, mehrere Erfassungsarten zu kombinieren.

Die Erfassung muss, gegenüber den hier durchgeführten Experimenten, hinsichtlich der Abdeckung mit verlässlichen 3D-Punkten, vor allem im Bereich der neu errichteten Bauteile, verbessert werden. Dafür müssen insbesondere die Zeitabstände zwischen den Aufnahmen verringert werden, um zu vermeiden, dass Bauteile, die gebaut werden, bei der nächsten Aufnahme bereits wieder komplett von anderen, neuen Bauteilen umgeben und damit verdeckt sind.

8 Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Alle in dieser Arbeit behandelten Schritte zur photogrammetrischen Baufortschrittskontrolle sind in Abbildung 8.1 am Beispiel des Aufnahmezeitpunktes $\mathcal{A}^{KS}_{0627}$ zusammenfassend gezeigt. Die Zusammenfassung folgt dieser Abbildung und greift die Forschungsfragen (FF) aus Kapitel 1 auf.

FF 1: Wie kann eine photogrammetrische Erfassung die Dokumentation des Bauzustandes unterstützen, welche Aufnahmetechniken eignen sich für die Baufortschrittskontrolle in unterschiedlichen Szenarien und wie gut eignen sich die verschiedenen Erfassungsarten für die vorgeschlagenen Verfahren zur fortlaufenden Koregistrierung und zur Erkennung des Bauzustands?

In Abbildung 8.1a ist ein Bild einer handgetragenen Kamera gezeigt. Neben dieser wurden noch zwei weitere Aufnahmearten, nämlich UAV und Krankamera, getestet. Handgetragene und UAV-Erfassung weisen in Bezug auf Koregistrierungsgenauigkeit, Abdeckungsrate und Bauteilerkennung eine vergleichbare Qualität der Ergebnisse auf. Dabei ist zu beachten, dass sich die beiden Baustellenszenarien deutlich unterscheiden. Die Aufnahme aus der Luft hat Vorteile bei der Erfassung von Deckenflächen und von nicht am Rand liegenden Objekten, die Erfassung mit handgetragener Kamera kann in einem innerstädtischen Szenario mit wenig Platz und etwaigen Flugeinschränkungen flexibler eingesetzt werden. Aufgrund der in Abschnitt 7.2 genannten Gründe weist die Erfassung vom Kran deutlich schlechtere Ergebnisse auf, mögliche Maßnahmen zur Verbesserung wurden vorgeschlagen. Wie im folgenden Absatz beschrieben, gibt es bei allen Aufnahmetechniken Verbesserungsbedarf bei der vollständigen Erfassung der Bauteile. Die fortlaufende Koregistrierung funktioniert bei der UAV-Aufnahme aufgrund der Abdeckung mit Nadirbildern in einem größeren unveränderten Bereich um die Baustelle am besten, konnte aber auch im Szenario mit der handgetragenen Kamera erfolgreich durchgeführt werden, mit der Einschränkung, dass die Prozessierung teilweise in Subblöcke aufgeteilt werden musste.

Grundsätzlich unterstützt die photogrammetrische Erfassung die Dokumentation der Baustelle, da mit dem 4D-Modell verknüpfte orientierte Bilddaten erstellt werden, und so z.B. aus einer Datenbank alle Bilder, die ein bestimmtes Bauteil zu einem bestimmten Zeitpunkt zeigen, abgefragt werden können.

FF 2: Welche Rekonstruktionsgenauigkeiten und Abdeckungsraten als Anteil der rekonstruierten Bauteilflächen können erreicht werden?

Für die aufgenommenen Bilder müssen die Orientierungen bestimmt (Abbildung 8.1b), geeignete Stereopaare gefunden, ein Dense Matching durchgeführt werden und die daraus entstandenen Disparitätsbilder zu einer Punktwolke (Abbildung 8.1d) fusioniert werden. Die Ergebnisse zeigen, dass das Genauigkeitsniveau der Rekonstruktion, bestimmt aus den geschätzten Standardabweichungen der Punkte, im Bereich von 1 bis 3 cm bei $\mathcal{T}^{KS}$ und $\mathcal{T}^{HFK}$ und bei um 5 cm bei $\mathcal{T}^{TTUM}$ liegt. Die Abdeckung von neu gebauten BF liegt deutlich unter der Hälfte der Gesamtfläche, dabei sind auch die sichtbaren BF im Schnitt nur zu maximal $50\dot{\%}$ mit Punkten abgedeckt.

FF 3: Können Bilder von aufeinanderfolgenden Aufnahmen einer Baustelle bei sich veränderndem Szeneninhalt koregistriert werden und mit welcher Genauigkeit kann die Koregistrierung von Gebäudemodell und Bildern, bzw. den aus ihnen generierten Punktwolken, erfolgen?

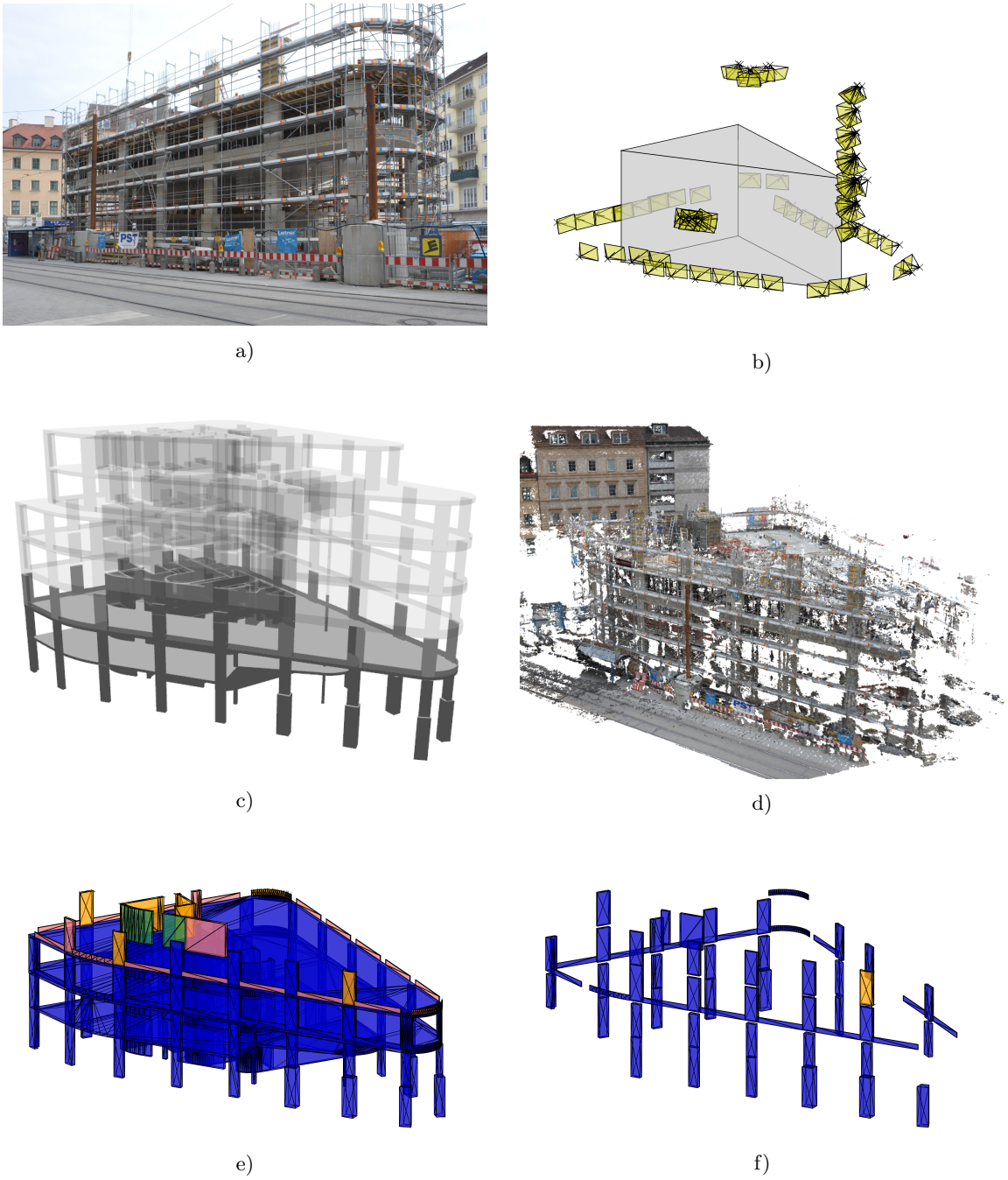
Das Soll-Modell (Abbildung 8.1c) muss mit der dichten Punktwolke abgeglichen werden, um den aktuellen Baufortschritt und insbesondere die Abweichungen vom Sollzustand aus der Planung zu ermitteln. Die dazu nötige Koregistrierung erfolgt über die Verknüpfung von Bildern aufeinanderfolgender Aufnahmezeitpunkte. Dafür wird der Bildblock des ersten Aufnahmezeitpunkts über Passpunkte in das Baustellensystem transformiert. In den hier durchgeführten Experimenten wurde teilweise auch ein anderer Aufnahmezeitpunkt als initialer Block verwendet. Das Verfahren wurde in Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ mit tachymetrisch eingemessenen Passpunkten erfolgreich angewendet. Die Analyse von Ebenenvariation und Differenzen von Passpunktkoordinaten von verschiedenen Zeitschritten zeigt Koregistrierungsgenauigkeiten, die im Bereich von wenigen Zentimetern liegen. Der Wert für die Ebenenvariation kann als kombinierte Abweichung aufgrund von Koregistrierung und Punktgenauigkeit angesehen werden. Die mittlere Ebenenvariation liegt bei 2.9 cm, der RMS-Fehler der Passpunktdifferenzen liegt bei 2.3 cm. Auch in Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ konnten alle Aufnahmezeitpunkte zueinander registriert werden, wobei in diesem Fall die Passpunkte aus einer Laserscanning-Punktwolke extrahiert wurden. Die mittlere Ebenenvariation liegt bei 2.9 cm, der RMS der Passpunktdifferenzen liegt in diesem Szenario bei 4.7 cm. In Szenario $\mathfrak{T}^{TTUM}$ waren mehrere initiale Bildblöcke notwendig, da das Verfahren hier nur teilweise erfolgreich war.

FF 4: Wie zuverlässig können gebaute und nicht gebaute Bauteile mit dem entwickelten Abgleichverfahren erkannt werden und kann zwischen den verschiedenen Zuständen beim Stahlbetonbau unterschieden werden?

Zur Bewertung der entwickelten Abgleichverfahren wurde für alle aufgenommenen Aufnahmezeitpunkte aller Szenarien eine detaillierte Ground Truth (Abbildung 8.1e) erstellt. Abbildung 8.1f zeigt als Ergebnis für einen Aufnahmezeitpukt die als *gebaut* erkannten Bauteile. In dieser Arbeit wurden unterschiedliche Kriterien für die Bewertung der Klassifikation der Bauteilzustände herangezogen. Ergebniswerte wurden sowohl für alle Bauteile als auch nur für neu gebaute Bauteile ermittelt. Weiterhin wurde zwischen einer flächenbasierten Bewertung und einer Bewertung nach Anzahl der Bauteile unterschieden. Zur Bewertung des entwickelten Abgleichverfahrens eignet sich die Bewertung aller Bauteile, diese Ergebnisse werden im Folgenden aufgeführt, für den praktischen Einsatz ist die Erkennung neuer Bauteile entscheidend.

Bei der Bewertung aller Bauteile auf Basis der Flächen konnten die folgenden Ergebnisse mit den in dieser Arbeit vorgestellten Verfahren erreicht werden: In Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ (vgl. Tabelle 6.18) liegt die Korrektheit, also der Anteil der richtigerweise als gebaut eingestuften Bauteile, bei 98.3%. Die Vollständigkeit, also der Anteil der als *gebaut* erkannten Bauteile an der Gesamtmenge aller gebauten Bauteile, erreicht bezüglich der als sichtbar eingestuften Bauteile 74.2 %. Unter derselben Konfiguration liegt bei Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ (vgl. Tabelle 6.22) die Korrektheit bei 99.4 %, die Vollständigkeit für die sichtbaren Bauteile bei 85.6 %. Aufgrund der in Abschnitt 7.2 genannten Gründe erfolgte diese Bewertung im dritten Szenario nicht. In den anderen beiden Szenarien konnten bei der Betrachtung aller Bauteile etwas bessere Ergebnisse erzielt werden als bei der alleinigen Betrachtung der neugebauten Bauteile.

Der Detailgrad der Ground Truth spiegelt die im Abgleichverfahren definierten Zustände wider. Dieser beinhaltet neben den Klassen der gebauten Bauteile auch nicht gebaute Bauteile. Letztere konnten mit Hilfe von Sichtbarkeitsanalysen mit großer Zuverlässigkeit bestimmt werden. Bei Szenario $\mathfrak{T}^{KS}$ lag die Korrektheit bei der flächenbasierten Bewertung der nicht gebauten Bauteile bei 99.8%, die Vollständigkeit bei 99.1 % für die sichtbaren Bauteile und 77.3% für alle Bauteile, bei Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ liegen diese Werte bei 99.1 %, 97.7 % und 70.1 % und bei Szenario $\mathfrak{T}^{TTUM}$ bei



a) b) c) d) e) f)

Abbildung 8.1: Überblick über die durchgeführten Schritte bei der Baufortschrittskontrolle: a) Bildaufnahme, b) Orientierung der Bilder, c) as-planned-Modell, d) as-built-Punktwolke, e) Ground-Truth, f) Detektionsergebnisse

99.7 %, 96.5 % und 13.3 %. Ob noch nicht gebaute Bauteile sichtbar oder nicht sichtbar sind, wird in Kapitel 5.4 bei Beschreibung der Ground Truth $\mathcal{G}_S$ definiert.

Das Verfahren ist also hinsichtlich der Korrektheit sehr zuverlässig, sie liegt sowohl für gebaute als auch für nicht gebaute Bauteile immer bei über 98 %. Die Vollständigkeit muss für den Einsatz noch verbessert werden, was besonders, wie oben beschrieben, die Datenerfassung betrifft, da es viele nicht sichtbare Bauteile gibt. Die Unterscheidung von Schalungsteilen ist möglich, wenn sich diese durch ihre markante orangene Farbgebung abheben. Die Erkennung von Bewehrung war mit

den hier vorgestellten Bewertungskriterien und bei der hier erreichten Rekonstruktionsgenauigkeit nicht möglich.

8.2 Ausblick

Der Ausblick umfasst mögliche Verbesserungen und Erweiterungen der beschriebenen Aufnahmetechniken und Abgleichverfahren. Außerdem werden an diese Arbeit anschließende und ergänzende Forschungsarbeiten, auch unter Nutzung der hier gewonnenen Daten, vorgestellt. Zuletzt werden mögliche Erweiterungen und Nutzungen der hier entwickelten Verfahren zur Baufortschrittskontrolle in anderen Bereichen als dem Rohbau aufgezeigt.

Eine mögliche Verbesserung bzw. Erweiterung der Aufnahmetechniken bietet die Verwendung mehrerer Kameras bei einem Kranszenario mit der in Kapitel 3 bestimmten Kameraanordnung. Um eine erhöhte Erfassungsfrequenz mit dem UAV zu erreichen, wäre eine optimierte UAV-Flugplanung mit automatischer Flugpfadberechnung anhand von Modell und Baustelleneinrichtung hilfreich. Im Freien automatisch messbare photogrammetrische Passmarken können zu einer weiteren Automatisierung des Koregistrierungsprozesses beitragen. Schließlich kann eine visuelle Unterstützung bei der Datenaufnahme, die in Echtzeit noch nicht erfasste Bereiche zeigt, zu einer besseren Abdeckung beitragen.

Zur Erweiterung des Abgleichverfahrens können Methoden zur Materialerkennung (z.B. von Dimitrov & Golparvar-Fard [2014]; Zhu & Brilakis [2010]; Son et al. [2012]; DeGol et al. [2016]) verwendet werden, um z.B. bereits Pixel in den Bildern zu markieren, die zu einer bestimmten Material- oder Objektklasse gehören. Die im BIM hinterlegten Informationen, wie die Materialeigenschaften, können so in den Abgleich mit einbezogen werden. Bisher beruht das Abgleichverfahren auf dem Abgleich von ebenen Flächen. Für eine Verallgemeinerung müssen die verwendeten Methoden auf die Anwendung auch für andere Formen angepasst werden, wobei zwischen parametrisierbaren Objekten und Freiformflächen unterschieden werden kann. Das häufigste gekrümmte Objekt sind zylindrische Stützen. Eine mögliche Umsetzung wäre hier, statt einer Repräsentation durch Dreiecke, die direkte Repräsentation durch Zylinderparameter und eine Teilung in Bauteilflächen durch Teilung des Zylinders in Sektoren, die sich ggf. an der Ausrichtung des Gebäudes, d.h. in Richtung der nach außen zeigenden Fassade orientieren.

Eine Vielzahl von Erweiterungen der hier genannten Verfahren bzw. die Nutzung der hier gewonnenen Daten wurden bereits in Anschlussarbeiten aufgenommen. Die in dieser Arbeit erstellten Punktwolken wurden u.a. schon zur Rekonstruktion von Gerüstelementen [Xu et al., 2015, 2016a], für Tests zur Koregistrierung mit Infrarot-Bildern [Hoegner et al., 2016] (siehe Abbildung 8.2), sowie zum Test von Segmentierungsalgorithmen für die Generierung von as-built-Modellen [Xu et al., 2016b, 2017a,b] verwendet. Letztere Verfahren zielen darauf ab, direkt aus den auf der Baustelle erfassten Daten ein as-built BIM zu erstellen. Die genannten Arbeiten behandeln den ersten dazu nötigen Schritt, die Gruppierung der Punktwolke in Segmente, die demselben Objekt zuzuordnen sind. An die extrahierten Segmente können geometrische Primitive wie Ebene und Zylinder angepasst werden. Die präsentierten Verfahren basieren allein auf der Geometrie der Punktwolke und nutzen die Gruppierung nach wahrnehmungsgeprägten Aspekten. Für die Umsetzung werden Voxel- und Graphen-basierte Verfahren kombiniert. Der nächste Schritt auf dem Weg zum as-built BIM ist die Klassifizierung der Segmente bzw. der geometrischen Primitive. Aus diesen Objekten kann ein Bauwerkmodell generiert werden oder sie können zum Abgleich mit einem bestehenden Modell genutzt werden.

Die Detektionsergebnisse der gebauten Bauteile können mit Hilfe eines Abhängigkeitsgraphen verfeinert werden, indem der Zustand z.B. verdeckter Bauteile anhand deren Abhängigkeiten im

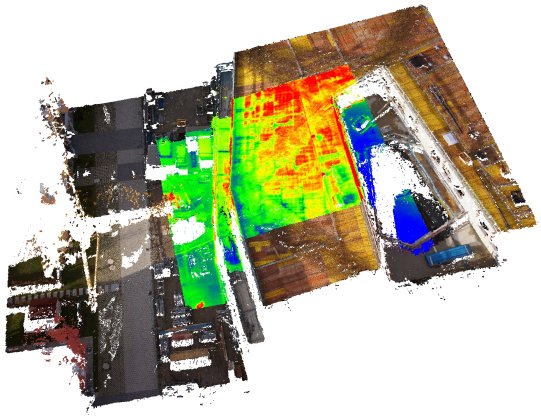
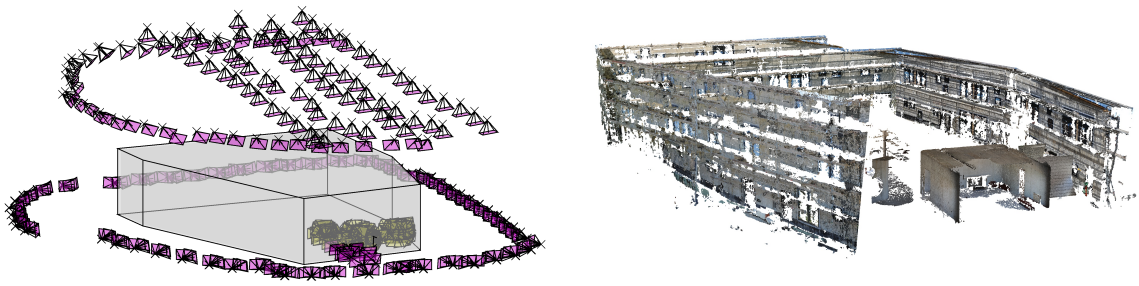


Abbildung 8.2: Koregistrierung mit Infrarot Bildern in Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ aus Hoegner et al. [2016]



a) b)

Abbildung 8.3: Kombinierte Innenraumerfassung: a) Kamerapositionen, b) Punktwolke mit innen liegenden Räumen

Bauwerkmodell bestimmt wird [Braun et al., 2014, 2015a,b]. Zusätzlich kann der Zeitplan Informationen zur Verbesserung der Detektionsergebnisse liefern [Braun et al., 2016b]. Außerdem soll, wie in Kapitel 3.1 beschrieben, mit Hilfe der detektierten Abweichungen der Zeitplan aktualisiert und optimiert werden.

Um neben dem Rohbau auch andere Schritte des Bauvorhabens zu erfassen, können die gezeigten Aufnahmeverfahren mit Innenraum-Erfassungssystemen kombiniert werden. Dies wurde auch in den Übersichtsarbeiten von Rankohi & Waugh [2014] und Kopsida et al. [2015] als Forschungslücke identifiziert. Die so aufgenommenen Daten können für die Detektion von außerhalb nicht einsehbaren Bauteilen, für die Detektion von nachträglichen Einbauten, z.B. Leitungen (MEP), oder für eine vollständige Rekonstruktion des Gebäudes eingesetzt werden. Von innen und von außen aufgenommene Daten müssen dafür koregistriert werden. Im Szenario $\mathfrak{T}^{HFK}$ wurde bereits ein erster Versuch unternommen, mit Hilfe einer handgetragenen Kamera einen Übergang von außen ins Innere des Gebäude durchzuführen (siehe Abbildung 8.3). Die Koregistrierung von getrennt voneinander aufgenommenen Punktwolken des Innen- und Außenbereichs ist Gegenstand aktueller Forschung, z.B. von Koch et al. [2016].

Eine weitere Erweiterungsmöglichkeit ist die Darstellung der generierten Informationen über den Bauzustand als Augmented Reality Applikation direkt auf der Baustelle. Arbeiten hierzu sind bereits in Zollmann et al. [2014], Bae et al. [2013], Golparvar-Fard et al. [2009] und Karsch et al. [2014] zu finden.

Literaturverzeichnis

Ahmadabadian AH, Robson S, Boehm J, Shortis M, Wenzel K, Fritsch D (2013) A comparison of dense matching algorithms for scaled surface reconstruction using stereo camera rigs. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 78: 157–167.

Akinci B, Boukamp F, Gordon C, Huber D, Lyons C, Park K (2006) A formalism for utilization of sensor systems and integrated project models for active construction quality control. Automation in Construction, 15 (2): 124–138.

Bae H, Golparvar-Fard M, White J (2013) High-precision vision-based mobile augmented reality system for context-aware architectural, engineering, construction and facility management (AEC/FM) applications. Visualization in Engineering, 1 (1): 1–13.

Bay H, Tuytelaars T, Van Gool L (2006) SURF: Speeded Up Robust Features. In: Leonardis A, Bischof H, Pinz A (Hrsg.) Computer Vision – ECCV 2006, 3951: 404–417.

Besl PJ, McKay ND (1992) Method for registration of 3-D shapes. In: SPIE Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures, 1611: 586–606.

Birchfield S, Tomasi C (1999) Depth Discontinuities by Pixel-to-Pixel Stereo. International Journal of Computer Vision, 35 (3): 269–293.

Blankenbach J (2015) Bauwerksvermessung für BIM. In: Borrmann A, König M, Koch C, Beetz J (Hrsg.) Building Information Modeling, VDI-Buch, Kapitel 22, S. 343–362. Springer Fachmedien Wiesbaden.

BMVI (2015) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Stufenplan Digitales Planen und Bauen.

BMVI (2016) Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur: Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Erteilung einer Allgemeinerlaubnis zum Aufstieg von unbemannten Luftfahrtsystemen gemäß § 20 Absatz 1 Nummer 7 Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO), Nachrichten für Luftfahrer Nr. 1-786-16 vom 20.07.2016.

Borrmann A (2013) Building Information Modeling - Durchgängige Planung, Realisierung und Bewirtschaftung auf Basis eines digitalen Gebäudemodells. In: 132. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning.

Borrmann A, König M, Koch C, Beetz J (2015) Building Information Modeling. VDI-Buch. Springer Fachmedien Wiesbaden.

Bosché F (2010) Automated recognition of 3D CAD model objects in laser scans and calculation of as-built dimensions for dimensional compliance control in construction. Advanced Engineering Informatics, 24 (1): 107–118.

Bosché F (2012) Plane-based registration of construction laser scans with 3D/4D building models. Advanced Engineering Informatics, 26 (1): 90–102.

Bosché F, Haas C, Akinci B (2009) Automated recognition of 3D CAD objects in site laser scans for project 3D status visualization and performance control. Journal of Computing in Civil Engineering, 23 (6): 311–318.

Bosché F, Haas C, Murray P (2008) Performance of automated project progress tracking with 3D data fusion. In: CSCE 2008 Annual Conference: 10 – 13.

Boykov Y, Veksler O, Zabih R (2001) Fast approximate energy minimization via graph cuts. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 23 (11): 1222–1239.

Braun A, Borrmann A, Tuttas S, Stilla U (2014) Towards automated construction progress monitoring using BIM-based point cloud processing. In: Mahdavi A, Martens B, Scherer R (Hrsg.) ECPPM 2014: 101–107.

Braun A, Borrmann A, Tuttas S, Stilla U (2015a) A concept for automated construction progress monitoring using BIM-based geometric constraints and photogrammetric point clouds. Journal of Information Technology in Construction, 20: 68–79.

Braun A, Borrmann A, Tuttas S, Stilla U (2016a) Classification of detection states in construction progress monitoring. In: Christodoulou S, Scherer R (Hrsg.) ECPPM 2016: 473–479.

Braun A, Borrmann A, Tuttas S, Stilla U (2016b) Incorporating knowledge on construction methods into automated progress monitoring techniques. In: 23rd EG-ICE International Workshop (eg-ice 2016).

Braun A, Tuttas S, Borrmann A, Stilla U (2015b) Automated progress monitoring based on photogrammetric point clouds and precedence relationship graphs. In: The 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015).

Bügler M, Vela P, Borrmann A, Teizer J (2017) Fusion of Photogrammetry and Video Analysis for Productivity Assessment of Earthwork Processes. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 32 (2): 107–123.

Cabinet Office (2011) Government Construction Strategy.

Calonder M, Lepetit V, Strecha C, Fua P (2010) BRIEF: Binary Robust Independent Elementary Features. In: Daniilidis K, Maragos P, Paragios N (Hrsg.) Computer Vision – ECCV 2010: 11th European Conference on Computer Vision, Proceedings, Part IV: 778–792.

Dai F, Rashidi A, Brilakis I, Vela P (2013) Comparison of image-based and time-of-flight-based technologies for three-dimensional reconstruction of infrastructure. Journal of Construction Engineering and Management, 139 (1): 69–79.

DeGol J, Golparvar-Fard M, Hoiem D (2016) Geometry-informed material recognition. In: The IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR): 1554–1562.

DFG (2012) Deutsche Forschungsgemeinschaft, Projekt: Baufortschrittskontrolle auf Basis integrierter Punktwolkeninterpretation und 4D-Bauwerksmodellierung. `gepris.dfg.de/gepris/projekt/220340609`. Aufgerufen am 15.09.2016.

Dimitrov A, Golparvar-Fard M (2014) Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections. Advanced Engineering Informatics, 28 (1): 37–49.

DIN 18202 (2013) Toleranzen im Hochbau – Bauwerke.

DVW (2016a) 11. Jenaer GeoMessdiskurs 2016, Building Information Modeling (BIM), 09.06.2016. `http://www.dvw.de/aktuelles/19312/11-jenaer-geomessdiskurs-2016-building-information-modeling-bim`. Aufgerufen am 15.09.2016.

DVW (2016b) 150. DVW-Seminar: Building Information Modeling (BIM) und 3D-Geoinformation, Hochschule Bochum, 21.06.2016. `http://www.dvw.de/aktuelles/19329/150-dvw-seminar-building-information-modeling-bim-und-3d-geoinformation-voller-erfol`. Aufgerufen am 15.09.2016.

Eastman C, Teicholz P, Sacks R, Liston K (2011) BIM Handbook. Hoboken, New Jersey: Wiley.

EDF R&D Telecom ParisTech (2015) CloudCompare (version 2.7.0).

Förstner W, Gülch E (1986) A fast operator for detection and precise location of distinct points, corners and centres of circular features. In: ISPRS Workshop on Fast Processing of Photogrammetric Data: 281–305.

Freimuth H, König M (2015) Generation of waypoints for UAV-assisted progress monitoring and acceptance of construction work. In: CONVR2015.

Fuhrmann S, Langguth F, Goesele M (2014) MVE-A multiview reconstruction environment. In: EUROGRAPHICS Workshop on Graphics and Cultural Heritage.

Furukawa Y, Ponce J (2010) Accurate, dense, and robust multiview stereopsis. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 32 (8): 1362–1376.

Gao XS, Hou XR, Tang J, Cheng HF (2003) Complete solution classification for the perspective-three-point problem. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 25 (8): 930–943.

Goesele M, Snavely N, Curless B, Hoppe H, Seitz SM (2007) Multi-view stereo for community photo collections. In: 2007 IEEE 11th International Conference on Computer Vision: 1–8.

Golparvar-Fard M, Bohn J, Teizer J, Savarese S, Peña Mora F (2011a) Evaluation of image-based modeling and laser scanning accuracy for emerging automated performance monitoring techniques. Automation in Construction, 20 (8): 1143–1155.

Golparvar-Fard M, Peña Mora F, Savarese S (2011b) Monitoring changes of 3D building elements from unordered photo collections. In: Computer Vision Workshops (ICCV Workshops), 2011 IEEE International Conference on: 249–256.

Golparvar-Fard M, Peña Mora F, Savarese S (2012) Automated progress monitoring using unordered daily construction photographs and IFC-based building information models. Journal of Computing in Civil Engineering, 29 (1).

Golparvar-Fard M, Peña-Mora F, Savarese S (2009) D^4AR – A 4-dimensional augmented reality model for automating construction progress monitoring data collection, processing and communication. Journal of Information Technology in Construction, 14 (13): 129–153.

Golparvar-Fard M, Peña-Mora F, Savarese S (2011c) Integrated sequential as-built and as-planned representation with D^4AR tools in support of decision-making tasks in the AEC/FM Industry. Journal of Construction Engineering and Management, 137 (12): 1099–1116.

Ham Y, Han K, Lin J, Golparvar-Fard M (2016) Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. Visualization in Engineering, 4 (1).

Han K, Lin J, Golparvar-Fard M (2015a) A formalism for utilization of autonomous vision-based systems and integrated project models for construction progress monitoring. In: Proc., 2015 Conference on Autonomous and Robotic Construction of Infrastructure: 118–131.

Han KK, Cline D, Golparvar-Fard M (2015b) Formalized knowledge of construction sequencing for visual monitoring of work-in-progress via incomplete point clouds and low-LoD 4D BIMs. Advanced Engineering Informatics, 29 (4): 889–901.

Han KK, Golparvar-Fard M (2015a) Appearance-based material classification for monitoring of operation-level construction progress using 4D BIM and site photologs. Automation in Construction, 53: 44–57.

Han KK, Golparvar-Fard M (2015b) BIM-assisted Structure-from-Motion for analyzing and visualizing construction progress deviations through daily site images and BIM. In: O'Brien W, Ponticelli S (Hrsg.) Computing in Civil Engineering 2015: 596–603.

Harris C, Stephens M (1988) A combined corner and edge detector. In: Alvey vision conference, 15: 147–151.

Hartley RI, Zisserman A (2004) Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press, second edition.

Hebel M, Stilla U (2009) Automatic co-registration of airborne laser-scanner data recorded at an urban area with oblique sensor configuration. PFG Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 2009 (3): 261–275.

Hirschmüller H (2008) Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 30 (2): 328–341.

HMGBIS (2015) HM Government Department for Business, Innovation & Skills: Digitally Built Britain – Level 3 Building Information Modelling - Strategic Plan.

HOAI (2001) Verordnung über die Honorare für Leistungen der Architekten und der Ingenieure - § 15 Leistungsbild Objektplanung für Gebäude, Freianlagen und raumbildende Ausbauten.

Hoegner L, Tuttas S, Xu Y, Eder K, Stilla U (2016) Evaluation of methods for coregistration and fusion of RPAS-based 3D point clouds and thermal infrared images. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B3: 241–246.

Hornung A, Wurm K, Bennewitz M, Stachniss C, Burgard W (2013) OctoMap: an efficient probabilistic 3D mapping framework based on octrees. Autonomous Robots, 34 (3): 189–206.

Ibrahim YM, Lukins TC, Zhang X, Trucco E, Kaka AP (2009) Towards automated progress assessment of workpackage components in construction projects using computer vision. Advanced Engineering Informatics, 23 (1): 93–103.

Irizarry J, Costa DB (2016) Exploratory study of potential applications of unmanned aerial systems for construction management tasks. Journal of Management in Engineering.

Irschara A, Rumpler M, Meixner P, Pock T, Bischof H (2012) Efficient and globally optimal multi view dense matching for aerial images. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., I-3: 227–232.

Karsch K, Golparvar-Fard M, Forsyth D (2014) ConstructAide: analyzing and visualizing construction sites through photographs and building models. ACM Trans. Graph., 33 (6): 176:1–176:11.

Kersten TP, Lindstaedt M (2012) Generierung von 3D-Punktwolken durch kamera-basierte low-cost Systeme – Workflow und praktische Beispiele. In: 121. DVW-Seminar Terrestrisches Laserscanning (TLS 2012), 69: 25–46.

Kim C, Kim B, Kim H (2013a) 4D CAD model updating using image processing-based construction progress monitoring. Automation in Construction, 35: 44–52.

Kim C, Son H, Kim C (2013b) Automated construction progress measurement using a 4D building information model and 3D data. Automation in Construction, 31: 75–82.

Kim H, Kano N (2008) Comparison of construction photograph and VR image in construction progress. Automation in Construction, 17 (2): 137–143.

Kluckner S, Birchbauer JA, Windisch C, Hoppe C, Irschara A, Wendel A, Zollmann S, Reitmayr G, Bischof H (2011) AVSS 2011 demo session: Construction site monitoring from highly-overlapping MAV images. In: Advanced Video and Signal-Based Surveillance (AVSS), 2011 8th IEEE International Conference on: 531–532.

Koch T, Körner M, Fraundorfer F (2016) Automatic alignment of indoor and outdoor building models using 3D line segments. In: Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops: 10–18.

Kopsida M, Brilakis I, Vela PA (2015) A review of automated construction progress monitoring and inspection methods. In: CIB W78: 421–431.

Koutsoudis A, Arnaoutoglou F, Pavlidis G (2015) Structure from Motion–Multiple View Stereovision (SFM/MVS) - An introduction on how to perform SFM/MVS. In: DIGARCH 2015 NOTES.

Krijnen T, Beetz J, Ochmann S, Vock R, Wessel R (2015) Towards extending IFC with point cloud data. In: 22nd EG-ICE International Workshop (eg-ice 2015).

Lee S, Oh S, Hong M, Choi J (2010) An investigation of an image processing application for measurement of a quantity estimate of Euro Form installed in construction sites. In: Ubiquitous Information Technologies and Applications (CUTE), 2010 Proceedings of the 5th International Conference on: 1–5.

Lepetit V, Moreno-Noguer F, Fua P (2008) EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. International Journal of Computer Vision, 81 (2): 155–166.

Leung Sw, Mak S, Lee BLP (2008) Using a real-time integrated communication system to monitor the progress and quality of construction works. Automation in Construction, 17 (6): 749–757.

Lichti D, Skaloud J (2010) Registration and calibration. In: Vosselman G, Maas HG (Hrsg.) Terrestrial and airborne laser scanning, Kapitel 3, S. 83–133. Dunbeath, Caithness: Whittles.

Lin J, Han K, Golparvar-Fard M (2015) A framework for model-driven acquisition and analytics of visual data using UAVs for automated construction progress monitoring. In: Computing in Civil Engineering 2015: 156–164.

LOC (2016) Leonhard Obermeyer Center – TUM Center of Digital Methods for the Built Environment. `https://www.loc.tum.de/`. Aufgerufen am 14.09.2016.

Lowe D (2004) Distinctive image features from scale-invariant keypoints. International Journal of Computer Vision, 60 (2): 91–110.

Luhmann T (2010) Nahbereichsphotogrammetrie. Berlin: Wichmann.

Lukins TC, Trucco E (2007) Towards automated visual assessment of progress in construction projects. In: BMVC: 142–151.

Ma Y, Soatto S, Kosecka J, Sastry SS (2003) An invitation to 3-D vision: from images to geometric models. New York: Springer.

Maalek R, Lichti D, Ruwanpura J (2015a) Development of an automated 3D/4D as-built model generation system for construction progress monitoring and quality control. In: Froese TM, Newton L, Sadeghpour F, Vanier DJ (Hrsg.) Proceedings of ICSC15: The Canadian Society for Civil Engineering 5th International/11th Construction Specialty Conference.

Maalek R, Lichti D, Ruwanpura J (2015b) Robust classification and segmentation of planar and linear features for construction site progress monitoring and structural dimension compliance control. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-3/W5: 129–136.

MacLeamy P (2004) „Collaboration, Integrated Information, and the Project Lifecycle in Building Design and Construction and Operation“. Architectural/Engineering Productivity Committee of The Construction Users Roundtable (CURT), Report.

Moravec HP, Elfes A (1985) High resolution maps from wide angle sonar. In: Robotics and Automation. 1985 IEEE International Conference on, 2: 116–121.

Nister D (2004) An efficient solution to the five-point relative pose problem. Pattern Analysis and Machine Intelligence, IEEE Transactions on, 26 (6): 756–770.

Omar T, Nehdi ML (2016) Data acquisition technologies for construction progress tracking. Automation in Construction, 70: 143–155.

Pierrot-Deseilligny M, Paparoditis N (2006) A multiresolution and optimization-based image matching approach: An application to surface reconstruction from SPOT5-HRS stereo imagery. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XXXVI-1/W41.

Pollefeys M, Van Gool L, Vergauwen M, Verbiest F, Cornelis K, Tops J, Koch R (2004) Visual modeling with a hand-held camera. International Journal of Computer Vision, 59 (3): 207–232.

Pătrăucean V, Armeni I, Nahangi M, Yeung J, Brilakis I, Haas C (2015) State of research in automatic as-built modelling. Advanced Engineering Informatics, 29 (2): 162–171.

Rankohi S, Waugh L (2014) Image-based modeling approaches for projects status comparison. In: CSCE 2014 General Conference, 30.

Rashidi A, Brilakis I, Vela P (2014) Generating absolute-scale point cloud data of built infrastructure scenes using a monocular camera setting. Journal of Computing in Civil Engineering: 04014089-1 - 04014089-12.

Rebolj D, Babič NČ, Magdič A, Podbreznik P, Pšunder M (2008) Automated construction activity monitoring system. Advanced Engineering Informatics, 22 (4): 493–503.

Remondino F, Spera MG, Nocerino E, Menna F, Nex F (2014) State of the art in high density image matching. The Photogrammetric Record, 29 (146): 144–166.

Rothermel M, Wenzel K, Fritsch D, Haala N (2012) SURE: Photogrammetric Surface Reconstruction from Imagery. In: LC3D Workshop.

Seitz SM, Curless B, Diebel J, Scharstein D, Szeliski R (2006) A comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. In: Computer Vision and Pattern Recognition, 2006 IEEE Computer Society Conference on, 1: 519–528.

Snavely N, Seitz SM, Szeliski R (2006) Photo tourism: exploring photo collections in 3D. ACM Trans. Graph., 25 (3): 835–846.

Son H, Bosché F, Kim C (2015) As-built data acquisition and its use in production monitoring and automated layout of civil infrastructure: A survey. Advanced Engineering Informatics, 29 (2): 172–183.

Son H, Kim C (2010) 3D structural component recognition and modeling method using color and 3D data for construction progress monitoring. Automation in Construction, 19 (7): 844–854.

Son H, Kim C, Kim C (2012) Automated color model–based concrete detection in construction-site images by using machine learning algorithms. Journal of Computing in Civil Engineering, 26 (3): 421–433.

Strecha C, Tuytelaars T, Gool LV (2003) Dense matching of multiple wide-baseline views. In: Computer Vision, 2003 Ninth IEEE International Conference on, Proceedings, vol. 2: 1194–1201.

Tang P, Rasheed SH (2013) Simulation for characterizing a progressive registration algorithm aligning as-built 3D point clouds against as-designed models. In: Proceedings of the 2013 Winter Simulation Conference: Simulation: Making Decisions in a Complex World: 3169–3180.

Tola E, Strecha C, Fua P (2011) Efficient large-scale multi-view stereo for ultra high-resolution image sets. Machine Vision and Applications, 23 (5): 903–920.

Turkan Y, Bosché F, Haas CT, Haas R (2012) Automated progress tracking using 4D schedule and 3D sensing technologies. Automation in Construction, 22: 414–421.

Turkan Y, Bosché F, Haas CT, Haas R (2013) Toward automated earned value tracking using 3D imaging tools. Journal of Construction Engineering and Management, 139 (4): 423–433.

Turkan Y, Bosché F, Haas CT, Haas R (2014) Tracking of secondary and temporary objects in structural concrete work. Construction Innovation: Information, Process, Management, 14 (2): 145–167.

Tuttas S, Braun A, Borrmann A, Stilla U (2014a) Comparison of photogrammetric point clouds with BIM building elements for construction progress monitoring. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XL-3: 341–345.

Tuttas S, Braun A, Borrmann A, Stilla U (2014b) Konzept zur automatischen Baufortschrittskontrolle durch Integration eines Building Information Models und photogrammetrisch erzeugten Punktwolken. In: Seyfert E, Gülch E, Heipke C, Schiewe J, Sester M (Hrsg.) Gemeinsame Tagung 2014 der DGfK, der DGPF, der GfGI und des GiN: 363–372.

Tuttas S, Braun A, Borrmann A, Stilla U (2015) Validation of BIM components by photogrammetric point clouds for construction site monitoring. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-3/W4: 231–237.

Tuttas S, Braun A, Borrmann A, Stilla U (2016) Evaluation of acquisition strategies for image-based construction site monitoring. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B5: 733–740.

Tuttas S, Braun A, Borrmann A, Stilla U (2017) Acquisition and Consecutive Registration of Photogrammetric Point Clouds for Construction Progress Monitoring Using a 4D BIM. PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science, 85 (1): 3–15.

Tuttas S, Stilla U (2013) Rekonstruktion von Fenstern aus Schrägsicht-ALS Punktwolken zur Anreicherung von Gebäudemodellen. In: Seyfert E (Hrsg.) Dreiländertagung D - A - CH und 33. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF: 363–372.

Urban S, Leitloff J, Hinz S (2016) MLPnP - a real-time maximum likelihood solution to the perspective-n-point problem. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., III-3: 131–138.

Viola P, Wells III WM (1997) Alignment by Maximization of Mutual Information. International Journal of Computer Vision, 24 (2): 137–154.

Wu C (2007) SiftGPU: A GPU Implementation of Scale Invariant Feature Transform (SIFT). `http://cs.unc.edu/~ccwu/siftgpu`.

Wu C (2013) Towards linear-time incremental Structure from Motion. In: 3D Vision, 2013 International Conference on: 127–134.

Wu Y, Kim H, Kim C, Han S (2010) Object recognition in construction-site images using 3D CAD-based filtering. Journal of Computing in Civil Engineering, 24 (1): 56–64.

Xu Y, He J, Tuttas S, Stilla U (2015) Reconstruction of scaffolding components from photogrammetric point clouds of a construction site. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., II-3/W5: 401–408.

Xu Y, Hoegner L, Tuttas S, Stilla U (2017a) Voxel-and graph-based point cloud segmentation of 3D scenes using perceptual grouping laws. In: ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., IV-1/W1: 43–50.

Xu Y, Tuttas S, Heogner L, Stilla U (2016a) Classification of photogrammetric point clouds of scaffolds for construction site monitoring using subspace clustering and PCA. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLI-B3: 725–732.

Xu Y, Tuttas S, Hoegner L, Stilla U (2017b) Geometric Primitive Extraction From Point Clouds of Construction Sites Using VGS. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14 (3): 424–428.

Xu Y, Tuttas S, Stilla U (2016b) Segmentation of 3D outdoor scenes using hierarchical clustering structure and perceptual grouping laws. In: 2016 9th IAPR Workshop on Pattern Recogniton in Remote Sensing (PRRS): 1–6.

Yang J, Park MW, Vela PA, Golparvar-Fard M (2015) Construction performance monitoring via still images, time-lapse photos, and video streams: Now, tomorrow, and the future. Advanced Engineering Informatics, 29 (2): 211–224.

Zhang C, Arditi D (2013) Automated progress control using laser scanning technology. Automation in Construction, 36: 108–116.

Zhang X, Bakis N, Lukins TC, Ibrahim YM, Wu S, Kagioglou M, Aouad G, Kaka AP, Trucco E (2009) Automating progress measurement of construction projects. Automation in Construction, 18 (3): 294–301.

Zhu Z, Brilakis I (2010) Parameter optimization for automated concrete detection in image data. Automation in Construction, 19 (7): 944–953.

Zollmann S, Hoppe C, Kluckner S, Poglitsch C, Bischof H, Reitmayr G (2014) Augmented reality for construction site monitoring and documentation. Proceedings of the IEEE, 102 (2): 137–154.

Danksagung

Ich bedanke mich bei ...

- ... Leitner GmbH & Co Bauunternehmung KG und Kuehn Malvezzi Architekten, für die Unterstützung bei Testszenario KS,
- ... Baureferat H5 der Landeshauptstadt Mïchen, Baugesellschaft Mickan mbH & Co KG, h4a Architekten, Wenzel + Wenzel und Stadtvermessungsamt München, für die Unterstützung bei Testszenario HFK,
- ... Staatliches Bauamt München, Baugesellschaft Brunner + Co and BKL (Baukran Logistik GmbH), für die Unterstützung bei Testszenario TTUM,
- ... der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Finanzierung dieses Forschungsvorhabens im Projekt „Baufortschrittskontrolle auf Basis integrierter Punktwolkeninterpretation und 4D-Bauwerksmodellierung “ unter dem Zeichen BO 3575/4-1 und STI 545/6-1,
- ... Konrad Eder für die Unterstützung bei der Datenaufnahme,
- ... Alex Braun für die gute Zusammenarbeit im Projekt,
- ... meinem Betreuer Prof. Uwe Stilla und meinem Zweitgutachter Prof. André Borrmann,
- ... allen meinen Kollegen für die angenehme Arbeitsatmosphäre und die schöne Zeit am FPF.