

Master of Science FHNW in Virtual Design and Construction

Automatisierte Baufortschrittskontrolle im HLK-Bereich zur Verbesserung der Baustellenabläufe



Vorgelegt von: Bryan Marcelo Albán Bonilla

Thesis-Begleiterin: Prof. Nora Dainton, FHNW

Thesis-Experte: Oliver Schneider, FHNW

Praxispartner: Patric Sommer, Implenia Schweiz AG, Basel,
Building Division - Gesundheitseinrichtungen

Muttenz, 23. Mai 2025

Eigenständigkeitserklärung

"Ich erkläre hiermit,

dass ich die vorliegende Master-Thesis mit dem Titel Automatisierte Baufortschrittskontrolle im HLK-Bereich zur Verbesserung der Baustellenabläufe selbst und selbständig verfasst habe,

dass ich sämtliche nicht von mir selbst stammenden Textstellen bzw. Bestandteile eines Werkes (Bilder, Grafiken, Codes, etc.) gemäss gängigen wissenschaftlichen Zitierregeln korrekt zitiert und die verwendeten Quellen gut sichtbar erwähnt habe;

dass ich in einem Verzeichnis alle verwendeten Hilfsmittel (KI-Assistenzsysteme wie Chatbots [z.B. ChatGPT], Übersetzungs- [z.B. DeepL] Paraphrasier- [z.B. Quillbot]) oder Programmierapplikationen [z.B. Github Copilot] deklariert und ihre Art der Verwendung offenlege und bei den entsprechenden Textstellen angegeben habe,

dass ich sämtliche immateriellen Rechte an von mir allfällig verwendeten Materialien wie Bilder oder Grafiken erworben habe oder dass diese Materialien von mir selbst erstellt wurden;

dass das Thema, die Arbeit oder Teile davon nicht bei einem Leistungsnachweis eines anderen Moduls verwendet wurden, sofern dies nicht ausdrücklich mit der Dozentin oder dem Dozenten im Voraus vereinbart wurde und in der Arbeit ausgewiesen wird;

dass ich mir bewusst bin, dass meine Arbeit auf Plagiate und auf Drittautorschaft menschlichen oder technischen Ursprungs (künstliche Intelligenz) überprüft werden kann;

dass ich mir bewusst bin, dass die Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik einen Verstoß gegen diese Eigenständigkeitserklärung bzw. die ihr zugrundeliegenden Studierendendenpflichten der Studien- und Prüfungsordnung der Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik verfolgt und dass daraus disziplinarische (Verweis oder Ausschluss aus dem Studiengang) Folgen resultieren können.“

Vorname Nachname: Bryan Marcelo Albán Bonilla

Ort, Datum: Basel, 23.05.2025

Unterschrift:

Abstract

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit der Frage, wie eine automatisierte Baufortschrittskontrolle (BFK) im Bereich Heizung, Lüftung, Klima (HLK) zur Verbesserung der Baustellenabläufe beitragen kann – mit Fokus auf die Analyse geeigneter Technologien, die effektive Erfassung und Visualisierung von Bauabweichungen und die Auswirkungen auf Arbeitsprozesse und Baubeteiligte.

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung und Überprüfung eines effizienten Lösungsprozesses zur kontinuierlichen und präzisen Überwachung des Baufortschritts im HLK-Bereich, der bestehende sowie moderne Technologien und digitale Anwendungen miteinander kombiniert.

Die theoretische Grundlage dieser Arbeit basiert auf einer systematischen Literaturrecherche zum Stand der Forschung im Bereich automatisierte BFK. Mithilfe dreier Analyse- und Entscheidungsmethoden wurden geeignete Technologien und Tools zur Ist-Erfassung und Ist-Soll-Auswertung identifiziert. Darauf aufbauend wurde ein integrativer BFK-Prozess entwickelt und im Rahmen eines Proof of Concept (PoC) im Projekt «Dreiklang» des Kantonsspitals Aarau gemeinsam mit dem Praxispartner Implenia Schweiz AG durch iterative Tests auf der Baustelle validiert.

Die Arbeit zeigt, dass eine teilautomatisierte, zweistufige BFK – basierend auf kontinuierlicher 360°-Bilddokumentation, präziser Abschlusskontrolle mittels Laserscanning und BIM-freundlichen Tools – im HLK-Bereich einen klaren Mehrwert bietet. Der entwickelte Prozess erhöht Transparenz und Effizienz und sichert die Ausführungsqualität, indem Abweichungen frühzeitig erkannt, dokumentiert und gezielt korrigiert werden. Die Verbindung der BIM-Methode mit digital erfasstem Ist-Zustand ermöglicht fundierte Qualitätskontrollen und verbessert die Zusammenarbeit aller Beteiligten. Der praxiserprobte, skalierbare Prozess senkt Nachbesserungen, unterstützt die Nachvollziehbarkeit und schafft eine digitale Grundlage für Betrieb und Facility Management – mit Potenzial für wirtschaftliche Einsparungen.

Die Ergebnisse belegen, dass der zweiphasige Ansatz – aus visueller Kontrolle und geometrischer Endprüfung – eine zentrale Lücke bestehender Verfahren schliesst und die BFK im HLK-Bereich optimiert und professionalisiert. Er bietet eine flexible, erweiterbare Lösung für komplexe Bauprojekte, die sowohl Fortschritt als auch Endabnahme zuverlässig abdeckt. Damit schafft die Arbeit eine übertragbare Grundlage für künftige Anwendungen und liefert Impulse für die Weiterentwicklung digitaler Kontrollsysteme im Bauwesen.

Schlagwörter: Baufortschrittskontrolle, BIM, Ist-Zustandserfassung, Soll-Ist-Abgleich, 360°-Bilddokumentation, Laserscanning, digitale BIM-Tools.

English Version

This master's thesis examines how automated construction progress monitoring (CPM) can improve site operations in heating, ventilation, and air conditioning (HVAC). It focuses on analysing suitable technologies, the effective detection and visualization of construction deviations and the impact on workflows and project stakeholders.

The aim was to develop and evaluate an efficient process for continuous and precise monitoring of construction progress in HVAC installations by combining established and modern technologies with digital tools.

The theoretical foundation is based on a systematic literature review on automated CPM. Using three different analysis and decision-making methods, appropriate technologies and tools for as-built data capture and as-built versus as-planned comparison were identified. Building on this, an integrated CPM process was developed and validated through iterative on-site testing as part of a Proof of Concept (PoC) in the “Dreiklang” project at Kantonsspital Aarau in collaboration with the industry partner Implenia Schweiz AG.

The study shows that a semi-automated, two-stage CPM approach – based on continuous 360° image documentation, precise final inspections via laser scanning, and BIM-compatible tools – delivers clear value in HVAC projects. This process increases transparency and efficiency and ensures execution quality by enabling early detection, documentation, and targeted correction of deviations. The integration of BIM with digitally acquired as-built data enables robust quality control and fosters better collaboration among stakeholders. The scalable, practice-validated process reduces rework, improves traceability, and creates a digital foundation for operation and facility management – with additional potential for cost savings.

The findings confirm that the proposed two-phase approach – combining visual monitoring with geometric final verification – closes key gaps in current practices and significantly advances optimization and professionalization in HVAC progress monitoring. It provides a flexible, expandable solution for complex construction projects, reliably supporting both progress tracking and final acceptance. As such, this thesis provides a transferable foundation for future applications and delivers valuable impulses for the further development of digital control systems in the construction industry.

Keywords: construction progress monitoring, BIM, as-built data acquisition, as-built vs. as-planned comparison, 360° image documentation, laser scanning, digital BIM tools.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	VIII
Tabellenverzeichnis.....	XI
Abkürzungsverzeichnis.....	XII
1 Einleitung	1
2 Methodik	5
3 Stand der Forschung.....	9
3.1 Technologien zur Baufortschrittserfassung	10
3.1.1 Laserscanner Technologien	11
3.1.2 Kamerabasierte Technologien.....	11
3.2 Methoden zur Auswertung und Analyse der Baufortschrittskontrolle	13
3.2.1 Scan-to-BIM.....	14
3.2.2 As-Built-Scan vs. BIM	19
3.2.3 3D Gaussian Splatting	20
3.2.4 Autonome Boden- und Luftfahrzeuge.....	21
3.2.5 Digitale BIM-Tools.....	23
3.2.6 Augmented Reality und Mixed Reality.....	24
3.2.7 Künstliche Intelligenz	26
3.3 Auswirkungen der Technologien zur Baufortschrittskontrolle im Bauwesen	28
3.3.1 Akzeptanz der Technologien.....	30
4 Lösungsprozess	34
4.1 Ressourcen für die zwei Phasen.....	36
4.2 Rollen der Baubeteiligten	40
4.3 Vorgehensweise der Baufortschrittskontrolle im HLK-Bereich.....	41
4.3.1 Phase Eins.....	42
4.3.2 Phase Zwei	46
5 Proof of Concept	52
5.1 Vorgehensweise	53

5.2	Ergebnisse und Erkenntnisse des PoC	55
5.2.1	Eignung der Technologien für die BFK im HLK-Bereich	55
5.2.2	Auswirkungen der BFK auf Arbeitsprozesse im HLK-Bereich.....	56
5.2.3	Auswirkungen der BFK auf Beteiligte im HLK-Bereich	57
5.2.4	Auswirkungen von Laserscanning auf Projektkosten im HLK-Bereich.....	58
5.2.5	Festgestellte Herausforderungen	59
5.2.6	Beispielhafte Darstellungen von Ergebnissen	61
6	Zusätzlich untersuchte Ansätze.....	76
6.1	Anwendung von 3DGS-Apps und LiDAR-Technologie.....	76
6.2	Gamma AR-Anwendung	79
6.3	NEXT-BIM-Anwendung.....	81
6.3.1	AR-Brille-Anwendung.....	81
6.3.2	AR-Tablet-Anwendung.....	85
7	Diskussion.....	91
8	Fazit.....	94
9	Ausblick.....	96
10	Literaturverzeichnis.....	100
11	Anhang	109
	Anhang 1: Nutzung von KI-Assistenzsystemen.....	110
	Anhang 2: BIM-Tools-Vergleich zur BFK-Erfassung und -Auswertung mittels MCDA	111
	Anhang 3: Methodenvergleich zur Punktwolkenerfassung mittels Choosing By Advantages (iPhone vs. Laser BLK360 G2)	114
	Anhang 4: Methodenvergleich zur Punktwolkenauswertung mittels Trial-and-Error (3DGS-Apps vs. 3DR Cyclone).....	117
	Anhang 5: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels Trial-and-Error (AR-Brille vs. AR-Tablet)	119
	Anhang 6: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels CBA (3DGS vs. Laserscanner vs. Kamera 360° vs. AR).....	120

Anhang 7: Zeiterfassung von SiteWalks, Laserscanning und mögliche Kosteneinsparungen in Phase Zwei 123

Anhang 8: Leitfaden Register (Leica) 129

Anhang 9: Leitfaden 3DR Cyclone (Leica) 130

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Suchmethode und Resultate der benutzten Quellen	6
Abbildung 2: Technologien zur Baufortschrittserfassung: a) OpenSpace; b) OnsiteIQ; c) Dalux; d) HoloBuilder	13
Abbildung 3: Automatisierte Bauelementerkennung für Soll-Ist-Vergleich anhand TLS/BIM. Quelle: (Bosché et al., 2015)	15
Abbildung 4: Daten einer HLK-Anlage: a) Laserscanner Punktwolken, b) Zylinderdetektion, c) Achsennetzwerk-Rekonstruktion, d) Ergebnisse aus SP3D Software (Patil et al., 2016).	16
Abbildung 5: Dateien von ClearEdge 3D: a) Automatische Erkennung von HLK-Bauelementen in der Punktwolke. b) Modellierung der HLK-Bauelemente (ClearEdge3D, 2024; Faster, More Accurate As-Built Modeling with EdgeWise, 2020).	17
Abbildung 6: Der vorgeschlagene Arbeitsablauf für die Erzeugung parametrischer Objekte aus unregelmässigen Elementen (Barazzetti, 2016).	18
Abbildung 7. Baufortschrittserfassung mit Leica Laserscanner BLK360. Quelle: Implenia 2024	19
Abbildung 8. Vergleich 3D-Modell mit Punktwolken/Mesh (Leica Geosystems, 2024b).	20
Abbildung 9: Aufwand im Projektverlauf mit und ohne BIM (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011).	23
Abbildung 10: KI-Umsetzung zur Verfolgung des Baufortschritts. Quelle: OnsiteIQ, 2024	27
Abbildung 11: Einsatzfelder der Technologieakzeptanz in der Bauindustrie. Quelle: (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).	32
Abbildung 12: Workflow mit den Methoden zur BFK	35
Abbildung 13: Übersicht der genutzten kommerziellen Softwares und deren Zusammenhänge	38
Abbildung 14: Mögliche Ressourcen für die BFK in ähnlichen BIM-Projekten.....	39
Abbildung 15: Darstellung der zwei Phasen zur BFK.....	42
Abbildung 16: BPMN-Diagramm der verwendeten Softwares in Phase Eins	44
Abbildung 17: BPMN-Diagramm der Rollenverteilung in Phase Eins.....	45
Abbildung 18: BPMN-Diagramm der verwendeten Softwares in Phase Zwei.....	49
Abbildung 19: BPMN-Diagramm der Rollenverteilung in Phase Zwei	51

Abbildung 20: Workflow der zwei Phasen der automatisierten BFK.....	52
Abbildung 21: Fehler bei der Erkennung der Bauabweichungen in 3DR Cyclone	60
Abbildung 22: Baufortschritte im OG06 mittels SiteWalks.....	64
Abbildung 23: Baufortschritte im EG und Vergleich mit dem 3D-Modell.....	65
Abbildung 24: Erstellung einer Pendenz nach visuellem Vergleich des BIM-Modells mit einem 360°-Foto	66
Abbildung 25: Abweichung und Korrektur zweier gescannter Punktwolken in der Seitenansicht.	67
Abbildung 26: Abweichung und Korrektur zweier gescannter Punktwolken in der Übersichtsperspektive.	68
Abbildung 27: Ergebnisse der Punktwolkenregistrierung.	68
Abbildung 28: Verknüpfung der Punkte und saubere Übersichtsdarstellung.	69
Abbildung 29: Gesamtregistrierung der Punktwolken und Fehlerbewertung	69
Abbildung 30: Vergleich in 3DR Cyclone (a) Mesh vs. BIM oder (b) Punktwolken vs. BIM ...	70
Abbildung 31: Konfiguration der Toleranzbereiche für die Abweichungsanalyse	70
Abbildung 32. Unterschied zwischen (a) nicht definierter und (a) definierter Toleranzeinstellung.	71
Abbildung 33: Abweichungen der Elemente in der Kältezentrale.....	72
Abbildung 34: Abweichungen von Lüftungselementen.	72
Abbildung 35: Weitere Ergebnisse von Abweichungen.....	73
Abbildung 36: Unterstützung mit 360°-Fotos von den SiteWalks für bessere Auswertungen.	74
Abbildung 37: Bauabweichungen der Medizinalgasleitungen im Vergleich zwischen BIM-Modell und Punktwolken.....	74
Abbildung 38: Anzahl der identifizierten Abweichungen bei der Installation von Heizungsleitungen (110 m ²).	75
Abbildung 39: Test-Anwendung der Mobil-Apps: a) SiteScape; b) Scaniverse; c) Luma.....	78
Abbildung 40: Test-Anwendung von GAMMA AR.....	79
Abbildung 41: Kontrolle der Modellierung von Elektrodoesen.	83
Abbildung 42: Kontrolle der Positionen von Brandmeldern	83

Abbildung 43: Kontrolle der modellierten Elektrokomponenten.....	84
Abbildung 44: Kontrolle der Abstände BIM-Modell vs. Ist-Zustand	84
Abbildung 45: Kontrolle der nicht modellierten Elemente.....	85
Abbildung 46: Schnelle und präzisere Referenzierung des BIM-Modells mit der realen Umgebung.....	86
Abbildung 47: Ergonomischere Umsetzung dank Tablet	86
Abbildung 48: Dieselbe Leistung von NEXT-BIM in beiden Versionen (AR-Brille und Tablet)	87
Abbildung 49: HLK-Analyse mit der Tablet-Version	87
Abbildung 50: Abweichungsauswertung bei HLK-Elementen	88
Abbildung 51: Abmessung einer Abweichung.....	88
Abbildung 52: Effiziente Zusammenarbeit mit der zuständigen Bauleitung	89
Abbildung 53: Workflow für automatisierte Baufortschrittserfassung und -kontrolle	98
Abbildung 54: Darstellung der automatisierten Baufortschrittserfassung und -kontrolle	99
Abbildung 55: Übersicht der durch SiteWalks und Scanning erfassten Bereiche (Korridore und bestimmte Bereiche)	124
Abbildung 56: Überblick der Scanprozesse pro Geschoss und Bereich.....	125
Abbildung 57: Verbesserung der Flächenabdeckung durch Optimierung der Scans.....	126

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Benutzte Datenbanken für die Literaturrecherche.	5
Tabelle 2. Tracking-Tabelle mit den wichtigsten Daten.....	62
Tabelle 3: Tracking der SiteWalks und Auswertungen Mesh vs. BIM-Modelle.....	63
Tabelle 4: Zusammenfassung der Schritte pro Geschoss zur verbesserten Übersicht.	63
Tabelle 5: MCDA-Vergleich der BIM-Tools hinsichtlich automatisierter BFK.....	113
Tabelle 6: CBA-Vergleich iPhone 13 Pro Max vs. Laserscanner BLK360 G2 zur Punktwolkenerfassung	116
Tabelle 7: Trial-and-Error Vergleich 3DGS-Apps vs. 3DR Cyclone Software zur Punktwolkenauswertung.....	118
Tabelle 8: Trial-and-Error Vergleich der AR-Anwendungen zur Ist-Soll Auswertung.....	119
Tabelle 9: CBA-Vergleich aller betrachteter Methoden zur Ist-Soll Auswertung.....	122
Tabelle 10: Zeiterfassung der SiteWalks und abgedeckte Flächen.....	123
Tabelle 11: Übersicht und Schätzung der Dauer des Ist-Soll Vergleichs bestimmter Geschosse	127
Tabelle 12: Geschätzte Bearbeitungsdauer des Ist-Soll-Vergleichs nach Geschossen	127
Tabelle 13: Grobe Schätzung von Dauer, Kosten und potenzieller Einsparung durch Laserscanning im HLK-Bereich	128

Abkürzungsverzeichnis

API = Application Programming Interface

AR = Augmented Reality (erweiterte Realität)

BCF = BIM Collaboration Format

BFK = Baufortschrittskontrolle

BIM = Building Information Modeling

BRIEF = Binary Robust Independent Elementary Features

BPMN = Business Process Model and Notation Diagramme

CAD = Computer-Aided Design

CBA = Choosing By Advantages (Entscheidung gemäss Vorteilen)

CNN = Convolutional Neural Network (Faltendes neuronales Netzwerk)

CV = Computer Vision

FAST = Features from Accelerated Segment Test

FHNW = Fachhochschule Nordwestschweiz

FM = Facility Management

FSM = Fertigstellungsmeldung

GNSS = Global Navigation Satellite System (Globales Navigationssatellitensystem)

HLK = Heizung, Lüftung, Klima

HLK-SERM = Heizung, Lüftung, Klima, Sanitär, Elektro, Rohrpost, Medizinalgase

IFC = Industry Foundation Classes

IMU = Inertial Measurement Unit (Inertiale Messeinheit / Beschleunigungs- und Rotations-sensoren)

IoT = Internet-of-Things

KI = Künstliche Intelligenz

KSA = Kantonsspital Aarau

LiDAR = Light Detection and Ranging (Licht-Erkennung und Entfernungsmessung/Laserbasiertes Entfernungs- und Detektionsverfahren/Laserscanning/laserbasierte 3D-Vermessung)

LP = Lösungsprozess

MEP = Mechanical, Electrical and Plumbing (Mechanische-, Elektrische-, Sanitärsysteme)

MCDA = Multi-criteria decision analysis (Multikriterielle-Entscheidungsanalyse)

MR = Mixed Reality (vermischte Realität)

NURBS = Non-Uniform Rational B-Splines (Nicht-uniforme rationale B-Splines)

OID = One Implemia Desktop

ORB = Oriented FAST and Rotated BRIEF

PoC = Proof of Concept (Machbarkeitsnachweis)

SLAM = Simultaneous Localization and Mapping (Simultane Positionsbestimmung und Kartierung)

SW = SiteWalks (Baubegehung)

SUN-Dataset = Semantic Understanding of Scenes Dataset (Semantisches Szenenverständnis Datensatz)

TGA = Technische Gebäudeausrüstung

TLS = Terrestrischer Laserscanner

UAV = Unmanned Aerial Vehicle (Unbemanntes Luftfahrzeug)

UGV = Unmanned Ground Vehicle (Unbemanntes Bodenfahrzeug)

UWB = Ultra-Wideband-Positionierung (Ultra-Breitband)

VIO = Visual-Inertial Odometry (Odometrie mit visuellen und inertialen Daten)

YOLOv3 = You Only Look Once-Version 3

3DGS = 3D Gaussian Splatting

1 Einleitung

Der Bausektor hat eine tiefgreifende Transformation erfahren, die massgeblich durch die fortschreitende Digitalisierung und die Einführung von *Building Information Modeling (BIM)* vorangetrieben wurde (Akkermann, 2023; Malkwitz & Schlüter, 2019). *BIM* als Methode integriert digitale Prozesse, Modelle und deren Informationen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. Dadurch werden die Zusammenarbeit und der Informationsaustausch zwischen den Projektbeteiligten optimiert, Fehler reduziert, Prozesse verbessert und der Ressourcenverbrauch gesenkt. Zudem trägt die Digitalisierung entscheidend zur Effizienzsteigerung im gesamten Bauprozess bei, von der Projektinitiierung bis zur Betriebsphase eines Bauwerks. Verschiedene digitale Werkzeuge und Softwarelösungen unterstützen diesen Ansatz und ermöglichen eine weitergehende Integration neuer Technologien (Blandini et al., 2022; Borrmann et al., 2018).

Eine genaue und regelmässige Baufortschrittskontrollen (BFK) in jedem Baubereich stellt eine grosse Herausforderung dar (Asadi & Han, 2018). Herkömmliche manuelle Methoden sind oft zeitaufwändig und fehleranfällig, was zu ungenauen Aufzeichnungen, Verzögerungen und zusätzlichen Kosten führt (Braun et al., 2021). Dies stellt hauptsächlich in medizinischen Bauwerken ein Problem dar, da diese eine hohe Präzision und eine reibungslose Zusammenarbeit erfordern. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass herkömmliche analoge Methoden im Bauprozess unter anderem folgende Herausforderungen mit sich bringen könnten: das Fehlen von *As-Built*-Modellen, eine unzureichende digitale Fotodokumentation der ausgeführten Arbeiten, ineffiziente, unzuverlässige und verzögerte Abgleiche von Ist- und Soll-Zuständen sowie fehlende Leistungsgarantien der gewerklichen Modelle. Dies kann zur verspäteten Feststellung von Bauabweichungen führen und damit modellhafte oder bauliche Anpassungen erforderlich machen, was wiederum Nachbesserungen, zusätzliche Kosten und Zeitverzögerungen zur Folge haben könnte.

Eine der grössten Herausforderungen im Bauwesen sind die hohen Kosten für Nachbesserungen, die durch mangelhafte BFK und unzureichend abgestimmte digitale Bauwerksmodelle entstehen. Laut einer aktuellen Studie von PlanRadar GmbH (2025) können Nachbesserungskosten zwischen 11 % und 20 % der Gesamtprojektkosten ausmachen – in einigen Fällen sogar bis zu 30 % durch Mängelbeseitigungen. Diese enormen finanziellen Belastungen entstehen durch verschiedene Faktoren, darunter ineffiziente Kommunikation, fehlerhafte digitale Planungsmodelle und eine unzureichende BFK.

Besonders problematisch ist die Situation bei Installationen im Bereich Heizung, Lüftung, Klima (HLK), wo häufig Abweichungen zwischen Modell und Realität auftreten. Während Hauptleitungen meist korrekt montiert werden, da ihre Aufhängesysteme vorgegeben sind,

weichen Abzweige und Anschlüsse oft von der geplanten Lage ab. Gründe dafür sind spontane Anpassungen durch Installateur*innen, die auf Raumüberschneidungen mit anderen Gewerken pragmatisch reagieren müssen, sowie digitale Modelle, die nicht exakt an die realen Bedingungen angepasst wurden. Diese mangelnde Übereinstimmung zwischen digitalem Modell und Bauwerk führt dazu, dass Nachbesserungen erforderlich sind, die wiederum zusätzliche Kosten und Verzögerungen verursachen.

Ein entscheidender Faktor zur Reduzierung solcher Fehler ist die konsequente Nutzung von *BIM*. Insbesondere für die BFK im HLK-Bereich, etwa in komplexen Projekten wie Gesundheitseinrichtungen, bietet *BIM* klare Vorteile, da die Komplexität dieser Installationen eine genaue Überwachung erfordert (Braun et al., 2021; Schlenger et al., 2023). Um dieses Potenzial voll auszuschöpfen, ist es jedoch unerlässlich, dass Bauherrschaft und Bauunternehmen verstärkt über die langfristigen finanziellen Vorteile von *BIM* informiert werden. Investitionen in digitale Planungsmethoden zahlen sich durch Effizienzsteigerung und Fehlerreduktion nachhaltig aus (Faust, 2025; PlanRadar GmbH, 2025).

Wie deutlich sich diese Vorteile in der Praxis zeigen, belegt eine Studie des BIM Monitors 2025: In herkömmlichen Bauprojekten entstehen durchschnittlich 22,4 % der Kosten durch Fehler, während dieser Wert bei *BIM*-basierten Projekten auf 9,6 % sinkt – eine Reduktion um mehr als 50 % (Faust, 2025). Trotz dieser positiven Bilanz sollte weiterhin angestrebt werden, die Fehlerquote noch weiter zu minimieren. Doch obwohl die Effizienzpotenziale bekannt sind, bleibt die Verbreitung von *BIM* in der Baupraxis bislang begrenzt. Viele Bauunternehmen beteiligen sich nicht aktiv an *BIM*-Projekten, und auch die Einführung neuer Technologien zur BFK bleibt gering. Neben fehlendem Know-how sind insbesondere die hohen Implementierungskosten ein Hindernis, das Unternehmen davon abhält, digitale Prozesse konsequent in ihre Arbeitsweise zu integrieren (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Faust, 2025).

Für eine Digitalisierung der BFK können verschiedene moderne Technologien zum Einsatz kommen, wie beispielsweise *Laserscanning*, Photogrammetrie und 360°-Kameras, die eine schnelle Dokumentation und einen präzisen Vergleich des tatsächlichen Baufortschritts mit dem geplanten Zustand begünstigen (Braun et al., 2021; Schlenger et al., 2023).

Die Nutzung digitaler Kontrollmethoden wird jedoch aktuell während der Bauphase noch nicht umfassend ausgeschöpft. *Laserscanning* und *Augmented Reality (AR)* könnten dabei helfen, Diskrepanzen zwischen Modell und Realität frühzeitig zu erkennen, werden aber in der Praxis nur selten eingesetzt (Digital Findet Stadt GmbH, 2024). Dabei könnten *AR*-gestützte Anwendungen in der Software Dalux direkt auf der Baustelle Abweichungen visualisieren und frühzeitige Anpassungen ermöglichen, bevor kostenintensive Mängelbeseitigungen erforderlich werden. Um die wirtschaftlichen Risiken durch Nachbesserungen nachhaltig zu minimieren,

ist es ausschlaggebend, *BIM* konsequenter in alle Bauphasen zu integrieren und den Einsatz digitaler Kontrollverfahren auszubauen.

Der Bedarf an automatisierten, benutzerfreundlichen Systemen zur Baufortschritterfassung und -kontrolle, die sich effizient und nahtlos in bestehende Arbeitsabläufe integrieren lassen, ist eindeutig gegeben. Dennoch fehlen bislang umfassende Lösungen, die diesen Anforderungen gerecht werden.

Insbesondere im HLK-Bereich besteht daher Handlungsbedarf: Die Entwicklung eines strukturierten BFK-Prozesses ist notwendig, um bestehende Lücken zu schliessen. Ein solcher Ansatz würde die frühzeitige Erkennung von Abweichungen ermöglichen, gezielte Korrekturmaßnahmen unterstützen und die Erstellung eines digitalen *As-Built*-Modells fördern – als Grundlage für eine lückenlose Fortschrittsdokumentation und den Übergang in das Facility Management (FM).

Vor diesem Hintergrund verfolgt die vorliegende Masterarbeit das Ziel, einen Lösungsprozess (LP) zu entwickeln und zu überprüfen, der eine kontinuierliche und präzise Baufortschrittskontrolle im HLK-Bereich durch die Kombination bewährter und moderner Technologien ermöglicht.

Dabei wird im Rahmen dieser Arbeit der Frage nachgegangen, wie eine automatisierte BFK im HLK-Bereich zur Verbesserung der Baustellenabläufe beitragen kann. Daraus ergeben sich drei Teilfragestellungen: 1. Welche Technologien eignen sich dabei für die automatisierte BFK? 2. Wie können Abweichungen zwischen geplanten und tatsächlichen Bauzuständen effektiv erfasst und visualisiert werden? 3. Welche Auswirkungen hat die automatisierte BFK auf die Arbeitsprozesse und die Baubeteiligten im HLK-Bereich?

Diese Masterarbeit ist in einen theoretischen und einen praktischen Teil gegliedert. Der theoretische Teil umfasst die Analyse des aktuellen Stands der Forschung zur automatisierten BFK im HLK-Bereich, einschliesslich relevanter Technologien, Methoden zur Erfassung und Visualisierung von Baufortschrittsdaten und Ansätze zur Abweichungserkennung. Die Analyse stützt sich unter anderem auf eine systematische Literaturrecherche und den Austausch mit Fachpersonen aus der Praxis.

Basierend auf den Erkenntnissen des theoretischen Teils, erfolgt im praktischen Teil die Entwicklung eines LP für die automatisierte BFK im Projekt Kantonsspital Aarau (KSA) «Dreiklang» der Building Division – Gesundheitseinrichtungen der Firma Implenia Schweiz AG. Ein *Proof of Concept (PoC)* wird implementiert, um die praktische Umsetzbarkeit durch iterative Tests beim Praxispartner Implenia Schweiz AG zu überprüfen und somit den LP zu validieren. Zudem werden die zuvor formulierten Forschungsfragen beantwortet sowie identifizierte

Herausforderungen erläutert. Die Ergebnisse des *PoC* werden mit Bildern aus der Praxis ergänzt, um Prozessausschnitte und erzielte Resultate anschaulich darzustellen.

Anschliessend werden weitere untersuchte Ansätze präsentiert, bevor die Ergebnisse des *PoC* im Rahmen der Diskussion analysiert, interpretiert und kritisch beleuchtet werden. Das Fazit bietet eine kompakte Zusammenfassung der Arbeit, während der Ausblick zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten, Optimierungspotenziale sowie weiterführende Forschungsansätze aufzeigt.

2 Methodik

Der aktuelle Stand der Forschung zur automatisierten BFK wurde durch eine systematische Literaturrecherche ermittelt, bei der mehrere wissenschaftliche Datenbanken genutzt wurden (siehe Tabelle 1). Um Verzerrungen in der Auswahl der Quellen zu minimieren, wurde ein breites Spektrum an Quellen berücksichtigt, das sowohl akademische als auch praxisorientierte Perspektiven umfasst. Dies beinhaltete unter anderem Anwendungsfälle, Technologieberichte, Erfahrungsberichte zu bestehenden Lösungen sowie wissenschaftliche Studien zu spezifischen Implementierungen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die thematische Breite und wissenschaftliche Relevanz der analysierten Quellen sicherzustellen. Die folgende Tabelle zeigt die Aufteilung der betrachteten Quellen.

Datenbanken	
Fachdatenbanken und akademische Suchmaschinen	Baufachliche Quellen
ScienceDirect	Dalux
Wiley Online Library	OpenSpace
IEEE Xplore	Doxel
Swisscovery	Leica Geosystems
SpringerLink	Digital Findet Stadt
Copernicus Online Journals	NEXT-BIM
ProQuest	U.a.
ICE Virtual Library	
arXiv.org	
ResearchGate	
Semantic Scholar	
schweitzer-online.de	

Tabelle 1. Benutzte Datenbanken für die Literaturrecherche.

Die Recherche fokussierte sich zunächst auf vier zentrale Themenbereiche: BFK mit *BIM*, automatisierte BFK, Einsatz von *BIM*-fähigen Technologien zur BFK und die Auswirkungen von *BIM*-fähigen Technologien auf Bauprozesse. Diese Begriffe wurden in Titeln, Abstracts und Keywords recherchiert. Im Verlauf der Untersuchung wurde jedoch der Begriffsfokus angepasst, um verwandte Themen zu integrieren, die zur Beantwortung der Teilfragestellungen entscheidend sind, wie zum Beispiel Methoden zur Ist-Zustandserfassung, Methoden zur Ist-Soll-Zustandsauswertung, digitale *BIM*-Tools, *AR*-Anwendungen, *Laserscanner*. Diese ergänzenden Begriffe erweiterten die Perspektive und halfen dabei, die komplexen Zusammenhänge im Bereich der BFK und Digitalisierung besser abzubilden. Die Literaturrecherche erfolgte mithilfe von wissenschaftlichen Suchmaschinen (siehe Tabelle 1) und wurde durch das Recherche-Tool Elicit unterstützt, welches auf künstlicher Intelligenz (KI) basiert und speziell für systematische Literaturrecherchen entwickelt wurde. Alle gesammelten Quellen wurden in das Literaturverwaltungsprogramm Zotero importiert und systematisch geprüft. Zunächst

wurden die Quellen anhand ihrer Titel überprüft und anschliessend wurde ihre Relevanz für die Forschungsfragen bewertet. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf wissenschaftlich fundierte und thematisch relevante Literatur gelegt (siehe Abbildung 1). Die Recherche berücksichtigte vor allem Quellen ab dem Jahr 2016, um den aktuellen Stand der Technik widerzuspiegeln, wobei ältere Arbeiten nur dann einbezogen wurden, wenn sie für das Thema von grundlegender Bedeutung waren. Zusätzlich wurden sowohl deutsch- als auch englischsprachige Quellen berücksichtigt, um eine breite internationale Perspektive zu gewährleisten.

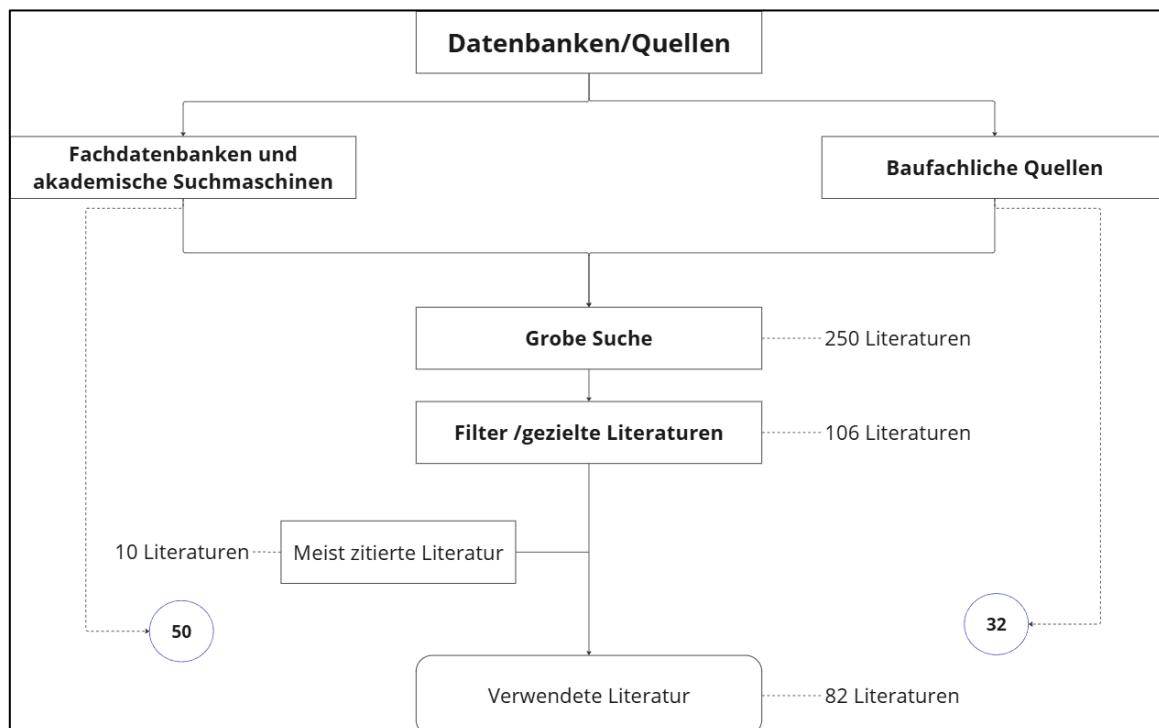


Abbildung 1: Suchmethode und Resultate der benutzten Quellen

Die Ergebnisse der Literaturrecherche dienten als Grundlage für die Entwicklung und Implementierung eines integrierten Prozesses zur automatisierten BFK im HLK-Bereich des Innenausbau beim KSA-Projekt «Dreiklang» von Implenia Schweiz AG. Im Fokus stand dabei die Untersuchung geeigneter Technologien und der Einsatz von *BIM*-fähigen Tools und Methoden wie Dalux zur kontinuierlichen Baufortschrittserfassung mittels *SiteWalks* mit der 360°Kamera sowie die Nutzung von *Laserscannern* zur präzisen Erfassung von *As-Built*-Daten und zur Identifikation von Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand.

Die methodische Validierung des entwickelten Prozesses erfolgte im Rahmen eines *PoC* durch iterative Tests auf der Baustelle und die kontinuierliche Abstimmung mit den Anforderungen des Bauprojekts. Zentrale Grundlage war die enge Zusammenarbeit mit Projektbeteiligten wie Bauleitung, Terminplanung und *BIM*-Koordination. Deren Rückmeldungen wurden fortlaufend in die Weiterentwicklung integriert, wodurch der Prozess schrittweise an die praktischen Gegebenheiten angepasst werden konnte. Im Mittelpunkt stand die stufenweise

Integration verschiedener Technologien zur Datenerfassung und digitaler Tools, sowie methodischer Ansätze, insbesondere der Einsatz von *Laserscannern* und der *BIM*-Plattform Dalux, in die BFK. Die iterative Gestaltung erlaubte eine bedarfsgerechte Einbindung dieser Komponenten und deren kontinuierliche Optimierung auf Basis praktischer Erfahrungen. So konnte der entwickelte Ansatz sowohl wissenschaftlich fundiert als auch praxisnah umgesetzt werden.

Dieser Prozess wurde in Zusammenarbeit mit Implenia Schweiz AG entwickelt und basierte auf den internen Anforderungen sowie praxisorientierten Anweisungen des Unternehmens. Die methodische Entwicklung, Optimierung und Validierung des Prozesses wurden hinsichtlich dieser Masterarbeit durchgeführt und stellen den wissenschaftlichen Beitrag des Autors dieser Arbeit dar. Der wissenschaftliche Mehrwert dieser Arbeit liegt in der methodischen Validierung des Prozesses und seiner theoretischen Verankerung im aktuellen Forschungsstand, wodurch eine Brücke zwischen praktischer Anwendung und akademischer Fundierung geschlagen wird.

Für die Auswahl der geeigneten Technologien und Methoden zur Ist-Zustandserfassung und Ist-Soll-Auswertung im HLK-Bereich wurden verschiedenste Ansätze und Tools analysiert, teils getestet und miteinander verglichen. Dabei wurden drei unterschiedliche Analysemethoden eingesetzt:

- *Mutli-criteria decision analysis (MCDA)*, also Multikriterielle Entscheidungsanalyse wurde für die Bewertung digitaler *BIM*-Tools genutzt, da es sich hierbei um eine reine Analyse der Eigenschaften und Möglichkeiten handelte, ohne dass ein praktischer Test durchgeführt werden musste.
- Die Methode *Trial-and-Error* kam zum Einsatz, um den Vergleich zwischen den 3D-Gaussian-Splatting-Apps und 3DR Cyclone zu evaluieren, da diese Softwarelösungen tatsächlich getestet wurden. Ebenso wurde diese Methode verwendet, um die *AR*-Ansätze (NEXT-BIM *AR*-Brille vs. NEXT-BIM *AR-Tablet* vs. GAMMA *AR-Tablet*) direkt miteinander zu vergleichen.
- Die Methode *Choosing-by-Advantages (CBA)* wurde genutzt, um das *Smartphone* iPhone 13 Pro Max mit dem *Laserscanner* BLK360 G2 zu vergleichen. Durch eine systematische Bewertung der jeweiligen Vorteile konnte die für das Projekt am besten geeignete Lösung ermittelt werden. Zudem wurde die *CBA*-Methode für den Gesamtvergleich aller eingesetzten Technologien und Methoden verwendet, da sie für eine ganzheitliche Bewertung sorgt, die sich auf die besten Vorteile jeder Methode in Bezug auf die *Best Practices* des Projekts konzentriert.

Die detaillierten Vergleiche und Analysen dieser Methoden sind in Kapitel 6 (Zusätzlich untersuchte Ansätze) und 11 (Anhang) dokumentiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen

fürten zur Schlussfolgerung, dass die BFK als ein integraler Prozess gestaltet werden sollte, der verschiedene Technologien kombiniert. *SiteWalks* wurden als geeignet für die kontinuierliche BFK identifiziert, *Laserscanner* für die präzise Endkontrolle und skalierbare Abweichungsauswertungen sowie *AR*-Technologien für spezifische Echtzeitbewertungen. Diese Erkenntnisse flossen in die Entscheidung ein, den Fokus auf *Dalux* und *Laserscanner* zu legen, wobei die *AR*-Anwendung durch den NEXT-BIM-Ansatz ergänzt wurde. Dadurch wird der gesamte Baufortschrittskontrollprozess optimiert und effizienter gestaltet.

Im Rahmen der Methodik wurden auch alternative Ansätze und Technologien analysiert, darunter die Erstellung parametrischer Bauteilmodelle aus Punktwolken sowie die automatische Modellierung von Leitungen und HLK-Komponenten (siehe Kapitel 3.2.1 *Scan-to-BIM*). Obwohl diese Methoden potenziell eine höhere Präzision bieten könnten, wurden sie aufgrund des erheblichen Zeit- und Kostenaufwands nicht weiterverfolgt. Für die BFK war es entscheidend, eine projektspezifische Lösung zu wählen, die schnell, kostenangemessen und gleichzeitig ausreichend detaillierte geometrische und geografische Informationen für den Ist-Soll-Vergleich liefert.

Zusätzlich zu den eingesetzten Technologien und Methoden wie *Dalux* und *Laserscanning* wurden im Gebiet dieser Arbeit alternative *BIM*-fähige Technologien, Methoden und Tools getestet oder analysiert, darunter NEXT-BIM, GAMMA AR, OpenSpace, Doxel und Anwendungen zur Nutzung von 3D-Gaussian Splatting. Diese Technologien wurden unter realen Baustellenbedingungen evaluiert, um ihre Leistungsfähigkeit im Vergleich zu den aktuell verwendeten Lösungen zu bewerten.

Die Verwendung präziserer Technologien wie fortschrittlicherer *Laserscanner*, autonome Luft- und Bodenfahrzeuge, sowie Lösungen basierend auf *Computer Vision (CV)* und KI wurden ebenfalls untersucht (siehe Kapitel 3.2.4 Autonome Boden- und Luftfahrzeuge und 3.2.7 Künstliche Intelligenz). Ihre Einbeziehung wurde jedoch ausgeschlossen, da sie entweder bedeutsame Kosten darstellten, noch nicht marktreif waren oder aufgrund der begrenzten Zeit und Ressourcen nicht praktikabel erschienen.

3 Stand der Forschung

Die Digitalisierung hat den Bausektor in den letzten zwei Jahrzehnten grundlegend verändert, wobei Forschungen zu *AR*-Anwendungen und anderen Technologien bedeutend zur Entwicklung neuer Methoden beitragen, die eine präzisere Verfolgung, Visualisierung und Interaktion mit Baufortschritten sicherstellen (Xu et al., 2024). Eine Schlüsselrolle spielt dabei die zunehmende *BIM*-Anwendung, welche die Zusammenarbeit erleichtert, indem es durchgängige digitale Modelle über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks bereitstellt und so die Effizienz steigert, Fehler minimiert und den Informationsaustausch verbessert (Blandini et al., 2022). Insbesondere im HLK-Bereich trägt *BIM* wesentlich zur teilautomatisierten BFK bei (Borrmann et al., 2018; Braun & Geibig, 2020).

BIM erleichtert eine präzisere Steuerung von Zeit, Ressourcen, Kosten und Leistung, verstärkt die Koordination zwischen Planenden, reduziert Planungsfehler und optimiert den Ressourcenverbrauch (Blandini et al., 2022). Die zunehmende Bedeutung von *BIM* begründet sich zudem in der Reduzierung der Fehleranfälligkeit, der Qualitätssteigerung von Planungs- und Ausführungsprozessen sowie der Schaffung höherer Prozesstransparenz (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

Ein zentraler Vorteil von *BIM* ist die präzise Baufortschrittsüberwachung durch die Verknüpfung von 3D-Modellen mit Planungsinformationen. Technologien wie *Laserscanning* spielen hier eine entscheidende Rolle, indem sie schnell Punktwolken mit hoher geometrischer Genauigkeit erfassen. Diese dienen als Basis für den automatisierten Soll-Ist-Vergleich und ermöglichen so eine effiziente Prozesskontrolle und -optimierung (Barazzetti, 2016; Braun et al., 2021, 2015; Rabbani et al., 2007; Schlenger et al., 2023).

Der HLK-Bereich ist besonders im Innenausbau komplexer Gebäude wie Krankenhäusern von zentraler Bedeutung. Die Integration zahlreicher gebäudetechnischer Systeme erfordert höchste Präzision und termingerechte Installationen, um gesetzliche Anforderungen zu erfüllen, den Betrieb medizinischer Geräte zu gewährleisten und den Komfort für Patient*innen und Personal sicherzustellen (Allgaier, 2023; Sacks et al., 2018).

Über *BIM* hinaus haben weitere digitale Technologien und Methoden wie 360°-Kameras, Drohnen und Augmented-Mixed-Reality-Lösungen den Baufortschrittsprozess weiter optimiert. Softwarelösungen wie Dalux und OpenSpace unterstützen diesen Prozess durch die praktische und schnelle Visualisierung des Baufortschritts in Innenbereichen und schaffen somit Transparenz während des gesamten Projekts (Braun et al., 2021; "Dalux Adapts Augmented Reality to Mobile for Construction Industry," 2017; OnSiteIQ, 2024a; OpenSpace, 2024a). Trotz der Vielseitigkeit bildbasierter Technologien bleibt das *Laserscanning* aufgrund seiner Fähigkeit zur schnellen aber präziseren Erfassung grosser Datenmengen und der Erstellung

hochgenauer Punktwolken ein unverzichtbares Werkzeug, insbesondere bei der Überwachung und Analyse komplexer Bauprojekte (Barazzetti, 2016; Braun et al., 2015; Rabbani et al., 2007).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass *BIM* und die unterstützenden digitalen Technologien die Effizienz, Transparenz und Qualität in Bauprojekten grundlegend verbessern. Die Kombination aus Automatisierung gewisser Prozesse, präzisen Überwachungsmethoden und integrierter Planung sorgen für die erfolgreiche und zukunftssichere Realisierung von Bauprojekten im digitalen Zeitalter (Braun & Geibig, 2020; Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

3.1 Technologien zur Baufortschrittserfassung

Die Technologie zur Baufortschrittserfassung hat sich durch den Einsatz moderner automatisierter und elektronischer Datenerfassungssysteme erheblich weiterentwickelt (Ley, 2024; Omar & Nehdi, 2016). Während Sensortechnologien wie *Laserscanner*, RFID-Tags und *GPS*-Sensoren physikalische Parameter wie Temperatur, Standort und Bewegung automatisch und in Echtzeit erfassen, gestatten elektronische Datenerfassungstechnologien wie digitale Kameras, mobile *Handheld*-Geräte und spezialisierte Software eine manuelle oder halbautomatische Dokumentation (Omar & Nehdi, 2016). Somit umfasst die Baufortschrittserfassung sowohl automatisierte als auch manuelle Methoden, wodurch je nach Projektanforderungen eine präzisere und effizientere Kontrolle sichergestellt wird.

Laserscanner und kamerabasierte Systeme wie Drohnen, *Smartphones* oder Kopfkameras spielen eine zentrale Rolle bei der Datenerfassung in Bauprojekten. Sie erfassen umfangreiche Bilder, Videos und Punktwolken, die für die Überwachung und Analyse des Baufortschritts genutzt werden (Ham & Kamari, 2019; Kemand & Beric, 2021). Während *Laserscanner* hochpräzise 3D-Modelle für detaillierte Bestandsaufnahmen liefern und die Geometrie von Bauwerken exakt erfassen (Braun et al., 2015), weist die Photogrammetrie eine kostengünstige Alternative auf. Sie generiert aus Kamerabildern farbige Punktwolken und texturierte 3D-Modelle, die durch die Integration mit *BIM* für den Soll-Ist-Vergleich genutzt werden können (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

Trotz dieser Fortschritte bestehen Herausforderungen bei der Kombination verschiedener Sensortypen (Dalal et al., 2024). Unterschiede in Datenqualität, Sensortechnologie und Koordinatensystemen erschweren die Fusion der erfassten Informationen, was die Vergleichbarkeit und Nutzung der Daten beeinträchtigen kann (Bosché et al., 2015; Halter & Erdogan, 2023). KI-gestützte Analyseverfahren bieten hier vielversprechende Lösungen, da sie eine automatisierte Auswertung und Harmonisierung der Daten ermöglichen und somit die Effizienz der Baufortschrittserfassung weiter steigern könnten (Pan & Zhang, 2021).

Mit der fortschreitenden Digitalisierung im Bauwesen gewinnt der Einsatz von *3D-Scanning*- und Bildgebungstechnologien zunehmend an Bedeutung. *Laserscanner* überzeugen durch ihre hohe Präzision, sind jedoch kostenintensiv, erfordern eine ungehinderte Sichtlinie und den Einsatz von Fachpersonal für die Datenerfassung und -verarbeitung (Braun et al., 2021; Digital Findet Stadt GmbH, 2024). Kameratechnologien hingegen sind flexibler und kostengünstiger einsetzbar, bringen jedoch Genauigkeitseinbussen mit sich und erfordern einen höheren Verarbeitungsaufwand (Omar & Nehdi, 2016). Daher sollte die Wahl der geeigneten Technologie stets an die spezifischen Anforderungen des jeweiligen Bauprojekts angepasst werden.

3.1.1 Laserscanner Technologien

Laserscanning ist eine etablierte Methode zur automatisierten präzisen Erfassung des Baufortschritts, die durch die Generierung von Punktwolken eine hohe geometrische Genauigkeit und eine grosse Datenmenge in kurzer Zeit liefert (Braun et al., 2015; Rabbani et al., 2007). Diese Punktwolken erfassen nicht nur die Koordinaten der sichtbaren Bauelemente, sondern auch von Objekten, die das Bauwerk teilweise verdecken (Braun et al., 2021). Zusammen mit Technologien wie Photogrammetrie wird *Laserscanning* als eine Messmethode genutzt, um den Fortschrittsüberwachungsprozess zu automatisieren (Barazzetti, 2016). *Laserscanning* wurde als eine der Technologien identifiziert, die zur Steigerung der Effizienz und Genauigkeit der Bauüberwachung beitragen (A.S. & Edayadiyil, 2022; Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

Die *Laserscanning*-Technologie hat die Erstellung von *As-Built* Modellen praktikabel gemacht. *Laserscanner* messen die Entfernung vom Sensor zu nahegelegenen Oberflächen mit einer Genauigkeit von Millimetern bis Zentimetern und mit Geschwindigkeiten von Tausenden bis Hunderttausenden Punktmessungen pro Sekunde. Die Punktwolken aus jedem *Scan* werden zunächst im lokalen Koordinatensystem des *Scanners* dargestellt (Leica Geosystems, 2024a, 2024b). Alle Daten müssen in ein gemeinsames, globales Koordinatensystem ausgerichtet werden, ein Prozess, der als Registrierung bekannt ist. Obwohl automatisierte Registrierungsverfahren entwickelt wurden, ist die Registrierung in der aktuellen Praxis immer noch ein halb-automatischer Prozess (Tang et al., 2010).

3.1.2 Kamerabasierte Technologien

Neben bewährten Methoden wie dem *Laserscanning* etablieren sich kamerabasierte Technologien, insbesondere in Kombination mit BIM-basierten Anwendungen wie Dalux und digitalen Baustellenbegehungen (*SiteWalks*), als flexible und kostengünstige Alternative (siehe Abbildung 2). *SiteWalks* ist eine Methode von Dalux, bei der während eines Baustellenrundgangs ein 360°-Video aufgenommen wird, aus dem an spezifischen Baustellenbereichen einzelne 360°-Fotos extrahiert und zeit- sowie ortsgenau auf Plänen und Modellen in Dalux abgelegt

werden (Dalux, 2024a). Im Gegensatz zum *Laserscanning* weisen Kameras als Erfassungsgeräte zwar eine geringere geometrische Genauigkeit auf, bieten aber den Vorteil höherer Flexibilität und merklich geringerer Kosten. Dies erfordert alternative Verarbeitungsstrategien bei der Analyse der Bilddaten (Braun et al., 2021).

Die Baubranche setzt zunehmend auf diese digitalen Technologien zur Verbesserung der Baudokumentation und des Baustellenmanagements (Ley, 2024). Digitale Baustellenbegehungen (oder *SiteWalks*), wie sie von Plattformen wie Dalux, OpenSpace, u.a. angeboten werden, erlauben die Integration von *BIM*-Modellen und anderen Bauwerksdaten in den Begehungsprozess (Dalux, 2024a, 2024b; OpenSpace, 2024e, 2024f) (siehe Abbildung 2: (a),(c)). Dadurch wird eine modellbasierte Navigation auf der Baustelle geleistet, wodurch sich Projektbeteiligte virtuell durch das Bauwerk bewegen und den Baufortschritt im Kontext des Modells überprüfen können (siehe Abbildung 2). Ein wesentlicher Vorteil ist die Möglichkeit zur direkten Mängelerfassung im Modell, was die Kommunikation und Nachverfolgung von Problemen deutlich verbessert.

Die 360°-Fotos (z.B. mit HoloBuilder) ergänzen die digitalen *SiteWalks* ideal durch eine umfassende visuelle Dokumentation des Baufortschritts (HoloBuilder, 2023a, 2023b, 2023c). Sie beschleunigen die Datenerfassung im Vergleich zu herkömmlichen 2D-Fotos, verbessern den Datenzugriff und garantieren eine detailliertere Dokumentation durch die Erstellung von Pendenzen. Die Kombination von 360°-Fotos mit *SiteWalks* führt zu deutlichen Optimierungen der Arbeitsabläufe, fördert die Kommunikation und erhöht die Transparenz auf der Baustelle, was zu einer effizienteren Projektabwicklung beiträgt.

Neben den genannten Beispielen existieren weitere innovative Lösungen auf dem Markt, die 360°-Kameras zur Baufortschritterfassung nutzen. OpenSpace beispielsweise ist nach eigenen Angaben "schneller als die manuelle Aufnahme von Fotos und die daraus resultierende Dokumentation ist gründlicher" (OpenSpace, 2024b, 2024d), aufgrund der erstellten 360°-Fotos aus den *SiteWalks*-Aufnahmen. Ein weiteres Beispiel ist OnSiteIQ, das eine systematische Dokumentation des Baufortschritts durch hochauflösende 360°-Bildgebung erleichtert und so eine fundierte Bauüberwachung unterstützt (OnSiteIQ, 2024a, 2024b). Der Vergleich der verschiedenen genannten *BIM*-Tools ist im Anhang zu finden (siehe Anhang 2).

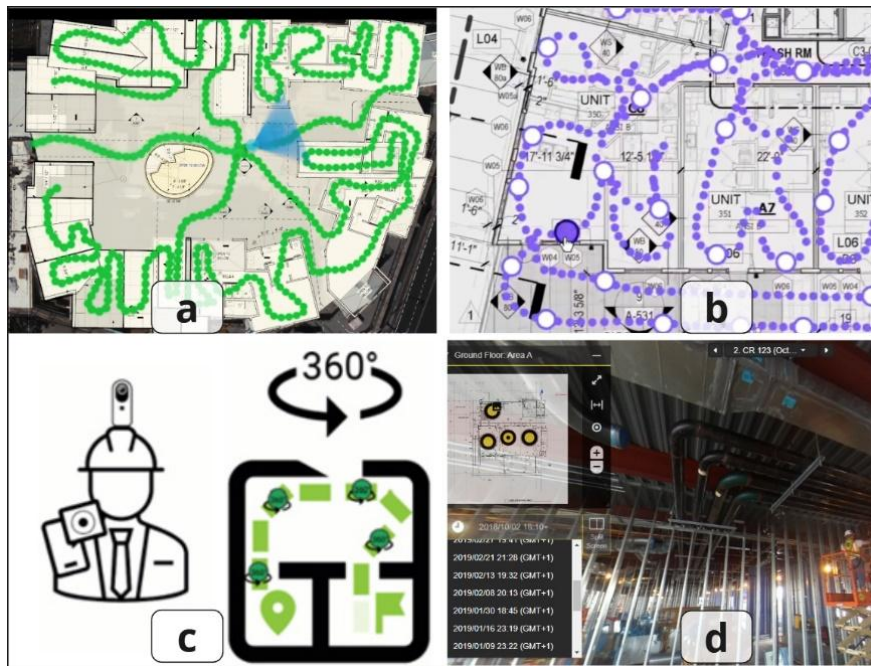


Abbildung 2: Technologien zur Baufortschritterfassung: a) OpenSpace; b) OnsiteIQ; c) Dalux; d) HoloBuilder

3.2 Methoden zur Auswertung und Analyse der Baufortschrittkontrolle

Während früher manuelle Inspektionen und Fotodokumentationen dominierten, kommen heute zunehmend innovative Technologien wie KI, *BIM* und Sensortechnologien zum Einsatz (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Pan & Zhang, 2021). Das Ziel besteht darin, präzise und frühzeitige Informationen bereitzustellen, um fundierte Entscheidungen treffen zu können und sowohl Projektverzögerungen als auch Mehrkosten zu minimieren (Hagen, 2023).

Ein integrierter Ansatz zur BFK kombiniert moderne Verfahren der Datenerfassung mit deren automatisierter Analyse und Auswertung. Dabei kommen unter anderem *Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)*, wie Drohnen, sowie *Unmanned Ground Vehicles (UGVs)*, autonome Bodenfahrzeuge, zum Einsatz. Diese Technologien ermöglichen die kontinuierliche Erfassung von Bilddaten und Punktwolken, die anschliessend systematisch verarbeitet werden, um den Bauzustand präzise zu bewerten und zu dokumentieren (Braun et al., 2015; Ham & Kamari, 2019). Ergänzend liefern *Laserscanner* hochauflösende 3D-Modelle, die für *Scan-to-BIM*- und *Scan-vs.-BIM*-Analysen genutzt werden können (Braun et al., 2015). Eine kostengünstige Alternative stellt die Photogrammetrie dar, die aus Kamerabildern farbige Punktwolken und texturierte 3D-Modelle generiert (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

Zusätzlich erleichtert *Mixed Reality (MR)* die modellbasierte Überwachung, indem digitale Baupläne direkt in den realen Raum projiziert werden. Dies wird durch *Head-Mounted Displays* wie die HoloLens 2 unterstützt (Tao et al., 2024). Ebenso verbessert *Augmented Reality (AR)* die Abstimmung der Gewerke, indem Baupläne direkt auf physische Strukturen projiziert werden (GAMMA Technologies, 2024; NEXT-BIM, 2024).

Parallel dazu entwickeln sich auch die Methoden zur Dateninterpretation stetig weiter. So vermittelt beispielsweise *3D Gaussian Splatting (3DGS)* eine schnelle und realistische Rekonstruktion von Bauwerken (Cai et al., 2024; Kerbl et al., 2023). Darüber hinaus analysiert KI-basierte Objekterkennung Baustellenbilder, indem sie Objekte semantisch segmentiert und Materialeigenschaften unterscheidet. Hierbei werden Bildpixel vordefinierten Kategorien wie Wänden oder Rohrleitungen zugeordnet (Ham & Kamari, 2019).

Die Kombination von *BIM* mit modernen Erfassungs- und Analysemethoden, wie KI-gestützten Verfahren erleichtert den Vergleich von Plan- und Ist-Zustand, reduziert den manuellen Aufwand und erlaubt eine frühzeitige Erkennung von Abweichungen (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Pan & Zhang, 2021). Somit leisten diese innovativen Ansätze einen wichtigen Beitrag zur Verbesserung von Bauprojekten.

3.2.1 Scan-to-BIM

Scan-to-BIM ist ein zentraler Prozess in der digitalen Bauindustrie, der die Erfassung von Punktwolkendaten aus *3D-Laserscanning* oder Bildern mit der Erstellung digitaler *BIM*-Modelle kombiniert. Dieser Ansatz gewährleistet eine präzise und effiziente Abbildung des Ist-Zustands (*As-Built*) von Bauwerken, welche die Grundlage für den Abgleich mit den Planungsdaten (*As-Planned*) bildet. Der Abgleich erlaubt es, Abweichungen frühzeitig zu erkennen und zu beheben, was sowohl die Qualitätssicherung als auch die Effizienz in Bauprojekten signifikant verbessert (Bosché et al., 2015, 2015; Braun et al., 2021).

Ein wesentlicher Vorteil von *Scan-to-BIM* liegt in seiner hohen Genauigkeit, welche die detaillierte Erfassung selbst komplexer Baugeometrien sicherstellt. Automatisierte Algorithmen auf Basis von KI, wie etwa *Convolutional Neural Networks (CNNs)*, unterstützen die Erkennung und Segmentierung von Bauelementen wie Wänden, Rohren oder Decken aus den Punktwolken. Kommerzielle Softwarelösungen wie ClearEdge3D EdgeWise, Leica Cyclone 3DR und NavVis IVION erleichtern diesen Prozess und beschleunigen die Umwandlung der Punktwolkendaten in nutzbare *BIM*-Modelle erheblich (Barazzetti, 2016; Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Laserscanning Europe GmbH, 2024; *Leica Cyclone 3DR-Scan to Pipe*, 2024; Leica Geosystems, 2024a). Fortschritte im Bereich *Deep Learning* erhöhen dabei die Genauigkeit und Effizienz der Erkennung, insbesondere bei komplexen Geometrien und grossen Datenmengen.

Die Integration von *Scan-to-BIM* in den sogenannten *Scan-vs-BIM*-Prozess kombiniert *3D-Laserscanning* und *BIM*, um den *As-Built*-Zustand mit dem *As-Planned*-Zustand zu vergleichen. Ausserdem wird eine fortlaufende Überwachung des Baufortschritts möglich gemacht. Durch einen anderen Ansatz werden die geometrischen Informationen aus den Punktwolken mit dem 4D-Bauwerksmodell abgeglichen, um den Fertigstellungsgrad von Bauelementen zu

beurteilen und Abweichungen zu identifizieren (Braun et al., 2021). Insbesondere *Mechanical, Electrical and Plumbing Systems (MEP)*, also mechanische, elektrische und sanitärtechnische Komponenten wie Rohre und Leitungen profitieren von diesem Ansatz. Automatisierte Verfahren wie die *Hough-Transformation* und fortschrittliche *Deep-Learning-Algorithmen* ermöglichen die Erkennung und Rekonstruktion zylindrischer *MEP*-Objekte (siehe Abbildung 3), was zur Messung des *Percent Built as Planned* und einem genauen *Discrepancy Tracking* beiträgt (Bosché et al., 2015).

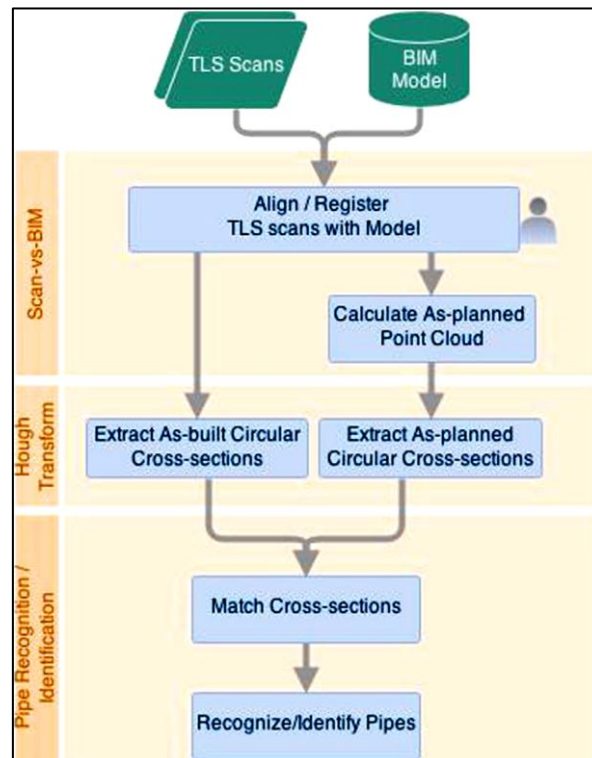


Abbildung 3: Automatisierte Bauelementerkennung für Soll-Ist-Vergleich anhand TLS/BIM. Quelle: (Bosché et al., 2015)

Die praktische Anwendung von *Scan-to-BIM* wird durch Pilotprojekte und Softwarelösungen wie Leica Cyclone 3DR demonstriert. Dennoch stellen die Skalierbarkeit und Integration in komplexe Bauprojekte weiterhin bedeutende Herausforderungen dar, die durch weitere Forschungs- und Entwicklungsbemühungen angegangen werden müssen (Barazzetti, 2016; Bosché et al., 2015). Ein konkretes Anwendungsbeispiel liefert Florin Coltoan von TITAN Digital Solutions, der die Digitalisierung der Klinik Donaustadt in Wien beschreibt. Die über einen Zeitraum von zwei Jahren gescannte Gesamtfläche von über 40'000 m², umfassend Geschosse, Untergeschossgänge und Technikzentralen, wurde mittels NavVis IVION bereitgestellt und in Revit modelliert. Dies ermöglichte präzise Planungen, insbesondere im Bereich der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Die schnelle Verfügbarkeit der gescannten Daten am Folgetag führte zu einer Reduktion von Fehlern sowie Zeit- und Kostenersparnissen (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

In der Studie von Patil et al. (2016) wird der Einsatz zur Erkennung und Segmentierung von Bauelementen im HLK-Bereich in Punktwolken durch *Laserscanner* untersucht. Dabei wurde die *Hough-Transformation* zur automatischen Identifizierung von Zylindern modifiziert, um die Segmentierung zu verbessern (Rabbani et al., 2007). Diese Methode reduziert die Rechenzeit und den Speicherbedarf und erhöht die Genauigkeit der Zylinderorientierungsschätzung. Zudem wurden Position und Radius der Zylinder durch einen minimalen Berechnungsschritt unter Verwendung eines algebraischen Kreis-Anpassungsalgorithmus bestimmt. Schliesslich konnte mit dem SP3D-Programm ein vollständiges *3D-As-Built-Pipeline-Modell* erfolgreich rekonstruiert werden (siehe Abbildung 4).

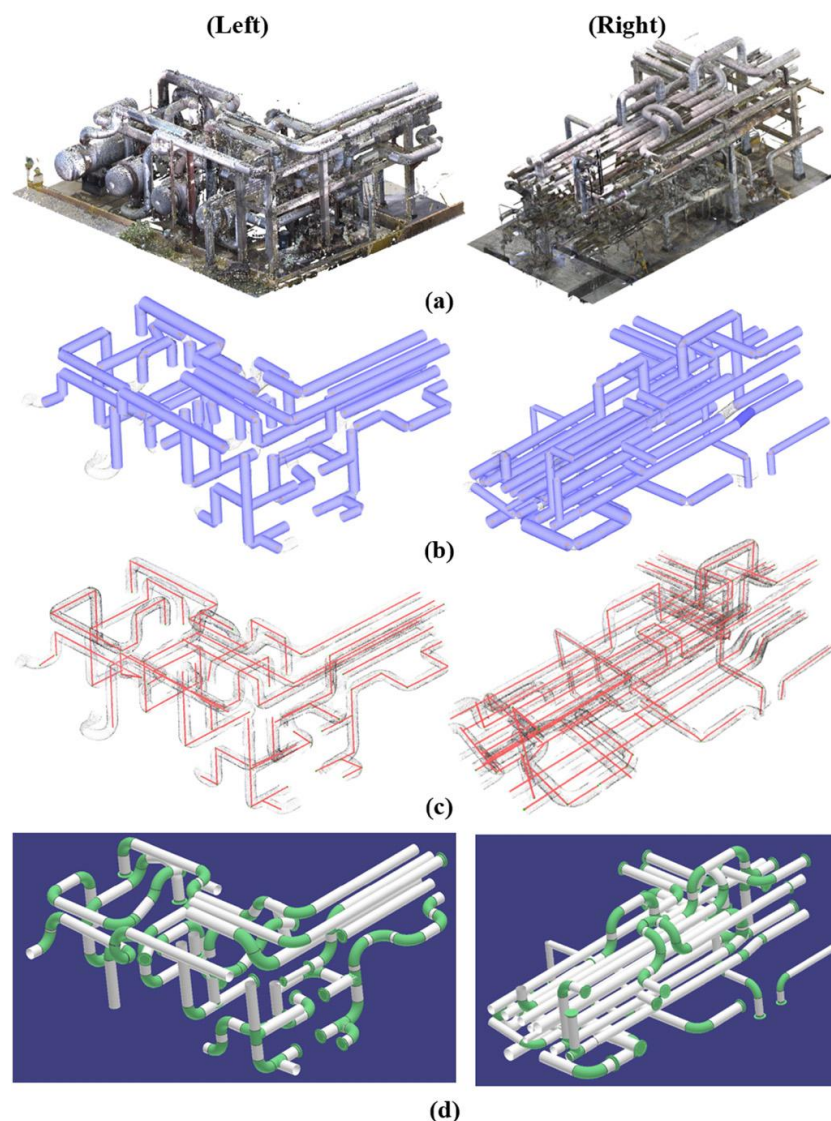


Abbildung 4: Daten einer HLK-Anlage: a) Laserscanner Punktwolken, b) Zylinderdetektion, c) Achsennetzwerk-Rekonstruktion, d) Ergebnisse aus SP3D Software (Patil et al., 2016).

Moderne Softwarelösungen wie EdgeWise, von ClearEdge3D, nutzen heute automatisierte mathematische Verfahren zur präzisen Erstellung intelligenter 3D-Modelle aus Punktwolken. ClearEdge3D EdgeWise ist eine spezialisierte CAD-Software, die Punktwolken von

terrestrischen *Laserscannern* oder Tachymetern in strukturierte 3D-Modelle umwandeln kann (ClearEdge3D, 2024). Die Software bietet eine teilautomatisierte Lösung zur Modellierung von Rohrleitungen und Flächen (siehe Abbildung 5), die in einer Datenbank organisiert werden, und unterstützt zudem die effiziente Darstellung von Stahlkonstruktionen und Kanälen. Komponenten wie Ventile und Flansche lassen sich dabei problemlos integrieren (Laserscanning Europe GmbH, 2024, nd). Ein vollständiges 3D-Modell der Bauelemente erlaubt einen detaillierten und präzisen Vergleich zwischen geplantem und tatsächlichem Bauzustand. Allerdings erfordert eine derartige Implementierung einen höheren Zeitaufwand, was die Nutzung für die BFK derzeit einschränken kann.

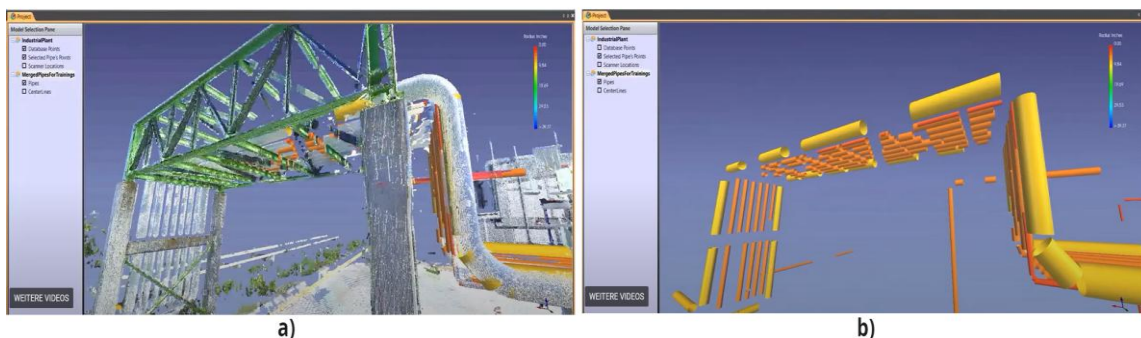


Abbildung 5: Dateien von ClearEdge 3D: a) Automatische Erkennung von HLK-Bauelementen in der Punktwolke. b) Modellierung der HLK-Bauelemente (ClearEdge3D, 2024; Faster, More Accurate As-Built Modeling with Edge-Wise, 2020).

Ein weiterer Ansatz zur Erstellung eines teilautomatisierten *3D-As-Built*-Modells ist die Anwendung der mathematischen Methode *Non-Uniform Rational B-Splines (NURBS)* mit Parametrisierung. Die entwickelte Methode zur Generierung parametrischer *As-Built*-Modelle aus Punktwolken erlaubt eine präzise Modellierung komplexer Bauwerke in mehreren wesentlichen Schritten. Zunächst werden dichte Punktwolken durch *Laserscanning* oder Photogrammetrie erfasst und mithilfe eines geodätischen Netzwerks in einem gemeinsamen Referenzsystem ausgerichtet, um eine hohe Präzision zu gewährleisten. In einem Vorverarbeitungsschritt wird Rauschen entfernt und die Daten werden für die Modellierung gefiltert, bevor strukturelle Elemente und Diskontinuitätslinien in der Punktwolke identifiziert werden. Durch die Extraktion und Anpassung von *NURBS*-Kurven und -Flächen lassen sich parametrische Objekte erstellen, die auf die erforderliche Genauigkeit verfeinert und angepasst werden (siehe Abbildung 6). Die Integration zusätzlicher Daten aus Inspektionen oder historischen Quellen erhöht die Modellgenauigkeit, gefolgt von Validierung und Export für eine präzise *BIM*-Abbildung der Struktur (Barazzetti, 2016).

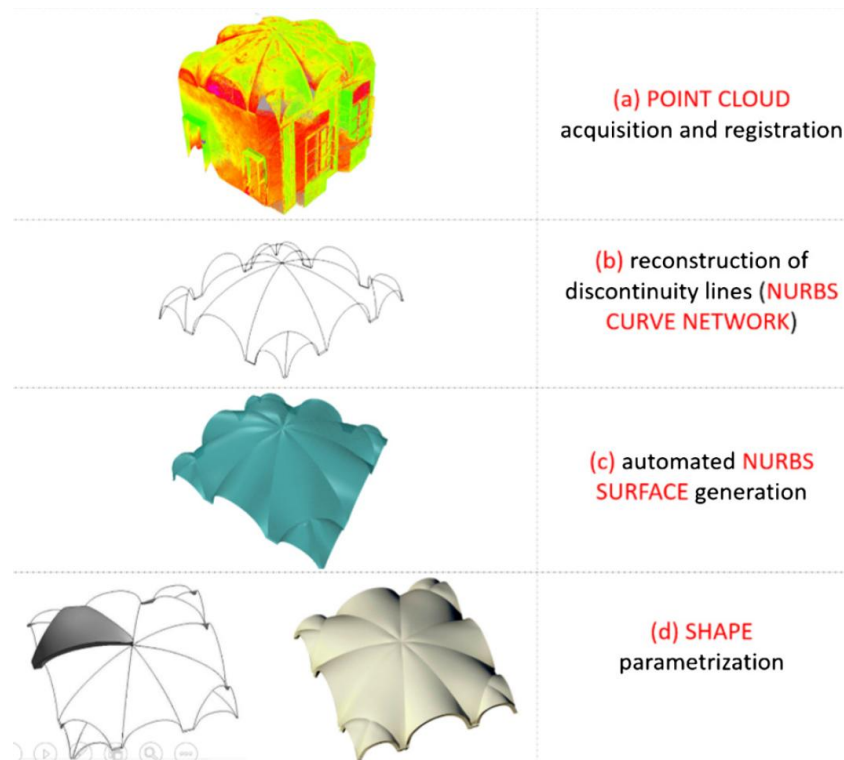


Abbildung 6: Der vorgeschlagene Arbeitsablauf für die Erzeugung parametrischer Objekte aus unregelmässigen Elementen (Barazzetti, 2016).

Trotz der Vorteile von *Scan-to-BIM*, wie Zeitersparnis und Fehlerreduktion in der BFK, sind technische und fachliche Herausforderungen nicht zu unterschätzen (Alizadehsalehi & Yitmen, 2016; Künzler et al., 2022). Die Verarbeitung von Punktwolkendaten setzt nicht nur fundierte Fachkenntnisse, sondern auch leistungsfähige Hardware und komplexe Software voraus. Dabei können Probleme wie Rauschen oder Okklusionen die automatische Objekterkennung beeinträchtigen, insbesondere bei komplizierten Geometrien wie gebogenen Rohren oder Verzweigungen. Hinzu kommt, dass trotz fortschreitender Automatisierung eine manuelle Nachbearbeitung häufig unvermeidbar bleibt, um die erfassten Daten vollständig und fehlerfrei in bestehende *BIM-Workflows* zu integrieren. Dies erhöht den Zeitaufwand und die Kosten für die Projektrealisierung (Bosché et al., 2015). Zusätzlich stellen die Verarbeitung grosser Datenmengen und deren effiziente Visualisierung deutliche Anforderungen an die Infrastruktur. Neben leistungsfähiger Hardware zur Datenerfassung sind spezialisierte Softwarelösungen und Serverkapazitäten erforderlich, um die teils hochkomplexen Punktwolken zu analysieren und nahtlos in die digitale Bauplanung zu überführen (Künzler et al., 2022).

Die kontinuierliche Weiterentwicklung von Methoden und Algorithmen bleibt entscheidend, insbesondere hinsichtlich der Verbesserung der Objekterkennung und der Integration grosser Punktwolkendaten in bestehende *BIM-Workflows*. Fortschritte bei der *Hough-Transformation* und *Deep-Learning*-Ansätzen versprechen eine präzisere Modellierung und eine höhere Automatisierung. Perspektivisch könnten KI- und Cloud-Technologien eine Echtzeit-Anwendung

von *Scan-to-BIM* ermöglichen, die nicht nur die Effizienz, sondern auch die Anwendungsmöglichkeiten dieser Technologie in der Bauindustrie erheblich erweitern würde (Bosché et al., 2015; Tang et al., 2010).

3.2.2 As-Built-Scan vs. BIM

Ein ähnliches Verfahren kann mit der Leica-Geosystem, einschliesslich des *Laserscanners* BLK360, unter Verwendung der Softwarelösungen Register 360 Plus und 3DR Cyclone durchgeführt werden. In diesem Verfahren werden Punktwolken eines definierten Bereichs oder Baugewerks erfasst, registriert, bereinigt, nachbearbeitet und schliesslich als *Mesh* erstellt, um Abweichungen im Vergleich zum geplanten Soll-Modell zu identifizieren (siehe Abbildung 7) (Leica Geosystems, 2024b, 2024c, 2024d, 2024b).

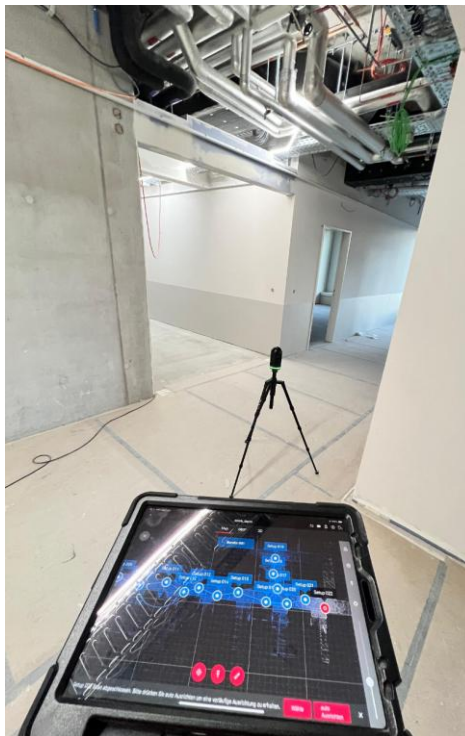


Abbildung 7. Baufortschrittserfassung mit Leica Laserscanner BLK360. Quelle: Implenia 2024

Die Methoden zur BFK, die bei Tao et al. (2024) beschrieben werden, wie *Bounding Box Occupation* und *Feature Matching*, ähneln den Funktionen von Leica 3DR Cyclone. Diese erfasst Punktwolken und *3D-Mesh*-Daten und vergleicht sie mit *BIM*-Modellen, um Abweichungen zwischen dem realen Bauzustand und dem geplanten Modell zu identifizieren. Die folgende Abbildung zeigt den Vergleich von Punktwolken und dem 3D-Modell, einschliesslich nachbearbeiteter *Meshes*. Mit 3DR Cyclone können Bauabweichungen automatisch erkannt werden, indem die Abstandsanforderungen des Projekts konfiguriert werden (siehe Abbildung 8).

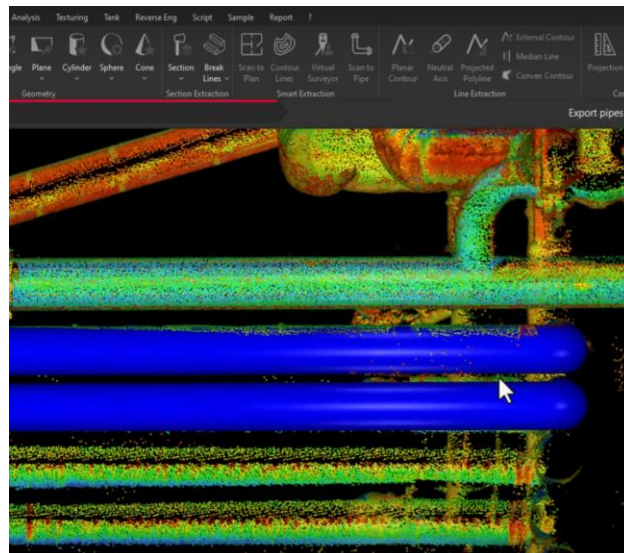


Abbildung 8. Vergleich 3D-Modell mit Punktwolken/Mesh (Leica Geosystems, 2024b).

Bei kontinuierlichen und automatisierten BFK entfällt oft die Notwendigkeit für zeitaufwändige Prozesse wie Parametrisierung und die vollständige Modellierung einzelner Bauelemente, da diese je nach Projektanforderungen nicht immer erforderlich sind. In solchen Fällen kann auf eine detaillierte geometrische Modellierung verzichtet werden.

Der *Laserscanner* BLK360 gilt laut Tests an der HafenCity University Hamburg derzeit als eines der leistungsfähigsten Geräte zur Baufortschritterfassung. Die Auswahl des geeigneten *Scanners* richtet sich jedoch nach den spezifischen Anforderungen des jeweiligen Projekts. Entscheidende Kriterien für die Auswahl umfassen die Genauigkeit der Punktwolkendaten, die je nach Projektanforderungen unterschiedlich sein kann, sowie das Datenvolumen, das häufig mit einem hohen Speicheraufwand verbunden ist. Zudem sind die Effizienz in Bezug auf Zeit und Kosten sowie die Integration des Systems in bestehende Arbeitsabläufe von Bedeutung. Es sollte beachtet werden, dass terrestrische *Laserscanning*-Systeme stets als Komplettsysteme betrachtet werden müssen, die sowohl Hardware als auch Software umfassen, einschliesslich entsprechender Algorithmen zur Verarbeitung der Punktwolkendaten (Kersten & Lindstaedt, 2022).

3.2.3 3D Gaussian Splatting

3D Gaussian Splatting bringt mit sich grosses Potenzial für die BFK durch die präzise visuelle Rekonstruktion von Szenen mittels anisotroper 3D-Gaussian-Ellipsoide (Kerbl et al., 2023). Diese Methode sorgt für detailgetreue Visualisierungen von geometrischen Strukturen, komplexen Texturen und reflektierenden Oberflächen, was sie besonders für den HLK-Bereich relevant macht.

Die Stärke von *3DGS* liegt in der genauen Darstellung von Baufortschritten, insbesondere für den Ist-Soll-Vergleich. Es erlaubt die Dokumentation verschiedener Bauphasen sowie die

Identifikation von Abweichungen. Experimente haben gezeigt, dass *3DGS* im Vergleich zu traditionellen Ansätzen sowohl die Trainingsgeschwindigkeit als auch die Qualität der Rekonstruktionen signifikant verbessert (Cai et al., 2024). Ein wesentlicher Vorteil ist die effiziente Datenverarbeitung, welche schnelle Analysen in dynamischen Bauumgebungen zulässt. Die Integration mit *BIM* oder *Internet-of-Things*-Sensoren eröffnet zudem neue Möglichkeiten für eine umfassendere Bauüberwachung und Entscheidungsfindung. Allerdings weist die Methode auch Herausforderungen auf, wie die hohe Rechenkomplexität und den Speicherverbrauch, die insbesondere bei grossen Punktwolken und hochauflösenden Szenen relevant werden. Unerwünschte Artefakte wie Rauschen oder Unschärfe in kontrastreichen Bereichen können die visuelle Qualität beeinträchtigen, und die Integration mit anderen *Rendering*-Techniken gestaltet sich oft schwierig (Dalal et al., 2024).

Trotz der Vorteile erfordert die Implementierung von *3DGS* qualitativ hochwertige Eingangsdaten und bleibt technisch anspruchsvoll. Während die Methode durch ihre visuelle Präzision und die Darstellung komplexer Texturen überzeugt, könnten für hochpräzise geometrische Messungen weiterhin etablierte Technologien wie *Laserscanning* notwendig bleiben. Dennoch ergänzt *3DGS* bestehende Technologien und erweitert die Möglichkeiten der BFK, indem es neue Ansätze zur Visualisierung und Datenverarbeitung vermittelt.

3.2.4 Autonome Boden- und Luftfahrzeuge

Der Einsatz von unbemannten Luftfahrzeugen (*UAVs*) und unbemannten Bodenfahrzeugen (*UGVs*) in der BFK hat sich als äusserst effektiv erwiesen, insbesondere im Innenausbau (Zhou et al., 2021). Diese Technologien ermöglichen eine präzise und effiziente Datenerfassung, welche die Überwachung von schwer zugänglichen oder gefährlichen Baustellenbereichen merklich verbessert (Asadi et al., 2020). Während *UAVs* durch ihre Fähigkeit, hochauflösende Luftbilder zu erstellen, eine weite Perspektive bieten und grossflächige Baustellen erfassen, kommen *UGVs* insbesondere in engen und komplexen Innenbereichen zum Einsatz, um detaillierte Bodendaten wie *Scans* zu sammeln. Durch die Kombination beider Systeme lässt sich eine höhere Datenqualität erzielen (Asadi et al., 2020), die wiederum die Entscheidungsfindung auf Baustellen fördert (Huang, 2019; Lin & Zhan, 2023).

Ein innovativer Ansatz zu einer optimierten Nutzung beider Systeme, besteht in der synchronisierten Nutzung von *UAVs* und *UGVs*, wie Asadi et al. (2020) darlegen. Dabei bewegt sich das *UGV* autonom durch den Innenraum und sammelt kontinuierlich Umgebungsdaten, während das *UAV* die Bewegung des *UGVs* relativ lokalisiert. Diese simultane Erfassung begünstigt eine effiziente Kartierung auch schwer zugänglicher Bereiche und führt zu einer detaillierten Datenerfassung etwa *Scans*. Zentral für diesen Ansatz ist der Einsatz von *Sensorfusion* und *Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)*, wodurch die Position und Orientierung

der Fahrzeuge in Echtzeit bestimmt und eine präzise Navigation in komplexen Umgebungen gewährleistet wird. Die Integration von Tiefensensoren und Kameras in beiden Fahrzeugtypen stellt sicher, dass auch in visuell herausfordernden Umgebungen oder bei schwierigen Lichtverhältnissen eine hohe Datenqualität erzielt wird (Asadi et al., 2020).

Ein Schlüsselement zur erfolgreichen Umsetzung dieser Systeme ist die Nutzung von *Visual-Inertial Odometry* (VIO), die visuelle und inertielle Daten aus Kameras sowie *Inertial Measurement Unit* (IMU), also Beschleunigungs- und Rotationssensoren kombiniert. In Verbindung mit *SLAM* stellt diese Technologie eine Echtzeitkartierung der Trajektorie sicher und damit eine präzise Bestimmung der Position und Orientierung von *UAVs* und *UGVs* (Huang, 2019; Zhou et al., 2021). Besonders in *GPS*-armen Umgebungen, wie sie in Innenräumen von Baustellen häufig vorkommen, erweist sich dieser Ansatz als unverzichtbar (Asadi et al., 2020; Lin & Zhan, 2023; Zhou et al., 2021). Während *SLAM* eine simultane Kartierung der Umgebung sowie die Positionsbestimmung ermöglicht, erleichtert der Algorithmus *Oriented FAST and Rotated BRIEF* (*ORB*) kombiniert mit *SLAM* (*ORB-SLAM2*) eine optimierte Extraktion visueller Merkmale zur Lokalisierung (Zhou et al., 2021).

Die Forschung von Zhou et al. (2021) leistet einen bedeutenden Beitrag zur Weiterentwicklung der Innenlokalisierung, indem sie *VIO* mit einem erweiterten *ORB-SLAM2*-Algorithmus kombinieren. Durch die Integration einer Tiefenfilterung über mehrere Frames hinweg erhöht sich die Genauigkeit der Positionierung und Kartierung deutlich. Diese modifizierte Version von *ORB-SLAM2* nutzt ein Vier-Thread-System zur effizienten Koordination von Bildverarbeitung, Merkmalsextraktion, Tiefenfilterung und lokalem Mapping. Ergänzend hierzu erweitern Lin & Zhan (2023) die traditionellen *VIO*- und *SLAM*-Ansätze durch die Integration von *Ultra-Wideband*-Positionierung (*UWB*), wenn *Global Navigation Satellite System* (*GNSS*) nicht verfügbar oder unzuverlässig ist, was in Innenräumen oft der Fall ist. Diese Technologie trägt dazu bei, die Genauigkeit der Positionsbestimmung in Innenräumen erheblich zu verbessern, indem sie die bei *VIO* typischen Driftprobleme minimiert. Während *VIO* eine kontinuierliche Schätzung der Bewegung liefert, sorgt *UWB* dafür, dass die Schätzungen innerhalb eines stabilen Referenzrahmens bleiben, was zu einer robusteren und genaueren Trajektorie führt (Lin & Zhan, 2023).

Schlussfolgernd zeigen die betrachteten Ansätze, dass die Systeme *UAV* und *UGV* mit *VIO* und *SLAM* eine zuverlässige Navigation in dynamischen und sich schnell verändernden Baustellenumgebungen sicherstellte, selbst unter schwierigen Lichtverhältnissen und in komplexen Innenräumen. Diese Methodenkombination führt zu einer stabileren und genaueren Lokalisierung, wodurch die BFK bedeutsam verbessert wird (Asadi et al., 2020; Lin & Zhan, 2023; Zhou et al., 2021).

Trotz des vielversprechenden Potenzials dieser Technologien bestehen weiterhin Herausforderungen, insbesondere in Bezug auf die Kommunikationsinfrastruktur, Umgebungsbedingungen oder schlechte Lichtverhältnisse, welche die Datenqualität beeinträchtigen können (Huang, 2019; Lin & Zhan, 2023). Zudem erfordern die Technologien hohe Rechenleistung und spezialisierte Software, was den Einsatz auf grossen oder komplexen Baustellen erschwert. Dennoch zeigen aktuelle Forschungsergebnisse, dass die langfristigen Vorteile hinsichtlich Genauigkeit und Effizienz die anfänglichen Herausforderungen rechtfertigen (Lin & Zhan, 2023; Zhou et al., 2021).

3.2.5 Digitale BIM-Tools

Digitale *BIM*-Tools optimieren Bauprozesse, indem sie den Informationsaustausch zwischen den Beteiligten effizient gestalten, die Koordination zwischen Fachplanenden verbessern und die Qualität der Ausführung steigern, während sie gleichzeitig zur Ressourcenschonung beitragen (Blandini et al., 2022). Durch die Nutzung digitaler Bauinformationen werden sowohl die Planungsphase als auch die Ausführung von Bauprojekten optimiert (siehe Abbildung 9). Zudem reduzieren diese Tools Konflikte, erlauben direkte Klärungen vor Ort und verknüpfen Aufgaben, Anmerkungen sowie Leistungsstände direkt mit dem Modell, was Informationsbrüche und Verzögerungen minimiert (Jung-Lundberg, 2024).

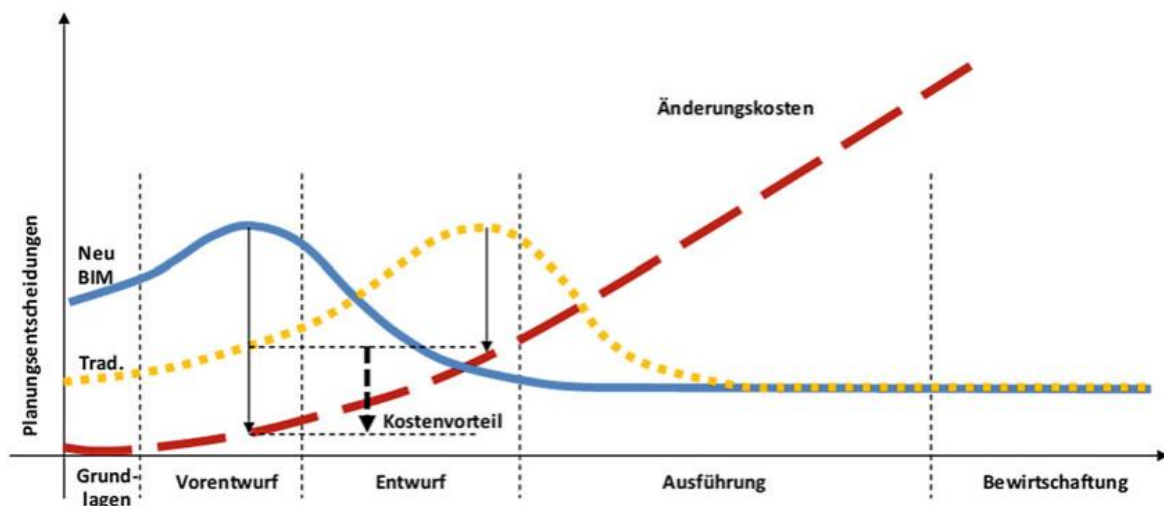


Abbildung 9: Aufwand im Projektverlauf mit und ohne BIM (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011).

Ein herausragendes Beispiel für den praktischen Einsatz digitaler *BIM*-Tools ist Dalux. Dieses *BIM*-Tool unterstützt die Baufortschrittsüberwachung durch *SiteWalks* und 360°-Fotos, die den Ist- und Soll-Zustand eines Projekts vergleichen und die Kommunikation im Team verbessern. Unternehmen wie Implenia, Drees & Sommer und All Real setzen Dalux erfolgreich in ihren Bauprojekten ein (Dalux, 2024b, 2024c, 2024d). Darüber hinaus hat HoloBuilder in

Kooperation mit der Firma BAM Ireland eine 360°-Fototechnologie integriert, um Transparenz, Effizienz und Dokumentation zu optimieren. Dies führt zu verbesserten Arbeitsabläufen und setzt neue Standards für zukünftige Bauprojekte, wie im Dublin Docklands (HoloBuilder, 2023d, 2023a, 2023c, 2023b).

Neben Dalux und HoloBuilder bietet auch OpenSpace innovative Lösungen für die digitale Baustellendokumentation. So wurde im *Ultra Fast Track Projekt* der Firma Exyte im deutschen Bundesland Sachsen-Anhalt ein Roboterhund mit einer 360°-Kamera eingesetzt, um tägliche digitale Baustellendokumentationen zu erstellen. Dies reduziert Fahrten zur Baustelle, fördert die Kommunikation und trägt zu schnelleren Entscheidungen bei. Zusätzlich erlaubt OpenSpace Track die kontinuierliche Überprüfung des Baufortschritts und die Einhaltung des Zeitplans (OpenSpace, 2025a, 2024e, 2024f, 2024a, 2024d, 2024b, 2024c).

Ein weiteres innovatives *BIM*-Tool ist Doxel, das KI und *Reality-Capture*-Technologien für die BFK nutzt. Durch den Vergleich von 360°-Bildern mit dem *BIM*-Modell garantiert Doxel eine präzise Fortschrittsdokumentation, die in Echtzeit Zeitpläne aktualisiert und die Ressourcenplanung optimiert (Doxel, 2024a, 2024b, 2024c).

Ein konkretes HLK-Anwendungsbeispiel für den erfolgreichen Einsatz von Dalux ist die HLK-Installation im Krankenhaus der dänischen Stadt Viborg durch das Unternehmen Airteam. Kasper Haack, *BIM*-Spezialist bei Airteam, hebt die Vorteile hervor: „Es ist revolutionär, dass die Technologie weiss, wo wir uns befinden und was wir sehen. Wir sparen Zeit und Geld, und Auftragnehmer profitieren enorm in Bezug auf Qualitätssicherung und Montage. Das Navigieren in den vielen Papierzeichnungen in der Baubranche ist äusserst kompliziert. Mit *AR* müssen wir nicht so viel nachdenken, sondern nur schauen“ (*“Dalux Adapts Augmented Reality to Mobile for Construction Industry,”* 2017).

3.2.6 Augmented Reality und Mixed Reality

Mixed Reality revolutioniert die BFK durch die tiefgreifende Integration digitaler Modelle in die physische Umgebung sowie die Erstellung eines Baumodells aus Punktwolken oder *Meshes* (Tao et al., 2024). Im Gegensatz zu *AR*, die statische digitale Overlays bietet und ein Modell in der realen Welt visualisiert und überlagert (GAMMA Technologies, 2024; NEXT-BIM, 2024) ermöglicht *MR* eine direkte, interaktive Echtzeit-Interaktion mit virtuellen Objekten. Dies geschieht durch *Head-Mounted Displays* wie die Microsoft HoloLens 2, die das digitale Modell auf der realen Baustelle überlagert und eine modellbasierte Überwachung von *MEP*-Installationen unterstützt (Tao et al., 2024). Darüber hinaus fördert *AR* die praktische Zusammenarbeit, indem es digitale Gebäudemodelle direkt auf der Baustelle projiziert und den Austausch zwischen den Baubeteiligten erleichtert, was in der Industrie, wie bei Airbus und Boeing, bereits

erfolgreich für Qualitätskontrollen und Montage eingesetzt wird (Airbus, 2021; Sims, 1994; Xu et al., 2024).

Der bewährte Ansatz zur BFK mit *MR*-Systemen (Tao et al., 2024) basiert auf einem *Scan-vs-BIM*-Vergleich, bei dem 3D-Punktwolken oder *Mesh*-Modelle der Baustelle mit dem geplanten *BIM*-Modell abgeglichen werden (ClearEdge3D, 2024; Collins et al., 2022; Leica Geosystems, 2024b; Schlenger et al., 2023; Tang et al., 2010). Dabei haben sich verschiedene Methoden wie *Bounding Box Occupation* und *Feature Matching* als besonders effizient erwiesen (Tao et al., 2024; Wang et al., 2017; Zenners, 2022). Durch die Integration von *Spatial Mapping* und *SLAM*-Technologien wird die Modellregistrierung verstärkt, was eine präzisere Überlagerung von virtuellen und physischen Modellen möglich macht (Xu et al., 2024).

Für die erfolgreiche Umsetzung von *MR*-basierten BFK sind leistungsstarke Hardware und fortschrittliche Algorithmen notwendig. Die HoloLens 2 nutzt Tiefensensoren und Echtzeit-*Raycasting*, um die Umgebung kontinuierlich zu kartieren und Abweichungen zu erkennen. Trotz der farbcodierten Visualisierung von Abweichungen bleiben Herausforderungen in der Echtzeit-Datenverarbeitung bestehen, die durch *Cloud*- und *Edge-Computing* optimiert werden können (Tao et al., 2024). Zudem lässt sich AR in markerbasierte und markerlose Tracking-Systeme unterteilen: Markerlose Systeme wie *SLAM* bieten mehr Flexibilität, während markerbasierte Systeme für eine höhere Präzision in schlecht strukturierten Umgebungen sorgen (Xu et al., 2024).

Die präzise Baufortschrittsmessung in Innenräumen wird durch ungenaue Modellregistrierungen, Oberflächenreflexionen und das begrenzte Sichtfeld der Headsets erschwert. Aufgrund der Unzuverlässigkeit von *GNSS* in Innenräumen sind alternative Lokalisierungsmethoden wie *SLAM* oder markerbasierte Positionierung erforderlich. Zudem könnte der Einsatz von maschinellem Lernen die Genauigkeit der Abweichungserkennung weiter verbessern (Tao et al., 2024). *AR* erweist sich besonders hilfreich bei visuellen Inspektionen, Qualitätskontrollen und Montageprozessen, auch wenn weiterhin Herausforderungen hinsichtlich der Skalierbarkeit und Wartung bestehen (Xu et al., 2024).

Laut Bent Dalgaard weist *AR* mit der *HoloLens* zwar Potenziale auf, ist jedoch kostenintensiv, wenig skalierbar und begrenzt benutzerfreundlich. Stattdessen empfiehlt er die Nutzung von *AR* auf *Smartphones*, um *BIM* breiter verfügbar zu machen ("Dalux Adapts Augmented Reality to Mobile for Construction Industry," 2017).

Trotz dieser Herausforderungen belegen aktuelle Forschungen das grosse Potenzial von *MR*- und *AR*-Technologien für die BFK, insbesondere bei der Überwachung von *MEP*-Installationen und der Abweichungsanalyse. Durch die präzise, interaktive Visualisierung und Echtzeit-Interaktion vermittelt *MR* im Vergleich zu *AR* signifikante Vorteile, insbesondere durch die tiefere

räumliche Integration und Interaktion mit digitalen Modellen in der realen Umgebung. Dennoch ist AR ebenfalls geeignet für die BFK und die Erfassung von Abweichungen (GAMMA Technologies, 2024; NEXT-BIM, 2024). Zukünftige Entwicklungen sollten sich daher auf die Optimierung von Hardware und Algorithmen konzentrieren, um die Echtzeit-Datenverarbeitung und Modellregistrierung zu verbessern. Fortschritte in der Benutzerfreundlichkeit, Rechenleistung und BIM-Integration sind ausschlaggebend, um die Effizienz und Genauigkeit der BFK langfristig zu steigern (Tao et al., 2024; Xu et al., 2024).

3.2.7 Künstliche Intelligenz

KI-Anwendungsfälle haben sich in den letzten Jahren durch den Einsatz moderner KI-Technologien und Methoden der CV beträchtlich weiterentwickelt, eine davon ist die automatisierte BFK, trotz ihrer langsamen Anwendungserweiterung (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Künzler et al., 2022). Insbesondere die automatische Objekterkennung auf Baustellenbildern sowie der Vergleich zwischen Ist- und Soll-Zustand spielen bei der Überwachung des Baufortschritts eine zentrale Rolle. Hierfür sind CNNs und semantische Segmentierung sehr entscheidend (Asadi & Han, 2018; Ekanayake et al., 2007). Letztere ist eine KI-gestützte Methode, die Bildpixel in vordefinierte Kategorien wie Wände, Decken oder Rohrleitungen unterteilt. Ergänzend wird die Analyse der Textur und Materialeigenschaften der erkannten Objekte durch semantische *Textons* eingesetzt, um beispielsweise isolierte von nicht isolierten Rohrleitungen zu unterscheiden (Ham & Kamari, 2019). In dieser Methodik kombinieren die Autoren ein zweistufiges Verfahren. Zunächst erfolgt die semantische Segmentierung mittels eines sogenannten *texton forest* (Textonwaldes), der Bildpixel durch Entscheidungsbäume klassifiziert und somit die Rechenanforderungen verringert. Im zweiten Schritt werden die segmentierten Objekte nach ihrer Relevanz und Position bewertet und mit Referenzdatensätzen wie dem *Semantic Understanding of Scenes Dataset* (SUN-Datensatz) verglichen, um die Informationsqualität zu optimieren.

Eine andere KI-gestützte Methode sind die CNN-basierten Modelle wie You Only Look Once (YOLOv3), die eine besonders effiziente Echtzeit-Objekterkennung erleichtert. YOLOv3 basiert auf CNNs und absolviert den gesamten Erkennungsprozess in einem einzigen Durchgang, was die Effizienz und Schnelligkeit der Analyse erheblich steigert (A.S. & Edayadiyil, 2022; Ekanayake et al., 2007). Dieser Ansatz ist ideal für dynamische Baustellenüberwachungsanwendungen, bei denen eine schnelle Erkennung von Bauaktivitäten erforderlich ist. A.S. und Edayadiyil (2022) entwickelten eine Plattform, die einen vierstufigen Ansatz umsetzt: Zunächst werden hochauflösende Kameras zur Datenerfassung eingesetzt, gefolgt von der Bildverarbeitung mit *OpenCV*, der Objekterkennung mit YOLOv3 und der automatisierten

Berichterstellung. Diese Methode erlaubt es, Bauaktivitäten in Echtzeit zu überwachen und Berichte zu verfassen, die den Baufortschritt dokumentieren.

Moderne KI-Tools und CV erleichtern eine präzise Analyse und Überwachung des Baufortschritts, indem sie *As-Built* Video-Daten auswerten und den aktuellen Status von Bauaktivitäten erkennen (Kropp et al., 2018; OpenSpace, 2025b). Ein aktuelles KI-Produkt zeigt OnsiteIQ, das mit *CV-Engines* architektonische Grundrisse sowie Fertigstellungsdaten nutzt, um Bildinformationen mit Grundrissen zu verknüpfen und den Fortschritt automatisiert zu verfolgen (On-SiteIQ, 2024b). Diese Technologien bieten die Möglichkeit, Gewerke über verschiedene Gebäudesysteme hinweg effizient zu kontrollieren, was die Transparenz und Genauigkeit im Bauprozess steigert (siehe Abbildung 10).



Abbildung 10: KI-Umsetzung zur Verfolgung des Baufortschritts. Quelle: OnsiteIQ, 2024

Trotz des Potenzials moderner KI-Methoden bestehen weiterhin Herausforderungen in der automatisierten BFK. Die Nutzung von *OpenCV* und *TensorFlow* erfordert spezifisches Fachwissen, insbesondere in der Modellierung und Datenvorbereitung, was zu Mangel an Fachpersonal und somit zu benötigtem Kompetenzaufbau führen kann (Digital Findet Stadt GmbH, 2024). Die Trainingsphase, in der 356 Bilder vom Mauerwerk erfasst wurden, war rechenintensiv und man brauchte erhebliche Ressourcen, die durch Cloud-Dienste wie *Google Colab* bereitgestellt werden konnten (A.S. & Edayadiyil, 2022). Ein wesentlicher Aspekt ist die Qualität der Trainingsdaten, die sowohl bei der semantischen Segmentierung als auch bei der *CNN*-basierten Objekterkennung eine entscheidende Rolle spielt. Unzureichende oder fehlerhafte Daten können die Modelleistung deutlich beeinträchtigen, was den Aufwand für die Datenerhebung und -vorbereitung merklich erhöht (Ham & Kamari, 2019; OpenSpace, 2024e).

Ein weiterer Aspekt besteht darin, dass Objekte vollständig sichtbar sein sollten, um korrekt klassifiziert zu werden. Unvollständigkeit, Okklusionen oder verdeckte Bereiche

beeinträchtigen die Genauigkeit der Objekterkennung. Zudem erschweren die Komplexität der Bilddaten und variierende Lichtverhältnisse den Klassifizierungsprozess (Kropp et al., 2018). Um diesen Herausforderungen zu begegnen, ist eine präzise Anpassung der KI-Modelle an unterschiedliche Baustellenbedingungen und Materialien nötig. Dies führt zu zusätzlichen Trainingsphasen, die mit erhöhten Zeit- und Kostenaufwänden verbunden sind (Ham & Kamari, 2019).

Die Integration von 3D-Daten und digitalen Zwillingen stellt einen ausschlaggebenden Fortschritt in der BFK dar. A.S. und Edayadiyil (2022) schlagen vor, Technologien wie *Laserscanner* und digitale Zwillinge zu nutzen, um eine präzisere Abgleichung des Ist-Zustands mit dem Soll-Zustand zu erreichen. Diese Technologien erweitern die Überwachung des Baufortschritts, indem sie nicht nur 2D-Bilder, sondern auch 3D-Modelle einbeziehen, was zu einer detaillierteren und umfassenderen Analyse führt. Jedoch stellen die Verarbeitung grosser Datenmengen und die Skalierbarkeit der Systeme weiterhin bedeutende Herausforderungen dar. Um die breite Anwendbarkeit dieser Technologien in der Bauindustrie zu gewährleisten, müssen diese Hürden überwunden werden. Trotz dieser Herausforderungen bieten KI-gestützte Methoden eine vielversprechende Grundlage für die Weiterentwicklung der automatisierten BFK, wodurch mit kontinuierlicher Optimierung dieser Ansätze sowohl die Effizienz gesteigert als auch Fehler in der BFK reduziert werden können.

3.3 Auswirkungen der Technologien zur Baufortschrittskontrolle im Bauwesen

Gemäss Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung revolutioniert die Digitalisierung, angeführt von *BIM*, die BFK (2011). *BIM* begünstigt präzisere Planung und verlagert den Arbeitsaufwand in frühe Projektphasen, was zu Kosteneinsparungen und reduzierter Nachbearbeitung führt (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011; Künzler et al., 2022). Gleichzeitig verändert *BIM* die Rollen und Verantwortlichkeiten im Bauprozess, wodurch neue Funktionen wie die des *BIM-Managers* entstehen (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011). Moderne Technologien wie *AR*, *CV*, *Laserscanning*, *MR*, Photogrammetrie eröffnen neue Möglichkeiten für die BFK, insbesondere im Innenausbau im HLK-Bereich (Alizadehsalehi & Yitmen, 2016; Bosché et al., 2015; Braun et al., 2021; Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Jann, 2019; Kersten & Lindstaedt, 2022; Omar & Nehdi, 2016; Patil et al., 2016; Tang et al., 2010; Tao et al., 2024; Xu et al., 2024).

Diese Technologien haben Auswirkungen auf die BFK (PlanRadar GmbH, 2025), darunter auch auf den HLK-Bereich. *MR*- und *AR*-Technologien ermöglichen eine Echtzeitvisualisierung und vereinfachen so den Vergleich zwischen dem tatsächlichen Bauzustand und dem geplanten *BIM*-Modell (Tao et al., 2024; Xu et al., 2024). Dies fördert die Qualitätssicherung und trägt zur frühzeitigen Erkennung von Abweichungen bei (Xu et al., 2024). Darüber hinaus

führt der Einsatz digitaler Werkzeuge zu einer Effizienzsteigerung und Kostenreduktion, da die Abhängigkeit von manuellen Inspektionen verringert und die Genauigkeit der BFK verbessert wird (Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011; PlanRadar GmbH, 2025; Tao et al., 2024). Zudem fördern AR und andere digitale Technologien die Echtzeitkommunikation und Zusammenarbeit zwischen den Baubeteiligten, was dazu beiträgt, Missverständnisse zu verringern und die Teamarbeit zu verbessern (Xu et al., 2024). Technologien wie *Laserscanning*, Photogrammetrie und CV erlauben die Automatisierung der Baufortschrittsüberwachung und die Erfassung grosser Datenmengen, die für die Analyse des Baufortschritts und die Optimierung von Prozessen genutzt werden können, wobei automatisierte Bauabweichungen mit *Laserscanning* anhand vom Vergleich des Ist-Soll Zustandes ermöglicht werden können (Alizadehsalehi & Yitmen, 2016; Braun et al., 2021; Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Jann, 2019; Patil et al., 2016; Tang et al., 2010).

Ergänzend dazu nimmt die Nutzung von KI im Bauwesen stetig zu. KI optimiert Planung, BFK und Ressourcenmanagement durch maschinelles Lernen und CV. Sie steigert die Effizienz, minimiert Fehler und senkt Kosten, indem sie Prozesse automatisiert und Datenanalysen für Vorhersagen und Optimierungen nutzt. KI unterstützt auch *BIM*, verbessert die Zusammenarbeit und Qualitätssicherung und trägt zu einer effizienteren und nachhaltigeren Bauweise bei (Akkermann, 2023; Wortmann et al., 2022). Die heutzutage genutzten digitalen *BIM*-Tools bringen KI zum Einsatz. Dies ist eine gängige Entwicklung, da KI trainiert werden kann. Digitale *BIM*-Tools, wie die im Kapitel 3.2.5. genannte, arbeiten ständig mit KI. Ein besonderer Fall ist die Software OpenSpace mit dem OpenSpace Track, welche CV und maschinelles Lernen nutzt, um Baufortschritte präzise zu verfolgen und zu messen, und so hilft, Zeitpläne und Budgets einzuhalten (OpenSpace, 2024e).

Allerdings bestehen auch Herausforderungen bei der Implementierung dieser Technologien. Die Qualität der erfassten 3D-Daten ist entscheidend für eine präzise BFK, und ungünstige Lichtverhältnisse oder Oberflächenreflexionen können die Datenerfassung beeinträchtigen (Bosché et al., 2015; Tao et al., 2024). Ebenso können die Datenerfassung durch *MR*-Systeme ergonomische Herausforderungen und Sicherheitsrisiken mit sich bringen, insbesondere bei Arbeiten an Deckeninstallationen (Tao et al., 2024). Die Implementierung der Technologien erfordert Fachpersonal, hohe Investitionen und Lösungen für Datensicherheit. Komplexe Schnittstellenprobleme sowie fehlende Standardisierung können die Integration erschweren. Zudem sind Schulungen und Anpassungen der Prozesse unverzichtbar (Digital Findet Stadt GmbH, 2024).

Die Forschung zeigt jedoch vielversprechendes Potenzial für die Weiterentwicklung der Technologien, insbesondere durch die Integration von maschinellem Lernen und KI (Jann, 2019; Tao et al., 2024). Langfristig könnten diese Technologien die Art und Weise, wie Baubeteiligte

zusammenarbeiten und Baufortschritte überwachen, grundlegend verändern (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Tao et al., 2024). Die Entwicklung benutzerfreundlicher Lösungen, die den spezifischen Anforderungen des Innenausbaus gerecht werden, ist ein wichtiger Aspekt zukünftiger Forschung (Omar & Nehdi, 2016; Xu et al., 2024). Ebenso ist es notwendig, die Integration der Technologien in bestehende Arbeitsabläufe zu optimieren und die langfristigen Auswirkungen auf der Baustelle zu untersuchen (Xu et al., 2024). Die Zukunft der BFK im HLK-Bereich wird durch die fortschreitende Digitalisierung und die kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologien massgeblich geprägt (Kersten & Lindstaedt, 2022).

3.3.1 Akzeptanz der Technologien

Die Bauindustrie befindet sich in einem ständigen Wandlungsprozess, der von der fortschreitenden Digitalisierung und der zentralen Rolle von *BIM* geprägt ist (Akkermann, 2023; Malkwitz & Schlüter, 2019). Die Akzeptanz digitaler Technologien, insbesondere in der BFK, ist ein entscheidender Faktor für deren effektive Nutzung und nachhaltige Integration. Der aktuelle Forschungsstand deutet auf eine positive Akzeptanzentwicklung hin, wenngleich detailliertere Untersuchungen zu den Einstellungen der Baubeteiligten weiterhin relevant sind. Die Notwendigkeit einer flächendeckenden Nutzung digitaler Technologien, um deren volles Potenzial auszuschöpfen, wird ebenfalls betont (Jann, 2019).

Die vorliegenden Informationen weisen auf eine wachsende Akzeptanz digitaler Werkzeuge hin, die primär durch den wahrgenommenen Nutzen und die generierten Mehrwerte begründet ist. Borrmann et al. (2018) betonen dabei die Steigerung der Effizienz, Fehlerreduktion und optimierten Informationsaustausch durch den Einsatz durchgängiger, digitaler Modelle. Diese Vorteile tragen merklich zur Akzeptanz bei den Anwendenden bei, da sie für unmittelbare Verbesserungen der Arbeitsabläufe und Projektergebnisse sorgen. Olender argumentiert in (Hagen, 2023), dass durch die Modifizierung bestehender Prozesse die Entwicklung neuer Methoden und die Anwendung neuer Abläufe, gestützt durch *BIM*-Technologien, ergebnisorientierte Planungsprozesse entstehen, die fundierte Entscheidungen zur richtigen Zeit ermöglichen und somit den Projektfluss optimieren. Dies impliziert, dass die Akzeptanz von *BIM* auch mit der Bereitschaft einhergeht, traditionelle Bauabläufe zu überdenken und an die neuen Möglichkeiten anzupassen. Die zunehmende Verbreitung von *BIM*-Technologien, motiviert durch den generierten Mehrwert (z.B. Reduktion der Fehleranfälligkeit, Steuerung der Planungs- und Ausführungsgüte, Erhöhung der Prozesstransparenz), ist ein direkter Indikator für eine wachsende Akzeptanz (Digital Findet Stadt GmbH, 2024). Die Einstufung von *BIM* als eine der fortschrittlichsten Methoden im Bauprojektmanagement unterstreicht diese positive Wahrnehmung (Braun et al., 2021; Mesároš et al., 2022).

Ein relevanter Aspekt der Akzeptanz ist die Benutzerfreundlichkeit von Technologien. Dies zeigt sich besonders bedeutsam bei der Betrachtung verschiedener Technologien zur BFK. Während bzw. AR mit der HoloLens zwar präzise Ergebnisse liefern kann, schränken die geringe Benutzerfreundlichkeit und die hohen Kosten ihre breitere Anwendung ein („Dalux Adapts Augmented Reality to Mobile for Construction Industry,” 2017). Diese Beobachtung deckt sich mit den Ergebnissen der empirischen Studie von Halter et al. (2023), die zeigt, dass trotz einer grundsätzlich hohen Akzeptanz digitaler Technologien deren tatsächlicher Einsatz oft noch begrenzt ist. Ausserdem wird hervorgehoben, dass digitale Technologien fast ausschliesslich in Grossunternehmen häufiger genutzt werden als in kleinen und mittleren Unternehmen (Digital Findet Stadt GmbH, 2024; Künzler et al., 2022).

Die Möglichkeit zur automatisierten Vergleichsanalyse zwischen dem tatsächlichen und dem geplanten Bauzustand, basierend auf Punktwolken aus Photogrammetrie oder *Laserscanning* zeigt ein erhebliches Potenzial für eine objektivere und effizientere BFK (Braun et al., 2021; Schlenger et al., 2023). Neben diesen technologischen Fortschritten betonen Studien auch die damit verbundenen Vorteile in Bezug auf Zeit-, Kosten- und Planungssicherheit, die wesentlich zur Akzeptanz solcher Lösungen beitragen (Hagen, 2023). Die wachsende Anwendung und die positive Rückmeldung zu Technologien wie *Laserscanning*, Photogrammetrie und Drohnen unterstreichen deren Status als gängige Praxis in der Bauindustrie (Braun et al., 2021; Sacks et al., 2018). Ein aktueller Bericht von Digital Findet Stadt GmbH (2024) zeigt, dass 3D-Erfassungssysteme, insbesondere in den Bereichen Bestandsaufnahme, Bauwerksdokumentation und BFK, eine zentrale Rolle spielen und zunehmend genutzt werden (siehe Abbildung 11). Dies wird besonders deutlich bei der Umfrage von Digital Findet Stadt GmbH (2024) zur *BIM*-Nutzung mit einer Steigerung von 29% im Jahr 2022 auf 49% im Jahr 2024 bei regelmässig Anwendenden, was darauf hindeutet, dass *BIM* in verschiedenen Anwendungsbereichen grossen Anklang findet, wie bei den Aktivitäten der folgenden Abbildung ersichtlich ist (siehe Abbildung 11).

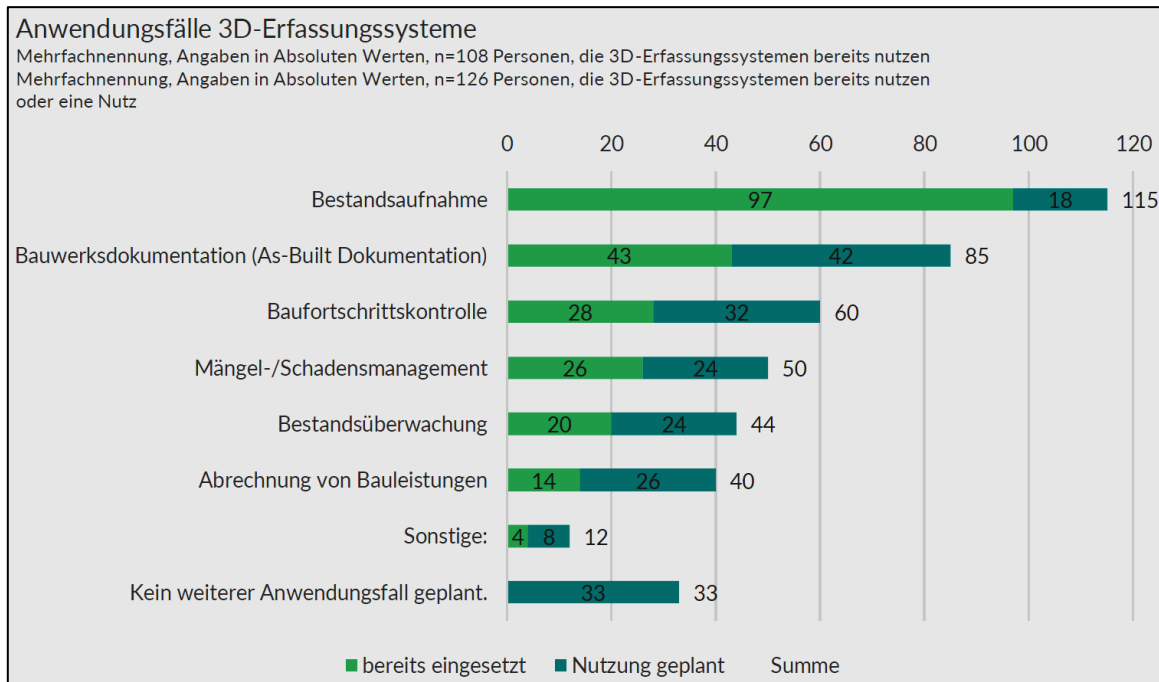


Abbildung 11: Einsatzfelder der Technologieakzeptanz in der Bauindustrie. Quelle: (Digital Findet Stadt GmbH, 2024)

Auch Lösungen wie OpenSpace, Dalux und HoloBuilder werden positiv aufgenommen, da sie die Baufortschrittsverfolgung vereinfachen, Zeit sparen und Nacharbeiten reduzieren. Sie verbessern die Zusammenarbeit zwischen den Gewerken und bieten Auftraggebern eine umfassende digitale Dokumentation. Borup (OpenSpace, 2024b) betont die Bedeutung von OpenSpace als Informationsquelle und Möglichkeit zur virtuellen Präsenz, wodurch Reisekosten um bis zu 50 % reduziert werden können. Zitate von Karsten Ley (Ley, 2024; OpenSpace, 2024e) und Nikolina Džeko (OpenSpace, 2024d, 2024c, 2024f) verdeutlichen die intuitive Bedienbarkeit und den direkten Nutzen von OpenSpace in der Projektpraxis. Die einfache Handhabung trägt bedeutsam zur Akzeptanz bei den Anwendenden bei.

Auch Doxel, als weiteres Beispiel, erfreut sich wachsender Beliebtheit. Craig Williamson (Doxel, 2024a, 2024d) beschreibt, wie Doxel die genaue Verfolgung der BFK und die nahezu Echtzeit-Verwaltung von Grossprojekten erlaubt, was zu Kosteneinsparungen führt. Die breite Anwendung von Doxel in verschiedenen Industriezweigen unterstreicht die Akzeptanz dieser Technologie über verschiedene Anwendungsbereiche hinweg.

Die Akzeptanz digitaler Technologien in der BFK wird vor allem durch den wahrgenommenen Nutzen, die Benutzerfreundlichkeit und die Kosten bestimmt. Hochentwickelte, aber komplexe und teure Technologien wie AR mit HoloLens stehen dabei vor Herausforderungen in Bezug auf ihre breite Akzeptanz, während benutzerfreundliche und kosteneffiziente Lösungen zunehmend an Beliebtheit gewinnen. Dies steht im Einklang mit der Aussage von Deubel (Deubel,

2021; Wallmüller, 2017), dass der Einsatz neuer digitaler Technologien darauf abzielt, Geschäftsprozesse zu verbessern und den Betrieb effizienter zu gestalten.

Trotz breiter Akzeptanz von digitalen Technologien gibt es auch einige Hürden. Kosel (2022) nennt als zentrale Barrieren die fehlende Qualifikation der Anwendenden, die starke Abhängigkeit von Einzelpersonen mit Spezialwissen sowie die steigende Komplexität durch eine Vielzahl nicht integrierter Tools. Diese Faktoren behindern eine breite und konsistente Anwendung im Projektalltag und verdeutlichen den hohen Bedarf an strukturierten Schulungs- und Implementierungsstrategien.

Zukünftige Forschung sollte die Perspektiven der Baubeteiligten weiterhin untersuchen, um ein umfassenderes Verständnis für die Akzeptanz sowie die damit verbundenen Herausforderungen und Chancen zu erhalten.

4 Lösungsprozess

Eine präzise und kontinuierliche BFK stellt im HLK-Bereich eine zentrale Herausforderung dar, insbesondere in komplexen Bauvorhaben mit hohen Anforderungen an Ausführungsqualität und Dokumentation. Traditionelle Methoden wie manuelle Inspektionen sind zeitaufwändig und fehleranfällig, weshalb digitale Lösungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die Nutzung von Ansätzen wie *Laserscannern* und Kopfkameras (Ham & Kamari, 2019; Künzler et al., 2022; Rabbani et al., 2007; Tang et al., 2010) begünstigt eine präzisere und effizientere Erfassung von Baufortschritten. Die Kombination dieser Technologien mit *BIM* erlaubt eine umfassende Visualisierung des Bauprozesses. Durch den Abgleich von erfassten Ist-Daten mit den geplanten Soll-Daten können Bauunternehmen Abweichungen frühzeitig erkennen und entsprechend reagieren. Dies fördert nicht nur die Zusammenarbeit zwischen den Projektbeteiligten, sondern erhöht auch die Effizienz und Qualität der Bauausführung (Mesároš et al., 2022; Pan & Zhang, 2021).

Bisher wurden im KSA-Projekt «Dreiklang» bei Implenia Schweiz AG die Baufortschritte im Innenausbau regelmässig anhand einzelner 360°-Fotos dokumentiert. Ein systematisierter und umfassender Ablauf zur BFK bestand jedoch nicht. Das KSA-Projekt «Dreiklang» stellt mit seiner Dimension den derzeit grössten Krankenhausneubau der Schweiz dar und wird seit Beginn vollständig *BIM*-basiert ausgeführt (Implenia Schweiz AG, 2020).

Aus diesem Grund wurde die Entwicklung eines strukturierten LP als besonders sinnvoll erachtet. Dieser ermöglicht eine kontinuierliche Erfassung und abschliessende Überprüfung der Baufortschritte sowie die Validierung der gewerklichen digitalen Modelle für den zukünftigen Betrieb und das FM.

Die Kombination von modellbasierten Methoden und technologisch erfassten Ist-Daten professionalisiert die BFK und vereint die Vorteile von *BIM* mit der Genauigkeit aktueller Baustellendaten. Typische Herausforderungen wie die Koordination verschiedener Gewerke oder die Einhaltung projektspezifischer Anforderungen, beispielsweise in Bezug auf Toleranzen im Ist-Soll-Vergleich, sollen dadurch zuverlässig überwunden werden.

So wurde ein LP entwickelt, der eine kontinuierliche Baufortschrittsüberwachung mit 360°-Fotodokumentation (*SiteWalks*) mit einer abschliessenden Bewertung durch *Laserscanning* kombiniert. Durch diese Methode soll eine systematische und automatisierte Dokumentation ermöglicht werden, wodurch Planungsabweichungen frühzeitig identifiziert und entsprechende Massnahmen eingeleitet werden können. Der folgende Abschnitt beschreibt die methodische Herangehensweise, die fünf Schritte des Prozesses, die technischen Komponenten sowie die Umsetzung in der Praxis (siehe Abbildung 12).

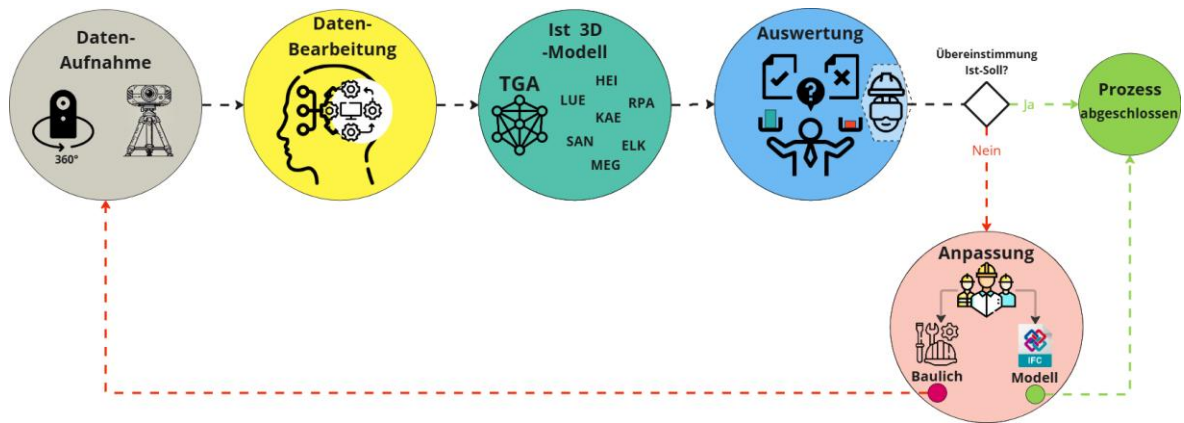


Abbildung 12: Workflow mit den Methoden zur BFK

Die Datenaufnahme als erster Schritt zur Erfassung der Baufortschritte erfolgt in zwei Phasen mit unterschiedlichen Technologien. In der ersten Phase wird eine Kopfhelmkamera eingesetzt, die mit einer Videoaufnahme und Rundgängen durch die Baustelle 360°-Fotos an bestimmten Standorten aufnimmt. Diese Fotos werden automatisch in Dalux auf dem 2D-Plan platziert und mit dem entsprechenden Bereich im 3D-Modell verknüpft. In der zweiten Phase kommt der *Laserscanner* zum Einsatz, der endgültige digitale Aufnahmen in Form von Punktwolken des Ist-Zustands von bestimmten und besonders relevanten Bereichen erstellt.

Der zweite Schritt umfasst die Datenbearbeitung, bei der die aufgenommenen Punktwolken übertragen, bereinigt und bearbeitet werden. Ziel ist es, nur die relevanten Informationen für die BFK zu extrahieren und zu analysieren.

Im dritten Schritt folgt die Ist-3D-Modellierung, bei der anhand der bereinigten Punktwolken ein *Mesh* mit den TGA-Elementen (einschliesslich HLK-SERM) erstellt wird.

Der vierte Schritt bezieht sich auf die Auswertung. In diesem Schritt können drei verschiedene Methoden zum Einsatz kommen:

1. Die Auswertung des Vergleichs der 360°-Fotos mit dem *BIM*-Modell. Diese Methode wird in Dalux durchgeführt, wo direkt im Büro die Bauabgleiche durchgeführt und Abweichungen als Pendenz erfasst werden können.
2. Die Auswertung anhand der Punktwolken, bei der Bauabweichungen mithilfe der Software 3DR Cyclone ermittelt werden. Dabei wird das TGA-*Mesh* des Ist-Zustands mit dem entsprechenden *BIM*-Modell verglichen, um Abweichungen gemäss den projektspezifischen Anforderungen zu identifizieren. Diese Abweichungen werden im *BCF*-Format exportiert und in Revizto weiterbearbeitet, um sie danach den verantwortlichen Fachpersonen zuzuweisen.
3. Die Anwendung von *AR*-Technologien (Brille oder *Tablet*). Dieser Schritt erfolgt direkt in Echtzeit auf der Baustelle. Dank NEXT-BIM und ihrem Ansatz können *BIM*-Modelle auf die reale Welt überlagert werden, um Abweichungen zwischen dem *BIM*-Modell

und der Realität zu erkennen. Ähnlich wie bei 3DR Cyclone können auch hier Abweichungen im *BCF*-Format exportiert und in Revizto weiterbearbeitet werden.

Im letzten Schritt werden Anpassungen vorgenommen. Diese können entweder baulich oder modellhaft sein, wobei diese Entscheidung in Zusammenarbeit mit den zuständigen Baubeteiligten getroffen wird. Nach der Durchführung der Anpassungen ist der Prozess abgeschlossen (siehe Abbildung 12).

4.1 Ressourcen für die zwei Phasen

Die für die beide Phasen der BFK eingesetzten Ressourcen umfassen unter anderen Dateien, Technologien sowie *BIM*-Tools und können grob in Software und Hardware eingeteilt werden.

Hardware:

- **360°-Kamera:** Beispielsweise die Ricoh Theta X oder eine andere Kamera, die mit *SiteWalks* kompatibel ist. Diese Kameras erleichtern eine schnelle und umfassende Dokumentation des Baufortschritts. Zur besseren Beleuchtung für hochauflösende Aufnahmen werden Baulampen benutzt.
- **Terrestrischer Laserscanner:** Zum Beispiel der BLK360 G2 von Leica Geosystems oder ein vergleichbares terrestrisches Gerät, das Punktwolken mit der erforderlichen Genauigkeit erzeugt und die Projektanforderungen erfüllt. Die gewonnenen Punktwolken sind essenziell für die spätere Modellanalyse und -kontrolle.
- **Tablet:** Ein *Tablet* z.B. iPad wird benötigt, um die gescannten Punktwolken zu registrieren, zu verknüpfen und zur relativen Referenzierung. Zudem kann ein *Tablet* mit *LiDAR*-Sensor im Rahmen einer *AR*-Kontrolle für den Ist-Soll-Vergleich genutzt werden, indem das digitale Modell direkt mit dem realen Ist-Zustand der Baustelle überlagert und auf dem Tablet visualisiert wird.
- **AR-Brille:** Für eine noch genauere BFK kann zudem die *AR*-gestützte Technologie durch eine Brille z.B. HoloLens von Microsoft verwendet werden. Diese unterstützt die Visualisierung digitaler Modelle direkt in der realen Umgebung und somit den Vergleich mit der aktuellen Bauausführung.

Software:

- **Dalux mit dem Feature SiteWalks (SW):** Für die Nutzung von *SiteWalks* müssen zunächst 2D-Pläne und 3D-Modelle jedes Geschosses sowie der entsprechenden Bauwerke in Dalux hochgeladen werden. Diese dienen als Grundlage für die Verortung der 360°-Fotos aus den erfassten Videos der *SiteWalks*. Zudem wird durch die 3D-Modelle der Vergleich zwischen den erfassten 360°-Fotos und dem Soll-Modell ermöglicht. Darüber hinaus werden in Dalux Field die Pläne und Modelle geschossweise

gegliedert zur Verfügung gestellt. Die erfassten Daten und Informationen bleiben jederzeit in der Software zugänglich, sofern alle Kameradaten korrekt übertragen und hochgeladen wurden. Schliesslich können Abweichungen, die durch *SiteWalks* identifiziert werden, direkt in Dalux den zuständigen Projektbeteiligten zugewiesen werden.

- **NEXT-BIM:** Eine AR-Lösung, in der baugewerkliche Modelle hochgeladen und direkt auf der Baustelle in Echtzeit mit der realen Umgebung verglichen werden können. Dadurch lassen sich Bauabweichungen schneller erkennen und unmittelbar im *BCF*-Format nach Revizto exportieren.
- **Revizto:** Diese Software dient als zentrale Plattform zur modellbasierten Visualisierung, Kommunikation und Verwaltung von Abweichungen, die etwa durch *Laserscans*, die HoloLens oder *Tablet*-basierte Begehungen festgestellt werden. Revizto ermöglicht die direkte Zuordnung von Verantwortlichkeiten, die modellverortete Dokumentation von Problemen, bspw. Pendenzen und eine strukturierte Nachverfolgung innerhalb des Projektteams. Im Rahmen dieser Arbeit wird Revizto zur dokumentierten BFK genutzt, indem identifizierte Abweichungen zwischen dem Soll-Modell und dem Ist-Zustand zentral erfasst, kommentiert und verfolgt werden können.
- **Leica-Softwarelösungen:** Um eine effiziente Verarbeitung der erfassten Scandaten zu gewährleisten, kommen vier zentrale Softwareanwendungen von Leica zum Einsatz:
 - **BLK360 Laserscanner App:** Diese App steuert die *Scans* direkt vom *Tablet* aus.
 - **Leica Register:** Sie dient zur ersten Bereinigung der Punktwolken und zur Erstellung von Verknüpfungen.
 - **3DR Cyclone:** Diese Software bietet die Erstellung eines Haustechnik-*Meshs* zum Vergleich mit dem 3D-Modell sowie die Identifikation von Abweichungen und deren Export als *BCF*-Format.
 - Ergänzend wird die **BLK Data Manager App** genutzt, um die *Scans* vom *Tablet* auf einen Rechner zu übertragen.

Abweichungen können im *BCF*-Format exportiert oder in einem zentralen Ordner abgelegt werden. Diese sind insbesondere für die Weiterverarbeitung in Revizto vorgesehen.

- **Microsoft Project:** Der Zugriff auf die Terminpläne und Baumeilensteine für die Planung der BFK erfolgt über das Programm MS Project, wo die benötigten Informationen in einem Gantt-Diagramm dargestellt sind.
- **Microsoft Excel:** Aus MS Project werden die für die BFK relevanten Informationen entnommen und in Excel-Tabellen nach Baumeilensteinen strukturiert, um den

Überblick über die verschiedenen Schritte der BFK zu behalten sowie den BFK-Fortschritt übersichtlich, systematisch und kostengünstig zu dokumentieren und zu tracken.

- **Microsoft Teams/Outlook:** Ein Teil der Kommunikation betreffend Aufträge, Planung und Austauschbedarf findet mittels MS Teams und Outlook statt.

Eine weitere wichtige Ressource ist ein gewöhnliches analoges Whiteboard, welches im Büro der *BIM*-Abteilung hängt und der besseren Übersicht und Koordination der anstehenden Aufgaben für beide Phasen dient.

Nachfolgend werden die obengenannten Softwares zum besseren Verständnis nochmals in zwei Kategorien unterteilt und die Zusammenhänge grafisch dargestellt (siehe Abbildung 13).

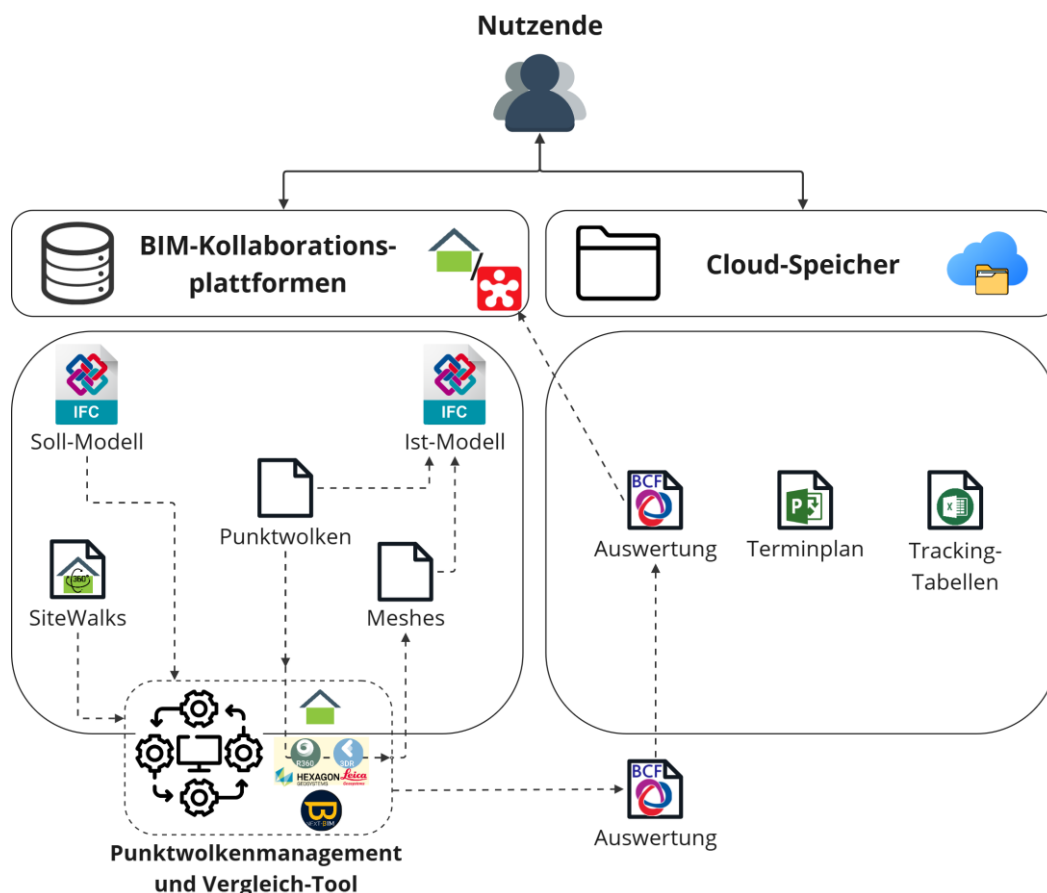


Abbildung 13: Übersicht der genutzten kommerziellen Softwares und deren Zusammenhänge

Abbildung 13 zeigt eine grobe Übersicht aller benötigten Softwares und deren Zusammenhänge im Rahmen der BFK, zusammen mit den entsprechenden kommerziellen Anbietenden. Je nach Rolle und Funktion der Nutzenden ergeben sich verschiedene Zugangsrechte auf die dargestellten Softwares sowohl bei den *BIM*-Kollaborationsplattformen als auch bei den Dokumenten im Cloud-Speicher.

Auf der linken Seite sind *BIM*-Kollaborationsplattformen wie Dalux und Revizto dargestellt, welche Datenbankfunktionen mit modellbasierter Visualisierung, Aufgabenmanagement und strukturierter Zusammenarbeit vereinen und kombinieren.

Die Cloud-Speicherlösungen wie OneDrive oder SharePoint auf der rechten Seite hingegen basieren auf einem Dateisystem: Sie dienen als digitale Ablageorte für Dateien in klassischer Ordnerstruktur. Zwar unterstützen sie den Datenaustausch und die gemeinsame Nutzung, bieten jedoch keine modellbezogene Logik oder zusammenhängende *BIM*-Funktionalitäten. Trotzdem sind Programme wie Microsoft Excel oder Microsoft Project wichtige Bestandteile für eine erfolgreiche BFK in diesem LP.

Die neben Dalux verwendeten Tools Leica Geosystems und NEXT-BIM für das Punktwolkenmanagement und den Ist-Soll-Vergleich gelten nicht als *BIM*-Kollaborationsplattformen und sind deshalb etwas ausserhalb dieser Kategorie dargestellt.

Natürlich können auch andere Softwares zum Einsatz kommen. Die Darstellung in Abbildung 14 zeigt die Übersicht über die wichtigen Daten und Softwares für die BFK ohne Angabe von Anbietenden, damit sie allenfalls in ähnlichen *BIM*-Projekten als Inspiration dienen kann.

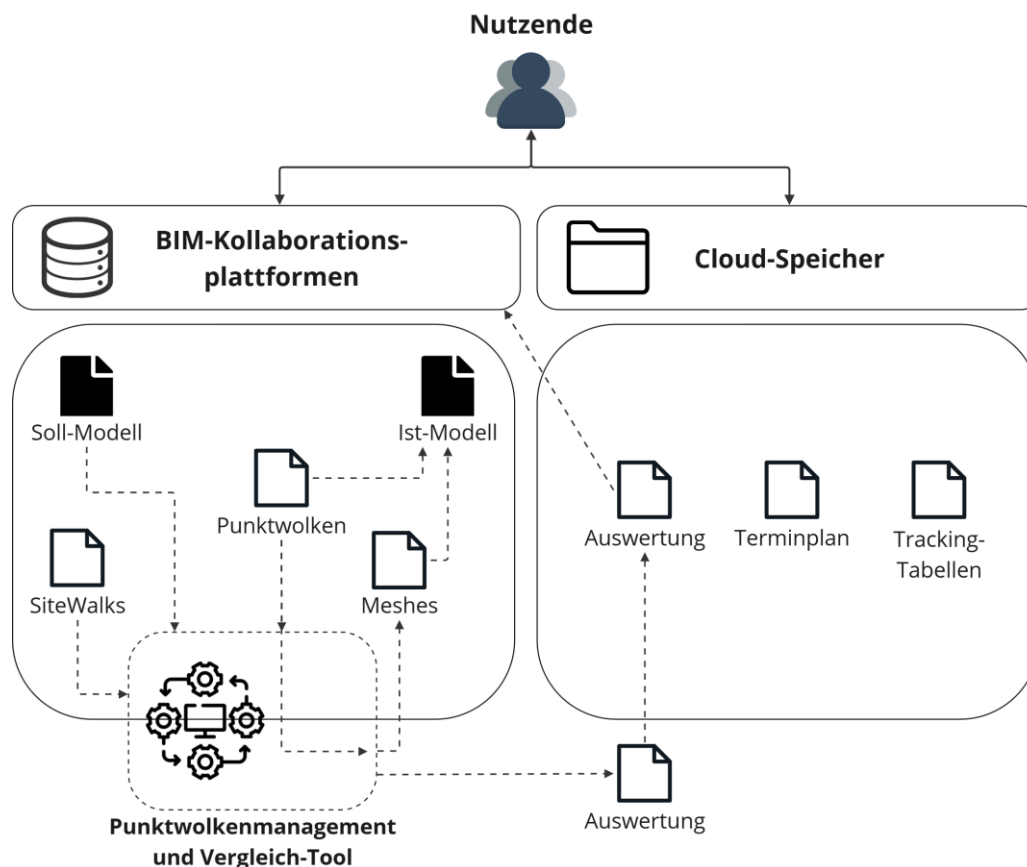


Abbildung 14: Mögliche Ressourcen für die BFK in ähnlichen *BIM*-Projekten

4.2 Rollen der Baubeteiligten

Die effiziente Durchführung der BFK erfordert eine enge Zusammenarbeit verschiedener Baubeteiligter, die jeweils spezifische Aufgaben und Verantwortlichkeiten übernehmen. Jede Rolle trägt mit ihrem Fachwissen und ihren Aufgaben zur erfolgreichen Umsetzung des Bauprojekts bei.

Rollen:

- **Projektleitung/Terminplanung:** Die Projektleitung stellt sicher, dass alle relevanten Informationen über die Bauaktivitäten vorliegen, insbesondere was, wo und wann gebaut werden soll. Diese Informationen bilden die Grundlage für die strukturierte Durchführung der BFK. Darüber hinaus sorgt die Projektleitung dafür, dass die *BIM*-Abteilung bei Bedarf mit der Durchführung spezifischer BFK beauftragt wird, etwa durch Rundgänge oder *Scans*, die an festgelegten Meilensteinen durchgeführt werden.
- ***BIM*-Abteilung:** Die *BIM*-Abteilung ist verantwortlich für die Durchführung und Steuerung der BFK, beispielsweise durch den Einsatz von 360°-Kameras, *Laserscannern* oder *AR*-Lösungen. Basierend auf den Informationen der Projektleitung und Terminplanung koordiniert die *BIM*-Abteilung die *SiteWalks* sowie erforderliche *Scans*, um danach kontinuierlich den aktuellen Stand des Projekts zu erfassen und zu dokumentieren. Anschliessend führt sie nacheinander die Ist-Soll-Vergleiche aller Gewerke durch. Zudem entscheidet sie je nach Abweichung mit anderen Baubeteiligten, welche Massnahmen ergriffen werden müssen – sei es modellhafte oder bauliche Anpassungen – und weist diese den jeweiligen Fachplanenden oder Subunternehmen zu.
- **Bauleitung:** Die Bauleitung analysiert den Bauzustand und den fortschreitenden Baufortschritt mithilfe von Dalux, wobei bei Bedarf auch *Laserscanner* oder *AR*-Kontrollen zum Einsatz kommen. Die Bauleitung kann Pendenzen aus den *SiteWalks* direkt in Dalux erstellen und Abweichungen identifizieren, die dann den entsprechenden Subunternehmen für die bauliche Anpassung zugewiesen werden. Dadurch wird eine effiziente und direkte Kommunikation gewährleistet. So bleibt die Bauleitung stets auf dem aktuellen Stand und kann die Baufortschritte jedes Baugewerks kontinuierlich überwachen.
- **Fachplanende:** Sie bringen ihre spezifische Expertise in den jeweiligen Gewerken ein und sind verantwortlich für die Erstellung und Pflege der Fachmodelle. Diese Modelle bilden eine zentrale Grundlage für den Soll-Ist-Vergleich im Rahmen der BFK. Bei festgestellten Abweichungen sind die Fachplanenden zuständig für die entsprechenden Anpassungen im Modell. Eine enge Zusammenarbeit mit der *BIM*-Abteilung ist dabei unerlässlich, um eine konsistente und koordinierte Umsetzung sicherzustellen.

- **Subunternehmen:** Die Subunternehmen sind für die Durchführung der baulichen Anpassungen im Rahmen der BFK verantwortlich. Sie gewährleisten die korrekte Ausführung ihrer Arbeiten unter Einhaltung der projektspezifischen Toleranzen. Unabhängig davon führt Implemia eine eigenständige Überprüfung der ausgeführten Arbeiten hinsichtlich der Toleranzeinhaltung durch.
- **Bauherrschaft:** Die Bauherrschaft hat jederzeit Zugriff auf die BFK-Daten in Dalux und Revizto und verwendet diese Informationen als Grundlage, um die korrekte Ausführung der baugewerklichen Modelle sicherzustellen. Diese Modelle sollen den Projektanforderungen entsprechen und für die spätere Übernahme optimal vorbereitet werden. Auf Basis dieser Daten trifft die Bauherrschaft fundierte Entscheidungen über notwendige Anpassungen oder Optimierungen des Bauplans.

Weitere Nutzende der BFK-Dokumentation sind Mitarbeitende des Facility Managements des Neubaus Kantonsspital Aarau «Dreiklang». Das FM ist zwar nicht aktiv im BFK-Prozess involviert, benötigt jedoch die Foto-Dokumentation, sowie die gewerklichen und realitätsgetreuen *BIM*-Modelle, weil es ab Inbetriebnahme des Spitals für dessen Wartung und Gebäudeunterhalt zuständig ist.

4.3 Vorgehensweise der Baufortschrittskontrolle im HLK-Bereich

Die BFK im HLK-Bereich erfolgt in einem strukturierten zweistufigen Prozess, der auf eine kontinuierliche Erfassung des Baufortschritts sowie eine detaillierte Kontrolle vor wichtigen Baumeilensteinen abzielt. Das Ziel ist, den Baufortschritt systematisch zu dokumentieren, Abweichungen frühzeitig zu erkennen und dadurch die Qualitätssicherung zu gewährleisten.

Der Prozess gliedert sich in zwei Phasen:

Phase Eins: Hier wird eine kontinuierliche BFK durch regelmässige Erfassungen mittels 360°-Kameras und der Plattform Dalux durchgeführt. Diese Phase umfasst den Baufortschritt ab Beginn des Innenausbaus über die gesamte Dauer der HLK-Arbeiten hinweg und ermöglicht eine fortlaufende Überwachung.

Phase Zwei: Ergänzend zur Phase Eins wird in dieser Phase eine detaillierte Prüfung vor kritischen Baumeilensteinen im HLK-Bereich vorgenommen, insbesondere vor der Schliessung der Decken. Dies geschieht mittels *Laserscanning* und Modellabgleich.

Die Abbildung 15 stellt die zwei Phasen zur BFK visuell dar. Sie zeigt die zeitliche Abfolge der Bauaktivitäten, wobei Phase 1 (gelb) und Phase 2 (rot) klar voneinander abgegrenzt sind. Die kontinuierliche Erfassung der Phase 1 beginnt ab Beginn des Innenausbaus und erstreckt sich über die gesamte Bauphase des HLK-Bereichs, während die detaillierte Kontrolle der Phase 2 gezielt vor den kritischen Meilensteinen, wie der Schliessung der Decken, stattfindet.

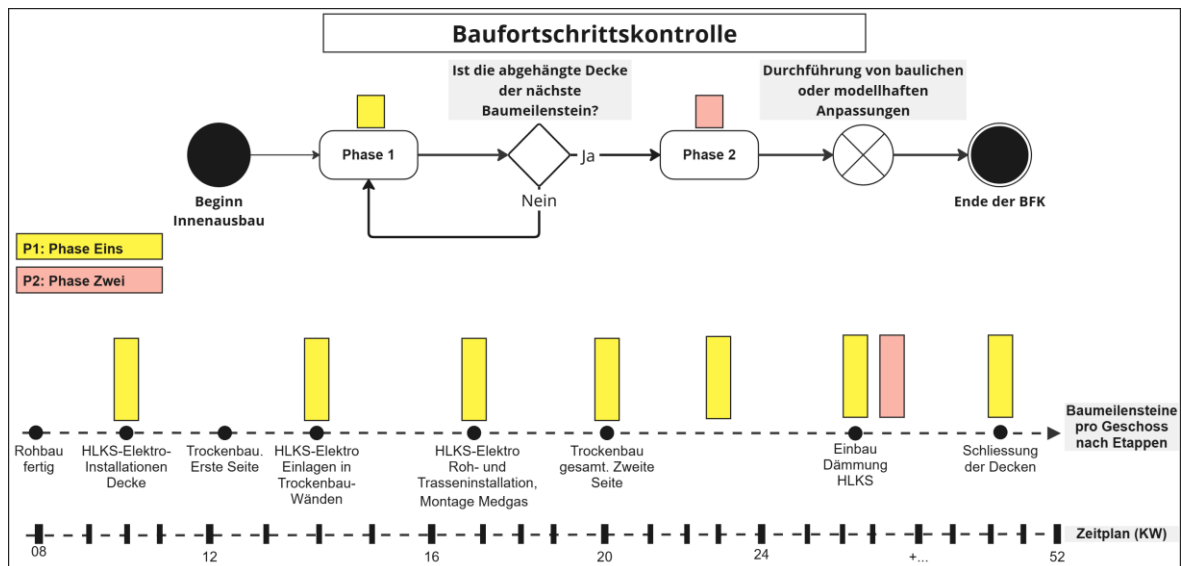


Abbildung 15: Darstellung der zwei Phasen zur BFK

Ein zentraler Entscheidungspunkt in der Vorgehensweise ist die Frage, ob die abgehängte Decke der nächste Baumeilenstein ist. Falls dies zutrifft, wird Phase 2 eingeleitet, um eine detaillierte Prüfung mittels *Laserscanning* durchzuführen. Falls nicht, wird die kontinuierliche Kontrolle fortgesetzt. Die BFK orientiert sich dabei an festgelegten Baumeilensteinen pro Geschoss und Etappe, die durch schwarze Punkte in der Abbildung markiert sind. Durch diese strukturierte Vorgehensweise wird sichergestellt, dass der Baufortschritt präzise dokumentiert und kontrolliert wird, sodass Abweichungen frühzeitig erkannt und gegebenenfalls bauliche oder modellhafte Anpassungen vorgenommen werden können.

4.3.1 Phase Eins

Die erste Phase der BFK erfolgt unabhängig von den Baumeilensteinen, folgt jedoch einer taktischen Planung. Diese BFK kann als kontinuierlich betrachtet werden, da sie in regelmäßigen Abständen (wöchentlich, monatlich oder je nach Bedarf und Bereich) durchgeführt wird.

Erforderliche Ressourcen für die erste Phase:

- Terminplanung
- Whiteboard
- Excel (als Tracking zur strukturierten Nachverfolgung der Baufortschritte).
- Dalux (zur Baufortschrittserfassung, Vergleich Soll-Ist-Zustand und Visualisierung)
- 360°-Kamera Ricoh Theta X, zusätzliche Akkus und Baulampen
- AR-Gerät mit NEXT-BIM (bei Bedarf für AR-Kontrolle)
- Revizto (bei Bedarf nach Nutzung von NEXT-BIM)

Ablauf:

1. Planung der kontinuierlichen BFK

Die *BIM*-Abteilung greift auf die Informationen der Bauaktivitäten in der Terminplanung zu, um auf dem Whiteboard und Excel eine strukturierte Planung anhand einer Tracking-Tabelle für die Phase eins der BFK zu erstellen. Die Planung der SiteWalks wird in wöchentlichen, monatlichen Abständen oder je nach Bedarf angepasst.

2. Erfassung des Ist-Zustands

Mit der 360°-Kamera werden durch die *BIM*-Abteilung regelmässig Bilder des Baufortschritts aufgenommen. Diese 360°-Fotos werden automatisch an Dalux übertragen und online bereitgestellt, sodass alle berechtigten Nutzenden jederzeit Zugriff auf die erfassten Daten haben.

3. Baukontrolle

Im Büro wählen die Bauleitenden in Dalux zunächst das entsprechende Geschoss sowie das Aufnahmedatum des gewünschten SiteWalks aus, um den Ist-Zustand mit dem 3D-Soll-Modell zu vergleichen. Entlang der Trajektorie des SiteWalks kann ein von Dalux definierter Standpunkt angeklickt werden, wodurch sich das zugehörige 360°-Foto öffnet. Über die Funktion „Vergleichen mit“ lässt sich das 3D-Soll-Modell einblenden. Dadurch werden das Soll-Modell und das 360°-Foto nebeneinander auf dem Bildschirm dargestellt – jeweils mit demselben Bildausschnitt. So lassen sich visuell etwaige Abweichungen zwischen Planung und Ausführung direkt im Büro erkennen.

Für eine präzisere Überprüfung oder bei Unklarheiten der Abweichungen kann die Bauleitung Soll-Ist-Vergleiche direkt vor Ort auf der Baustelle (Gemba) mit dem 3D-Modell auf dem *Smartphone* oder *Tablet* durchführen oder bei der *BIM*-Abteilung eine Nachkontrolle via NEXT-BIM beantragen.

4. Umgang mit Abweichungen

Identifizierte Abweichungen werden in Dalux von der Bauleitung als Pendenzen dokumentiert und den verantwortlichen Subunternehmen zugewiesen. Pendenzen aus NEXT-BIM werden hingegen als BCF-Format über Revizto zugewiesen.

5. Bearbeitung durch Subunternehmen

Subunternehmen analysieren ihre Zuweisungen auf Dalux oder Revizto und entscheiden über geeignete Massnahmen. Bei komplexen Überprüfungen, kann NEXT-BIM für eine präzisere Kontrolle genutzt werden. Nach Behebung der Abweichungen erfolgt eine entsprechende Meldung über die durchgeführten Korrekturen.

In den folgenden zwei BPMN-Diagrammen ist der detaillierte Ablauf der Phase Eins sowohl mit den verwendeten Softwares (siehe Abbildung 16) als auch mit den involvierten Rollen dargestellt (siehe Abbildung 17).

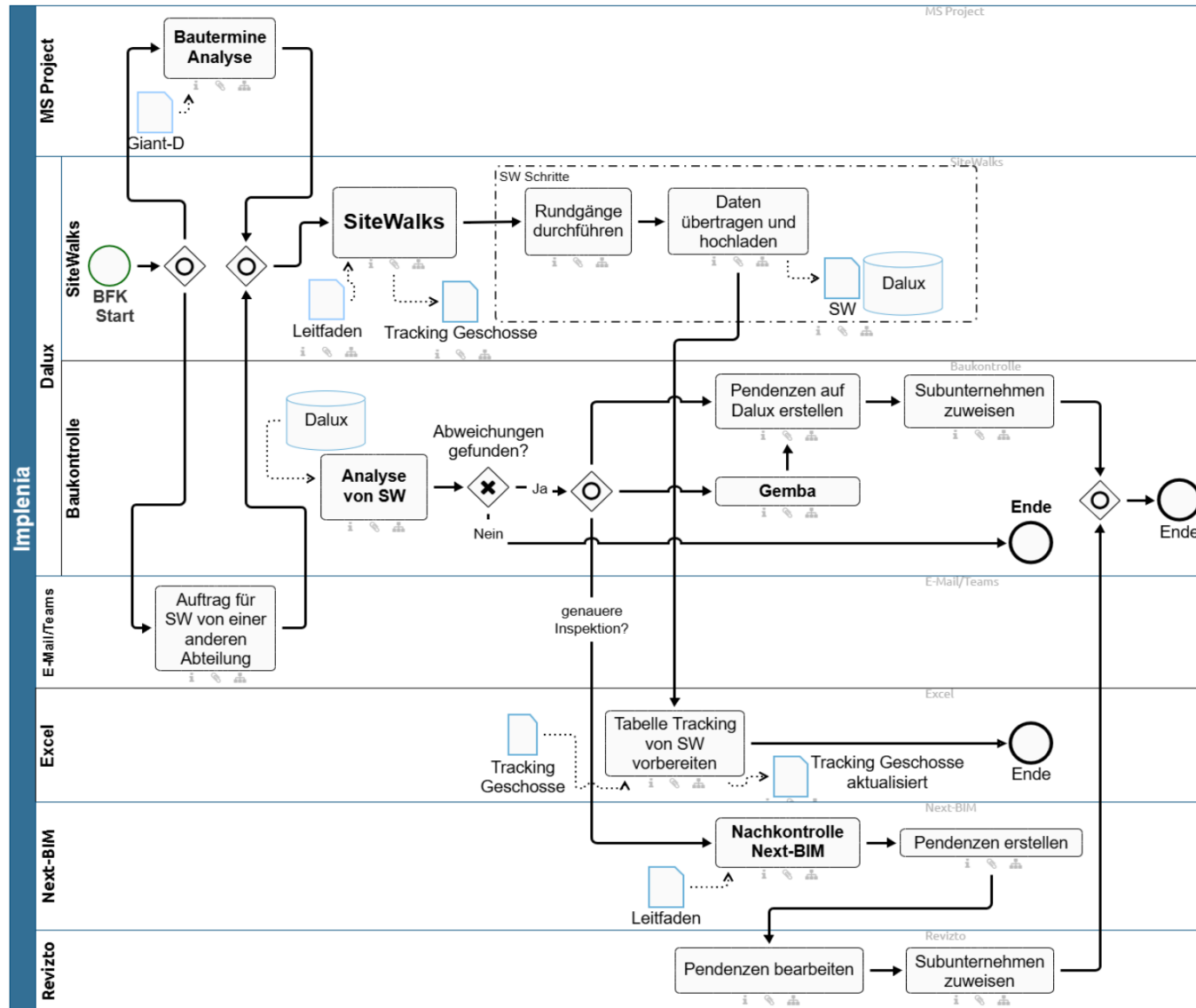


Abbildung 16: BPMN-Diagramm der verwendeten Softwares in Phase Eins

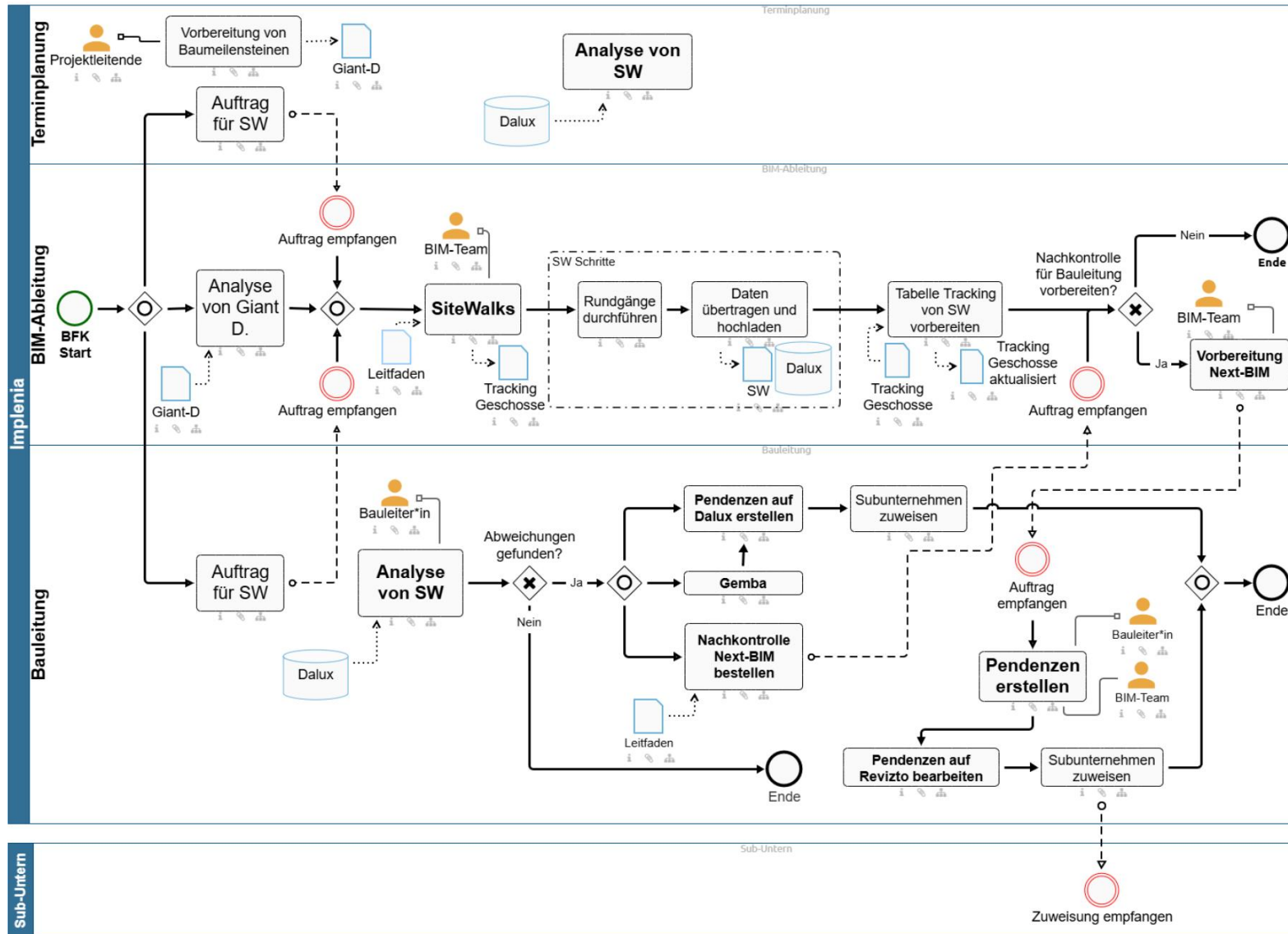


Abbildung 17: BPMN-Diagramm der Rollenverteilung in Phase Eins

4.3.2 Phase Zwei

Die zweite Phase der BFK erfolgt abhängig von den Baumeilensteinen. Im Vergleich zur Phase Eins, liegt der Fokus in dieser Phase auf einer definitiven digitalen Erfassung, die dank geeigneter Technologien geometrische Daten liefert, was einen genaueren Vergleich des Soll-Ist-Zustands für die BFK im HLK-Bereich ermöglicht.

Erforderliche Ressourcen für die zweite Phase:

- Terminplanung
- Whiteboard
- Excel (als Tracking zur strukturierten Nachverfolgung der Baufortschritte)
- Dalux (zur Baufortschrittserfassung, Vergleich Soll-Ist-Zustand und Visualisierung)
- 360°-Kamera Ricoh Theta X, zusätzliche Akkus und Baulampen
- Terrestrischer Laserscanner BLK360 G2
- Register BLK360 (Punktwolkenverarbeitung)
- 3DR Cyclone (für eine detaillierte Analyse und Abweichungsermittlung).
- Revizto (zur modellbasierten Kollaboration und Entscheidungsfindung)
- AR-Gerät mit NEXT-BIM (bei Bedarf für AR-Kontrolle)

Ablauf:

1. Planung der definitiven BFK

Vor den *SiteWalks* müssen drei Faktoren berücksichtigt werden:

- **Terminplanung:** Das Gantt-Diagramm wird analysiert, um die geplanten Baudertermine zu ermitteln. Dies bietet eine gezielte Planung der Bereiche, die in den nächsten Schritten mittels *SiteWalks* aufgenommen werden.
- **Fertigstellungsmeldung:** In den auf Dalux erstellten Checklisten wird überprüft, ob die Montage der HLK-SERM-Elemente an der Betondecke schon abgeschlossen ist und die Etappe für die Baufortschrittsaufnahme mittels *Laserscanner* freigegeben werden kann. Wenn keine Fertigstellungsmeldung vorhanden ist, erfolgt zur Überprüfung eine kurze Sichtkontrolle auf der Baustelle.
- **Tracking-Tabelle anhand der Baumeilensteine:** Fehlt die offizielle Fertigstellungsmeldung einzelner Etappen, kann auf die von der *BIM*-Abteilung erstellte Excel-Tabelle zurückgegriffen werden. Diese enthält relevante terminliche Informationen wie die Fertigstellung, den Beginn der Abhangdeckenschliessung, anstehende Begehungen durch die Bauherrschaft oder offene Pendenzen im *BCF*-Format. Auf Basis dieser Angaben lassen sich Termine für die Durchführung der definitiven BFK gezielt planen (siehe Tabelle 2).

2. Definitive Erfassung des Ist-Zustands mittels SiteWalks

Analog zur ersten Phase erfolgt auch in dieser Phase die Erfassung des Ist-Zustands mithilfe einer 360°-Kamera. Die Aufnahmen werden hier aber jeweils vor bedeutenden Baumeilensteinen, wie dem Beginn der Deckenschliessung, durchgeführt. Der genaue Zeitpunkt variiert je nach Geschoss und Etappe und ist im Terminplan festgehalten. Es handelt sich dabei um die letzten SiteWalks vor der Schliessung der abgehängten Decken. Anschliessend werden lediglich noch SiteWalks mit den montierten Abhangdecken zur abschliessenden Dokumentation durchgeführt.

Die definitive visuelle Erfassung der ausgeführten HLK-Arbeiten dient zusätzlich als Orientierungshilfe für den späteren Soll-Ist-Vergleich zwischen dem 3D-Bauwerksmodell und den durch den Laserscanner erzeugten Punktwolkendaten. Der Laserscanner wird eingesetzt, sobald alle HLK-SERM-Komponenten an der Betondecke montiert und die letzten SiteWalks abgeschlossen sind. Zur Nachverfolgung der bereits erfassten Baufortschritte unterstützt eine Excel-Tabelle das Tracking (siehe Tabelle 3 und 4).

3. Definitive Erfassung des Ist-Zustands mittels Laserscanner und Auswertung

Nach der definitiven Erfassung der SiteWalks erfolgt die definitive Aufnahme der Baufortschritte im Bereich HLK-SERM durch den Einsatz des *Laserscanners*. Der Vorgang des Scannens und der Bearbeitung der gewonnenen Daten besteht aus vier Hauptschritten: die Vorbereitung des *Laserscanners* und Aufnahme von Punktwolken, die Erstellung von *Meshes*, den Vergleich des *Mesh* mit dem 3D-Modell in Bezug auf projektspezifische Toleranzen sowie die Auswertung der Abweichungen in 3DR Cyclone im *BCF*-Format. Für diese Schritte sind die in Kapitel 4.1 erwähnten Softwares von Leica erforderlich. Eine ausführliche Schritt-für-Schritt-Erklärung findet sich in den Anhängen als Leitfaden (siehe Anhang 7 und 8).

Die erforderlichen Toleranzeinstellungen und Auswertungskriterien werden innerhalb des *BIM*-Teams abgestimmt, um möglichst präzise und projektspezifisch angepasste Ergebnisse zu erzielen, die als *Best Practice* für das Projekt dienen. Die *BIM*-Abteilung übernimmt dabei eine zentrale Vorbereitungsrolle, indem sie die Abweichungen detailliert dokumentiert. Dies erleichtert den Fachplanenden die modellhafte Anpassung der 3D-Modelle und ermöglicht eine zeitgerechte Korrektur – als Grundlage für die spätere Revision durch die *BIM*-Abteilung und zur Sicherstellung einer erfolgreichen Abnahme durch die Bauherrschaft.

4. Ergänzende Auswertung

Zur Ergänzung der Auswertung der BFK wird eine *AR*-Lösung mit *NEXT-BIM* eingesetzt. Diese präzise Kontrolle wird vor allem für die Überprüfung der Positionierung von kleinen Baukomponenten wie Elektroboxen, Netzwerkboxen und anderen Bauteilen eingesetzt, bei denen eine genaue Lage entscheidend ist. Bei der Nutzung von *NEXT-BIM* gibt es vier Hauptschritte: die

Vorbereitung der Modelle, die Referenzierung vor Ort, die Kontrolle der projektspezifischen Toleranzen und das Exportieren der Auswertungen im *BCF*-Format.

5. Zuweisung der Abweichungen

Die durch *Scans* oder *AR*-Kontrolle festgestellten Abweichungen werden zunächst in den jeweiligen Softwares (3DR Cyclone und NEXT-BIM) ausgewertet. Anschliessend werden sie als *BCF*-Dateien in Revizto importiert und den zuständigen gewerklichen Fachplanenden oder Subunternehmen zugewiesen, damit die erforderlichen modellhaften oder baulichen Anpassungen fachgerecht und entsprechend den vertraglichen Vorgaben durchgeführt werden können.

6. Modellhafte oder bauliche Anpassungen

Befinden sich die festgestellten Abweichungen ausserhalb der projektspezifischen Toleranzen, ohne ein Risiko für die bestehende Struktur darzustellen, sind modellhafte Anpassungen erforderlich. In diesem Fall werden die Fachplanenden über die erfassten Abweichungen informiert und erhalten eine definierte Frist, um die *BIM*-Modelle entsprechend der realen Bauausführung zu aktualisieren - insbesondere, da diese später als *As-Built*-Modelle dienen. Nach erfolgter Anpassung erfolgt eine Rückmeldung an Implenía.

Liegt die Abweichung hingegen ausserhalb der zulässigen Toleranzbereiche, stellt ein ernsthaftes Risiko dar oder verletzt geltende Baunormen, sind bauliche Korrekturen notwendig. Die entsprechenden Pendenzen werden den zuständigen Subunternehmen zugewiesen, wobei sie zunächst um eine Stellungnahme zur Situation gebeten werden. Anschliessend wird in Absprache mit den weiteren Baubeteiligten entschieden, wie die baulichen Massnahmen umgesetzt werden.

Sollten Unstimmigkeiten bestehen bleiben, sind in beiden Fällen alternative Lösungsansätze zu prüfen – etwa in Form von Mediation, interner Vermittlung oder abgestimmten Vereinbarungen seitens Implenía – mit dem Ziel, zeitnah und effizient eine tragfähige Lösung zu finden.

7. Revision und Abschluss

Dieser Schritt umfasst die Überprüfung durch die *BIM*-Abteilung von Implenía, um sicherzustellen, dass alle Modellanpassungen durchgeführt wurden und keine Abweichungen mehr bestehen. Sobald die Modelle der tatsächlichen Bauausführung entsprechen, wird der BFK-Prozess abgeschlossen. Die Modelle sind dann bereit für die Abnahme und die Begehung durch die Bauherrschaft.

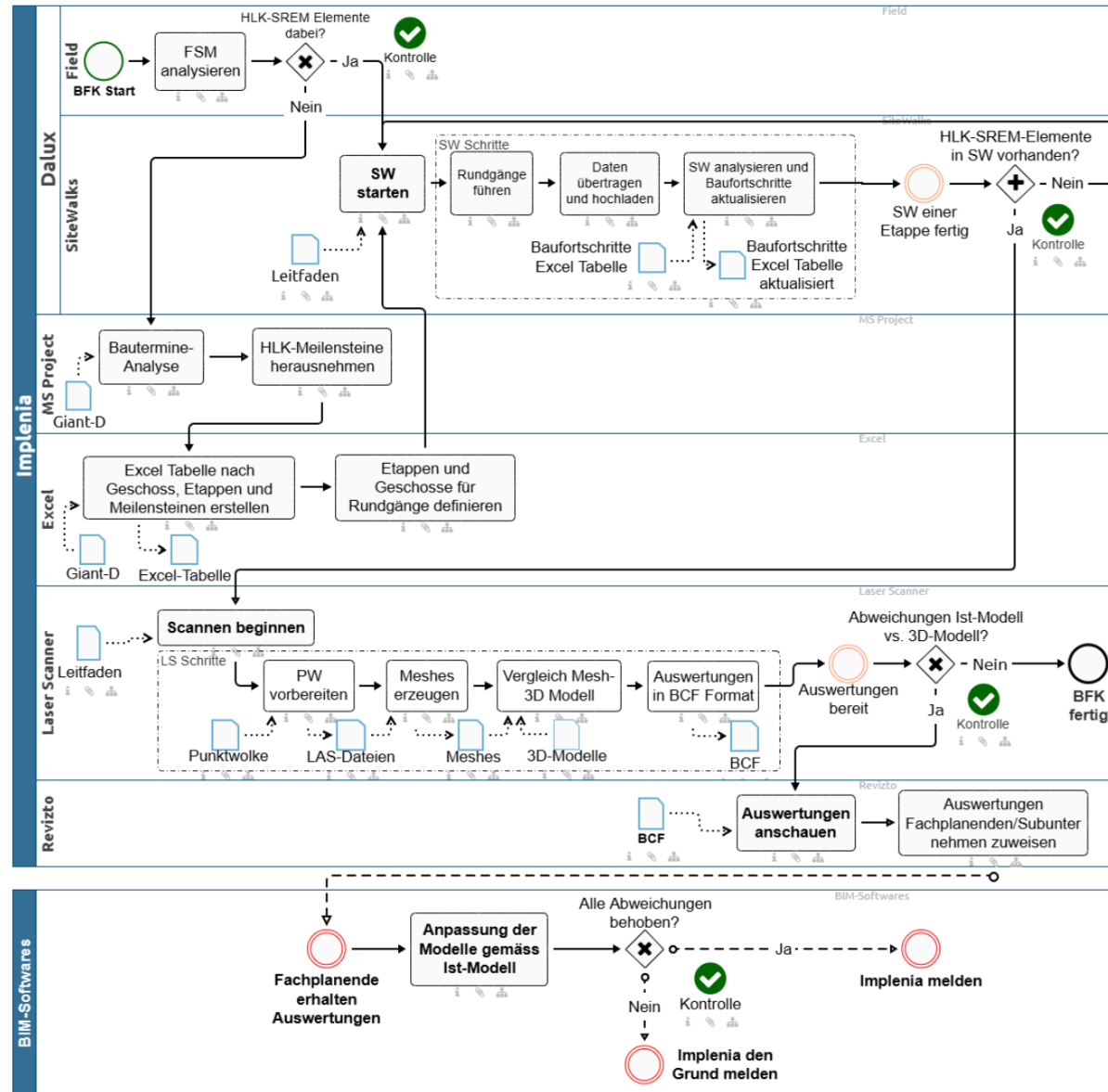


Abbildung 18: BPMN-Diagramm der verwendeten Softwares in Phase Zwei

Die zwei BPMN-Diagramme (Abbildungen 18 und 19) gehören zur zweiten Phase der BFK. Im Gegensatz zur ersten Phase, die einen schlankeren und schnelleren Prozess darstellt, umfasst diese Phase eine grössere Anzahl an Aktivitäten und ist dadurch zeitaufwändiger.

Das erste BPMN-Diagramm (Abbildung 18) zeigt die eingesetzten Softwarelösungen und deren Interaktionen in dieser Phase. Neben der Erfassung des Baufortschritts liegt der Fokus auf der digitalen Dokumentation des Ist-Zustands sowie der detaillierten Analyse des Ist-Soll-Vergleichs. Ein zentrales Ziel ist die automatische Überprüfung und Erkennung von Abweichungen anhand der projektspezifischen Toleranzen.

Das zweite BPMN-Diagramm (Abbildung 19) stellt dieselben Abläufe aus der Perspektive der beteiligten Rollen dar und verdeutlicht die Verantwortlichkeiten der einzelnen Akteure. Der Prozess trägt es zudem bei, erkannte Abweichungen in einem offenen, baufreundlichen Kommunikationsformat, wie dem *BCF*-Format, an die zuständigen Projektbeteiligten zu übermitteln. Das *BCF*-Format ermöglicht den effizienten Austausch von Informationen in *BIM*-Projekten und unterstützt die Kommunikation zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten. Dadurch können modellhafte Anpassungen gezielt und effizient durchgeführt werden, um eine möglichst präzise Übereinstimmung des Modells mit der Realität zu erreichen.

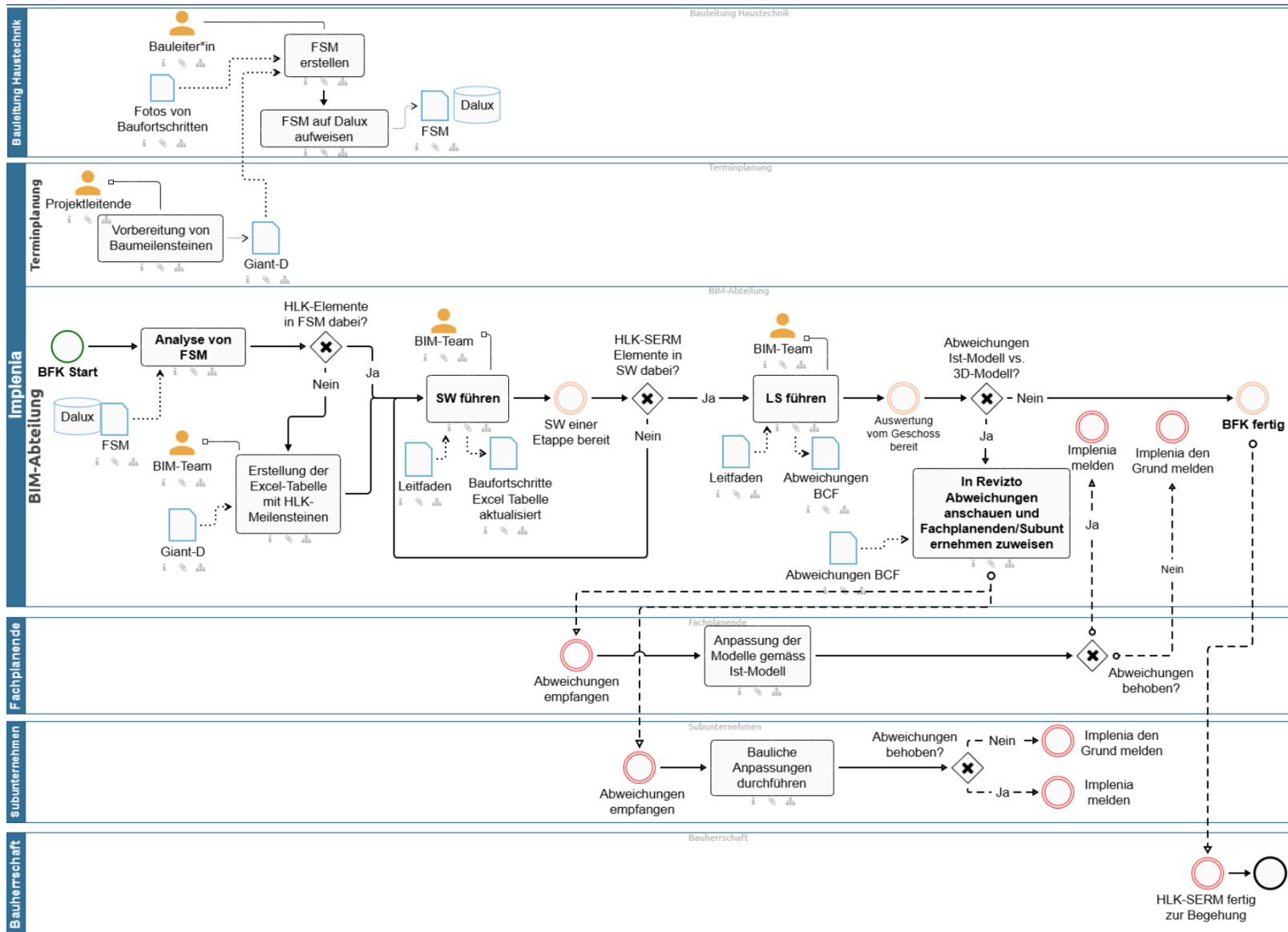


Abbildung 19: BPMN-Diagramm der Rollenverteilung in Phase Zwei

5 Proof of Concept

Der vorliegende *PoC* hat das Ziel, die Machbarkeit und Effizienz, der im LP erarbeiteten, zwei-stufigen BFK im HLK-Bereich zu validieren. Der Prozess gliedert sich in zwei aufeinanderfolgende Phasen: In der ersten Phase erfolgt eine kontinuierliche BFK durch *SiteWalks*, die eine visuelle Erfassung des Baufortschritts bis zum Erreichen eines definierten Baumeilensteins, beispielsweise der Schliessung der Abhangdecke, ermöglichen. Vor diesem Meilenstein beginnt die zweite Phase, in der eine detaillierte und abschliessende Prüfung mittels *Laserscanning* durchgeführt wird. Das Ziel dieses zweistufigen Ansatzes besteht darin, den Baufortschritt zu erfassen, Abweichungen zwischen dem Ist-Zustand und dem digitalen Bauwerksmodell frühzeitig zu identifizieren, in einem baustellentauglichen Format wie *BCF* zu dokumentieren und gezielt zu beheben. Die folgende Darstellung (siehe Abbildung 20) veranschaulicht diesen Workflow und zeigt, wie die beiden Phasen mit ihren jeweiligen Softwares und Dateien nahtlos ineinandergreifen und in ihrer Kombination eine ganzheitliche BFK ergeben. Zur besseren Darstellung der beiden Phasen wurden diese farblich unterschieden (gelb=Phase 1, rot=Phase 2).

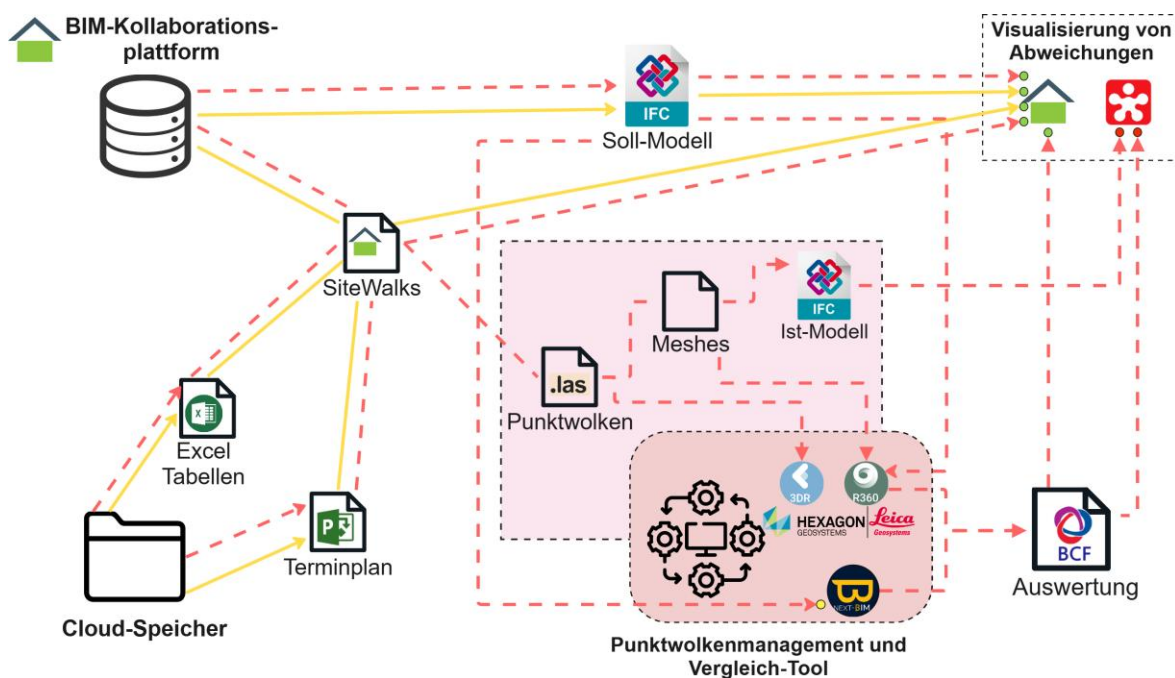


Abbildung 20: Workflow der zwei Phasen der automatisierten BFK

Im Rahmen des *PoC* sollen die im LP ausgewählten Technologien und Geräte hinsichtlich ihrer Eignung für eine automatisierte BFK überprüft werden.

Diese sollen in der Lage sein, den Bauzustand kontinuierlich zu erfassen, Vergleiche mit dem digitalen Modell durchzuführen und die Ergebnisse nachvollziehbar zu dokumentieren. Der dargestellte LP soll zudem den Projektbeteiligten eine verständliche und strukturierte Möglichkeit bieten, den Baufortschritt effizient zu verfolgen und fundierte Entscheidungen zu treffen. Ein wichtiger Bestandteil dieses *PoC* ist die Prüfung der Einhaltung spezifischer Toleranzen, insbesondere des in diesem Projekt maximal zulässigen Abstands von 15 cm zwischen montierten HLK-Elementen und deren digitalen Entsprechungen. Wird diese Toleranz überschritten, soll das System die Abweichung automatisch erkennen, damit die Abweichungen ausgewertet, dokumentiert und den Verantwortlichen für weitere Prüfungen oder Anpassungen weitergeleitet werden können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass durch den *PoC* eine strukturierte und technologiegestützte Methode zur BFK im HLK-Bereich erprobt wird, die sowohl die laufende bildbasierte Kontrolle als auch die detaillierte Endprüfung umfasst. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen als Entscheidungsgrundlage für die Implementierung des LP in anderen vergleichbaren Bauprojekten bei Implenia dienen.

5.1 Vorgehensweise

Im Rahmen des *PoC* wurde die Vorgehensweise entsprechend des zuvor definierten LP in zwei Phasen unterteilt:

Phase Eins:

Das Ziel dieser Phase bestand in der kontinuierlichen, schnellen und hochauflösenden Erfassung des Ist-Zustandes mit einer Frequenz von weniger als vier Wochen.

Die Umsetzung erfolgte in folgenden Schritten:

1. **Erstellung eines Ablaufplans:** Basierend auf dem Terminplan wurden Excel-Tabellen erstellt, die eine strukturierte Nachverfolgung der Geschosse und Bauetappen in einem regelmässigen Rhythmus (alle drei bis vier Wochen) garantieren.
2. **Durchführung der SiteWalks:** Die Baufortschrittserfassung wurde via Dalux Mobile-App mittels der 360°-Kamera Ricoh Theta X durchgeführt. Zur Sicherstellung eines reibungslosen Ablaufs und genügend Beleuchtung wurden zusätzliche Akkus und eine tragbare Baulampe verwendet.
3. **Datenverarbeitung und Upload:** Die aufgenommenen Videos wurden von der Kamera auf ein *Smartphone* übertragen und in Dalux über die WLAN-Verbindung hochgeladen.
4. **Tracking und Aktualisierung:** Nach jeder Erfassung wurde die Excel-Tabelle aktualisiert, um den Fortschritt pro Geschoss und Bauetappe nachzuverfolgen.

Phase Zwei:

Das Ziel dieser Phase war die definitive Bauaufnahme der HLK-Installationen, um Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Zustand anhand der projektspezifischen Anforderungen zu identifizieren, zu dokumentieren, Pendenzen weiterzuleiten und das Ergebnis nach Abschluss der Korrekturen zu überprüfen. Die folgenden Schritte wurden durchgeführt:

1. **Planung der definitiven Bauerafassungen:** Für die Planung der abschliessenden Erfassungen mittels SiteWalks und *Laserscanner* wurden in Excel anhand der zuvor im LP erwähnten Kriterien Tracking-Tabellen erstellt. Besonders relevant war jeweils der Baumeilenstein «Abhangdeckenschliessung», welcher die Priorität der Durchführung der definitiven BFK definierte. Die Fertigstellungsmeldung wurde analysiert zur Überprüfung, ob alle relevanten HLK-SERM-Elemente bereits montiert wurden. Bei fehlender Fertigstellungsmeldung wurde vor Ort eine Sichtkontrolle durchgeführt.
2. **Abschliessende Bauaufnahmen mittels SiteWalks:** Es wurden von jedem Geschoss die definitiven Aufnahmen von allen Räumen und Korridoren vor Schliessung der Decken gemacht. Die Vorgehensweise war dieselbe wie in der ersten Phase.
3. **Abschliessende Bauaufnahmen mittels Laserscanning:** In jedem Geschoss wurden abschliessende Aufnahmen von spezifischen Bauabschnitten wie Korridoren, Operationssälen, Gastrobereich, Steigzonen mittels *Laserscanner* erfasst, wodurch hochpräzise Punktwolken mit geometrischen Daten zur Verfügung standen.
4. **Datenverarbeitung, -bereinigung und Auswertung:** Die erfassten Punktwolken wurden in die Software Register übertragen, bereinigt und hinsichtlich ihrer Verknüpfung optimiert. Anschliessend erfolgte der Export im LAS-Format zur Software 3DR Cyclone. Dort wurden die Punktwolken zu einem *Mesh* verarbeitet und mit den digitalen gewerklichen 3D-Soll-Modellen abgeglichen, um Bauabweichungen automatisch erkennen zu lassen und anschliessend manuell auszuwerten. Dann wurden die identifizierten Abweichungen im *BCF*-Format abgespeichert und in Revizto importiert.
5. **Behebung der Abweichungen:** Basierend auf den Auswertungsergebnissen wurden Entscheidungen hinsichtlich baulicher oder modellhafter Anpassungen getroffen. Abschliessend wurden die festgestellten Abweichungen den verantwortlichen Baubeteiligten zugewiesen und erforderliche Massnahmen eingeleitet.
6. **Revision und Abschluss:** Die ausgeführten modellhaften Anpassungen der verschiedenen Gewerke wurden überprüft. Bauliche Anpassungen gab es bisher in der zweiten Phase keine. Die definitive BFK der Betten-Geschosse OG05, OG06 und OG07 wurden komplett abgeschlossen und es fand bereits eine Abnahme des Geschosses OG06 durch die Bauherrschaft statt. In den restlichen Obergeschossen, sowie im Sockelbau und in den Untergeschossen wurden die nötigen Laserscans schon erfasst.

Bis zum Zeitpunkt der Abgabe dieser Masterarbeit wurde jedoch die definitive BFK noch nicht vollständig abgeschlossen.

5.2 Ergebnisse und Erkenntnisse des PoC

Im Folgenden wird der erarbeitete LP mittels eines PoC analysiert, anhand von verschiedenen Kriterien beurteilt und somit die in der Einleitung erwähnten Teilfragestellungen dieser Masterarbeit beantwortet.

5.2.1 Eignung der Technologien für die BFK im HLK-Bereich

Hinsichtlich des *PoC* wurden folgende Technologien in den beiden Phasen als geeignet identifiziert:

1.1. Phase Eins (Kontinuierliche Baufortschrittsaufnahmen)

Die Verwendung der 360°-Kamera von Ricoh Theta X in Kombination mit Dalux und dem Feature SiteWalks hat sich für die kontinuierliche Fortschrittserfassung sehr bewährt und aus folgenden Gründen als geeignet herausgestellt:

- Schnelle und lückenlose Baufortschrittserfassung durch 360°-Kamera.
- Einfache Aufnahme der Baufortschritte in Videoaufnahmen durch Helmkamera.
- Reduzierung des manuellen Aufwands durch automatische Ableitung von 360°-Fotos aus Videos. Es müssen keine einzelnen 360°-Fotos von jedem Standpunkt mehr gemacht werden
- Direkte und automatische Verortung der Fotos auf dem 2D-Plan und Synchronisierung mit dem 3D-Modell.
- Klare Grundlage für Fotodokumentation und 3D-Vergleich durch visuell nachvollziehbare Baufortschrittsdarstellung.

1.2. Phase Zwei (Definitive Baufortschrittsaufnahmen)

Der Einsatz des *Laserscanners* BLK360 mit den Softwares Register und 3DR Cyclone erwies sich für die Erzeugung von hochgenauen Punktwolken des Ist-Zustands und die Visualisierung von Bauabweichungen in dieser Phase als besonders geeignete Technologie. Im Folgenden wird genauer auf die Vorteile eingegangen:

- **Hohe Messgenauigkeit für den HLK-Bereich:**
Der BLK360 bietet eine Punktgenauigkeit von ± 4 mm auf 10 m Distanz, was ihn besonders geeignet für die Prüfung von HLK-Bauelementen mit engen Toleranzen (z. B. ± 15 cm) macht.

- **Weitreichendes vertikales und horizontales Sichtfeld:**
Mit einem horizontalen Sichtfeld von 360° und einem vertikalen Sichtfeld von 270° wird ein grosser Raumwinkel erfasst – ideal für Deckenbereiche, Installationen in Schächten oder Technikräumen.
- **Effiziente Erfassung mit mittlerer Scandichte:**
Es wurde die zweithöchste Scandichte verwendet, wodurch ein vollständiger Scan eines Standorts in rund 30 Sekunden durchgeführt werden konnte – ein guter Kompromiss zwischen Detailtiefe und Effizienz.
- **IMU-Sensorik zur Scanverknüpfung:**
Die integrierte *IMU* im BLK360 erkennt Bewegungen und Neigungen des Geräts und sorgt für eine automatische Lagekorrektur. Sie unterstützt die grobe Ausrichtung der Punktwolken, wodurch die Registrierung erleichtert und eine präzise Überlagerung mit dem 3D-Modell für die Abweichungserkennung in der BFK ermöglicht wird.
- **Lokal kartesisches Referenzsystem für schnelle Erfassung:**
Die Scans erfolgten in einem lokalen, kartesischen Koordinatensystem, was eine schnelle und einfache Aufnahme erlaubte. Wichtig war hierbei, dass der erste Scan präzise gesetzt wurde, da dieser als absoluter Referenzpunkt für alle folgenden Scans diente.
- **Automatisierte Toleranzanalyse:**
In 3DR Cyclone lassen sich Toleranzbänder definieren (z. B. ± 15 cm) und somit automatisiert Abweichungen erkennen. Diese werden farblich markiert, manuell ausgewertet und gespeichert.
- **Export und Integration in BIM-Koordinationsplattformen:**
Die erkannten Abweichungen wurden systematisch im *BCF*-Format exportiert und liessen sich nahtlos in Koordinationsplattformen wie Revizto überführen, ideal für kollaborative Entscheidungsprozesse.
- **Wiederholbarkeit und Nachvollziehbarkeit:**
Die Methode ist objektiv messbar, verlässlich, reproduzierbar und eignet sich somit gut für die BFK bei HLK-Installationen.

5.2.2 Auswirkungen der BFK auf Arbeitsprozesse im HLK-Bereich

In der Auswertung des LP durch den *PoC* liessen sich im Rahmen der beiden Phasen der BFK im HLK-Bereich folgende Ergebnisse feststellen:

- **Strukturierte und digitale Abläufe**

Die automatisierte Baufortschrittskontrolle führt zu einem standardisierten und klar nachvollziehbaren Arbeitsablauf. Durch digitale Fortschrittsdokumentationen, auf die jederzeit zentral zugegriffen werden kann, wird der Informationsfluss optimiert und Missverständnisse in der Kommunikation zwischen den Gewerken reduziert. Dies ist besonders im komplexen HLK-Bereich entscheidend, wo mehrere Einzelsysteme exakt aufeinander abgestimmt sein müssen.

- **Frühzeitige Erkennung von Abweichungen**

Die automatisierte Erkennung von Abweichungen und visuelle Analyse von Punktwolken erlaubt es, Fehler bereits während oder nach der Ausführung der Arbeiten und nicht erst bei der Bauabnahme oder später zu erkennen. Das reduziert kostspielige Nacharbeiten und minimiert Verzögerungen. Gerade bei HLK-Installationen, die oft verdeckt verbaut werden, ist eine frühzeitige Kontrolle entscheidend für die spätere Funktionalität.

Die kontinuierliche Baufortschrittserfassung durch *SiteWalks* wurde von einigen Bauleitenden aktiv zur Analyse und zum Ist-Soll-Vergleich genutzt, in anderen Fällen wurde jedoch nicht vom LP profitiert.

- **Standardisierte Datenerfassung für spätere Nutzung**

Informationen über gebaute Zustände werden systematisch sowie zentral erfasst und gespeichert und bleiben so nicht in Einzeldokumenten oder E-Mails versteckt. Dadurch können relevante Daten direkt in den Betrieb überführt werden – insbesondere für Wartungs- und Instandhaltungsprozesse werden die Fotodokumentationen und Ist-Modelle sowie digitalen Bauwerksmodelle nutzbar gemacht. Dies macht den Bauprozess nachhaltiger und reduziert langfristige Betriebskosten.

- **Modellbasierte Prozessoptimierung durch Soll-Ist-Abgleich**

Der automatisierte Abgleich zwischen Modell und Realität deckt nicht nur Abweichungen auf, sondern macht auch wiederkehrende Schwachstellen im Bauablauf sichtbar. Dadurch lassen sich Planungs- und Ausführungsfehler systematisch erkennen und künftig vermeiden. Zudem unterstützt dies die Auswahl geeigneter, *BIM*-kompetenter Subunternehmen für zukünftige Projekte.

5.2.3 Auswirkungen der BFK auf Beteiligte im HLK-Bereich

Die Auswertung des LP im Rahmen des *PoC* zeigte in beiden Phasen der BFK im HLK-Bereich folgende zentrale Erkenntnisse in Bezug auf Baubeteiligte:

- **Entlastung und gezielte Zusammenarbeit**

Durch die zentrale und strukturierte Verfügbarkeit aller Fortschrittsdaten entfällt für die Bauleitung und Fachplanende ein grosser Teil manueller Kontrollen und Rückfragen. Subunternehmen profitieren davon, dass sie klar sehen, wann und wo ihre Leistungen gefragt sind, ohne auf zeitintensive Abstimmungen angewiesen zu sein. Dies führt zu einer gezielteren und effizienteren Zusammenarbeit.

- **Sensibilisierung für die Bedeutung modellbasierter Arbeitsweise (BIM)**

Die automatisierte Baufortschrittskontrolle zeigt klar: Erst wenn alle Beteiligten von der Planung bis zur Ausführung modellbasiert und koordiniert arbeiten, entfalten sich die Vorteile digital integrierter Prozesse vollständig.

Eine durchgängige *BIM*-basierte Arbeitsweise verbessert die Abstimmung zwischen den Gewerken, verringert Informationsverluste und reduziert Planungs- sowie Ausführungsfehler. Dadurch können Ressourcen gezielter eingesetzt, Doppelarbeiten vermieden und die Gesamtproduktivität auf der Baustelle gesteigert werden. Die Sensibilisierung für die Wichtigkeit einer modellbasierten Zusammenarbeit ist daher ein zentraler Hebel für die erfolgreiche Umsetzung digital unterstützter Bauprojekte.

- **Stärkung der digitalen Kompetenz und Akzeptanz**

Der Einsatz von digitalen Werkzeugen wie *Laserscannern*, Punktwolkenanalysen oder *BCF*-basierten Kommunikationstools (z. B. Revizto) macht digitale Arbeitsweisen für alle Beteiligten erfahrbar und nachvollziehbar. So entsteht eine praxisnahe Lernkurve – besonders für jene, die bisher wenig mit *BIM* oder digitaler Bauführung zu tun hatten. Das stärkt die digitale Reife des gesamten Projektteams.

5.2.4 Auswirkungen von Laserscanning auf Projektkosten im HLK-Bereich

Der Einsatz des *Laserscanners* im Rahmen der Phase Zwei der BFK zur Feststellung von Abweichungen im HLK-Bereich hat ausserdem Auswirkungen auf die Projektkosten.

Die grobe Kostenanalyse zeigt, dass der Einsatz eines *Laserscanners* inklusive Auswertung während der hypothetischen Projektdauer von fünf Monaten rund CHF 60'000 beträgt. Diese Investition steht einem möglichen Einsparungspotenzial von über CHF 56 Mio. gegenüber, basierend auf typischen Nachbesserungskosten von 10 % bei *BIM*-Projekten wie dem CHF 563 Mio. umfassenden KSA-Projekt «Dreiklang». Die Berechnung berücksichtigt jedoch nur ausgewählte Faktoren wie *Laserscanner*-Anschaffung und Personalkosten eines Vollzeitmitarbeitenden, der während fünf Monaten ausschliesslich *Laserscans* inklusive Auswertungen des HLK-Bereichs des gesamten KSA-Projekts durchführt. Weitere Aufwendungen für beispielsweise Software, Wartung oder Schulung bleiben unberücksichtigt. Zudem bezieht sich

die Analyse nur auf bestimmte Ursachen für Nachbesserungen und konzentriert sich ausschliesslich auf den Einsatz von *Laserscanning* in der BFK von HLK-Elementen, während sie alle anderen Bereiche ausschliesst. Daher sind die Ergebnisse vorsichtig zu interpretieren.

Die detaillierten Berechnungen der aufgewendeten Zeit für die Erfassung der zweiten Phase, sowie die daraus abgeleiteten Kosten und potenziellen Einsparungen für den *Laserscanning*-Prozess finden sich im Anhang 7.

5.2.5 Festgestellte Herausforderungen

Trotz der zahlreichen positiven Ergebnisse des LP wurden auch einige Herausforderungen deutlich. Während der ersten Durchführungen der *SiteWalks* und *Laserscans* konnten einige der auftretenden Schwierigkeiten analysiert und in späteren Iterationen durch gezielte Anpassungen behoben werden. Andere Herausforderungen blieben bis zum Abschluss des Prozesses bestehen und werden im Folgenden näher erläutert.

- **Optimierungsbedarf bei der Hardware-Infrastruktur**

Scans und vor allem deren Datenübertragungen nahmen viel Zeit in Anspruch und könnten durch leistungsfähigere Geräte beschleunigt und stabiler gestaltet werden. Für die Bearbeitung der Punktwolken wurde zudem ein leistungsfähigerer *CAD*-Rechner notwendig. Aufgrund von fehlenden Ressourcen wurde stattdessen die Nutzung von *One Implenia Desktop* (OID) implementiert, was den Remote-Zugriff auf rechenintensive *BIM*- und *CAD*-Anwendungen erlaubte. Somit wurde die Performance von 3DR Cyclone verbessert.

- **Angepasste Ausrüstung für SiteWalks**

Die Ausrüstung für eine optimale Datenerfassung wurde laufend angepasst. Besonders bei den *SiteWalks* zeigte sich aber das Tragen der Helmkamera und Baulampen als körperlich belastend, was den Bedarf an ergonomischerer und trotzdem gut beleuchtender Ausrüstung verdeutlichte.

Der Akku der 360°-Kamera war nach rund einer Stunde *SiteWalks* leer. Deshalb wurden vier weitere Akkus gekauft, um somit mehrere Stunden *SiteWalks* am Stück durchführen zu können. Zudem wurde vom Smartphone auf Tablet gewechselt, um mehr Speicherkapazität und einen grösseren Bildschirm zu erhalten.

- **Leistungsprobleme bei grossen Arbeitsdateien in 3DR Cyclone**

Bei grossen Arbeitsdateien in 3DR Cyclone (>25 GB) kam es zu Leistungsproblemen der Software. Um 3DR Cyclone stabil und schnell zu halten, wurde eine gezielte Reduktion der Punktwolken durch die Eliminierung irrelevanter Bereiche sowie eine etappenweise Auswertung nötig.

- **Stabilitätsprobleme in 3DR Cyclone**

Vereinzelt kam es zu unerklärlichen Softwareabstürzen, wodurch Verzögerungen entstanden, da auf Updates von Leica und Unterstützung durch die IT-Abteilung gewartet werden musste. Aufgrund der fehlenden automatischen Speicherfunktion gingen dabei jeweils Daten und wertvolle Arbeitszeit verloren.

- **Fehlerhafte automatische Abweichungserkennung in 3DR Cyclone**

Relevante Differenzen zwischen Modell und Realität wurden in seltenen Fällen weder erkannt noch farblich markiert (z. B. 20 cm Leitungsabstand), weswegen eine manuelle Kontrolle weiterhin notwendig war.

- **Automatisierung und Fehlererkennung in 3DR Cyclone**

Obwohl 3DR Cyclone eine hohe Genauigkeit bei der Erkennung von Bauabweichungen aufweist, wurden einzelne Fehler identifiziert. Beispielsweise wurde ein Abstand von mehr als 20 cm zwischen einer digitalen (hellblauen) und einer realen (gelbmarkierten) Leitung nicht korrekt als Abweichung erkannt (siehe Abbildung 21). In solchen Fällen kann eine vollständige Automatisierung problematisch sein. Eine manuelle Überprüfung bleibt erforderlich, während die Software jedoch potenzielle Abweichungsbereiche markieren könnte, um den Kontrollaufwand zu minimieren.

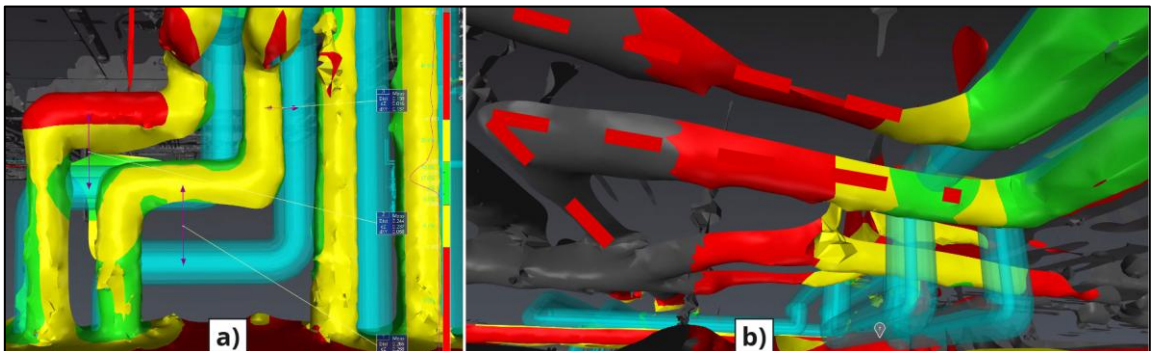


Abbildung 21: Fehler bei der Erkennung der Bauabweichungen in 3DR Cyclone

- **Einschränkungen bei Dalux**

Dalux gestattet die Möglichkeit, Bauabweichungen zu identifizieren und Pendenzen zu erstellen, die den relevanten Projektbeteiligten zugewiesen werden können. Jedoch sind einige Einschränkungen zu beachten: Die fehlende Möglichkeit zur genauen Überlappung von Bildern und zur Durchführung von Messungen beeinträchtigt die Präzision der Kontrolle. Dies stellt insbesondere bei der Kontrolle von Elektroden eine Herausforderung dar.

- **Skalierbarkeit des BFK-Prozesses**

Die Skalierbarkeit des BFK-Prozesses hängt stark von der Anzahl der Teammitglieder ab. Mit zunehmender Projektgröße steigt der Bedarf an personeller Unterstützung, um eine kontinuierliche und detaillierte Fortschrittskontrolle

sicherzustellen. Ein klar definierter *Workflow* und die Verteilung der Verantwortlichkeiten sind essenziell für den reibungslosen Ablauf.

5.2.6 Beispielhafte Darstellungen von Ergebnissen

Weitere Ergebnisse werden anhand von Bildern und Tabellen dargestellt, um ein besseres Verständnis der erfolgreichen Umsetzung des LP für die BFK im HLK-Bereich zu ermöglichen.

Tabellen für die Planung und Tracking

Die nachfolgende Tabelle zeigt eine vollständige Übersicht des Trackings der BFK, gegliedert nach Geschossen und Etappen. Sie enthält die wichtigsten Daten, wie bereits in Kapitel 4 (Lösungsprozess) erwähnt, darunter beispielsweise Fertigstellungsmeldungen und Pendenzen, die als *BCF*-Dateien dokumentiert wurden.

Zudem veranschaulicht die Tabelle, wie der Prozess der BFK schrittweise und strukturiert von links nach rechts durch die einzelnen Etappen verläuft und schliesslich mit der Auswertung im *BCF*-Format für Revizto abgeschlossen wird (siehe Tabelle 2). Dabei ist zu beachten, dass die Durchführung der BFK nicht zwingend einer starren Ordnung folgen muss. Entscheidend ist vielmehr die Einhaltung der zuvor mit der Bauherrschaft und anderen Projektbeteiligten festgelegten Meilensteine und Fristen.

Fertigstellungs-meldung UN	Prüfung Fach-bauleitung /TU [As Built Kontrolle]			Pendenz pro Bereich liegen vor (BCF)	Bereinigte Fachmodelle liegen vor	As Built Nachkontrolle	As Built Abnahme KSA	Start "Decken schliessen"	SW Status	Vor As-Built Abnahme?	Auswertung & Export BCF	Datum Aufnahmen Laserscan	Status	Download Scandaten	Prozessierung (Pnkt Verbindungen) Register	Export .las *referenziert (R.)	3DR Cy (LAS Importiert)	Auswertung 3DR	Export .las referenziert	Export & Upload Mesh	Auswertung & Export BCF	Geschoss	Etappe				
①	③				⑤	⑥	⑦																				
16.12.2024	20.12.2024	51	2024	22.01.2025	05.02.2025	7	8	10.02.2025			22.01.2025	46										OG05	1				
16.12.2024	20.12.2024	51	2024					10.02.2025				46				46										OG05	2
20.12.2024	07.01.2025	2	2025					17.02.2025				49				49										OG05	3
20.12.2024	07.01.2025	2	2025					17.02.2025				49				49										OG05	4
20.12.2024	06.01.2025	2	2025					24.02.2025				49				49										OG05	5
20.12.2024	06.01.2025	2	2025					24.02.2025				49				49										OG05	6
11.11.2024	18.11.2024	47	2024	20.12.2024	17.01.2025	4	4	20.01.2025			20.12.2024	42										OG06	1				
11.11.2024	18.11.2024	47	2024					20.01.2025				42				42										OG06	2
11.11.2024	18.11.2024	47	2024					27.01.2025				42				42										OG06	3
25.11.2024	02.12.2024	49	2024					27.01.2025				44				44										OG06	4
25.11.2024	02.12.2024	49	2024					03.02.2025				44				44										OG06	5
25.11.2024	02.12.2024	49	2024					03.02.2025				44				44										OG06	6
06.01.2025	13.01.2025	3	2025	31.01.2025	21.02.2025	9	10	03.03.2025			31.01.2025	50										OG07	1				
06.01.2025	13.01.2025	3	2025					03.03.2025				50				50										OG07	2
13.01.2025	20.01.2025	4	2025					10.03.2025				51				51										OG07	3
13.01.2025	20.01.2025	4	2025					10.03.2025				51				51										OG07	4
20.01.2025	27.01.2025	5	2025					17.03.2025				52				52										OG07	5
20.01.2025	27.01.2025	5	2025					17.03.2025				52				52										OG07	6

Tabelle 2. Tracking-Tabelle mit den wichtigsten Daten

In der nächsten Tabelle wird der Tracking-Prozess detaillierter anhand von zwei Beispielen (OG06 und OG07) dargestellt, mit besonderem Fokus auf die Auswertung des Vergleichs zwischen dem generierten *Mesh* und den *BIM*-Modellen. Der Prozess beginnt mit der Erfassung der gescannten Punktwolken und endet mit der Zuweisung der *BCF*-Auswertung sowie der bereinigten TGA-Punktwolke in Revizto.

Die Nutzung einer strukturierten Tracking-Tabelle hat es dafür besorgt, den Überblick über den Fortschritt zu behalten und systematisch die weiteren Geschosse zu scannen und auszuwerten (siehe Tabelle 3).

OG07											
SiteWalk	Gescannt	Punktw downloaded 4 Reg	LAS von Reg 4 3DR C	LAS in 3DR Cy	Mesh	Modell in 3DR	Ausw	BCF export	BCF in Revizto	Zuweisung Revizto	Pnktwlke in Revizto
Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>
Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>
Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>
Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>
Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>
Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>
						HEI	<input checked="" type="checkbox"/>	HEI	<input checked="" type="checkbox"/>	HEI	<input checked="" type="checkbox"/>
						LUE	<input checked="" type="checkbox"/>	LUE	<input checked="" type="checkbox"/>	LUE	<input checked="" type="checkbox"/>
						KAE	<input checked="" type="checkbox"/>	KAE	<input checked="" type="checkbox"/>	KAE	<input checked="" type="checkbox"/>
					<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>
						SAN	<input checked="" type="checkbox"/>	SAN	<input checked="" type="checkbox"/>	SAN	<input checked="" type="checkbox"/>
						MEG	<input type="checkbox"/>	MEG	<input type="checkbox"/>	MEG	<input type="checkbox"/>
						RPA	<input type="checkbox"/>	RPA	<input type="checkbox"/>	RPA	<input type="checkbox"/>
OG06											
SiteWalk	Gescannt	Punktw downloaded 4 Reg	LAS von Reg 4 3DR C	LAS in 3DR Cy	Mesh	Modell in 3DR	Ausw	BCF export	BCF in Revizto	Zuweisung Revizto	Pnktwlke in Revizto
Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>	Et01	<input checked="" type="checkbox"/>
Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>	Et02	<input checked="" type="checkbox"/>
Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>	Et03	<input checked="" type="checkbox"/>
Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>	Et04	<input checked="" type="checkbox"/>
Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>	Et05	<input checked="" type="checkbox"/>
Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>	Et06	<input checked="" type="checkbox"/>
						HEI	<input checked="" type="checkbox"/>	HEI	<input checked="" type="checkbox"/>	HEI	<input checked="" type="checkbox"/>
						LUE	<input checked="" type="checkbox"/>	LUE	<input checked="" type="checkbox"/>	LUE	<input checked="" type="checkbox"/>
						KAE	<input checked="" type="checkbox"/>	KAE	<input checked="" type="checkbox"/>	KAE	<input checked="" type="checkbox"/>
					<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>	ELT	<input checked="" type="checkbox"/>
						SAN	<input checked="" type="checkbox"/>	SAN	<input checked="" type="checkbox"/>	SAN	<input checked="" type="checkbox"/>
						MEG	<input checked="" type="checkbox"/>	MEG	<input checked="" type="checkbox"/>	MEG	<input checked="" type="checkbox"/>
						RPA	<input checked="" type="checkbox"/>	RPA	<input checked="" type="checkbox"/>	RPA	<input checked="" type="checkbox"/>

Tabelle 3: Tracking der SiteWalks und Auswertungen Mesh vs. BIM-Modelle

Die folgende Tabelle weist auf eine zusammenfassende Darstellung der wesentlichen Schritte im Prozess, beginnend mit den *SiteWalks* bis hin zur Auswertung der Geschosse. Sie dient einer vereinfachten Nachverfolgung des Fortschritts: Jeder abgeschlossene Schritt wird durch ein Häkchen gekennzeichnet (siehe Tabelle 4). Im Unterschied zur vorherigen Tabelle, die eine detaillierte Analyse aller *BIM*-Modell-Auswertungen enthält, fasst die nachstehende Tabelle ausschliesslich der einzelnen Geschosse zusammen und vermittelt somit eine kompakte Übersicht.

Geschoss	Etappe	SW	SW bereit zum Scann?	SCAN	LAS	3DR	Mesh (0.01/0.03m)	Auswertung
OG05	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG05	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG05	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG05	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG05	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG05	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG06	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG06	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG06	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG06	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG06	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG06	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>
OG07	1	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG07	2	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG07	3	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG07	4	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG07	5	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OG07	6	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Tabelle 4: Zusammenfassung der Schritte pro Geschoss zur verbesserten Übersicht.

Darstellungen von Ergebnissen aus Dalux

In Abbildung 22 ist eine Zusammenfassung der Baufortschritte der HLK- und Medizinalgas-Elemente im Obergeschoss OG06 dargestellt. Diese Ergebnisse entsprechen der Umsetzung der ersten Phase der kontinuierlichen BFK. Die Nachverfolgung der Baufortschritte erfolgt monatlich, sodass bis Ende Oktober die HLK-Leitungen samt Isolierung installiert sein sollten, was einen Vergleich mit dem 3D-Modell ermöglicht. Durch die *SiteWalks* wird eine schnelle und hochauflösende Kontrolle der Bauelemente begünstigt (siehe Abbildung 22).



Abbildung 22: Baufortschritte im OG06 mittels SiteWalks

Abbildung 23 zeigt die Baufortschritte in der Steigzone des Erdgeschosses. Diese stellt ein weiteres Beispiel dar, wie *SiteWalks* zur regelmässigen Verfolgung von Fortschritten genutzt werden können. Durch diese Vergleiche mit dem 3D-Modell können frühzeitig Abweichungen identifiziert werden, sodass nicht bis zur endgültigen Abnahme gewartet werden muss.

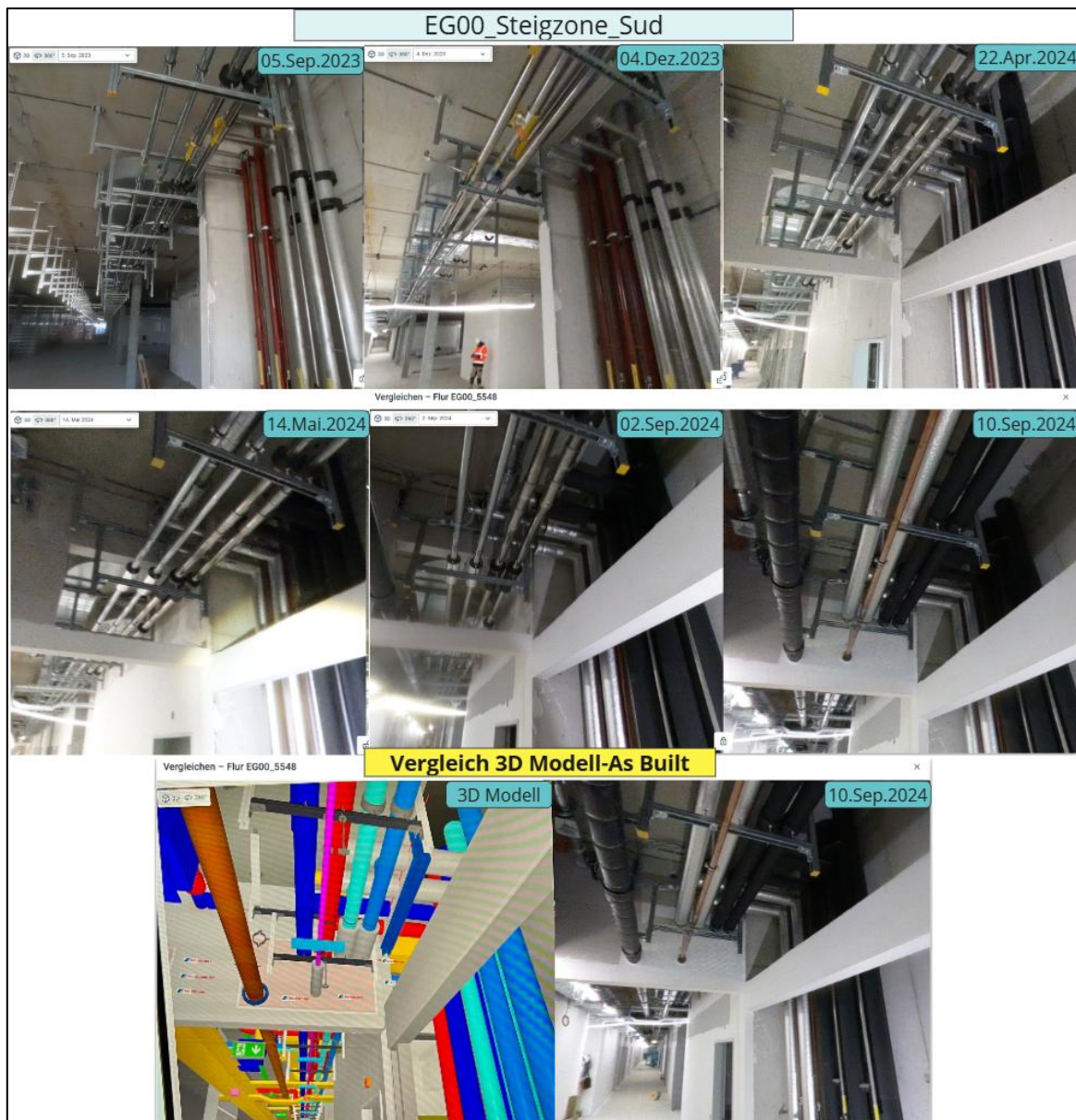


Abbildung 23: Baufortschritte im EG und Vergleich mit dem 3D-Modell

In Abbildung 24 ist (a) die Übersicht eines *SiteWalks* sowie die Visualisierung der Baufortschrittserfassung dargestellt. Die Benutzerfreundlichkeit der *SiteWalk*-Technologie zeigt sich in der praktischen und einfachen Handhabung. In den Abbildungen (b) und (c) wird die Ermittlung einer Bauabweichung durch den visuellen Vergleich des *BIM*-Modells mit einem 360°-Foto gezeigt. Auf Basis dieser Abweichung kann eine *Pendenz* erstellt werden, die dem verantwortlichen Projektbeteiligten zugewiesen wird. Dies ermöglicht eine zeitnahe bauliche oder modellhafte Anpassung.

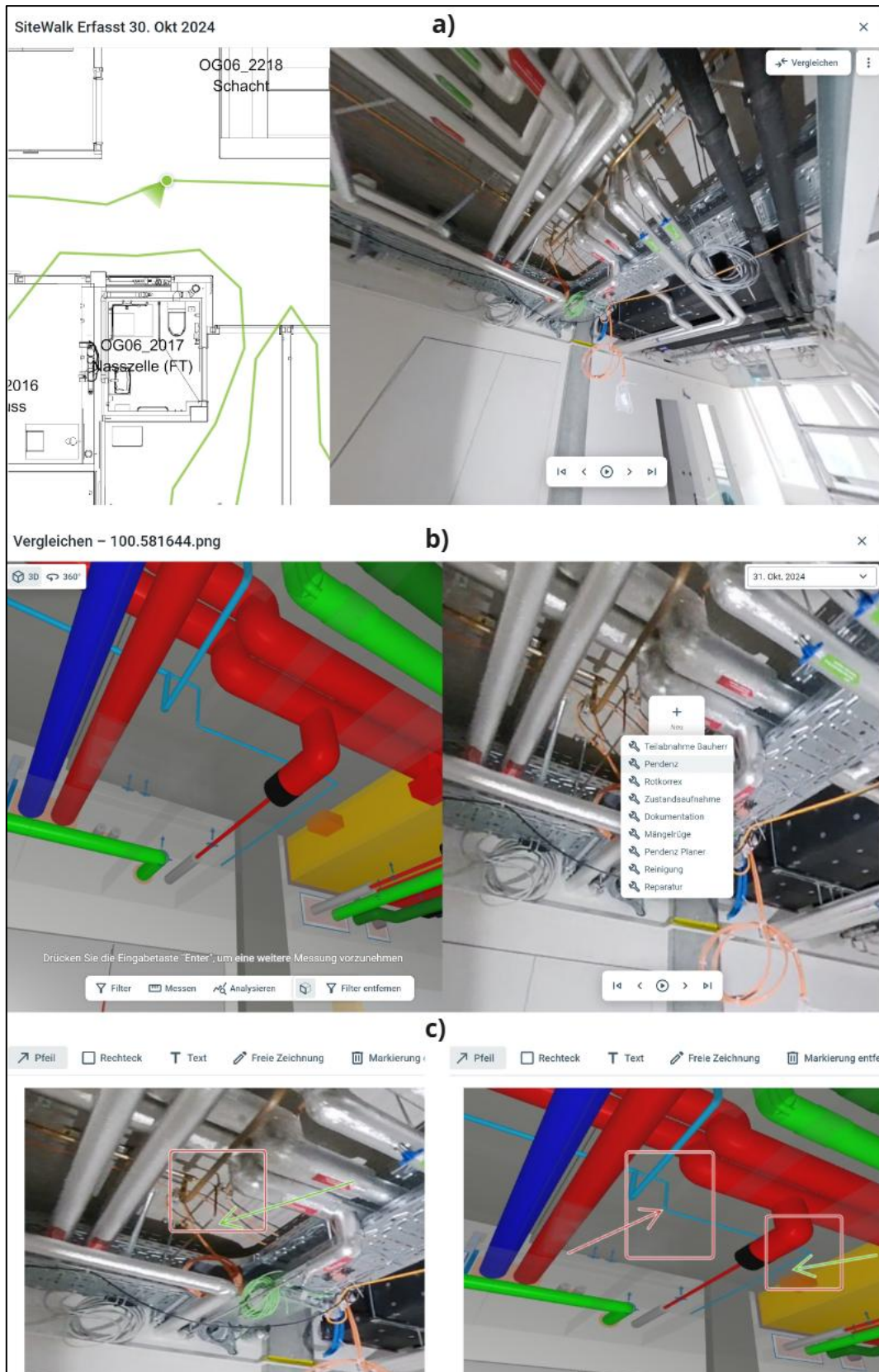


Abbildung 24: Erstellung einer Penzenz nach visuellem Vergleich des BIM-Modells mit einem 360°-Foto

Darstellungen von Ergebnissen aus Register

Die Umsetzung des LP mittels *PoC* ermöglichte es, weitere Ergebnisse aus den verwendeten Softwarelösungen von der Phase zwei zu gewinnen. Insbesondere lassen sich aus Register Erkenntnisse zur Registrierung der gescannten Punktwolken, deren Verknüpfung sowie zur Bereinigung der Daten ableiten. In 3DR Cyclone erfolgt die Überlagerung der Punktwolken mit dem *BIM*-Modell sowie weitere Verarbeitungsschritte, beispielsweise die Gruppierung der Punktwolken zu einer TGA-Punktwolke zur späteren Erstellung eines *Meshes*.

Ein wesentlicher Aspekt ist die Verknüpfung zweier gescannter Punktwolken, wodurch Abweichungen erkannt und korrigiert werden können. In Abbildung 25 ist in (a) eine gefundene Abweichung dargestellt, die entsteht, wenn zwei Punktwolken (farblich in blau und orange dargestellt) zusammengeführt werden. Diese Seitenansicht verdeutlicht die Differenz zwischen den Punkten, die anschliessend in (b) korrigiert werden kann. Die Software gewährleistet eine präzise Anpassung, sodass eine verbesserte Übereinstimmung der beiden verknüpften Punktwolken erzielt wird.

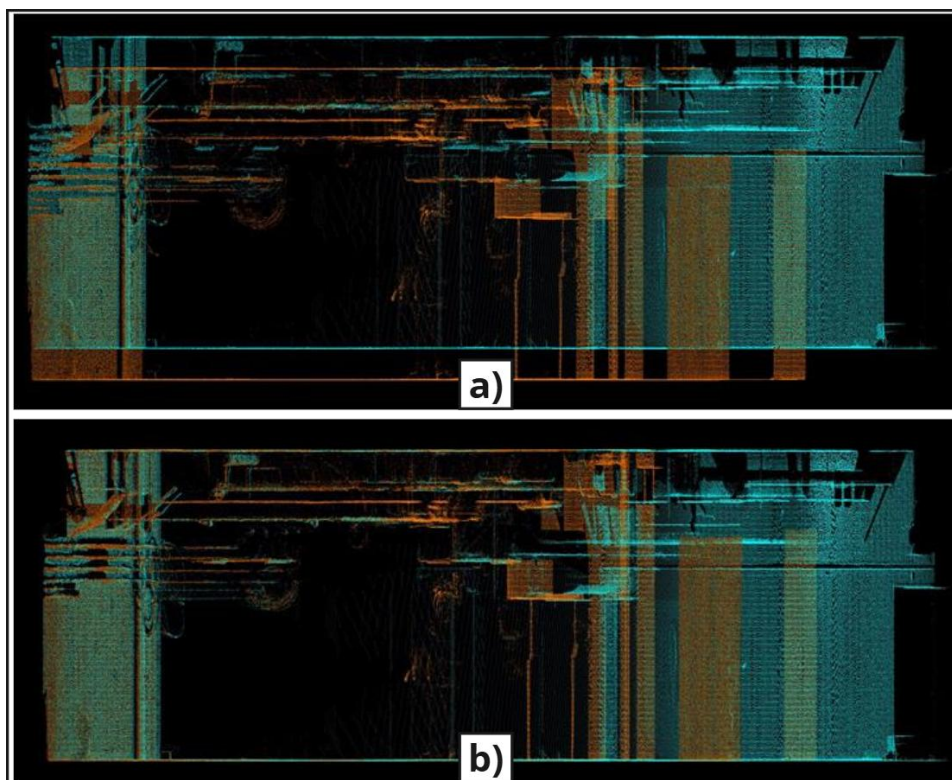


Abbildung 25: Abweichung und Korrektur zweier gescannter Punktwolken in der Seitenansicht.

Abbildung 26 zeigt die Überlagerung derselben Punktwolken aus Abbildung 25, aber diesmal aus einer Übersichtsperspektive. In (a) sind die Abweichungen zwischen den Räumen oder Ecken sichtbar, während in (b) die Korrektur vorgenommen wurde, sodass eine bessere Überdeckung erreicht wurde.

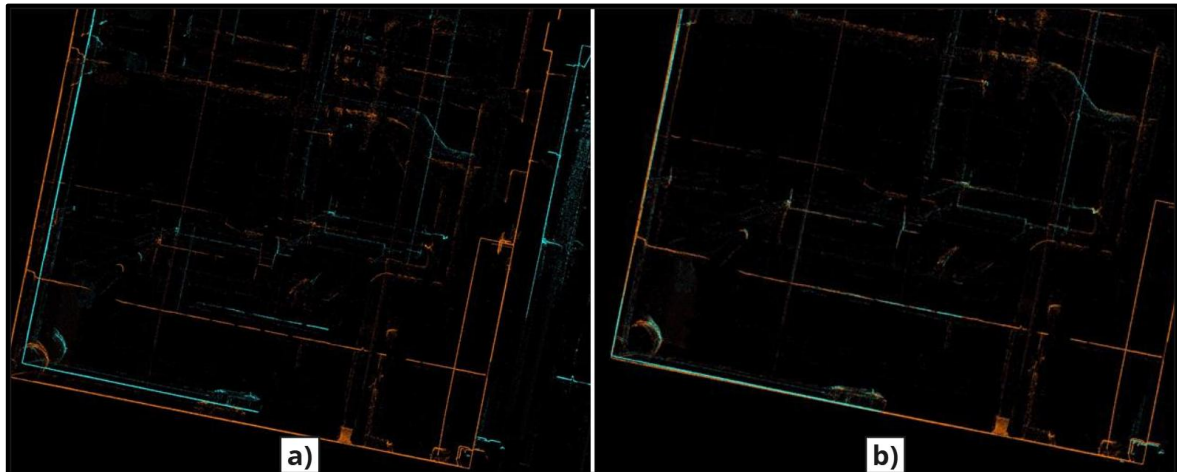


Abbildung 26: Abweichung und Korrektur zweier gescannter Punktwolken in der Übersichtsperspektive.

Nach der Registrierung der Punktwolken lässt sich die Fehlerstatistik auswerten. Die Berechnung ergibt einen absoluten Mittelwert von 0,001 m (1 mm) (siehe Abbildung 27). Der Grad der Überlappung variiert, beeinflusst jedoch die Qualität der Punktwolkenverknüpfung nicht signifikant. Erst bei Abweichungen über 10 mm ist eine Verknüpfung zwar technisch möglich, führt jedoch zu unzureichenden Ergebnissen in der abschliessenden Auswertung.

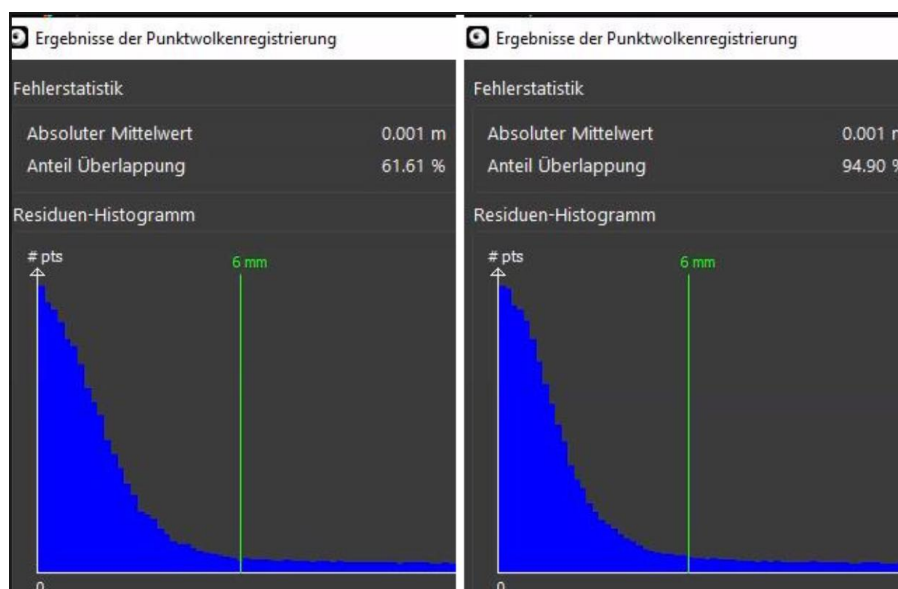


Abbildung 27: Ergebnisse der Punktwolkenregistrierung.

Im weiteren Verlauf des Prozesses werden die Punkte verknüpft und die resultierende Übersichtsdarstellung überprüft. Eine erfolgreiche Überlappung wird durch eine visuelle Markierung (grüne Linien) bestätigt (siehe Abbildung 28).

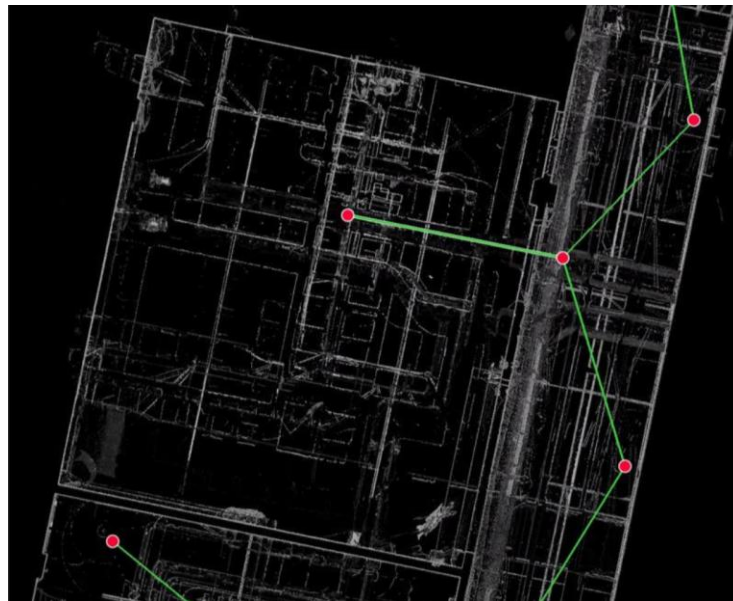


Abbildung 28: Verknüpfung der Punkte und saubere Übersichtsdarstellung.

Der Abschluss des Register-Prozesses liefert eine Gesamtübersicht über die Punktwolkenregistrierung sowie die zugehörige Fehlerberechnung (siehe Abbildung 29). Ein Fehler von 3 mm liegt innerhalb des zulässigen Toleranzbereichs. Bei Abweichungen über 10 mm wäre eine erneute Registrierung erforderlich, um die Qualität der Daten sicherzustellen. Durch diese Methodik kann gewährleistet werden, dass die Punktwolken innerhalb der definierten Toleranzen liegen und für die weitere Verarbeitung in 3DR Cyclone geeignet sind.

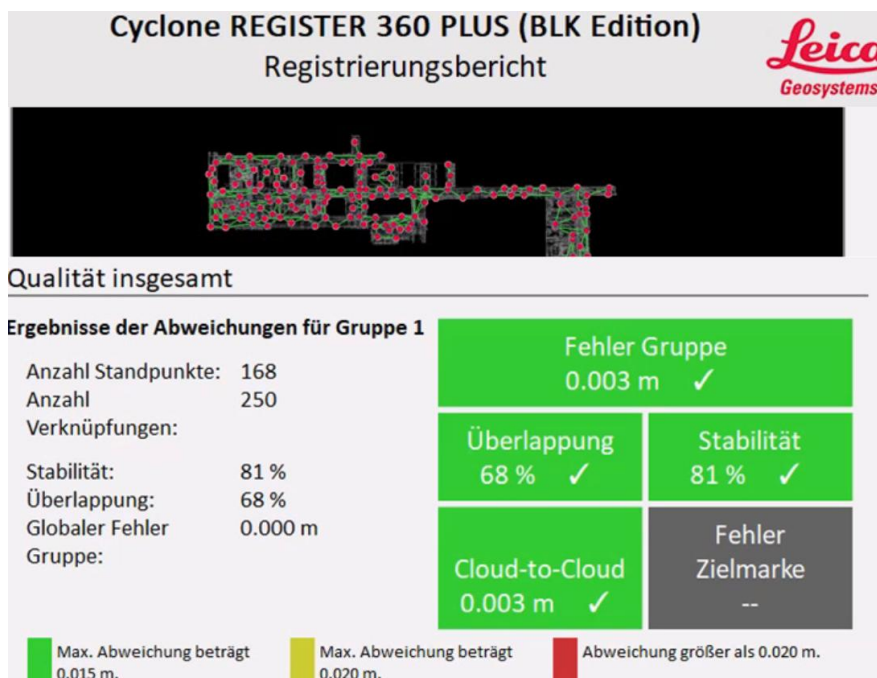


Abbildung 29: Gesamtregistrierung der Punktwolken und Fehlerbewertung

Darstellungen von Ergebnissen aus 3DR Cyclone

Die Ergebnisse aus 3DR Cyclone lassen sich anhand der folgenden Abbildungen nachvollziehen. Die untenstehende Abbildung zeigt zwei Methoden zur Analyse von Abweichungen zwischen *Scan*-Daten und dem *BIM*-Modell in 3DR Cyclone. In (a) wird das generierte *Mesh* der TGA-Punktwolke mit dem entsprechenden *BIM*-Modell verglichen (*Mesh vs. BIM*). Diese Methode ist die gängigste, da sie eine visuelle Erkennung von Bauabweichungen ermöglicht. Die zweite Methode (b) vergleicht die Punktwolken direkt mit dem *BIM*-Modell (Punktwolken vs. *BIM*). Dies kann insbesondere dann vorteilhaft sein, wenn bestimmte Bauelemente im *Mesh* nicht klar erkennbar sind, beispielsweise Medizinalgasleitungen. Da diese Elemente in der Punktwolke oft deutlicher sichtbar sind, lassen sich Abweichungen im Vergleich Punktwolken vs. *BIM* präziser identifizieren (siehe Abbildung 30).

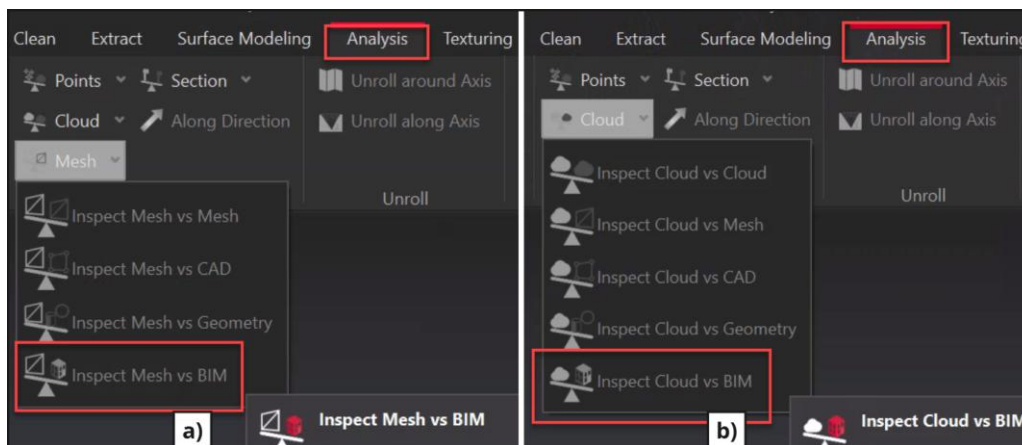


Abbildung 30: Vergleich in 3DR Cyclone (a) *Mesh vs. BIM* oder (b) Punktwolken vs. *BIM*

In Abbildung 31 ist in (a) die Konfiguration zur Festlegung der Abweichungen zwischen *Mesh* und *BIM*-Modell dargestellt. In (b) sind die vordefinierten Toleranzen gemäss den projektspezifischen Anforderungen ersichtlich. Grün bedeutet keine Abweichung (innerhalb des Toleranzbereichs), gelb zeigt Abweichungen bis 15 cm auf und rot markiert alle Abweichungen ausserhalb des Toleranzbereichs. Diese individuell anpassbaren Einstellungen tragen zu einer präzisen und effizienten Analyse der Abweichungen bei.

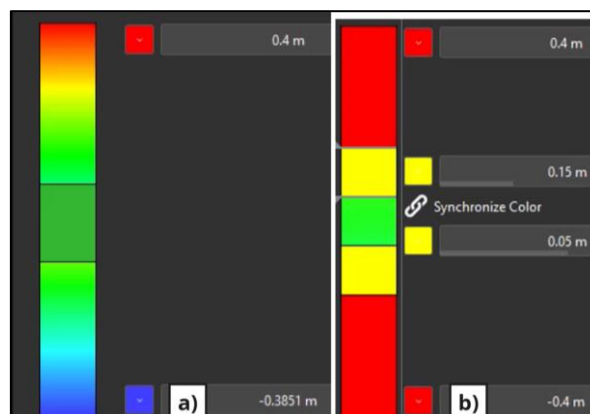


Abbildung 31: Konfiguration der Toleranzbereiche für die Abweichungsanalyse

In der folgenden Abbildung 32 wird der Einfluss präziser Toleranzeinstellungen auf die Abweichungsanalyse dargestellt. Teil (a) zeigt eine Analyse ohne definierte Toleranzen, wodurch keine verlässlichen Abweichungen identifiziert werden können. In Teil (b) hingegen verdeutlicht die Farbgebung klar, welche Bereiche innerhalb der festgelegten Toleranzgrenzen liegen und welche ausserhalb. Die Abweichungsanalyse muss stets im Kontext des zugrunde liegenden *BIM*-Modells interpretiert werden. Dabei ist zu beachten, dass eine rote Markierung nicht zwangsläufig auf eine fehlerhafte Ausführung hinweist. Daher ist eine ergänzende visuelle und manuelle Überprüfung der Ergebnisse erforderlich, um eine fundierte Bewertung vorzunehmen.

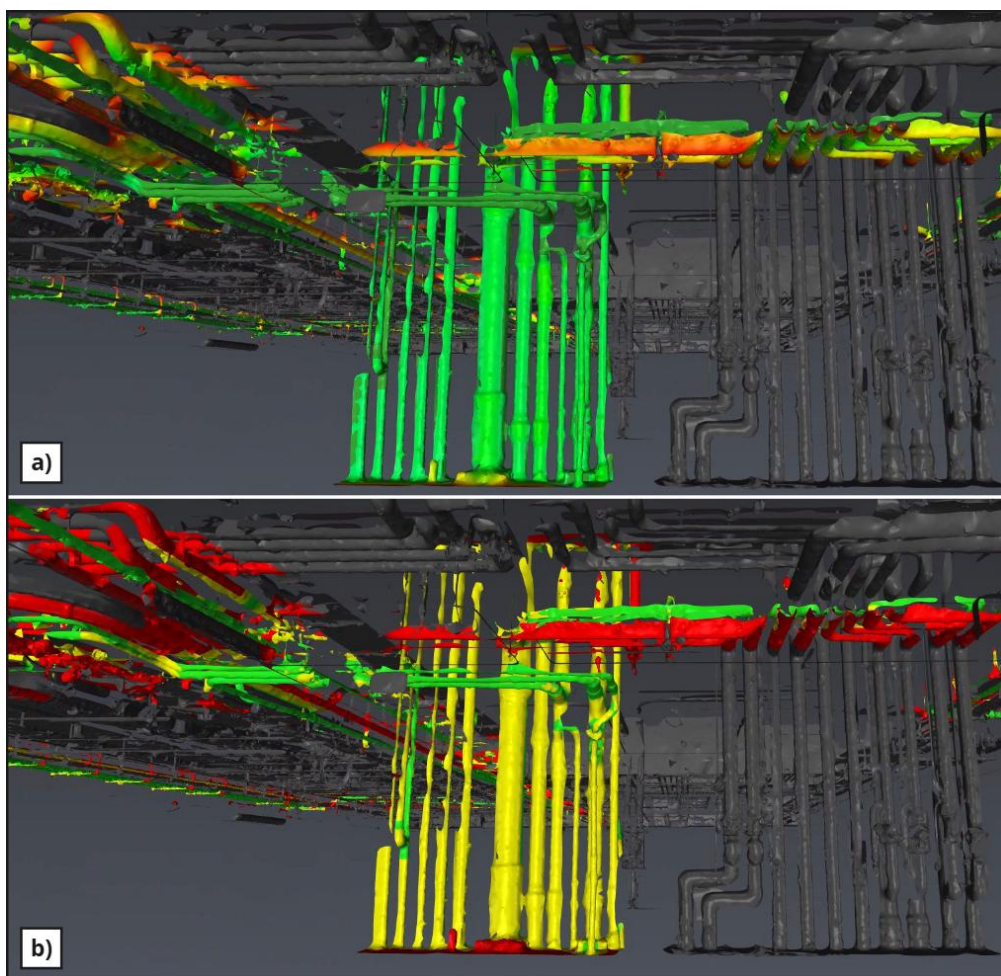


Abbildung 32. Unterschied zwischen (a) nicht definierter und (a) definierter Toleranzeinstellung.

Die Abbildung 33 zeigt die Überlagerung (c) des *BIM*-Modells (a) mit den Punktwolken (b) am Beispiel der Kältezentrale. Dabei sind zwei Abweichungen erkennbar, die durch weisse und hellblaue Rechtecke markiert wurden: Erstens wurden in der Punktwolke (b) Rohrbögen erfasst (weiss markiert), die im Modell (a) nicht vorhanden sind. Zweitens sind im Modell (a) Rohrbögen enthalten (hellblau markiert), die in der realen Ausführung (b) nicht gebaut wurden.

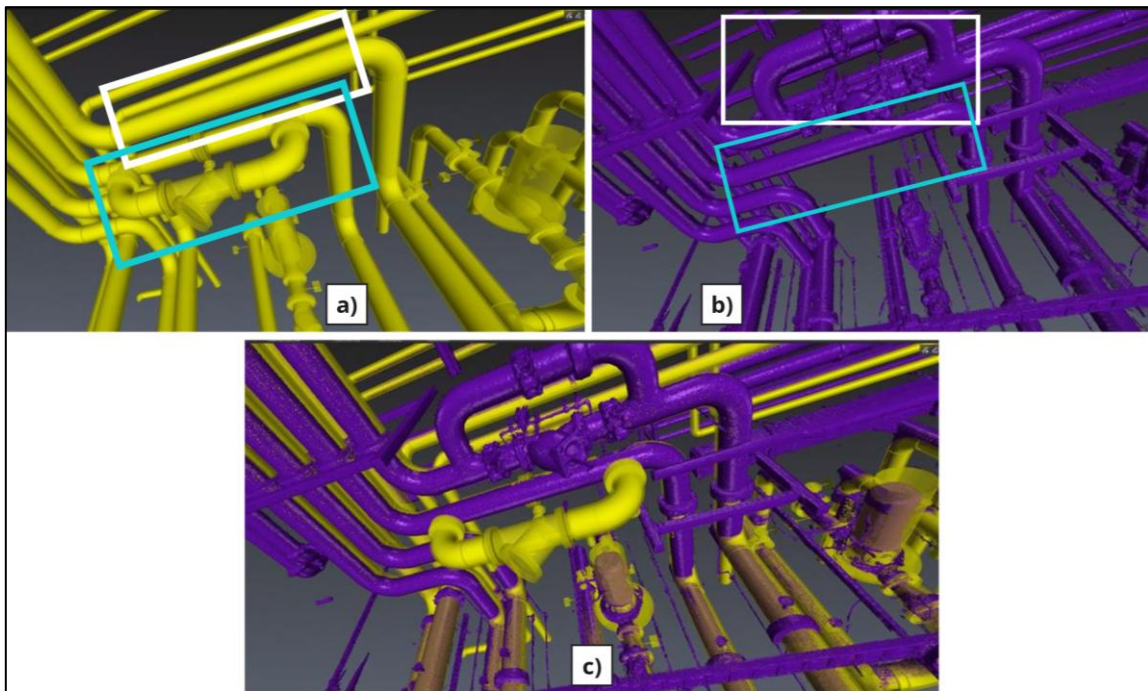


Abbildung 33: Abweichungen der Elemente in der Kältezentrale

Dank der definierten Toleranzen konnten mehrere Abweichungen in den verschiedenen Bauwerken identifiziert werden. In Abbildung 34 ist eine Abweichung am Beispiel von Lüftungselementen aus verschiedenen Perspektiven dargestellt. In (a) ist eine deutliche Abweichung des Drall-Deckenluftdurchlasses erkennbar, dessen Position korrigiert werden muss. In (b) wird die Verschiebung zum Modell (hellblau markiert) um 70 cm klarer sichtbar. In (c) sind die definierten Toleranzen hervorgehoben. Hier zeigt sich, dass ausschliesslich die Lüftungselemente, die hellblau markiert sind, analysiert werden müssen, während die in der Abbildung rot markierte Leitung nicht in die Analyse einbezogen wird, weil sie zu einem anderen Gewerk gehört.

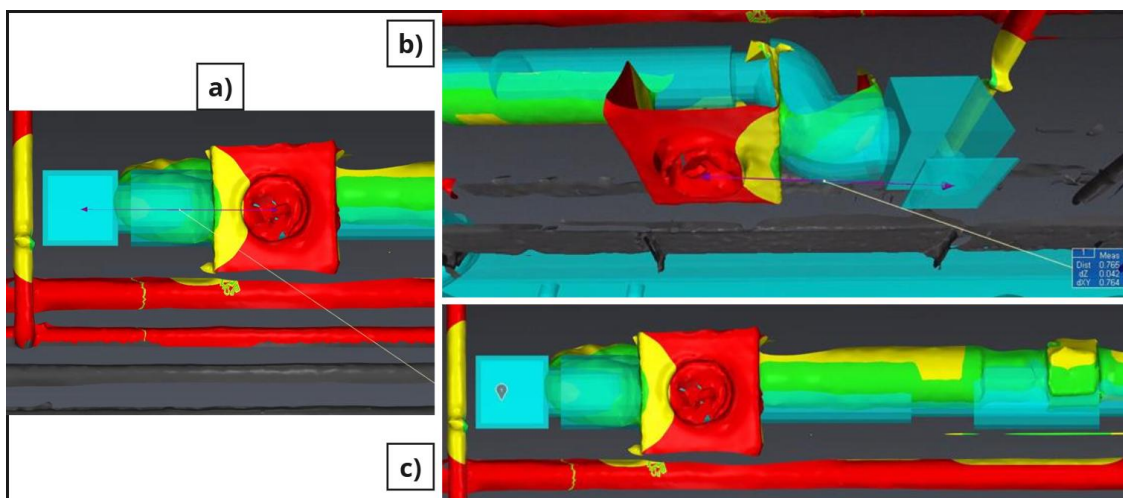


Abbildung 34: Abweichungen von Lüftungselementen.

Auf der untenstehenden Abbildung 35 sind Beispiele weiterer Ergebnisse dargestellt, bei denen Abweichungen identifiziert wurden. Nach demselben Prinzip werden Elemente rot markiert, welche die vorgegebenen Toleranzen nicht einhalten, um danach eine visuelle und manuelle Auswertung zu begünstigen.

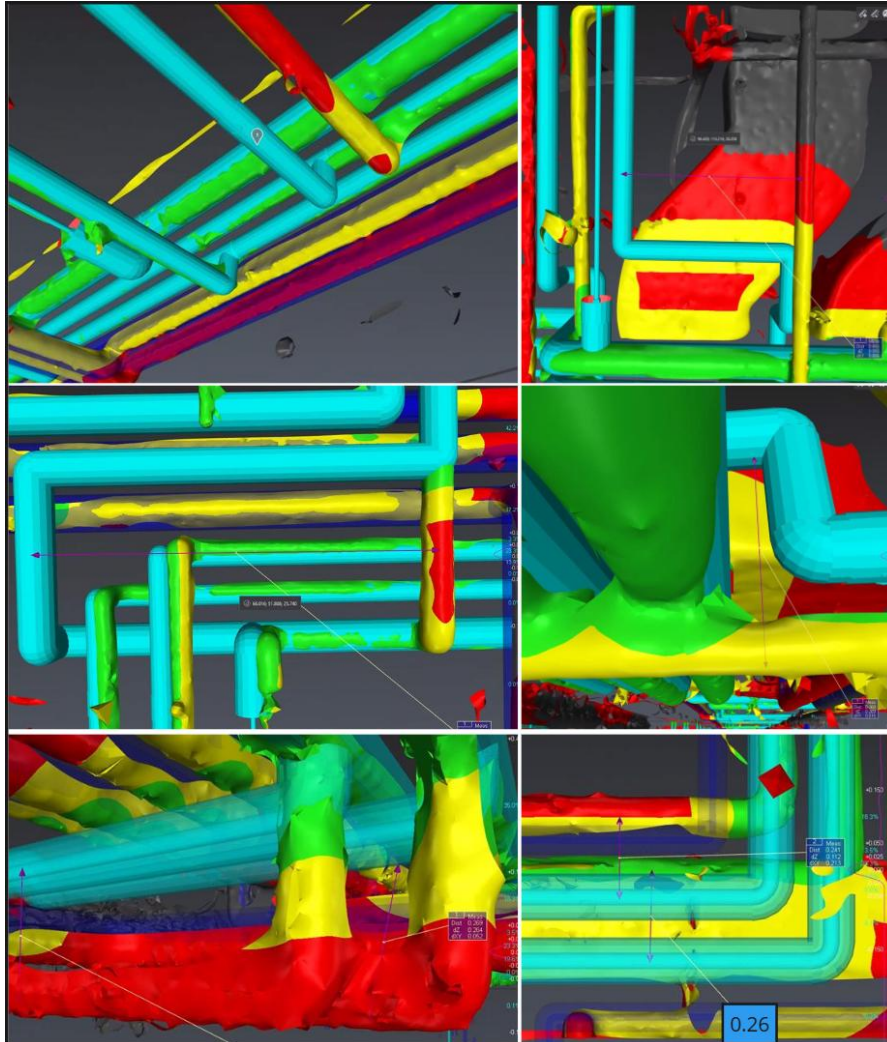


Abbildung 35: Weitere Ergebnisse von Abweichungen.

In speziellen Fällen, wie in der untenstehenden Abbildung 36 dargestellt, bei denen nicht eindeutig erkennbar ist, wohin eine Leitung oder ein Bauelement führt und andere Leitungen die Sicht erschweren, wurde auf die *SiteWalks* von Dalux zurückgegriffen. Durch die Analyse der 360°-Fotos konnten detailliertere Informationen gewonnen und eine präzisere Untersuchung durchgeführt werden. Dies erleichterte eine fundierte Auswertung und eine nachvollziehbare Berichterstattung.

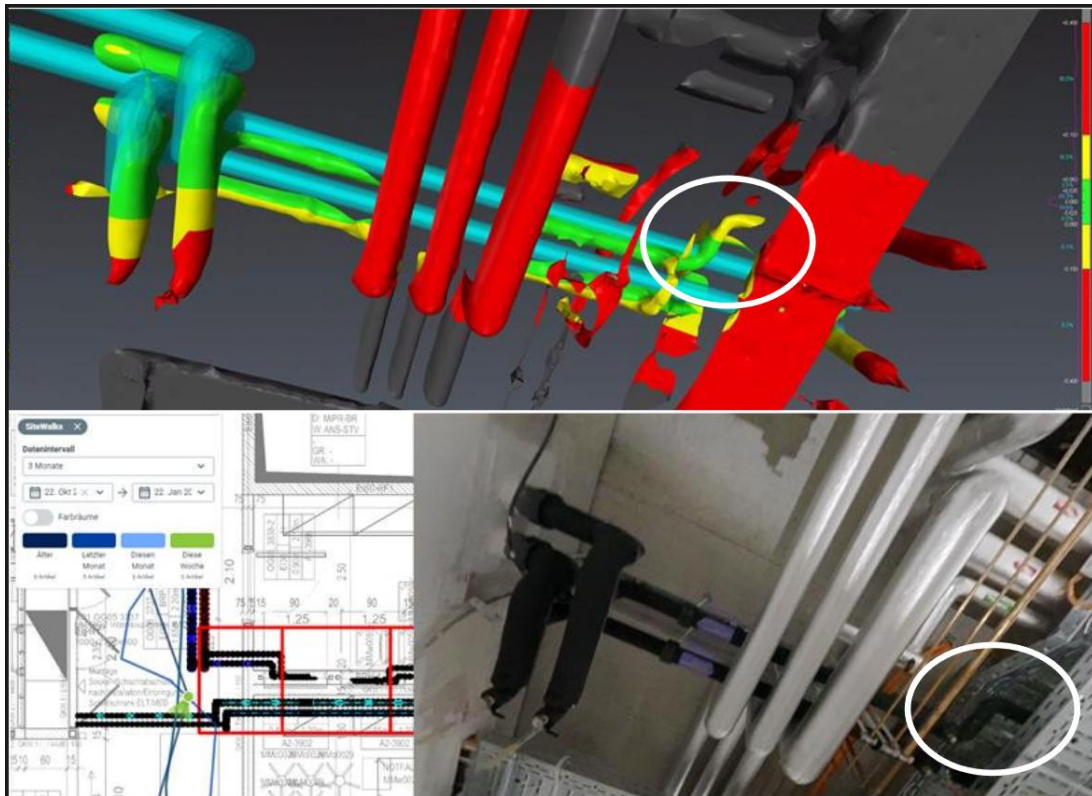


Abbildung 36: Unterstützung mit 360°-Fotos von den SiteWalks für bessere Auswertungen.

Im Fall von engen Leitungen, wie bei Medizinalgasleitungen, erfolgte die Erkennung von Bauabweichungen durch den Vergleich des *BIM*-Modells mit Punktwolken. Diese Methode ermöglichte eine präzisere Analyse und eine genauere Wahrnehmung von Überlappungen. In der untenstehenden Abbildung zeigt (a) eine Seitenansicht, bei der eine Abweichung der Leitung erkennbar ist (durch violetten Pfeil markiert). In (b) ist eine Übersichtsperspektive dargestellt, in der eine weitere Abweichung deutlich sichtbar wird (siehe Abbildung 37).

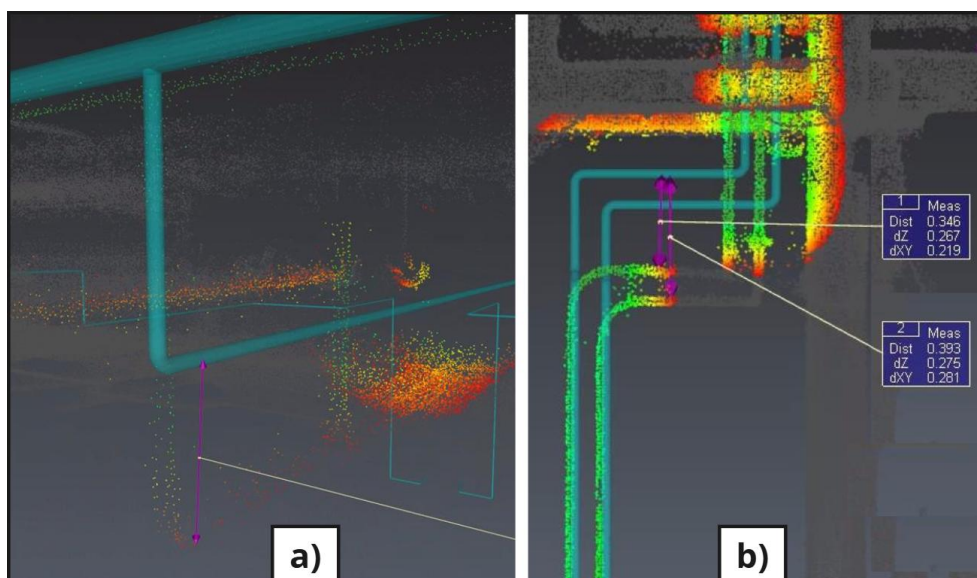


Abbildung 37: Bauabweichungen der Medizinalgasleitungen im Vergleich zwischen *BIM*-Modell und Punktwolken.

Abbildung 38 zeigt exemplarisch die Installationen von Heizungselementen auf einer Fläche von 110 m², bei denen lediglich zehn Abweichungen identifiziert wurden. Diese Anzahl variiert je nach Baustaple, Geschoss und Arbeitsweise der jeweiligen Gewerke; insbesondere abhängig davon, wie konsequent das BIM-Modell als Grundlage für die Bauausführung genutzt wurde.

Das Ziel der BFK besteht nicht darin, möglichst viele Abweichungen zu identifizieren, sondern diese auf ein Minimum zu reduzieren. Eine geringe Anzahl von Abweichungen ist insbesondere dann erreichbar, wenn die ausführenden Gewerke modellbasiert arbeiten und, soweit möglich digitale *BIM*-Technologien zur Montage der Bauelemente einsetzen.

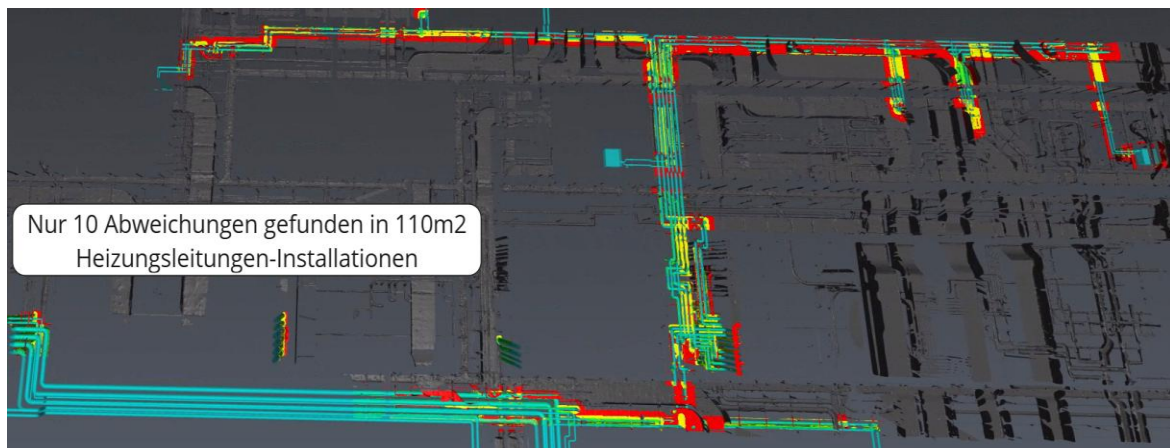


Abbildung 38: Anzahl der identifizierten Abweichungen bei der Installation von Heizungsleitungen (110 m²).

6 Zusätzlich untersuchte Ansätze

Im Rahmen des Konzepts für die automatisierte BFK wurden verschiedene Ansätze untersucht und teilweise getestet. Ziel war die Identifizierung kostengünstiger und zeitsparender Ansätze, deren Integration in den Prozess sowie die Evaluierung ihrer Praxistauglichkeit. Dieses Kapitel beschreibt die analysierten Ansätze, ihre Potenziale sowie die identifizierten Limitationen.

6.1 Anwendung von 3DGS-Apps und LiDAR-Technologie

Verschiedene Anwendungen wurden getestet, die 3DGS und LiDAR-Technologie nutzen und wie der *Laserscanner* funktionieren, darunter Scaniverse, Luma 3D, SiteScape, 3D Scanner App, Polycam und Canvas. Ziel war es, die Potenziale dieser Technologien für die BFK zu evaluieren und ihre Eignung für den Baufortschritterfassungsprozess zu beurteilen.

Testergebnisse

Die getesteten Apps lieferten visuell beeindruckende und detailreiche Darstellungen, insbesondere bei kleineren Bereichen wie einzelnen Räumen. Dank der Kombination von 3DGS und LiDAR-Technologie überzeugten sie mit präzisen Texturen und realistischen Materialdarstellungen.

Trotz ihrer hohen visuellen Qualität offenbarten sich im praktischen Einsatz jedoch Einschränkungen, die ihre Nutzung für eine umfassende BFK erschweren (siehe Abbildung 39):

- **Datenvolumen**

Die erstellten Dateien waren sehr gross, was sowohl die Übertragung als auch die Weiterverarbeitung erschwerte. Die Dateigrösse lag zwischen 300 MB und 600 MB in einem Raum von 15 m² und 4 m Höhe. Diese variiert je nach Detailgrad des *Scans* und der Grösse des Raums. Für die Skalierbarkeit stellt dies ein grosses Hindernis dar.

- **Störende Schatten**

Die Aufnahmen wiesen oft störende Schatten auf, welche die Qualität der Punktwolken beeinträchtigten.

- **Aufnahmefehler durch Bewegungen**

Es war zwar praktisch nur mit dem *Smartphone* aufzunehmen, aber die Bewegungen während der Aufnahme führten dazu, dass bestimmte Bauteile ungenau oder gar nicht erfasst wurden. Die Aufnahmen können nicht mit denjenigen des terrestrischen *Laserscanners* BLK360 verglichen werden, der statisch bleibt und sich 360° horizontal und 270° vertikal drehen kann, was einen umfangreicheren Winkel zum Scannen erlaubt.

- **Hardware-Belastung**

Das *Smartphone* wurde während der Nutzung aller getesteten Apps schnell heiss, was die Aufnahmedauer einschränkte.

- **Aufwand bei grösseren Bereichen**

Während kleine Bereiche oder Räume effizient erfasst werden konnten, war der Aufwand für grössere Bereiche, wie ein komplettes Geschoss, erheblich. Dieser entsprach in etwa dem Zeitaufwand der Aufnahmen eines *Laserscanners*.

- **Übertragung und Nachbereitung**

Die Übertragung der erfassten Daten erforderte zusätzlichen Aufwand. Positiv war jedoch, dass die Ergebnisse in verschiedenen Formaten exportiert werden konnten, was eine weitere Verarbeitung in anderen Softwares erleichterte.

- **Abweichungen bei der Modellintegration**

Die aufgenommenen Punktwolken wurden in die Software 3DR Cyclone hochgeladen, um sie mit dem 3D-Soll-Modell abzugleichen. Dabei zeigte sich, dass die Abmessungen der Punktwolken nicht mit denen des Soll-Modells übereinstimmten. Dies war unerwartet, da die *LiDAR*-Technologie normalerweise präzise geometrische Daten liefern sollte. Die Abweichung ist auf die geringere Präzision der Sensoren in Mobilgeräten im Vergleich zu terrestrischen *Laserscannern* zurückzuführen, was zu einer geringeren Abmessungsgenauigkeit führt. Dies deutet darauf hin, dass diese Anwendungen möglicherweise noch nicht vollständig für die BFK geeignet sind.

Bewertung der Apps

Trotz der Vorteile in der Visualisierung und der Möglichkeit, die Daten weiterzuverarbeiten, ist die Integration von 3DGS in den Bauprozess für die BFK aufgrund der genannten Probleme nicht praktikabel. Die fehlende Übereinstimmung der Punktwolken mit den Soll-Abmessungen stellt insbesondere eine signifikante Limitation dar, weil sie die Genauigkeit und Verlässlichkeit der BFK beeinträchtigt.

Die getesteten Apps eignen sich gut für die Visualisierung von Baufortschritten in kleineren Bereichen. Ihre Anwendung auf grössere Bereiche oder die Integration in umfassende BFK-Prozesse ist jedoch nach *Best Practice* aufgrund von Einschränkungen wie hohem Datenvolumen, Aufnahme Fehlern und geringerer Genauigkeit im Vergleich zu *Laserscannern* derzeit nicht realistisch. Für eine umfassende und präzise BFK bleibt der Einsatz von *Laserscannern* die effektivere Lösung.

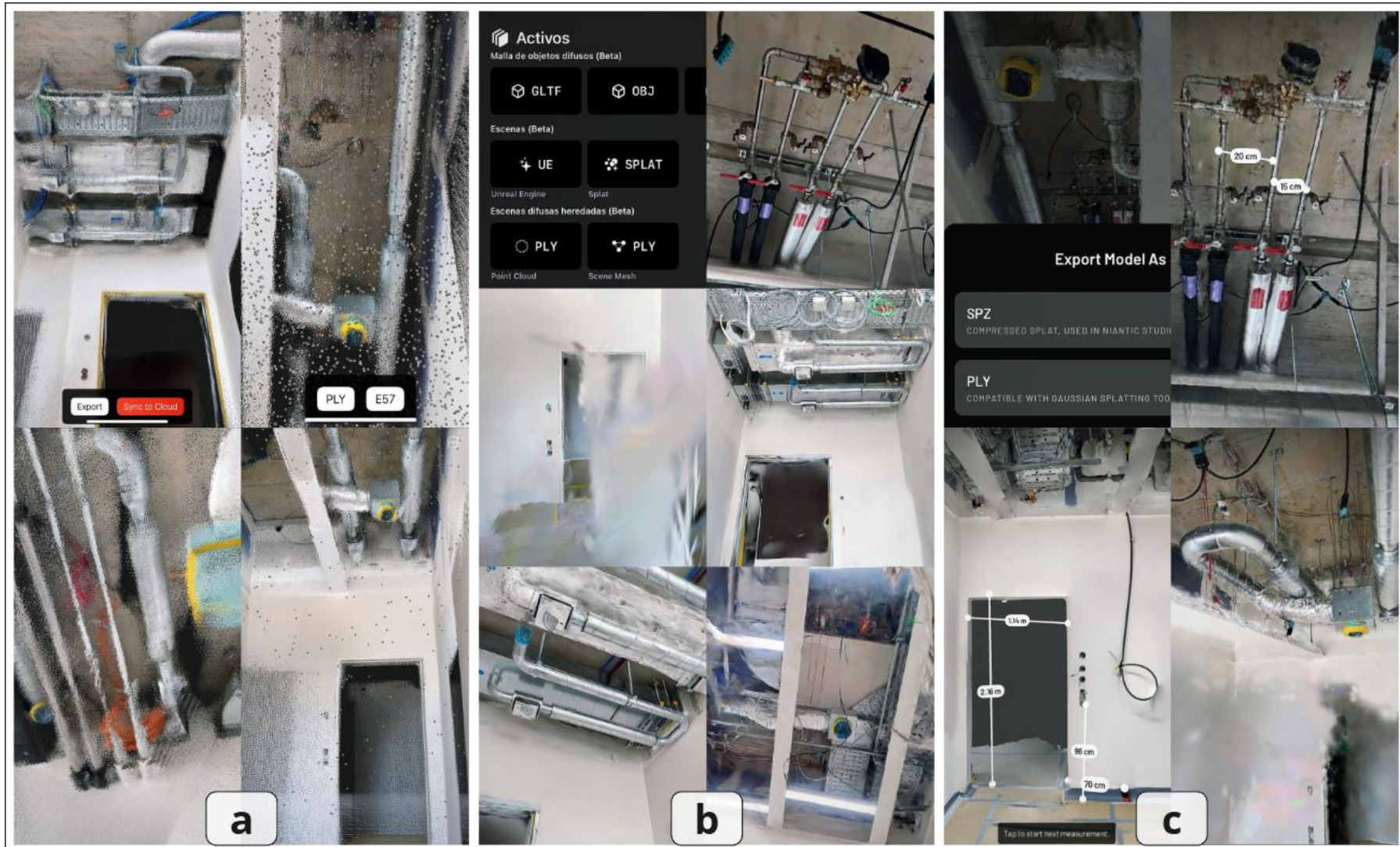


Abbildung 39: Test-Anwendung der Mobil-Apps: a) SiteScape; b) Scaniverse; c) Luma

6.2 Gamma AR-Anwendung

GAMMA AR wurde im Rahmen der BFK als ergänzende AR-Technologie getestet. Die App für *Smartphones* oder *Tablets* lässt eine einfache Übertragung und das Hochladen von *BIM*-Modellen zu, die anschliessend in Echtzeit auf der Baustelle mit der gebauten Umgebung überlagert werden (siehe Abbildung 40). Die intuitive Bedienung und visuelle Praktikabilität erleichtern den Einsatz, insbesondere für Bauleitung und Fachplanende, die einen schnellen Abgleich zwischen Planung und Realität durchführen möchten.

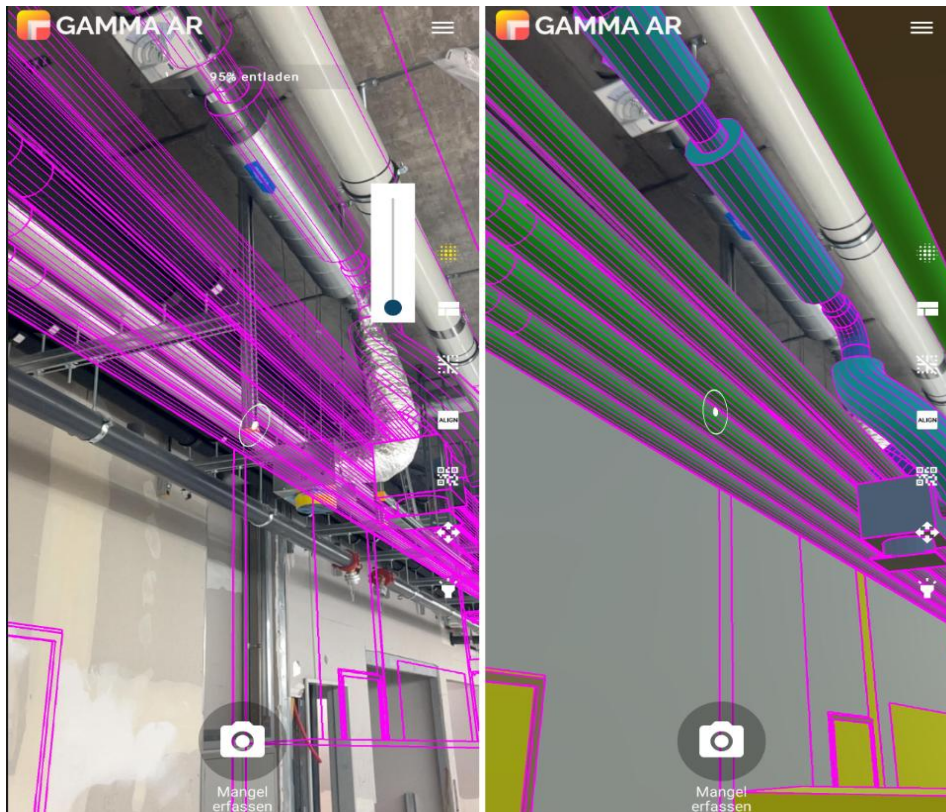


Abbildung 40: Test-Anwendung von GAMMA AR

Testergebnisse

- **Erfassung von Abweichungen und Exportmöglichkeiten**

Ein bedeutender Vorteil ist die Möglichkeit, festgestellte Abweichungen als Pendenzen zu erfassen und im *BCF*-Format zu exportieren. Dadurch können die erfassten Mängel oder Abweichungen nahtlos in andere *BIM*-Softwarelösungen übertragen und weiterverarbeitet werden.

- **Integration in bestehende BIM-Workflows und Softwarekompatibilität**

GAMMA AR erleichtert eine direkte Anbindung an Autodesk BIM 360, Autodesk Construction Cloud und Autodesk Build, was Unternehmen, die diese Plattformen nutzen, eine komfortable Einbindung in ihre bestehenden *BIM*-Prozesse garantiert.

Jedoch nicht alle Bauprojekte arbeiten mit diesen Autodesk-Produkten. Da GAMMA AR aktuell nur diese Plattformen unterstützt, ist die Interoperabilität mit anderen Softwarelösungen eingeschränkt. Dies kann die Flexibilität und Integration in bereits etablierte *Workflows* in solchen Bauprojekten behindern und alternative Softwaresysteme ausschliessen.

- **Instabilität der Referenzierung**

Eine der grössten Herausforderungen bei der Nutzung von GAMMA AR ist die Referenzierungsstabilität. Nach wenigen Minuten verliert das Modell aufgrund von Bewegungen des Geräts (*Smartphone* oder *Tablet*) an Genauigkeit. Dies führt dazu, dass eine ständige Neureferenzierung erforderlich wird, was die Effizienz bedeutsam beeinträchtigt und die Anwendung für eine durchgehende BFK oder Inspektion erschwert.

- **Abhängigkeit von LiDAR-Sensoren**

GAMMA AR ist ausschliesslich mit Geräten kompatibel, die über *LiDAR*-Sensoren verfügen. Diese Sensoren sind essenziell für die exakte Platzierung der BIM-Modelle in der realen Umgebung. Da jedoch nicht alle mobilen Geräte über *LiDAR* verfügen, ist die Nutzung auf eine begrenzte Auswahl an *Smartphones* und *Tablets* beschränkt. Zudem müsste für eine flächendeckende Anwendung in Unternehmen die gesamte Ausrüstung auf *LiDAR*-fähige Geräte umgestellt werden, was hohe zusätzliche Kosten verursachen kann.

Fazit und Potenzial für die Zukunft

GAMMA AR weist grosses Potenzial für die BFK auf, insbesondere durch die visuelle Überlagerung von *BIM*-Modellen, die Pendenz-Erfassung und den *BCF*-Export. Dennoch gibt es wesentliche technische und softwareseitige Einschränkungen, die eine umfassende BFK derzeit erschweren.

Für eine breitere Anwendung wäre es sinnvoll, die Technologie in folgenden Bereichen weiterzuentwickeln:

- Verbesserung der Referenzierungsstabilität, um eine durchgehende Platzierung der Modelle ohne häufige Neuausrichtung zu gewährleisten.
- Erweiterung der Softwarekompatibilität über Autodesk-Produkte hinaus, um eine grösere Flexibilität in bestehenden *BIM-Workflows* zu erleichtern.

6.3 NEXT-BIM-Anwendung

Eine weitere AR-Technologie zur Erkennung von Abweichungen ist NEXT-BIM, die ähnlich wie GAMMA AR funktioniert. NEXT-BIM bietet jedoch das gleiche Produkt in zwei Varianten an: einerseits für die HoloLens-Brille, andererseits für das *Tablet*. Beide Ausführungen werden im Folgenden näher erläutert.

NEXT-BIM als AR-Technologie wurde im BFK-Prozess insbesondere in der zweiten Phase implementiert, um die Leistung der Subunternehmen zu überprüfen und sicherzustellen, dass montierte Bauelemente, wie Elektroinstallationen oder TGA, tatsächlich an den vorgesehenen Positionen angebracht wurden. Dabei geht es primär um die Kontrolle von Höhen und Abständen zwischen Elementen, um Abweichungen frühzeitig zu erkennen und weniger darum, Pen- denzen zu erfassen und im Soll-Modell anzupassen.

6.3.1 AR-Brille-Anwendung

Für die Nutzung dieser Variante von NEXT-BIM ist eine AR-Brille wie die HoloLens erforderlich, um von den AR-Funktionalitäten zu profitieren. Diese gestatten die Überlagerung von *BIM*-Modellen auf die Realität und somit eine direkte Interaktion mit der realen Umgebung. Das Ziel ist nicht die Erstellung einer vollständig virtuellen Welt, sondern eine präzise Verschmelzung digitaler Bauinformationen mit der physischen Baustelle.

Testergebnisse

- **Technische Umsetzung und Anforderungen**

Für die effektive Anwendung ist es notwendig, dass die *BIM*-Modelle vorab in der Software aufbereitet wurden. Dies kann Zeit in Anspruch nehmen, da sowohl die Handhabung der Software als auch der HoloLens erlernt werden muss. Zudem ist für eine effiziente und präzise Kontrolle die Bereitstellung von *BIM*-Modellen der relevanten Baugewerke (z. B. Architekturmodelle) erforderlich. In manchen Fällen müssen die *BIM*-Modelle vereinfacht werden, um eine klare Visualisierung zu unterstützen. Hierfür können Werkzeuge wie SimpleBIM genutzt werden, um nicht benötigte Elemente auszublenden und die Übersichtlichkeit zu verbessern.

Ein weiterer wichtiger Aspekt sind die Lichtverhältnisse auf der Baustelle. Für eine präzise AR-Kontrolle ist eine gute Beleuchtung nötig, da dunkle oder schlecht beleuchtete Räume die Anwendung erschweren. Der Vorteil von NEXT-BIM ist, dass keine Internetverbindung benötigt wird, um *BIM*-Modelle auf der Baustelle zu platzieren, was besonders an Orten mit eingeschränkter Konnektivität vorteilhaft ist.

- **Erfassung und Dokumentation von Bauabweichungen**

Die mit NEXT-BIM identifizierten Abweichungen können als Pendenzen erfasst und im *BCF*-Format exportiert werden. Diese Daten können anschliessend in Revizto oder anderen *BIM*-Kollaborationsplattformen importiert werden, um eine weiterführende Analyse und Bearbeitung durch die Projektbeteiligten zu garantieren. NEXT-BIM unterstützt den *OpenBIM*-Standard und arbeitet mit *IFC*-Dateien für den Modellimport sowie *BCF* für die Anmerkungskommunikation, was die Zusammenarbeit verschiedener Gewerke und Softwarelösungen erleichtert.

- **Nutzungsszenarien und Vorteile**

NEXT-BIM erlaubt mehreren Benutzenden gleichzeitig die Arbeit an komplexen *BIM*-Modellen im *IFC*-Format, sei es im Besprechungsraum oder direkt auf der Baustelle. Während der Bauphase ermöglicht die *AR*-Lösung die automatische und präzise Überlagerung des *BIM*-Modells auf die reale Umgebung in Echtzeit, ohne dass vorherige Vorbereitungen wie das Platzieren von Markern vonnöten sind. Dies erleichtert die Visualisierung geplanter Elemente und trägt zur Vermeidung von Baufehlern bei.

- **Herausforderungen und Risiken**

Trotz der Vorteile bringt die Nutzung von NEXT-BIM auch einige Herausforderungen mit sich. Während der Anwendung mit der HoloLens kann die Sicht auf reale Gefahrenquellen (z. B. herumliegende Baumaterialien, Paletten, Leitern) beeinträchtigt werden. Daher ist es essenziell, die Umgebung vor der Nutzung zu überprüfen und sicherzustellen, dass keine Hindernisse oder Stolperfallen bestehen. Die Einarbeitung in die Software und das Gerät kann ebenfalls zeitaufwändig sein, was eine entsprechende Schulung des Personals erforderlich macht.

Fazit und Potenzial für die Zukunft

NEXT-BIM stellt eine leistungsfähige Lösung für die BFK mit *AR*-Technologie dar. Die Möglichkeit, *BIM*-Modelle ohne Marker auf der Baustelle zu überlagern, Abweichungen effizient zu erfassen und diese in standardisierten Formaten weiterzuverarbeiten, bietet erhebliche Vorteile für Bauprojekte. Dennoch sollten Herausforderungen wie die Einarbeitung in die Software, Lichtverhältnisse und Sicherheitsaspekte beim Tragen der HoloLens berücksichtigt werden. Eine weiterführende direkte Integration mit anderen *BIM*-Plattformen wie Dalux, Revizto, ArchiCAD oder Revit könnte den Anwendungsbereich in Zukunft noch erweitern und eine effizientere Zusammenarbeit erleichtern.

Im KSA-Projekt «Dreiklang» wurde NEXT-BIM in Zusammenarbeit mit Vincent-Victor Häner, *BIM*-Koordinator, eingesetzt. Dabei konnte das System erfolgreich zur Identifikation und

Dokumentation von Bauabweichungen genutzt werden. Die festgestellten Abweichungen wurden als Pendenzen erfasst, im *BCF*-Format exportiert und in Revizto für die weitere Bearbeitung sowie zur Zuweisung der Verantwortlichen importiert. Die Anwendung zeigte, dass NEXT-BIM eine wertvolle Unterstützung bei der Qualitätssicherung und BFK darstellt.

Beispielhafte Darstellungen von erkannten Abweichungen durch die HoloLens

In den folgenden Abbildungen werden Bauabweichungen gezeigt, die mittels einer modellbasierten Qualitätskontrolle identifiziert wurden. Die Analyse erfolgte durch den Abgleich des Ist-Zustands mit dem *BIM*-Modell unter Einsatz von *AR* und modellgestützten Messverfahren.

In Abbildung 41 wird eine Diskrepanz in der Modellierung von Elektrodosen dargestellt. Eine Dose weist eine Positionsabweichung auf, während eine andere im *BIM*-Modell nicht modelliert, aber in der Realität gebaut wurde.



Abbildung 41: Kontrolle der Modellierung von Elektrodosen.

Abbildung 42 zeigt Abweichungen in der Montageposition von Brandmeldern. Die Messungen in (a) und (b) belegen, dass die installierten Sensoren nicht mit den geplanten Positionen im *BIM*-Modell übereinstimmen. Mittels NEXT-BIM können die Abstände quantifiziert und als Pendenzen im *BCF*-Format für die weitere Bearbeitung exportiert werden.

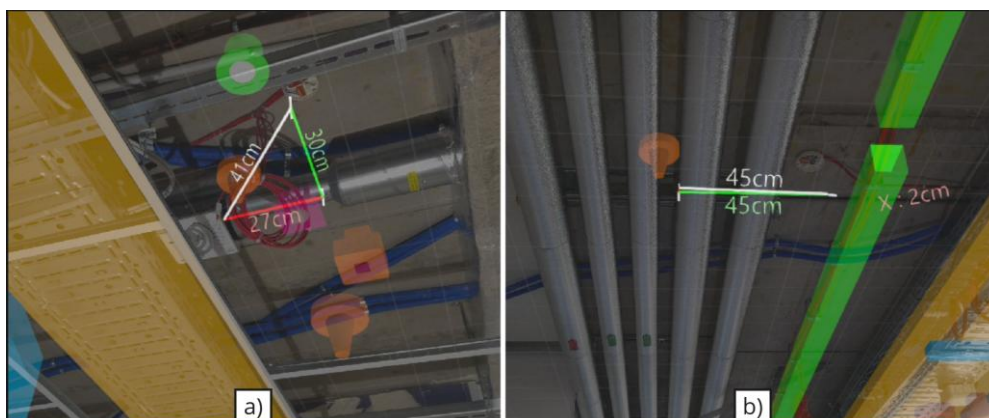


Abbildung 42: Kontrolle der Positionen von Brandmeldern

In Abbildung 43 ist in (a) ersichtlich, dass zwei bauliche Elemente nicht modelliert wurden. Diese Abweichung wurde als Pendezenz dokumentiert und für die Modellanpassung vorgemerkt. In (b) zeigt sich eine fehlerhafte Montageposition einer Elektroverteilung (grün eingefärbt). Dank der Messfunktion von NEXT-BIM konnte die vertikale Abweichung exakt bestimmt werden, um deren Einfluss auf die Gesamtausführung zu bewerten.

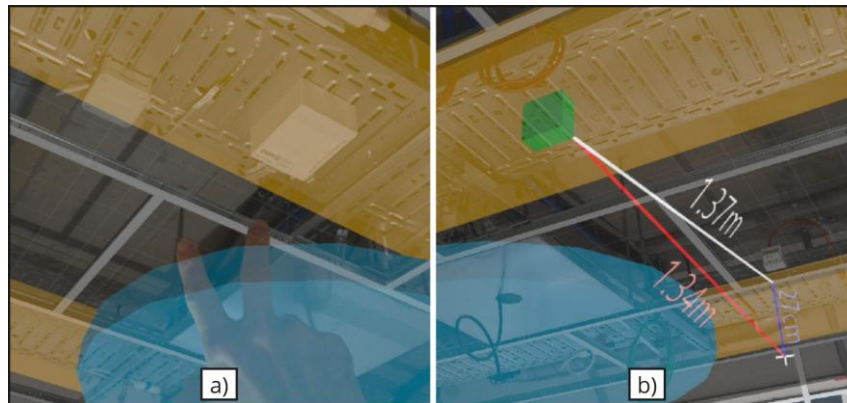


Abbildung 43: Kontrolle der modellierten Elektrokomponenten

Abbildung 44 stellt Abweichungen zwischen dem *BIM*-Modell und dem realen Bauzustand dar. In (a) und (b) wurden Elemente identifiziert, deren Position oder Dimensionierung nicht mit dem Soll-Modell übereinstimmt. Die Abweichungen wurden messtechnisch erfasst und zur späteren Modellanpassung als *BCF*-Export hinterlegt.

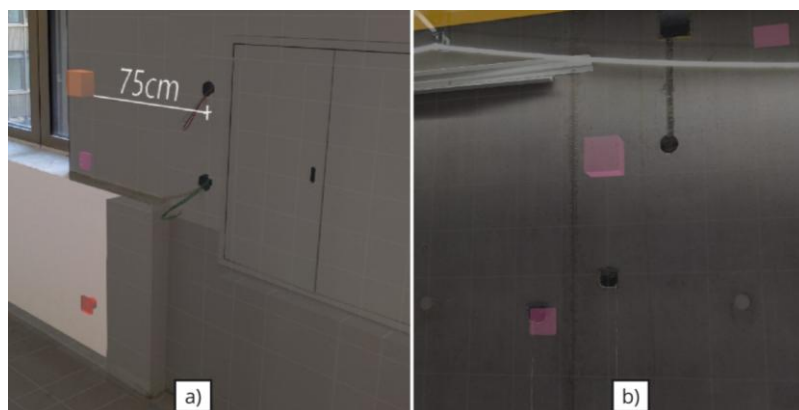


Abbildung 44: Kontrolle der Abstände *BIM*-Modell vs. Ist-Zustand

In Abbildung 45 sind Elektrodosen dargestellt, die in der Modellierung fehlen. Diese wurden als Pendenzen erfasst und zur Korrektur im *BIM*-Modell vorbereitet.

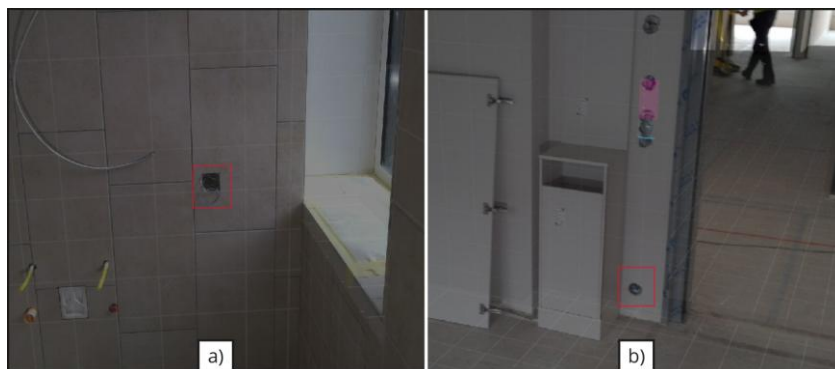


Abbildung 45: Kontrolle der nicht modellierten Elemente

Bauabweichungen konnten durch den Einsatz von AR mit NEXT-BIM-HoloLens effizient identifiziert und visualisiert werden. AR leistet eine direkte Überlagerung des *BIM*-Modells mit der realen Umgebung, wodurch Abweichungen in Echtzeit erkannt und dokumentiert werden können. Diese Methode gewährt einen erheblichen Vorteil gegenüber herkömmlichen Bildaufnahmen oder Punktwolkenanalysen, da sie eine schnellere, interaktive und prozessintegrierte Prüfung der Bauausführung erlaubt.

6.3.2 AR-Tablet-Anwendung

NEXT-BIM hat kürzlich eine neue Version für die Ist-Soll-Zustandsauswertung auf *Tablets* entwickelt, die sich noch in der Beta-Phase befindet. Da im KSA-Projekt «Dreiklang» die HoloLens-Brille Teil des *Workflows* ist, konnte die Beta-Version auf dem *Tablet* ausprobiert und getestet werden. Nachfolgend werden die Ergebnisse anhand von Bildern dargestellt.

In Abbildung 46 (a) ist zu sehen, wie schnell und einfach die Überlappung und Referenzierung der *BIM*-Modelle mit der realen Umgebung erfolgen kann. Mit einfachen Klicks können zwei oder drei Oberflächen des *BIM*-Modells ausgewählt werden. Dank des *LiDAR*-Sensors des *Tablets* erkennt das System das Objekt vor sich und stellt eine intelligente Verknüpfung her. Im Vergleich zur HoloLens geht es schneller, da nur der Bildschirm des *Tablets* angetippt werden muss, anstatt in der virtuellen Welt zu interagieren. Zudem können andere Teammitglieder oder Baubeteiligte den Vorgang ebenso beobachten. Im Vergleich zu GAMMA AR läuft die neue Version von NEXT-BIM deutlich besser, da die Referenzierung präziser ist und länger stabil bleibt – insbesondere der Boden bleibt referenziert, was bei GAMMA AR nach einiger Zeit verzerrt war.

In Abbildung 46 (b) ist eine kleine Abweichung zwischen der digitalen und der realen Welt zu sehen (pinkes Rechteck). Dabei handelt es sich um einen Softwarefehler, da die Türe nicht vollständig überlappt wurde. Dies stellt zwar ein Entwicklungs- und Korrekturpotenzial für NEXT-BIM dar, ist jedoch für eine erste Version minimal und beeinträchtigt die Ist-Soll-Zustandsauswertungen nicht wesentlich.

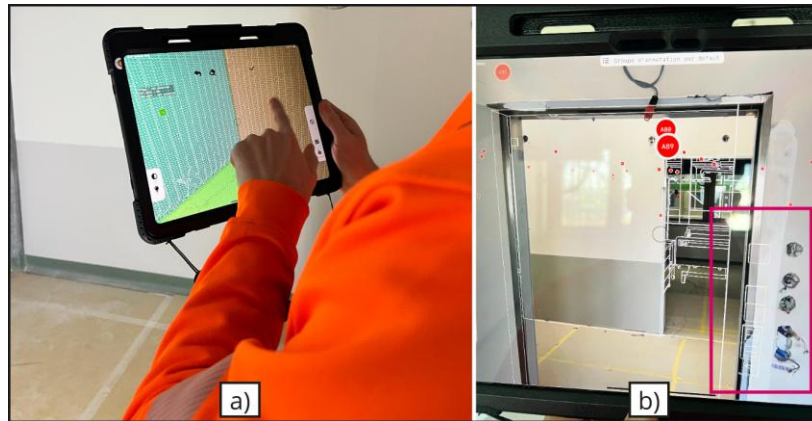


Abbildung 46: Schnelle und präzisere Referenzierung des BIM-Modells mit der realen Umgebung

In den Abbildungen 47 (a) und (b) wird gezeigt, wie ergonomisch die neue Umsetzung ist. Zu Beginn wird festgelegt, welche Elemente kontrolliert werden sollen. Bei einer festgestellten Abweichung kann ein Foto davon gemacht werden, das dann bearbeitet, die Abweichung ausgemessen und gegebenenfalls als Pendenz gespeichert wird. Obwohl das Tragen des *Tablets* an einem langen Arbeitstag anstrengend sein kann, ist dies weniger belastend als das Tragen der *AR-Brille*, bei welcher der Kopf ständig nach oben geneigt werden muss, um Abweichungen zu ermitteln.



Abbildung 47: Ergonomischere Umsetzung dank Tablet

Abbildung 48 zeigt, dass dieselbe Leistung von NEXT-BIM sowohl mit der *AR-Brille* (a) und (b), als auch mit dem *Tablet* (c) erzielt wird, wobei letzteres eine ergonomischere Lösung aufweist.

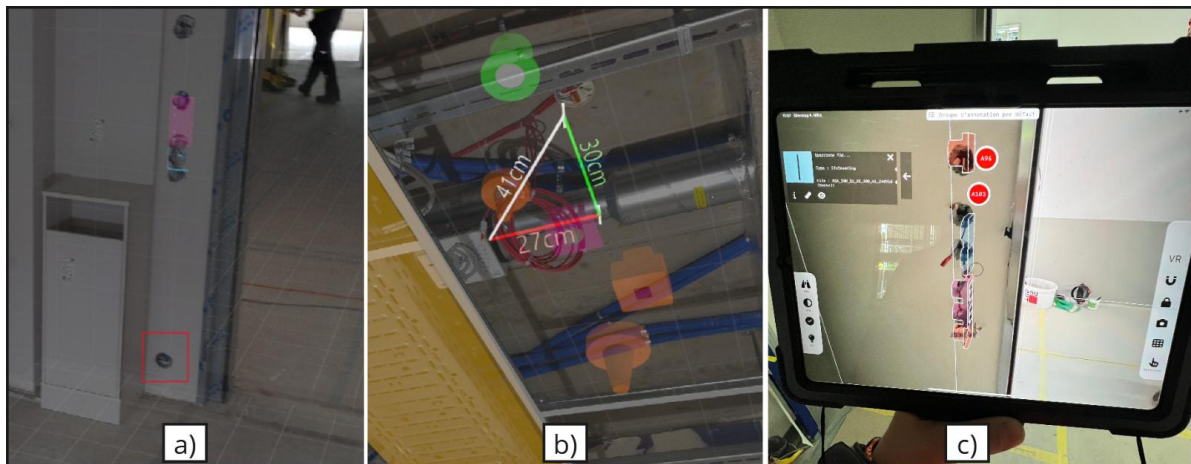


Abbildung 48: Dieselbe Leistung von NEXT-BIM in beiden Versionen (AR-Brille und Tablet)

In Abbildung 49 (a) und (b) wird gezeigt, wie die neue *Tablet*-Variante auch für die HLK-Auswertung genutzt werden kann. Die Baukomponenten sind gut erkennbar und können auch ausgewertet werden.

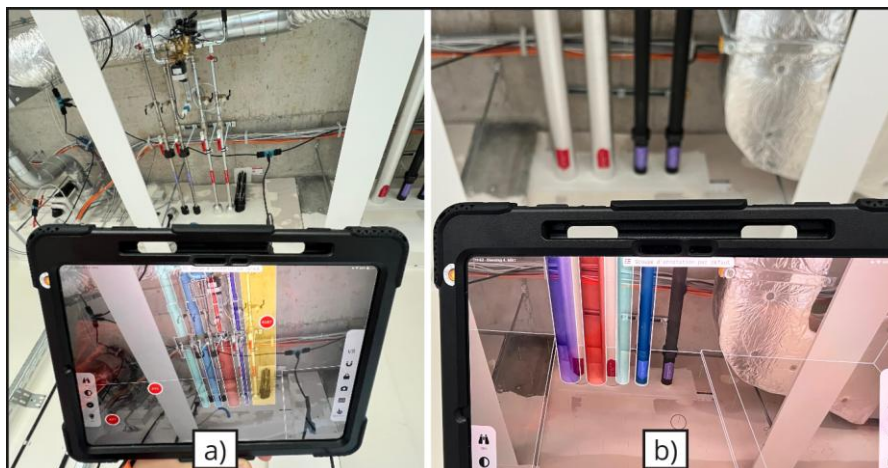


Abbildung 49: HLK-Analyse mit der Tablet-Version

Dieser Ansatz lässt sich nicht direkt mit 3DR Cyclone und Punktwolken vergleichen, da dort die geometrische Auswertung präziser erfolgt. Dennoch können mit der neuen Version Auswertungen durchgeführt und Messungen vorgenommen werden, um Abstände zu überprüfen und sicherzustellen, dass die Projektanforderungen eingehalten werden. In Abbildung 50 sind in (a) die Leitungen des 3D-Modells auf dem *Tablet* durch die Farbintensität gut erkennbar, während in (b) die Objekte des 3D-Modells durch die reduzierte Deckkraft der Farben besser mit der auf dem *Tablet* visualisierten, realen Bauausführung abgeglichen werden können. Wenn Unsicherheiten bestehen, kann das Objekt ausgewählt, ein Foto gemacht und die Abweichung gemessen werden (siehe Abbildung 50 (c)). Diese Schritte sollten für jedes einzelne Objekt durchgeführt werden, wenn mit dem *Tablet* ausgewertet wird. Daher könnte der Aufwand bei der Auswertung grösser werden, was diesen Ansatz für die Auswertung aller Baukomponenten weniger skalierbar macht. Allerdings eignet sich dieser Ansatz gut für

Elektrokomponenten und andere kleine Bauelemente. Die Nutzung von *Laserscannern* bleibt jedoch die beste Option für die Auswertung grosser Projekte im Bereich der HLK-Komponenten, da sie eine bessere Skalierbarkeit und die Erstellung eines digitalen Ist-Zustandsmodells gewährleistet.

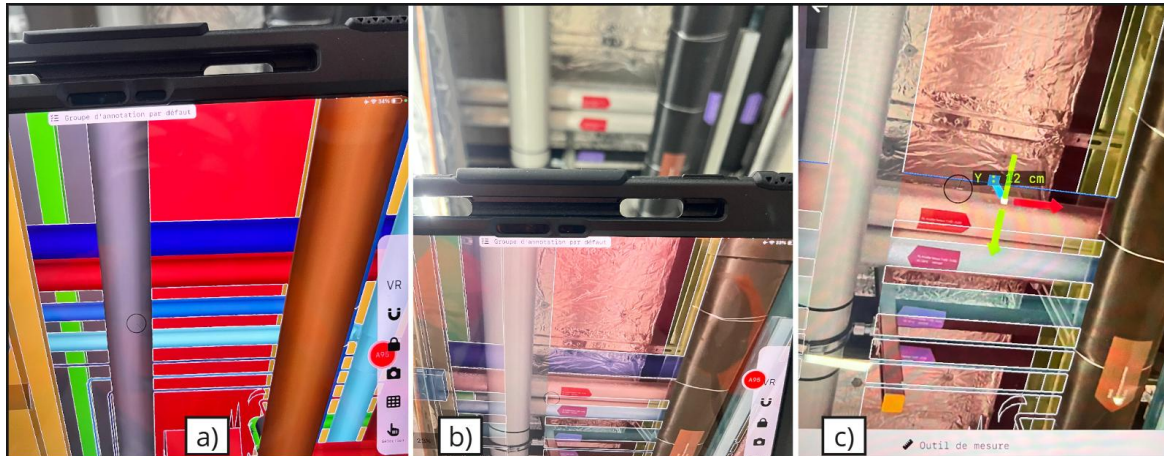


Abbildung 50: Abweichungsauswertung bei HLK-Elementen

In Abbildung 51 (a) ist zu erkennen, wie eine Abweichung gemessen wird, während in (b) die Abweichung ermittelt und als Pendezenz im *BCF*-Format gespeichert wird. Diese Abweichung wird zugewiesen, wenn der Abstand zwischen Ist- und Soll-Modell grösser als 15 cm ist. Diese Prozedur erfordert deutlich mehr Aufwand als in 3DR Cyclone, wo die Abstände automatisch berechnet und farblich markiert werden. Dennoch stellt dieser Ansatz eine gute Möglichkeit für Echtzeit-Auswertungen vor Ort dar.

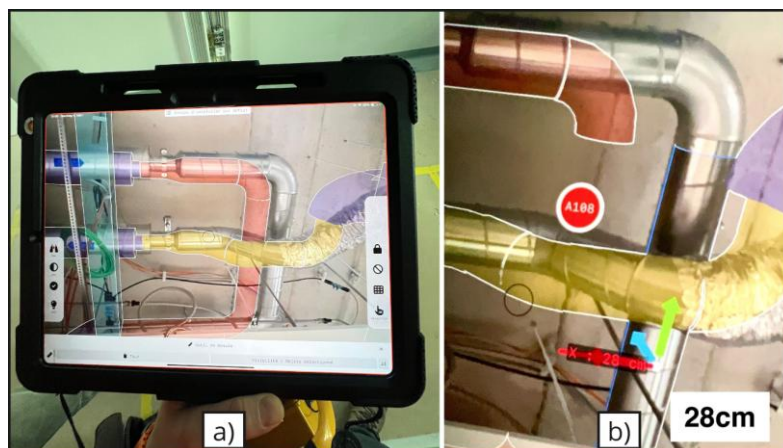


Abbildung 51: Abmessung einer Abweichung

Für eine effiziente Durchführung dieses Ansatzes ist eine enge Zusammenarbeit mit der verantwortlichen Bauleitung im Elektrobereich (siehe Abbildung 52) notwendig. Auf diese Weise können die Elektrokomponenten schnell erkannt, ausgewertet und als Pendenzen gespeichert werden, die dann den entsprechenden Zuständigen zugewiesen werden können.

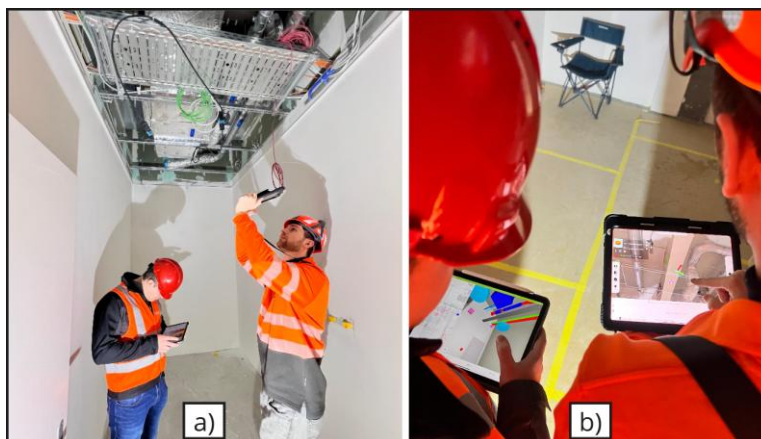


Abbildung 52: Effiziente Zusammenarbeit mit der zuständigen Bauleitung

Vergleich der AR-gestützten Baukontrollen mit anderen Methoden

- **360°-Kameras (z. B. Dalux SiteWalks)**

Diese gestatten eine schnelle visuelle Erfassung des Baufortschritts, bieten jedoch keine Tiefeninformation oder eine direkte geometrische Überprüfung der Bauausführung. Der Abgleich mit dem *BIM*-Modell erfolgt lediglich über statische Bilder, ohne echte räumliche Referenzierung. Eine präzise Positionskontrolle oder Überlagerung mit digitalen Modellen ist nicht möglich.

- **Laserscanning (z. B. BLK360)**

Laserscanner liefern hochpräzise Punktwolken, die eine detaillierte geometrische Analyse ermöglichen, insbesondere für grossflächige Baukomponenten und technische Installationen. Besonders für Leitungen, Trassen, Kanäle und grössere HLK-Elemente ist das Verfahren optimal.

Allerdings bringt *Laserscanning* hohe Datenmengen und einen beträchtlichen Nachbearbeitungsaufwand mit sich:

- Hochauflösende *Scans* sind ausschlaggebend, um kleine Abweichungen präzise zu erkennen, was grosse Speicher- und Rechenkapazitäten beansprucht.
- Die Messgenauigkeit des BLK360 beträgt 4 mm auf 10 m, was für feine Elektrokomponenten oder kleinere Bauabweichungen eine Einschränkung darstellen kann.
- Punktwolken müssen zunächst registriert, bereinigt und mit dem *BIM*-Modell abgeglichen werden, was den Verarbeitungsaufwand merklich erhöht.

- **AR-gestützte Baukontrolle mit NEXT-BIM**

AR stellt einen praxisnahen Ansatz für die BFK bereit, da Modellinformationen direkt in der realen Umgebung überlagert werden:

- Ideal für kleinere Baukomponenten wie Elektrodosen, Verteilerkästen, Entleerungen oder Ventile, die mit *Laserscanning* nur eingeschränkt erfassbar sind.
- Echtzeit-Kontrolle ohne aufwändige Datenverarbeitung, da lediglich das *BIM*-Modell hochgeladen und die Arbeitsdatei für die Prüfung vorbereitet werden muss.
- Effiziente Integration in den Bauprozess, da keine komplexe Nachbearbeitung oder Punktwolkenregistrierung erforderlich ist.

Optimale Verfahrenswahl je nach Baukontrollziel

- *Laserscanning* für grossflächige, geometrische Analysen und die digitale Erfassung von HLK-Systemen und baulichen Strukturen.
- *AR* für intuitive, detaillierte Inspektionen kleinerer Baukomponenten mit direkter Visualisierung in der realen Umgebung.

7 Diskussion

Das ursprüngliche Ziel dieser Masterarbeit war die Prozessarbeit und Machbarkeitsprüfung einer vollständig automatisierten BFK im HLK-Bereich. Im Verlauf der Literaturrecherche und der Ausarbeitung des Ansatzes stellte sich jedoch heraus, dass die aktuell verfügbaren Technologien sowie die im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden Ressourcen eine vollständige Automatisierung nicht zulassen. Stattdessen wurde deutlich, dass es sich vielmehr um einen Prozess handelt, welcher teilautomatisierte Schritte umfasst und durch technologische Weiterentwicklungen fortlaufend ergänzt und optimiert werden kann.

Vor diesem Hintergrund wird die ursprüngliche Vision einer vollautomatisierten BFK im Kapitel 9 (Ausblick) als langfristige Perspektive dargestellt und der damit verbundene Forschungsbedarf näher ausgeführt.

Die nach dieser strategischen Neuausrichtung entwickelte Methode zur BFK im HLK-Bereich basiert auf einem integrativen Ansatz. Sie kombiniert die visuelle Erfassung mittels 360°-Kamera, die kontinuierliche Baufortschrittsanalyse mit Dalux, die präzise Vermessung durch *Laserscanner* sowie die geometrische Abweichungserkennung mit 3DR Cyclone. Der durchgeführte *PoC* hat bestätigt, dass diese Kombination eine praxisnahe und effiziente Lösung für die BFK im HLK-Bereich darstellt. Gleichzeitig hat sich gezeigt, dass trotz technologischer Fortschritte manuelle Kontrollen weiterhin erforderlich sind, um die Einhaltung der geforderten projektspezifischen Toleranzen zu gewährleisten. Diese Erkenntnis verdeutlicht, dass eine vollständige Automatisierung der Entscheidungsprozesse aktuell noch nicht realisierbar ist und menschliche Expertise, insbesondere bei der Validierung und Interpretation von Abweichungen, weiterhin eine wesentliche Rolle spielt.

Ein zentrales Ziel des entwickelten Prozesses ist die Übereinstimmung der digitalen HLK-Modelle mit dem realisierten Bauwerk. Dafür ist es notwendig, Abweichungen zwischen Ist- und Soll-Zustand systematisch zu erkennen, transparent zu dokumentieren und zeitnah an die verantwortlichen Baubeteiligten weiterzuleiten. Gerade im HLK-Bereich, in dem höchste Präzision gefordert ist, ist die Einhaltung der Toleranzen von entscheidender Bedeutung.

Bewertung des Lösungsprozesses

Die Kombination von Dalux und 3DR Cyclone hat sich als besonders wirkungsvoll erwiesen: Während Dalux eine visuelle Grundlage für die rasche Identifikation und Zuweisung von Abweichungen bietet, ermöglicht 3DR Cyclone eine hochpräzise geometrische Auswertung der Punktwolkendaten. Diese Kombination bietet eine tragfähige Grundlage für die Weiterentwicklung vergleichbarer Methoden in künftigen Projekten. Ergänzend wurde der Mehrwert von *AR*-Ansätzen – insbesondere auf *Tablets* – aufgezeigt, welche die Visualisierung der Baukontrolle

auf der Baustelle in Echtzeit unterstützen können, beispielsweise bei der Überprüfung elektrotechnischer Komponenten.

Die entwickelte Methode zeigt, dass durch strukturierte Prozesse in Verbindung mit digitalen Technologien eine signifikante Verbesserung der BFK im HLK-Bereich erzielt werden kann. Der LP zeichnet sich durch hohe Flexibilität und Anpassungsfähigkeit aus und kann auf unterschiedliche Gewerke und Projektanforderungen übertragen werden. Die Verbindung visueller Kontrolle mit präziser 3D-Vermessung bietet eine vielversprechende Perspektive zur Sicherstellung von Genauigkeit und Effizienz in der BFK.

Der *PoC* bestätigt die Wirksamkeit des LP und dessen hohes Potenzial für die Qualitätssicherung im HLK-Bereich. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse liefern wichtige Impulse für die Weiterentwicklung eingesetzter Technologien. Perspektivisch könnten insbesondere KI-basierte Lösungen zur automatisierten Abweichungsanalyse einen wesentlichen Beitrag zur Effizienz- und Präzisionssteigerung leisten.

Insgesamt stellt der entwickelte LP einen zukunftsweisenden Ansatz für die BFK im HLK-Bereich dar. Trotz bestehender Herausforderungen hinsichtlich Datenverarbeitung, Projektdiversität und begrenzter Generalisierbarkeit bietet er eine solide Grundlage für die Weiterentwicklung hin zu einer präziseren, effizienteren und wirtschaftlicheren BFK – im HLK-Bereich und darüber hinaus.

Methodische Fundierung

Der entwickelte LP orientiert sich an bestehenden Methoden zur BFK, wurde jedoch an die spezifischen Anforderungen des HLK-Bereichs angepasst. Dabei wurden gezielt die Ansätze identifiziert, die sich am besten für das Projekt eignen. Zur Bewertung der Methoden wurden unterschiedliche Entscheidungsstrategien eingesetzt: So wurden digitale *BIM*-Tools mit der Methode *MCD*A verglichen, während verschiedene Punktwolkenerfassungsmethoden, wie *Smartphone*-basierte *LiDAR-Scanner* im Vergleich zum Leica BLK360 G2, mittels *CBA* bewertet wurden. Darüber hinaus erfolgte eine *Trial-and-Error*-Analyse zur Punktwolkenauswertung mit verschiedenen 3DGS-Apps (Scaniverse, Luma, SiteScape) und 3DR Cyclone sowie zur Ist-Soll-Auswertung zwischen *AR*-Brille und *AR*-Tablet. Diese fundierten Analysen ermöglichten eine differenzierte Auswahl geeigneter Technologien zur Beantwortung der Forschungsfragen.

Validierung in der Praxis

Ein zentraler Erfolgsfaktor war die enge Zusammenarbeit mit Implenia Schweiz AG als Praxispartner dieser Masterarbeit. Die Integration des entwickelten LP im Rahmen des KSA-Projekts «Dreiklang» in Aarau ermöglichte eine praxisorientierte Validierung. Das Projekt stellt aufgrund seiner hohen Anforderungen an Toleranzgenauigkeit und Skalierbarkeit – insbesondere durch

die Vielzahl verteilter TGA-Elemente über mehrere Etagen – ein ideales Testfeld dar. Daraus ergab sich die Notwendigkeit, einen robusten und skalierbaren Prozess zu entwickeln, der grosse Datenmengen effizient verarbeitet. Neben der digitalen 3D-Erfassung wurde auch die bildbasierte Dokumentation berücksichtigt, um eine umfassende Qualitätskontrolle sicherzustellen.

Technologische und methodische Herausforderungen

Im Rahmen des *PoC* wurden verschiedene Herausforderungen identifiziert – insbesondere hinsichtlich der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Softwarelösungen und der Skalierbarkeit des LP. Die Verarbeitung grosser Datenmengen, beispielsweise bei Punktwolken, kann zu Leistungseinbussen führen, welche die Effizienz der Methode beeinträchtigen können. Dies birgt, insbesondere bei Grossprojekten, Risiken wie Verzögerungen oder erhöhten Ressourcenaufwand. Darüber hinaus erfordert die Implementierung solcher Lösungen in grossem Massstab erhebliche Investitionen in leistungsfähige Hardware und spezialisierte Software. Dies stellt ein Hindernis für eine breite Anwendung dar, besonders für kleinere Unternehmen, die möglicherweise nicht über die notwendigen Ressourcen verfügen, um die Technologie umfassend zu integrieren.

Auch methodische Limitationen wurden im Rahmen der Masterarbeit deutlich: Die Validierung der entwickelten Methode erfolgte auf Basis eines einzigen Projekts, wodurch die Generalisierbarkeit der Ergebnisse eingeschränkt sein kann. Zudem wurde der Fokus auf den HLK-Bereich gelegt, während andere Gewerke nur am Rande berücksichtigt wurden. Auch langfristige Auswirkungen der eingeführten Prozesse auf Projektkosten, Bauzeiten und Teamdynamiken konnten im Rahmen des *PoC* nicht abschliessend untersucht werden.

Beitrag zur Weiterentwicklung des Stands der Technik

Im Vergleich zu bisherigen Ansätzen, die BFK häufig als punktuelle Ist-Soll-Vergleiche am Ende einzelner Bauphasen durchführen, verfolgt diese Masterarbeit einen zweiphasigen, prozessbasierten Ansatz, der sowohl kontinuierliche visuelle Kontrollen mittels 360°-Technologie als auch automatisierte geometrische Analysen mit *Laserscans* integriert. Damit wird nicht nur die Transparenz über den gesamten Bauverlauf erhöht, sondern auch die frühzeitige Erkennung potenzieller Abweichungen systematisiert. Durch die methodische Verknüpfung modellbasierter Planung, realitätsnaher Erfassungsmethoden und kollaborativer Plattformen wie Dalux und Revizto leistet die Masterarbeit einen Beitrag zur Weiterentwicklung des Stands der Technik im Bereich der digitalen BFK, insbesondere im HLK-Ausbau. Sie zeigt, wie technologiebasierte Kontrollprozesse nicht nur die Bauqualität absichern, sondern auch zur Standardisierung übertragbarer Verfahren im Projektmanagement beitragen können.

8 Fazit

Das Ziel dieser Masterarbeit war es, eine effiziente und praxisorientierte Lösung zur Überwachung und Dokumentierung des Baufortschritts im HLK-Bereich zu schaffen, welche moderne Technologien und digitale Anwendungen integriert. Es sei an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen, dass es sich noch nicht um einen vollständig automatisierten BFK-Prozess handelt, sondern vielmehr um eine zweiphasige, praxiserprobte Methode mit teilautomatisierten Schritten, die flexibel angepasst und erweitert werden kann.

Die Beantwortung der zentralen Forschungsfrage – wie eine automatisierte BFK zur Verbesserung der Baustellenabläufe im HLK-Bereich beitragen kann – hat gezeigt, dass durch den klar strukturierten, technologiegestützten Workflow eine Steigerung von Transparenz, Effizienz und Qualitätssicherung erreicht werden kann. In diesem Zusammenhang wurden drei zentrale Aspekte vertieft untersucht: die Eignung spezifischer Technologien für die BFK, die effektive Erfassung und Visualisierung von Abweichungen sowie die Auswirkungen auf die Arbeitsprozesse und die beteiligten Akteure.

Ein strukturierter, übertragbarer und gezielt auf den HLK-Bereich im Innenausbau ausgerichteter Prozess, der bewährte Methoden mit digitalen Tools kombiniert, wurde erfolgreich entwickelt. Dabei erwies sich die Auswahl geeigneter Technologien mithilfe der Methoden *Trial-and-Error*, *MCD*A und *CBA* als zielführend. Die Analyse unterschiedlicher Punktwolkenerfassungsmethoden bestätigte den Nutzen von *Laserscanning* und *AR*-Lösungen für die Überprüfung von Bauausführungen. *Laserscanner* ermöglichen die Erstellung detaillierter geometrischer 3D-Punktwolken, die danach in 3DR Cyclone nachbearbeitet werden, um sie mit dem digitalen Soll-Modell abzugleichen. Die Ergebnisse werden in benutzerfreundlicher Form dokumentiert, wobei Abweichungen zwischen Punktwolken und Soll-Modell automatisch erkannt und im *BCF*-Format weiterverarbeitet werden. Die integrierte Abstandskontrolle der HLK-Elemente (z. B. automatische Markierung von Abweichungen über 15 mm) erlaubt eine frühzeitige Korrektur. Die Ergänzung durch hochauflösende 360°-Bilder schafft eine umfassende visuelle Grundlage für eine nachvollziehbare Fortschrittsdokumentation. In Verbindung mit *BIM*-basierten *Tools* wie Dalux können durch visuelle Kontrolle Abweichungen manuell erfasst und direkt den Verantwortlichen zur Behebung zugewiesen werden. *AR*-Anwendungen unterstützen zudem die Visualisierung und Baukontrolle in Echtzeit sowie die Feststellung von Abweichungen direkt auf der Baustelle.

Durch diese zweistufige Methodik der kontinuierlichen visuellen Kontrolle durch *SiteWalks* sowie der präzisen, geometrischen Endprüfung mittels *Laserscanning* mit optionaler *AR*-Kontrolle schliesst der entwickelte Ansatz eine Lücke bisheriger Methoden und bietet eine skalierbare Lösung für komplexe Bauprojekte, die sowohl den laufenden Fortschritt als auch die

Endabnahme zuverlässig abdeckt. Entscheidend für den Erfolg der BFK ist die Verbindung technologischer Erfassung und teilautomatisierter Kontrolle mit manueller Bewertung durch spezialisierte Fachkräfte.

Die Auswirkungen auf die Arbeitsprozesse im HLK-Bereich sind klar erkennbar. Baubeteiligte profitieren von der erhöhten Genauigkeit, Flexibilität und Schnelligkeit der digitalen Arbeitsweise – von der mobilen Visualisierung über die punktgenaue Datenerfassung bis hin zur Echtzeitanalyse. Die technologischen Möglichkeiten erleichtern die Nachverfolgbarkeit, erlauben die rechtzeitige Einleitung gezielter Korrekturmaßnahmen, reduzieren den Koordinationsaufwand, ermöglichen eine effizientere Zusammenarbeit aller Beteiligten und erhöhen die Transparenz im gesamten Projektverlauf. Auch die Arbeitsqualität profitiert: Eine *BIM*-basierte Bauausführung und die frühzeitige Erkennung von Abweichungen helfen, Fehlerkosten zu minimieren und kostspielige Nachbesserungen zu vermeiden. Im HLK-Bereich ist dies besonders relevant, da hier bei Abweichungen bevorzugt modellhafte Anpassungen vorgenommen werden – bauliche Korrekturen sind aufwändiger und mit höheren Kosten verbunden. Der entwickelte Prozess ermöglicht es, durch den Abgleich von Ist- und Soll-Zustand bereits vor der Deckenmontage gezielt auf Problemstellen zu reagieren und ein belastbares digitales *As-Built*-Modell für die spätere Nutzung im Betrieb und Facility Management zu schaffen.

Neben der Untersuchung möglicher Auswirkungen der BFK auf die Arbeitsprozesse und Baubeteiligte wurden ergänzend erste Überlegungen zu den wirtschaftlichen Auswirkungen angestellt. Zwar erfolgte keine vollständige betriebswirtschaftliche Analyse, dennoch konnte im Rahmen einer groben Berechnung aufgezeigt werden, dass sich durch kontinuierliche Fortschrittserfassung und frühzeitige Korrekturen potenzielle Einsparungen gegenüber herkömmlichen Projekten ohne digitale BFK ergeben könnten. Dieser Aspekt weist auf einen zusätzlichen Nutzen der entwickelten Methodik hin, der in künftigen Untersuchungen weiter vertieft werden sollte.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Umsetzung des LP in der Praxis überwiegend positive Ergebnisse erzielt hat. Der entwickelte Ansatz ist praxisnah, technologiegestützt und skalierbar und bietet eine fundierte Grundlage für zukünftige ähnliche Projekte, die digitale Kontrollsysteme nutzen wollen, um die Ausführungsqualität nachhaltig zu sichern, Abweichungen frühzeitig zu erkennen und die Effizienz zu steigern. Gleichzeitig könnten festgestellte Probleme und Herausforderungen als Ausgangspunkt für laufende Verbesserungen des Prozesses sowie Anpassungen an technologische Fortschritte dienen sowie Gegenstand weiterführender Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sein, welche im folgenden Kapitel näher betrachtet werden.

9 Ausblick

Die in dieser Masterarbeit entwickelte zweiphasige Methode zur BFK im HLK-Bereich könnte durch zukünftige technologische Entwicklungen in den Bereichen *Laserscanning*, KI, AR und Drohnen weiter optimiert und automatisiert werden. Die gewonnenen Erkenntnisse bilden eine solide Grundlage für weiterführende Forschungen und Optimierungen in der praktischen Umsetzung mit der langfristigen Vision einer umfassenden, skalierbaren sowie automatisierten BFK als integraler Bestandteil der Qualitätssicherung auf Baustellen.

Optimierungspotenzial und zukünftige Entwicklungsmöglichkeiten

Um die entwickelte Methode erfolgreich und breitflächig zu implementieren, sind verschiedene Weiterentwicklungen erforderlich, die sowohl technische als auch organisatorische Aspekte betreffen:

Eine wichtige Optimierung wäre die Weiterentwicklung der *Laserscanner*-Technologie. In der Praxis ist insbesondere die Zeit zwischen der Aufnahme und der tatsächlichen Verfügbarkeit der Daten für die Analyse ein kritischer Faktor. Schnellere Sensoren und optimierte Algorithmen zur Verarbeitung und Analyse von Punktwolken könnten die Erfassungszeiten beträchtlich reduzieren und den Gesamtprozess beschleunigen.

Für die Durchführung von *SiteWalks* sollten zukünftig leichtere, ergonomischere Tragesysteme und kompaktere Lichtquellen evaluiert werden, um die Belastung für das Personal zu reduzieren. Zudem wären leistungsstärkere Akkus für die 360°-Kamera von Vorteil, um unterbrechungsfreie Datenerfassungen über mehrere Stunden zu ermöglichen.

Um Leistungsprobleme und Abstürze bei der Arbeit mit grossen Punktwolken in 3DR Cyclone künftig zu vermeiden, sollten vorab eine strukturierte Datensegmentierung und eine etappenweise Analyse der Geschosse implementiert werden. Eine automatische Speicherfunktion in der Software wäre ein zusätzlicher Schutz vor Datenverlusten.

Trotz hoher Genauigkeit wäre eine Weiterentwicklung von 3DR Cyclone in Richtung KI-gestützte Mustererkennung wünschenswert, damit auch kritische Abweichungen zuverlässig identifiziert werden. Zusätzlich wäre es sinnvoll, wenn potenziell kritische Bereiche automatisch markiert würden, um den Fokus der manuellen Kontrolle gezielter zu steuern.

Die derzeitigen Einschränkungen in Dalux, etwa bei präzisen Bildüberlagerungen oder der Messung kleiner Bauteile wie Elektrodoesen, könnten durch gezielte Funktionserweiterungen z.B. *LiDAR* ergänzt werden, damit direkt in den Fotos Abstände gemessen sowie das 3D-Modell mit Fotos überlagert werden können. Eine bessere Interoperabilität zwischen Dalux, 3DR Cyclone und Revizto würde zudem den Informationsfluss stärken und Medienbrüche vermeiden.

Eine stärkere Standardisierung von Abläufen sowie klare Verantwortlichkeiten sind entscheidend für die Übertragbarkeit des Prozesses auf ähnliche Bauprojekte. Durch gezielte Schulungen oder den Einsatz digitaler Assistenten könnten Aufgaben delegiert oder teilautomatisiert werden. Zudem könnten preiswertere Technologien wie Drohnen oder *Smartphones* zur Punktwolkenerfassung sowie kostengünstigere Hardwarelösungen die Einstiegshürden insbesondere für kleinere Unternehmen senken.

Der vollständige Verzicht auf manuelle Kontrolle ist derzeit nicht realistisch. Dennoch können algorithmische Vorschläge und automatisierte Vorselektionen von Abweichungsbereichen dazu beitragen, den Kontrollaufwand für Fachkräfte zu senken. Die Zukunft liegt in der intelligenten Kombination automatisierter Analyseprozesse mit fachlicher Validierung, um Effizienz und Verlässlichkeit in der BFK nachhaltig zu steigern.

Die Analyse der langfristigen Auswirkungen der eingeführten Prozesse auf Projektkosten, Bauzeiten und Teamdynamiken könnte ebenfalls Gegenstand zukünftiger Forschung sein, um die Bedeutung einer umfassenden BFK im übergeordneten Kontext zu bewerten und die Akzeptanz ihrer flächendeckenden Implementierung zu fördern.

Weiterentwicklung hin zur vollständig automatisierten BFK

Neben der Optimierung bestehender Technologien könnte der Einsatz von Drohnen mit 360°-Kameras eine neue Dimension der BFK eröffnen. Die Erfassung des Baufortschritts könnte durch den Einsatz automatisierter oder personengeführter Flugrouten erleichtert werden, wodurch sich eine manuelle Erfassung erübrigen würde. In Ergänzung dazu besteht die Möglichkeit, dass KI durch eine Kombination von *ORB* und semantischer Segmentierung die 360°-Bilder mit dem digitalen Modell abgleicht und daraus eine automatisierte Bewertung des Baufortschritts ableitet.

Eine solche Vision einer automatisierten BFK wurde im Rahmen dieser Arbeit zu Beginn konzipiert, jedoch aufgrund begrenzter Ressourcen, Zeit und fehlender externer Unterstützung schlussendlich nicht umgesetzt. Da es aber ein erfolgsversprechender Ansatz für die weiterführende Entwicklung hin zu einer vollständig automatisierten BFK ist, wird der ursprünglich entworfene Prozess hier grob zusammengefasst und dargestellt. Geplant war die Nutzung eines *Unmanned Aerial Vehicle (UAV)*, also eines autonomen Luftfahrzeugs (z.B. Drohne) oder eines *Unmanned Ground Vehicle (UGV)*, also eines autonomen Bodenfahrzeugs. Dessen Flug- bzw. Fahrroute hätte über die *Application Programming Interface (API)*, also Programmierschnittstelle von Dalux definiert werden müssen. Diese Lösung hätte vorab festgelegte Routen im Innenausbau abfliegen oder abfahren sollen, wobei gleichzeitig Videoaufnahmen und 360°-Fotos erstellt worden wären. Die Bilder hätten automatisch in einem 2D-Plan verortet und gespeichert werden können (siehe Abbildung 53).

Das Ziel dieser Methode war es, eine vollständige Automatisierung des Baufortschritts zu erreichen, die schnell und hochauflösend Baufortschritte durch Fotodokumentation zeigt. Um unkontrollierte Bewegungen der Drohne im Innenausbau – einem Bereich mit hohem Unfallrisiko – zu vermeiden, war geplant, die Flugroute durch die Dalux API präzise zu steuern sowie die Drohne mit VIO- oder SLAM-Technologie auszustatten, um sicherzustellen, dass sie stabil fliegt und Hindernisse auf dem Gelände erkennt und umfliegt.

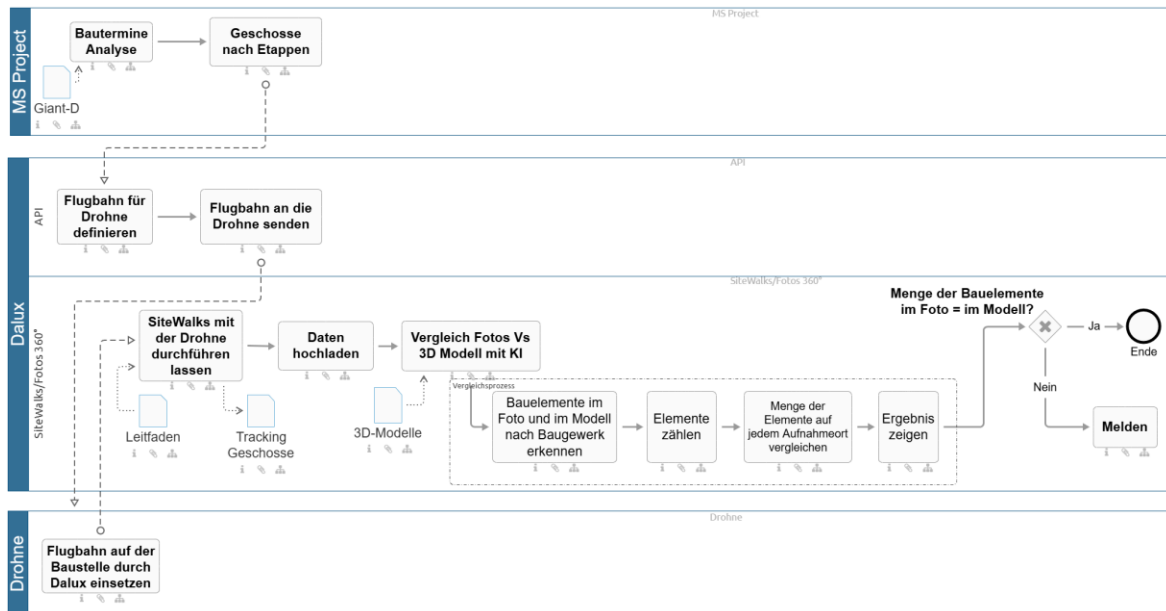


Abbildung 53: Workflow für automatisierte Baufortschrittserfassung und -kontrolle

Die aufgenommenen 360°-Bilder hätten dann zur Erkennung von Abweichungen genutzt werden können. Für die vollständige Automatisierung dieses Prozesses wäre der Einsatz von KI erforderlich, insbesondere durch Techniken wie semantische Segmentierung und Texton-Analyse. Das geplante KI-System hätte mehrere Methoden der CV kombiniert. Zunächst hätte ein speziell trainiertes *Deep-Learning*-Modell, wie ein *CNN*, auf Pixelebene Objekte innerhalb der 360°-Bilder identifiziert und klassifiziert (z. B. Heizungsrohre, Wände, Decken), was eine Analyse von bereits montierten Elementen erlauben würde. Für eine schnelle und präzise Echtzeit-Objekterkennung wurde das *YOLOv11*-Modell als geeignet erachtet, weil es eine hohe Geschwindigkeit und Genauigkeit bietet.

Zusätzlich zur Objekterkennung hätte die semantische Segmentierung verwendet werden können, um Objekte pixelgenau voneinander abzugrenzen. Die Texton-Analyse hätte wiederum Texturen und Materialeigenschaften erkannt, was eine detaillierte Differenzierung zwischen isolierten und nicht isolierten Rohrleitungen ermöglicht hätte. Die für diese Erkennung notwendigen Informationen wären aus annotierten Trainingsdatensätzen, 3D-BIM-Modellen zur Positions- und Dimensionsvalidierung sowie Materialdatenbanken zur Unterscheidung verschiedener Bauelemente (z.B. Rohrtypen) gewonnen worden.

Die erkannten Abweichungen hätten visuell im Bild hervorgehoben und zusätzlich in detaillierten Berichten im Word-, PDF- oder BCF-Format dokumentiert werden können für eine geeignete modellhafte Dokumentation und eine effiziente Kommunikation mit den Baubeteiligten, um Bauabweichungen vollständig zu erfassen (siehe Abbildung 54). Diese KI-gestützte Lösung hätte somit das Potenzial, die BFK im HLK-Bereich sowie in anderen Baubereichen zu automatisieren und zu beschleunigen, wodurch sich der Aufwand von manuellen Kontrollen drastisch reduzieren liesse.

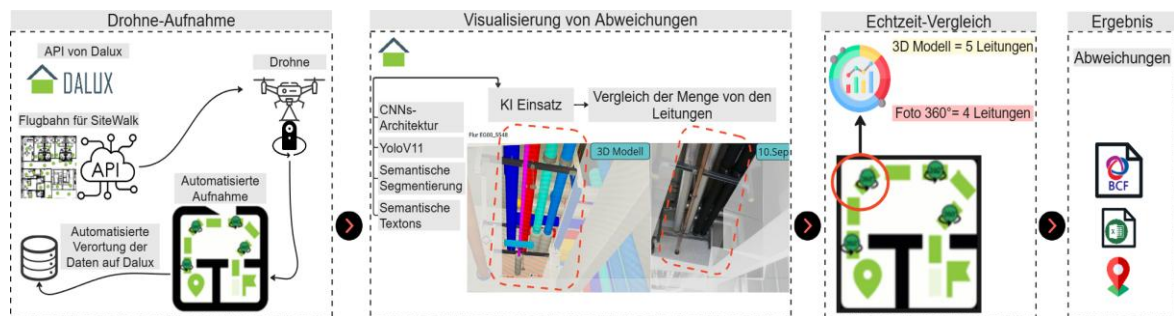


Abbildung 54: Darstellung der automatisierten Baufortschritterfassung und -kontrolle

Herausforderungen, die bei der Umsetzung dieser Lösung womöglich berücksichtigt werden müssten, umfassen die hohe Rechenleistung, die insbesondere für die semantische Segmentierung und Texton-Analyse erforderlich wäre, sowie die umfangreichen Trainingsdatensätze. Um die Effizienz und Skalierbarkeit sicherzustellen, könnte das YOLOv11-Modell für die schnelle Objekterkennung genutzt und bei Bedarf durch detailliertere Analysen mit semantischer Segmentierung ergänzt werden. Ausserdem sollte die Drohne über ausreichend Batteriekapazität verfügen, nicht zu gross sein und geräuscharm arbeiten.

Zum damaligen Zeitpunkt stellte Dalux trotz mehrfacher Anfragen die benötigte API nicht zur Verfügung, weshalb die ursprünglich geplante Methode leider nicht getestet werden konnte. Es bleibt jedoch zu hoffen, dass sich dies künftig ändert und Dalux sein Angebot um weitere technologische Möglichkeiten erweitert. In diesem Fall könnte auch dieser Ansatz wieder aufgegriffen werden, um das Potenzial einer vollständig automatisierten BFK weiter zu erforschen und zu erproben.

10 Literaturverzeichnis

- Airbus, 2021. Virtual reality [WWW Document]. URL <https://www.airbus.com/en/news-room/news/2016-12-virtual-reality> (accessed 2.1.25).
- Akkermann, J., 2023. *Digitalisierung und Ingenieurbaukunst – eine Partnerschaft*. Bautechnik 100, 229–229. <https://doi.org/10.1002/bate.202370503>
- Alizadehsalehi, S., Yitmen, I., 2016. *The Impact of Field Data Capturing Technologies on Automated Construction Project Progress Monitoring*. Procedia Eng., World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium 2016, WMCAUS 2016 161, 97–103. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.504>
- Allgaier, K., 2023. *Heizung, Lüftung, Klimatisierung: Optimieren für einen reibungslosen Betrieb*. Kma - Klin. Manag. Aktuell 28, 21–23. <https://doi.org/10.1055/s-0043-1772665>
- A.S., G., Edayadiyil, J.B., 2022. *Automated progress monitoring of construction projects using Machine learning and image processing approach*, Elsevier Ltd. Elsevier Ltd, pp. 554–563. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.137>
- Asadi, K., Han, K., 2018. *Real-Time Image-to-BIM Registration Using Perspective Alignment for Automated Construction Monitoring*, American Society of Civil Engineers, in: Construction Research Congress 2018. Presented at the Construction Research Congress 2018, American Society of Civil Engineers, New Orleans, Louisiana, pp. 388–397. <https://doi.org/10.1061/9780784481264.038>
- Asadi, K., Suresh, A.K., Ender, A., Gotad, S., Maniyar, S., Anand, S., Noghabaei, M., Han, K., Lobaton, E., Wu, T., 2020. *An integrated UGV-UAV system for construction site data collection*, Elsevier. Autom. Constr. 112, 103068.
- Barazzetti, L., 2016. *Parametric as-built model generation of complex shapes from point clouds*. Adv. Eng. Inform. 30, 298–311. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.03.005>
- Blandini, L., Bechmann, R., Brunetti, M., 2022. *Die Digitalisierung des Planens und Bauens – Ansätze und Ziele*, John Wiley & Sons, Ltd, in: BetonKalender 2022. John Wiley & Sons, Ltd, pp. 725–760. <https://doi.org/10.1002/9783433610879.ch11>
- Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., 2018. *Building Information Modeling: Why? What? How?*, Springer International Publishing AG, in: Building Information Modeling. Springer International Publishing AG, Switzerland, pp. 1–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92862-3_1
- Bosché, F., Ahmed, M., Turkan, Y., Haas, C.T., Haas, R., 2015. *The value of integrating Scan-to-BIM and Scan-vs-BIM techniques for construction monitoring using laser scanning*

- and BIM: The case of cylindrical MEP components*. Autom. Constr., 30th ISARC Special Issue 49, 201–213. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2014.05.014>
- Braun, A., Borrmann, A., Koch, C., 2021. *Automatisierte Baufortschrittserkennung mit BIM*, Springer Fachmedien Wiesbaden, in: Building Information Modeling Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, VDI-Buch. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 563–576. https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4_29
- Braun, A., Tuttas, S., Borrmann, A., Stilla, U., 2015. *Automated Progress Monitoring Based on Photogrammetric Point Clouds and Precedence Relationship Graphs*. <https://doi.org/10.22260/ISARC2015/0034>
- Braun, J., Geibig, O., 2020. *Mehr als nur ein Modell*. Bauingenieur 95, A 14-A 15. <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2020-07-08-14>
- Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR), 2011. Auswirkungen der Planungsmethode Building Information Modelling (BIM) auf die Leistungsbilder und Vergütungsstruktur für Architekten und Ingenieure sowie auf die Vertragsgestaltung [WWW Document]. BBSR. URL https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/forschung/programme/zb/Auftragsforschung/3Rahmenbedingungen/2010/BIM/01_start.html (accessed 11.21.24).
- Cai, Z., Yang, J., Wang, T., Huang, H., Guo, Y., 2024. *3D Reconstruction of Buildings Based on 3D Gaussian Splatting*, Copernicus GmbH. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. XLVIII-4-W10-2024, 37–43. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W10-2024-37-2024>
- Christensen, R., 2022. *Defining More Sustainable and Innovative Solutions Through Choosing by Advantages*. Presented at the 30th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), pp. 588–598.
- ClearEdge3D, 2024. Softwarelösung EdgeWise [WWW Document]. ClearEdge3D. URL <https://de.clearedge3d.com/edgewise/> (accessed 10.26.24).
- Collins, F.C., Ringsquandl, M., Braun, A., Hall, D.M., Borrmann, A., 2022. *Shape encoding for semantic healing of design models and knowledge transfer to scan-to-BIM*, ICE Publishing. Proc. Inst. Civ. Eng. - Smart Infrastruct. Constr. 175, 160–180. <https://doi.org/10.1680/jsmic.21.00032>
- Dalal, A., Hagen, D., Robbersmyr, K.G., Knausgård, K.M., 2024. *Gaussian Splatting: 3D Reconstruction and Novel View Synthesis: A Review*. IEEE Access 12, 96797–96820. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3408318>

- Dalux, 2024a. *Reality Capture*. Dalux. URL <https://www.dalux.com/solutions/reality-capture/> (accessed 4.26.25).
- Dalux, 2024b. *SiteWalk* [WWW Document]. Dalux Help. URL <https://dalux.zendesk.com/hc/es/articles/6693181799324-SiteWalk> (accessed 11.1.24).
- Dalux, 2024c. *SiteWalk*. Dalux. URL https://www.dalux.com/de-ch/dalux-field__trashed/site-walk/ (accessed 11.22.24).
- Dalux, 2024d. *Dalux Field*. Dalux. URL <https://www.dalux.com/de-ch/produkte/dalux-field/> (accessed 11.10.24).
- Dalux Adapts Augmented Reality to Mobile for Construction Industry*, Disco Digital Media, Inc., 2017. . Real Estate Monit. Worldw.
- Deubel, M., 2021. *Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Building Information Modeling (BIM) in der Planungs- und Realisierungsphase von Bauprojekten*. Inst. Für Technol. Manag. Im Baubetr., Karlsruher Reihe Technologie und Management im Baubetrieb 472. <https://doi.org/10.5445/KSP/1000120175>
- Digital Findet Stadt GmbH, 2024. *Technologiereport 2024*. Zehn Schlüsseltechnologien als Innovationsgradmesser der Branche.
- Doxel, 2024a. DOXEL für BIM/VDC [WWW Document]. Doxel.ai. URL <https://doxel.ai/stakeholder/bim-vdc> (accessed 12.1.24).
- Doxel, 2024b. How production rate data keeps your projects on schedule [WWW Document]. Doxel.ai. URL <https://doxel.ai/blog/how-production-rate-data-keeps-your-projects-on-schedule> (accessed 12.1.24).
- Doxel, 2024c. Das Doxel-Produkt [WWW Document]. Doxel.ai. URL <https://doxel.ai/product#work-in-place> (accessed 12.1.24).
- Doxel, 2024d. Doxel branchenübergreifend. Entwickelt für komplexe Projekte in allen Branchen [WWW Document]. Doxel.ai. URL <https://doxel.ai/industries> (accessed 12.1.24).
- Ekanayake, B., Kwok-Wai Wong, J., Ahmadian Fard Fini, A., Smith, P., 2007. *Computer vision-based interior construction progress monitoring: A literature review and future research directions*. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103705>
- Faster, More Accurate As-Built Modeling with EdgeWise*, 2020.
- Faust, A., 2025. *Neue Studie: BIM reduziert Fehlerkosten um über die Hälfte – laut Nutzern*. BauInfoConsult. URL <https://bauinfoconsult.de/neue-studie-bim-reduziert-fehlerkosten-um-ueber-die-haelfte-laut-nutzern/> (accessed 3.21.25).

- GAMMA Technologies, 2024. BIM auf Ihrer Baustelle mit AR [WWW Document]. URL <https://gamma-ar.com/produkt/?lang=de> (accessed 2.2.25).
- Hagen, R., 2023. *Bauprojekte ohne durch Änderungen verursachte Nachträge. Ein Beispiel vom Kantonalen Hochbauamt St. Gallen*. Phase0 - J. Für Integr. Plan. Bau. Betreiben. <https://doi.org/10.21428/71cd88bc.bf982bb5>
- Halter, J., Erdogan, M., 2023. *Akzeptanz und Verbreitung digitaler Technologien bei der Bauausführung*, DuEPublico: Duisburg-Essen Publications online, University of Duisburg-Essen, Germany. Tagungsband Zum 32 BBB-Assist. 2023 04102023 - 06102023 Universität Duisburg-Essen, 135. <https://doi.org/10.17185/DUEPUBICO/79114>
- Ham, Y., Kamari, M., 2019. *Automated content-based filtering for enhanced vision-based documentation in construction toward exploiting big visual data from drones*. Autom. Constr. 105, 102831. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102831>
- HoloBuilder, T., 2023a. *360° Photos: Part of IT's Evolving Role in Oil & Gas*. URL <https://www.holobuilder.com/content-type/casestudy/360-photo-capture-technology-part-of-a-shift-in-it-role-in-oil-gas/> (accessed 11.22.24).
- HoloBuilder, T., 2023b. *BAM Ireland Uses 360° Photos for Progress Management*. URL <https://www.holobuilder.com/content-type/casestudy/bam-ireland-adopts-progress-management-with-360-photo-capture-for-historic-bolands-quay-development/> (accessed 11.22.24).
- HoloBuilder, T., 2023c. *Kajima Enhances Documentation and Processes with 360° Photos*. URL <https://www.holobuilder.com/content-type/casestudy/kajima-uses-360-photos-to-improve-documentation-and-processes-on-construction-projects/> (accessed 11.22.24).
- HoloBuilder, T., 2023d. *Mortenson cut documentation time by 80% with HoloBuilder*. URL <https://www.holobuilder.com/content-type/casestudy/mortenson-reduced-time-spent-on-site-documentation-by-80-and-learned-to-use-holobuilders-360-reality-capture-app-in-minutes/> (accessed 11.19.24).
- Huang, G., 2019. *Visual-Inertial Navigation: A Concise Review*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1906.02650>
- Implenia Schweiz AG, 2020. *Neubau Kantonsspital Aarau «Dreiklang» (KSA)* [WWW Document]. URL <https://implenia.com/referenzen/detail/ref/neubau-kantonsspital-aarau-dreiklang/> (accessed 4.26.25).
- Jann, J., 2019. *Partnerschaftliche Projektentwicklung-Mögliche Lösungen für den schweizerischen Infrastrukturbau*.

- Jung-Lundberg, P.-I.S., 2024. *Building Information Modeling (BIM) bei kleineren Wohnungsbauprojekten: Die Potenziale von BIM in der Anwendung*, 2024th edition. ed, Transformation Im Bauwesen. Springer.
- Kemand, A., Beric, F., 2021. Drohne – Zukunft der Baustelle [WWW Document]. Build-Ing BIM-Fachmag. BIM-Plattf. URL <https://www.build-ing.de/fachartikel/detail/drohne-zukunft-der-baustelle/> (accessed 10.18.24).
- Kerbl, B., Kopanas, G., Leimkuehler, T., Drettakis, G., 2023. *3D Gaussian Splatting for Real-Time Radiance Field Rendering*. ACM Trans. Graph. 42, 1–14. <https://doi.org/10.1145/3592433>
- Kersten, T.P., Lindstaedt, M., 2022. *Geometric accuracy investigations of terrestrial laser scanner systems in the laboratory and in the field*. Appl. Geomat. 14, 421–434. <https://doi.org/10.1007/s12518-022-00442-2>
- Kosel, C., 2022. *Ein Beitrag zur Prozessautomatisierung im Bauprojekt-Controlling*.
- Kropp, C., Koch, C., König, M., 2018. *Interior construction state recognition with 4D BIM registered image sequences*. Autom. Constr. 86, 11–32. <https://doi.org/10.1016/j.aut-con.2017.10.027>
- Künzler, K., Robbi, S., Schuster, A., Schuster, P., 2022. *Technologiereport: Digitalisierung der Bau- und Immobilienbranche*.
- Laserscanning Europe GmbH, 2024. ClearEdge 3D - EdgeWise [WWW Document]. Laserscanning Eur. URL <https://www.laserscanning-europe.com/de/software/clearedge-3d-edgewise> (accessed 10.25.24).
- Laserscanning Europe GmbH, nd. Bestandsmodellierung eines Pumpenraums im Wasserwerk Überlingen am Bodensee [WWW Document]. Laserscanning Eur. URL <https://www.laserscanning-europe.com/de/service-modellierung/modellierung/referenzen/bestandsmodellierung-eines-pumpenraums-im-wasserwerk-ueberlingen-bodensee> (accessed 10.25.24).
- Leica Cyclone 3DR-Scan to Pipe*, 2024.
- Leica Geosystems, 2024a. Leica BLK360 bildgebender Laserscanner [WWW Document]. URL <https://leica-geosystems.com/de-ch/products/laser-scanners/scanners/blk360> (accessed 11.8.24).
- Leica Geosystems, 2024b. Leica Cyclone 3DR [WWW Document]. URL <https://leica-geosystems.com/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-3dr> (accessed 10.26.24).

Leica Geosystems, 2024c. *Leica Cyclone 3DR*.

Leica Geosystems, 2024d. *Leica Cyclone REGISTER 360 PLUS* [WWW Document]. URL <https://leica-geosystems.com/de-de/products/laser-scanners/software/leica-cyclone/leica-cyclone-register-360> (accessed 11.9.24).

Ley, K., 2024. *Es war klar, dass diese Technologie Projekte im Bereich Remote- Management, Überwachung und Verifizierung unterstützen kann*. openspace.ai.

Lin, H.-Y., Zhan, J.-R., 2023. *GNSS-denied UAV indoor navigation with UWB incorporated visual inertial odometry*. *Measurement* 206, 112256. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112256>

Malkwitz, A., Schlüter, D., 2019. *Digitales Planen und Bauen*, Springer Fachmedien, in: Zilch, K., Diederichs, C.J., Beckmann, K.J., Gertz, C., Malkwitz, A., Moormann, C., Urban, W., Valentin, F. (Eds.), *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit*. Springer Fachmedien, Wiesbaden, pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/978-3-658-21749-5_11-1

Masson, D., Vermeulen, J., Fitzmaurice, G., Matejka, J., 2022. *Supercharging Trial-and-Error for Learning Complex Software Applications*, Association for Computing Machinery, in: *Proceedings of the 2022 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems, CHI '22*. Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, pp. 1–13. <https://doi.org/10.1145/3491102.3501895>

Mesároš, P., Mandičák, T., Behúnová, A., 2022. *Use of BIM technology and impact on productivity in construction project management*, Springer US. *Wirel. Netw.* 28, 855–862. <https://doi.org/10.1007/s11276-020-02302-6>

Neb, A., Remling, D., 2019. *Quantification and Evaluation of Automation Concepts based on a Multi-Criteria Decision Analysis*. *Procedia CIRP*, 29th CIRP Design Conference 2019, 08-10 May 2019, Póvoa de Varzim, Portugal 84, 624–629. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.321>

NEXT-BIM, 2024. *Solución inmersiva y colaborativa para BIM* [WWW Document]. -BIM. URL <https://next-bim.com/es/next-bim-solution-immersive-et-collaborative-pour-le-bim-espanol/> (accessed 2.2.25).

Omar, T., Nehdi, M.L., 2016. *Data acquisition technologies for construction progress tracking*. *Autom. Constr.* 70, 143–155. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.06.016>

OnSiteIQ, 2024a. *OnsiteIQ Helps The Moinian Group Monitor their Development Pipeline of Premier Residential, Commercial, and Hospitality Projects* [WWW Document]. OnsiteIQ. URL <https://onsiteiq.io/stories/the-moinian-group/> (accessed 10.2.24).

- OnSiteIQ, 2024b. Captur real progress [WWW Document]. OnsiteIQ. URL <https://onsiteiq.io/product/> (accessed 12.30.24).
- OpenSpace, 2025a. *Die 360°-Realitätserfassung im Bauwesen*.
- OpenSpace, 2025b. Die Technologie hinter unserer Software - OpenSpace Capture [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/die-technologie/> (accessed 2.21.25).
- OpenSpace, 2024a. Exyte - Weniger Reiseaufwand & mehr Sicherheit mit OpenSpace [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/ressourcen-infos/fallstudien/exyte-weniger-reiseaufwand-und-mehr-sicherheit-auf-der-baustelle-mit-openspace/> (accessed 11.29.24).
- OpenSpace, 2024b. OpenSpace improves JLL project delivery through faster, more complete documentation [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/resources/case-studies/openspace-improves-jll-project-delivery-through-faster-more-complete-documentation/> (accessed 11.29.24).
- OpenSpace, 2024c. Projekt Kraft wechselt zur Baustellenerfassung mit OpenSpace [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/ressourcen-infos/fallstudien/innenausbauprofi-projekt-kraft-wechselt-zu-lueckenloser-baustellenerfassung-mit-openspace/> (accessed 11.29.24).
- OpenSpace, 2024d. Wie intec mit OpenSpace die Installation von Millionen Solarpanels erfasst [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/ressourcen-infos/fallstudien/wie-intec-mit-openspace-die-installation-von-millionen-solarpanels-erfasst/> (accessed 11.29.24).
- OpenSpace, 2024e. Baufortschritt automatisch nachverfolgen | OpenSpace Track [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/produkte/track/> (accessed 11.28.24).
- OpenSpace, 2024f. OpenSpace in Zusammenarbeit mit Skanska und BIMvirtual [WWW Document]. OpenSpace. URL <https://www.openspace.ai/de/ressourcen-infos/fallstudien/openspace-skanska-und-bimvirtual-aufbruch-in-das-zeitalter-des-bilddatengestuetzten-bauens/> (accessed 11.28.24).
- Pan, Y., Zhang, L., 2021. *Roles of artificial intelligence in construction engineering and management: A critical review and future trends*. Autom. Constr. 122, 103517. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103517>
- Patil, A.K., Holi, P., Lee, S.K., Chai, Y.H., 2016. *An adaptive approach for the reconstruction and modeling of as-built 3D pipelines from point clouds - ScienceDirect*.

- PlanRadar GmbH, 2025. Die Kosten für Nacharbeiten im globalen Baugewerbe [WWW Document]. PlanRadar. URL <https://www.planradar.com/de/ebooks/nacharbeit/> (accessed 3.21.25).
- Rabbani, T., van den Heuvel, F.A., Vosselman, G., 2007. *Segmentation of point clouds using smoothness constraint*. ISPRS Comm. V Symp. Image Eng. Vis. Metrol. 22, 94–96. <https://doi.org/10.1111/j.1477-9730.2007.00418.x>
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., Teicholz, P., 2018. *BIM Handbook A Guide to Building Information Mode*, 3. ed, Third edition. Wiley, Hoboken, New Jersey :
- Schlenger, J., Pfitzner, F., Braun, A., Vilgertshofer, S., Borrmann, A., 2023. *Digitaler Zwilling Baustelle – Baustellenüberwachung zur automatisierten Zeit- und Kostenkontrolle*. Bautechnik 100, 190–197. <https://doi.org/10.1002/bate.202300005>
- Schöttle, A., Gigler, L.M., Mingle, B., 2019. *From Concept Development to Implementation: Choosing by Advantages Across an Organization*. Presented at the 27th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC), pp. 987–998.
- Sims, D., 1994. *New realities in aircraft design and manufacture*. IEEE Comput. Graph. Appl. 14, 91-. <https://doi.org/10.1109/38.267487>
- Tang, P., Huber, D., Akinci, B., Lipman, R., Lytle, A., 2010. *Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques*. Autom. Constr. 19, 829–843. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.06.007>
- Tao, B., Bosché, F., Li, J., 2024. *Mixed Reality-based MEP construction progress monitoring: Evaluation of methods for mesh-to-mesh comparison*. Autom. Constr. 168, 105852. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105852>
- Wallmüller, E., 2017. *Praxiswissen Digitale Transformation-Den Wandel verstehen, Lösungen entwickeln, Wertschöpfung steigern*.
- Wang, J., Lindenbergh, R., Menenti, M., 2017. *SigVox – A 3D feature matching algorithm for automatic street object recognition in mobile laser scanning point clouds*. ISPRS J. Photogramm. Remote Sens. 128, 111–129. <https://doi.org/10.1016/j.isprs.2017.03.012>
- Wortmann, T., Herschel, M., Staab, S., Tarín, C., 2022. *AI for AEC: KI für Bauplanung und Bau*. Bautechnik 99, 711–719. <https://doi.org/10.1002/bate.202200070>
- Xu, Z., Feng, Z., Babaeian Jelodar, M., Guo, B.H.W., 2024. *Augmented reality applications in construction productivity: A systematic literature review*. Adv. Eng. Inform. 62, 102798. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102798>

Zenners, L., 2022. *Automatisierte Baufortschrittsermittlung und -kontrolle*, Hochschule für Architektur, Bau und Geomatik FHNW.

Zhou, Y., Yu, Z., Ma, Z., 2021. *The Realtime Indoor Localization Unmanned Aerial Vehicle*, Springer, in: Sun, F., Liu, H., Fang, B. (Eds.), *Cognitive Systems and Signal Processing*. Springer, Singapore, pp. 56–70. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2336-3_5

11 Anhang

Anhang 1: Nutzung von KI-Assistenzsystemen.....	110
Anhang 2: BIM-Tools-Vergleich zur BFK-Erfassung und -Auswertung mittels MCDA	111
Anhang 3: Methodenvergleich zur Punktwolkenerfassung mittels Choosing By Advantages (iPhone vs. Laser BLK360 G2)	114
Anhang 4: Methodenvergleich zur Punktwolkenauswertung mittels Trial-and-Error (3DGS-Apps vs. 3DR Cyclone).....	117
Anhang 5: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels Trial-and-Error (AR-Brille vs. AR-Tablet)	119
Anhang 6: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels CBA (3DGS vs. Laserscanner vs. Kamera 360° vs. AR).....	120
Anhang 7: Zeiterfassung von SiteWalks, Laserscanning und mögliche Kosteneinsparungen in Phase Zwei	123
Anhang 8: Leitfaden Register (Leica).....	129
Anhang 9: Leitfaden 3DR Cyclone (Leica)	130

Anhang 1: Nutzung von KI-Assistenzsystemen

Assistenzsystem	Stelle(n) in der Arbeit	Art des Einsatzes
deepL/Write	Ganze Arbeit	Übersetzung, Textoptimierung, Input und Output von Gedanken und deren Verbesserung, Schreibfehlerbehebung, schriftliche Eloquenz.
LanguageTool	Ganze Arbeit	Textbearbeitung, Formatierung, Schreibfehlerbehebung.
Elicit	Ganze Arbeit	Forschungsunterstützung, Datenanalyse, Input und Output von Gedanken und deren Verbesserung.
ChatGPT	Ganze Arbeit	KI-Assistenz, Formatierung, Input und Output von Gedanken und deren Verbesserung, Textoptimierung, Vorschläge zur schriftlichen Eloquenz.
ChatPDF	Ganze Arbeit	PDF-Analyse, Inhaltsabfragen.
Gemini	Ganze Arbeit	KI-Optimierung, Datenauswertung, Textoptimierung, Vorschläge zur schriftlichen Eloquenz.
Leo	Ganze Arbeit	Wörterbuch, Sprachübersetzung

Anhang 2: BIM-Tools-Vergleich zur BFK-Erfassung und -Auswertung mittels MCDA

Um die verschiedenen *BIM*-Tools hinsichtlich ihrer Eignung für die automatisierte BFK zu vergleichen, wurde die Methode der Multi-Kriterien-Entscheidungsanalyse (*MCDA*) angewendet. *MCDA* ist eine Entscheidungstechnik, die es erlaubt, mehrere Kriterien gleichzeitig zu bewerten und zu gewichten, um die beste Lösung aus einer Auswahl zu bestimmen (Neb & Remling, 2019).

Für diese Analyse wurden Kriterien ausgewählt, die auf den Informationen der Webseiten der Tools und den allgemeinen Nutzerfeedbacks basieren und für die automatisierte BFK von besonderem Interesse sind.

Die Bewertung umfasst technische Merkmale wie die Möglichkeit, 360°-Fotos auf 2D-Plänen zu hinterlegen, Video-Rundgänge durchzuführen, BFK zu unterstützen sowie die Integration von *LiDAR* und Drohnen mit 360°-Kameras. Die *MCDA* berücksichtigt zudem Aspekte wie Benutzerfreundlichkeit, Integration in bestehende Systeme, Kundenzufriedenheit und Kosten. Abgesehen von Dalux wurden die in der Tabelle erwähnten *BIM*-Tools hauptsächlich wegen den Kosten nicht getestet, sondern anhand deren Webseite und *Study Cases* analysiert. Die erstellte Tabelle weist eine strukturierte Übersicht auf und hilft, die Vor- und Nachteile der einzelnen Tools zu erkennen (siehe Tabelle 5).

Berücksichtigte Kriterien:

- **Funktionalität:** Bewertet, welche spezifischen Funktionen jedes *BIM*-Tool bietet, z.B. 360°-Fotos, *BIM*-Integration, und Dokumentation.
- **Benutzerfreundlichkeit:** Bezieht sich auf die Einfachheit der Nutzung der Software, wie schnell und intuitiv Benutzer auf die benötigten Funktionen zugreifen können. Dies wurde anhand der Erfahrungen der Kunden betrachtet.
- **Integration:** Wie gut das Tool in bestehende Arbeitsabläufe integriert werden kann, z.B. die Möglichkeit, mit anderen Softwarelösungen (z.B. *BIM*-Software oder Cloud-Services) zusammenzuarbeiten.
- **Kundenzufriedenheit:** Bezieht sich auf Bewertungen und Rückmeldungen von Nutzenden, welche die Software verwenden, und gibt einen Hinweis darauf, wie zufrieden die Anwendenden mit dem Tool sind.
- **360°-Fotos auf 2D-Plan hinterlegen:** Die Möglichkeit, 360°-Fotos direkt auf den 2D-Bauplänen zu platzieren, um die Dokumentation des Fortschritts zu erleichtern und die Visualisierung zu verbessern.

- **Rundgänge mit Video & 360°-Fotos:** Tools, die dafür sorgen, sowohl 360°-Fotos als auch Videos von der Baustelle zu erstellen und als Rundgang darzustellen, um den Baufortschritt zu dokumentieren.
- **Vergleich zwischen 360°-Fotos und *BIM*-Modellen:** Die Möglichkeit, 360°-Fotos direkt mit dem digitalen *BIM*-Modell zu vergleichen, um Abweichungen zu erkennen und gegebenenfalls Anpassungen vorzunehmen.
- **LiDAR-Nutzung / Scannen:** Die Fähigkeit des Tools, *LiDAR-Scans* zur präzisen Dokumentation und Analyse der Baustelle zu integrieren. Dies ist besonders nützlich für hochpräzise 3D-Daten.
- **Drohnen mit 360°-Kamera verknüpfen:** Einige Tools vermitteln es, Drohnen mit 360°-Kameras in den Arbeitsablauf zu integrieren, was eine detaillierte und umfassende Ansicht der Baustelle aus der Luft gewährt.
- **Messfunktionen auf Fotos:** Bewertet, ob es möglich ist, direkt auf den 360°-Fotos Masse und Abstände zu nehmen, was eine schnelle und präzise Kontrolle der Baustellenverhältnisse leistet.

Fazit:

Die *MCD*A-Methode stellt eine umfassende und systematische Bewertung der verschiedenen *BIM*-Tools bereit. Doxel, OpenSpace und OneSiteIQ liefern viele Funktionen, die für die automatisierte BFK wichtig sind, einschliesslich der Möglichkeit, 360°-Fotos auf 2D-Plänen zu hinterlegen, Rundgänge mit Video und 360°-Fotos zu machen und den Vergleich zwischen 360°-Fotos und *BIM*-Modellen durchzuführen. Tools wie Dalux und HoloBuilder leisten ebenfalls nützliche Funktionen, jedoch mit weniger umfangreichen Möglichkeiten in bestimmten Bereichen (z.B. *LiDAR*-Integration oder Drohnenverknüpfung).

Die Auswahl des besten *BIM*-Tools hängt von den spezifischen Anforderungen ab, wie der Integration von Drohnen, der Verfügbarkeit von *LiDAR*-Daten oder der Fähigkeit zur Messung auf den 360°-Fotos. Alle in der Tabelle dargestellten *BIM*-Tools vermitteln solide Lösungen zur BFK, wobei einige besondere Funktionen anbieten, die für spezifische Anforderungen von grösserer Bedeutung sein könnten.

BIM-Tool	Dalux	Doxel	OpenSpace	HoloBuilder	OneSiteIQ
Funktionalität	Sehr gut: Umfassende Funktionen, einschliesslich 360°-Fotos, Dokumentation und Integration von Bauplänen.	Sehr gut: 360°-Fotografie und automatische Vergleichsfunktionen zu <i>BIM</i> -Modellen.	Sehr gut: Bietet 360°-Fotos und Video-Rundgänge mit grossem Fokus auf Baufortschritt.	Gut: 360°-Fotos und einfache Möglichkeit, Pläne hinzuzufügen.	Sehr gut: Unterstützt 360°-Fotos und sorgt für eine umfassende BFK-Dokumentation.
Benutzerfreundlichkeit	Sehr gut	Gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut
Integration in Bauablauf	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut	Sehr gut
Kundenzufriedenheit	Positiv	Positiv	Positiv	Positiv	Positiv
360°-Fotos auf 2D-Plan hinterlegen	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Rundgänge mit Video & 360°-Fotos	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
Vergleich zwischen 360°-Fotos und <i>BIM</i>-Modell	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
LiDAR Nutzung / Scannen	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
Drohnen mit 360°-Kamera verknüpfen	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja
Messfunktionen auf Fotos	Nein	Ja	Ja	Ja	Ja

Tabelle 5: MCDA-Vergleich der BIM-Tools hinsichtlich automatisierter BFK

Anhang 3: Methodenvergleich zur Punktwolkenerfassung mittels Choosing By Advantages (iPhone vs. Laser BLK360 G2)

Die Entscheidung für den Leica BLK 360 G2 basiert auf einer faktorenbasierten Analyse nach der *CBA*-Methode (Christensen, 2022; Schöttle et al., 2019). Diese Methode erlaubt es, Alternativen nicht nur auf Basis einzelner Kriterien zu bewerten, sondern die gesammelten Vorteile der jeweiligen Lösungen systematisch gegeneinander abzuwägen (siehe Tabelle 6). In diesem Fall überzeugt der BLK 360 G2 gegenüber dem iPhone 13 Pro Max vor allem durch seine höhere Genauigkeit, grössere Reichweite, bessere Punktdichte und überlegene Ergonomie. Besonders in gross angelegten Bauprojekten im Gesundheitssektor spielt die Skalierbarkeit eine zentrale Rolle. Der BLK 360 G2 bietet hierbei eine konsistente und zuverlässige Datenerfassung, die für die präzise Dokumentation und Planung unerlässlich ist.

Für das KSA-Projekt von Implenia Schweiz AG und vergleichbare Grossprojekte im Gesundheitswesen ist es nach *Best Practice* sinnvoll, in ein hochwertiges, technologisch ausgereiftes Gerät wie den BLK 360 G2 zu investieren. Obwohl die Anschaffungskosten höher sind als beim iPhone 13 Pro Max, gewährleistet der *Laserscanner* eine effizientere Skalierbarkeit, was der untenstehenden Tabelle entnommen werden kann (siehe Tabelle 6). Dies sorgt dafür, dass komplexe Projektanforderungen innerhalb der vorgegebenen Fristen und Qualitätsstandards erfolgreich umgesetzt werden können. Die Projektziele lassen sich mit dem Einsatz des BLK 360 G2 deutlich besser erreichen, da das Gerät speziell für die hohen Anforderungen im Bauwesen und in der Bestandsdokumentation von Gebäuden entwickelt wurde. Diese Entscheidung trägt zu einer präziseren, effizienteren und nachhaltigeren Durchführung von Bauprojekten bei. Gleichzeitig liefert der BLK 360 G2 eine nahtlose Integration in bestehende digitale *Workflows* wie *BIM* und *CAD*, was eine optimale Verarbeitung und Nutzung der erfassten Daten sicherstellt.

Kriterium	iPhone 13 Pro Max (LiDAR)		Leica BLK 360 G2 (Laserscanner)		Wichtigster Vorteil
Genauigkeit	~10–30 mm		4 mm bei 10 m		BLK 360 ist deutlich präziser
<i>je genauer, desto besser</i>	Unpräzise, hohe Messfehler, falsche Daten, unzuverlässig.	25	Liefert präzise und zuverlässige Abmessungen	100	
Erfassungsreichweite	Max. 5 m		45 m		BLK 360 erfasst effizient grössere Flächen
<i>je umfassender, desto besser aber die Genauigkeit muss entsprechen</i>	Sehr einfacher LiDAR Sensor, für einen Raum oder kleinen Bereich könnte es genügend sein	25	Ein präziser Lasersensor, der in langen Bereichen driften kann; teurere Scanner sind genauer	85	
Scangeschwindigkeit	Sehr schnell (Sekunden)		Sehr schnell (Sekunden)		Beide Methoden sind schnell, die Wahl hängt vom Bearbeitungsaufwand ab
<i>je schneller, desto besser</i>	Scannt kleine Bereiche sehr schnell, stösst bei grossen Bereichen an seine Grenzen	75	Für kleine Bereiche sehr schnell, für grosse Bereiche etwas langsamer wegen der Anzahl an Scans	75	
Ergonomie	Unangenehm, da Arm hochgehalten werden muss		Ergonomisch, da Stativ-basiert		BLK 360 erfordert weniger körperlichen Aufwand
<i>je bequemer und müheloser, desto besser</i>	Für längere Scans wird es anspruchsvoll	25	Es ist bequem, der Laser auf dem Stativ bleibt	100	
Batterielaufzeit	Ca. 3–4 Std.		3-4 Std.		BLK360 erlaubt Wechsel des Akkus
<i>Je länger, desto besser</i>	Hält regulär aber überhitzt schnell	50	Mit Wechselakku verlängert man die Betriebszeit des Scanners.	75	
Koordinatensystem	Lokales kartesisches KS		Lokales kartesisches KS		BLK 360 bietet genauere Referenzpunkte
<i>je genauer Punkte verknüpft werden, desto genauer.</i>	Ungenau	25	Präziseres Koordinatensystem mit einem Ursprungspunkt relativ zu den anderen Punkten	100	

LiDAR-Typ	Time-of-Flight <i>LiDAR</i>		Time-of-Flight <i>LiDAR</i>		
<i>je professioneller, desto besser</i>	Begrenzte Genauigkeit wegen eines statischen <i>Scanners</i> mit begrenztem Sichtfeld	50	Hochpräzise Genauigkeit dank des vollständig integrierten und professionellen Systems	100	BLK 360 hat überlegene <i>LiDAR</i> -Technologie
Handhabung	Sehr einfach		Relativ einfach		iPhone ist einfacher zum Bedienen
<i>je einfacher, desto besser</i>		100	Man braucht eine Schulung, aber es ist nicht schwer zu verstehen	75	
Punktdichte	Gering, Lücken möglich		Sehr hoch, detaillierte Punktwolke		BLK 360 erzeugt genauere Modelle
<i>je dichter, desto besser</i>	Weniger Punkte, weniger Detail	50	680.000 Punkte/Sekunde, von daher sehr hohe Punktwolkendichte	100	
IMU-Kompensation	Keine		Integrierte IMU		BLK 360 bietet stabilere Daten
<i>es ist besser, wenn es eine Bewegungskompensation gibt</i>	Bewegungen erzeugen Fehler	25	Stabilere <i>Scans</i> durch Gyroskop und Beschleunigungssensor mit Bewegungsausgleich	100	
Kalibrierung & Wartung	Keine		Möglich		BLK 360 ermöglicht langfristig stabile Messungen
<i>besser wenn es möglich ist</i>	Keine professionelle Kalibrierung möglich	25	Kann kalibriert und gewartet werden	100	
Preis	Günstig		Teuer		iPhone ist günstiger
<i>je günstiger, desto besser</i>	~1'200 CHF (inkl. Handy)	100	30'000 CHF	25	
Gesamtvorteil	575		1035		Der BLK360-Laserscanner ist der Sieger

Tabelle 6: CBA-Vergleich iPhone 13 Pro Max vs. Laserscanner BLK360 G2 zur Punktwolkenerfassung

Anhang 4: Methodenvergleich zur Punktwolkenauswertung mittels Trial-and-Error (3DGS-Apps vs. 3DR Cyclone)

Die Methode *Trial-and-Error* wurde genutzt, um verschiedene Verfahren zur Punktwolkenauswertung systematisch zu testen und ihre Stärken sowie Schwächen zu identifizieren. Durch schrittweise Experimente, iterative Anpassungen und praktische Tests mit den *3DGS-Apps* (Scaniverse, Luma, SiteScape etc.) sowie der Software 3DR Cyclone konnten relevante Bewertungskriterien entwickelt werden. Diese basieren auf realen Anwendungsfällen und ermöglichen eine objektive Beurteilung der Effektivität und Praxistauglichkeit der jeweiligen Methode (siehe Tabelle 7).

Der *Trial-and-Error*-Ansatz erwies sich als besonders effektiv, da er praxisnahe Erkenntnisse über die tatsächliche Leistungsfähigkeit der getesteten Anwendungen lieferte (Masson et al., 2022). Dabei wurden nicht nur technische Aspekte wie Genauigkeit, Skalierbarkeit und Datenqualität analysiert, sondern auch Faktoren wie Benutzerfreundlichkeit, Automatisierungspotenzial, Interaktionsmöglichkeiten und die langfristige Nutzbarkeit der Ergebnisse berücksichtigt. Durch diese strukturierte Herangehensweise konnte sichergestellt werden, dass die Bewertung nicht nur theoretisch fundiert, sondern direkt aus der praktischen Anwendung abgeleitet wurde.

Kriterium	3DGS-Apps	3DR Cyclone
Geometrische Genauigkeit	Niedrig, oft Abweichungen beim Import in <i>BIM</i> .	Sehr hoch (bis 10 mm Toleranz), Registrierung minimiert Fehler.
Datenqualität	Störanfällig durch Bewegungsfehler und Schatten (Rauschen anfällig).	Punktwolken können bereinigt und gefiltert werden.
Skalierbarkeit der Daten	Grosse Dateigrößen, schwierig für grosse Flächen.	Grosse Punktwolkendaten (>30 GB) sind verwaltbar mit Optimierungsschritten.
Präzision der Modellintegration	Punktwolken weichen vom Soll-Modell ab.	Sehr präzise Überlagerung mit <i>BIM</i> möglich (Punktwolken vs. <i>BIM</i> oder <i>Mesh</i> vs. <i>BIM</i>).
Automatisierung der Analyse	Keine echte Automatisierung, nur Visualisierung.	Automatische Erkennung von Bauabweichungen mit definierten Toleranzen und Farbmarkierung. Manuelle Kontrolle bleibt nötig.
Korrekturfähigkeit	Keine Möglichkeit, Abweichungen direkt zu korrigieren.	Korrektur von Punktwolkenregistrierung möglich, um Fehler zu minimieren.
Export und Weiterverarbeitung	Unterstützt Standardformate, aber nicht für detaillierte <i>BIM</i> -Analysen optimiert.	Optimierter Export für Revizto, <i>BCF</i> und <i>BIM-Workflows</i> .
Interaktion und Messungen	Sehr einfach und schnell: Messungen direkt am <i>Smartphone</i> in Echtzeit möglich.	Keine Echtzeit-Messungen. Erst nach Registrierung und Bereinigung der Punktwolken möglich.
Geschwindigkeit der Auswertung	Sehr schnell, da die Auswertung in Echtzeit mit der Aufnahme möglich ist. Allerdings sind die Funktionen begrenzt.	Längere Verarbeitungszeit durch Vorprozess (Registrierung, Bereinigung), aber danach sind umfassendere Analysen möglich.
Benutzerabhängigkeit	Ergebnisse hängen stark von der Aufnahmequalität des Benutzenden ab.	Für Aufnahmen keine aber für die Auswertung sehr abhängig. Trotzdem sorgt die Qualität des <i>Laserscans</i> für die Ergebnisse.
Langfristige Nutzung und Dokumentation	Eher für kurzfristige, schnelle Analysen. Punktwolken sind schwer in grosse <i>Workflows</i> einzubinden.	Es kann gut im <i>Workflow</i> integriert werden. Dokumentation des Ist-Zustands wird gesichert.

Tabelle 7: Trial-and-Error Vergleich 3DGS-Apps vs. 3DR Cyclone Software zur Punktwolkenauswertung

Anhang 5: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels Trial-and-Error (AR-Brille vs. AR-Tablet)

Zur Analyse der Leistungsfähigkeit verschiedener AR-Lösungen für die Ist-Soll-Auswertung auf der Baustelle wurde die *Trial-and-Error*-Methode angewendet. Im Fokus standen dabei die NEXT-BIM AR-Brille (HoloLens), das NEXT-BIM AR-Tablet und das GAMMA AR-Tablet. Ziel war es, die Stärken und Schwächen dieser Systeme hinsichtlich Messgenauigkeit, Benutzerfreundlichkeit, Abweichungsdokumentation, Überlagerungsfähigkeit der Modelle, Ergonomie, Sicherheitsrisiken, Referenzierungsstabilität, Automatisierung der Abweichungserkennung und Skalierbarkeit zu bewerten. Durch praktische Tests auf der Baustelle konnte ermittelt werden, welche Technologie sich am besten für eine präzise und effiziente BFK eignet. Diese strukturierte Analyse bildet eine fundierte Grundlage für die Auswahl geeigneter Technologien in der Baukontrolle.

Kriterium	NEXT-BIM AR-Brille	NEXT-BIM AR-Tablet	GAMMA AR-Tablet
Messgenauigkeit	Präzise Abstands- und Höhenmessungen.	Präzise Abstands- und Höhenmessungen, geringe Abweichungen bei schnellen Bewegungen.	Eingeschränkt, da das Modell nach einiger Zeit an Genauigkeit verliert.
Benutzerfreundlichkeit	Hohe Einarbeitungszeit, da die Steuerung mit Gesten erfolgt.	Sehr einfache Bedienung durch Touchscreen, schneller als mit Brille.	Sehr einfach, jedoch durch häufige Neureferenzierung umständlich.
Abweichungsdokumentation	Export als <i>BCF</i> möglich	Export als <i>BCF</i> möglich	Export als <i>BCF</i> möglich
Digitale Ist-Zustand-Erfassung	Nicht möglich	Nicht möglich	Nicht möglich
Überlagerungsfähigkeit	Exakte Überlagerung des <i>BIM</i> -Modells auf die Realität.	Auch präzise, aber schnellere Referenzierung als mit der Brille.	Referenzierung instabil, Modellverschiebung nach einiger Zeit.
Ergonomie	Hohe Belastung für den Kopf bei längerer Nutzung, Sicht kann durch <i>AR</i> -Elemente eingeschränkt sein.	Weniger belastend als die Brille, aber langes Halten des <i>Tablets</i> kann ermüdend sein.	Handhabung ähnlich wie bei NEXT-BIM, jedoch häufiger Neuausrichtung nötig.
Sicherheitsanfälligkeit	Kann die Wahrnehmung realer Gefahren (z. B. herumliegende Materialien) einschränken.	Weniger Risiko als die Brille, da die Umgebung besser sichtbar ist.	Ähnlich wie NEXT-BIM-Tablet.
Referenzierungsstabilität	Sehr stabil, benötigt keine permanente Neuausrichtung.	Stabiler als GAMMA AR, aber gelegentliche Neuausrichtung erforderlich.	Instabil, Modell muss regelmässig neu referenziert werden.
Automatisierung der Abweichungserkennung	Nein, es läuft manuell.	Nein, es läuft manuell.	Nein, es läuft manuell.
Skalierbarkeit	Für grosse Projekte und umfangreiche Baukomponente nicht geeignet. Für Auswertung von Elektrokomponente geeignet.	Genauso wie bei der Brille, einfach ergonomischer.	Nein, das Referenzierungsproblem ist eine grosse Belastung.

Tabelle 8: *Trial-and-Error* Vergleich der AR-Anwendungen zur Ist-Soll Auswertung

Anhang 6: Methodenvergleich zur Ist-Soll Auswertung mittels CBA (3DGS vs. Laserscanner vs. Kamera 360° vs. AR)

Bei der Bewertung der verschiedenen Methoden zur Ist-Soll-Auswertung wurde bewusst auf eine numerische Bewertung verzichtet. Der Grund dafür liegt darin, dass jede der getesteten Methoden ihre eigenen Stärken im Bereich der BFK hat. Keine der Methoden ist als Einzelansatz perfekt, doch in Kombination mit anderen lassen sich robuste Prozesse entwickeln, die eine effiziente BFK ermöglichen (siehe Tabelle 9).

Der Begriff „automatisierte“ BFK ist derzeit eher eine Utopie, da es momentan keine Technologie oder Methode gibt, die den gesamten Prozess vollständig automatisiert und alle Schritte eigenständig durchführt. Vielmehr gibt es vielversprechende Ansätze, die in spezifischen Bereichen einen hohen Mehrwert mit teilautomatisierten Prozessen bieten. Gleichzeitig gibt es Methoden, die wenig oder gar keinen Nutzen für die BFK bringen. Ziel dieser Analyse ist es daher, die effektivsten Methoden hervorzuheben, um eine praxisnahe und kombinierte Lösung für die Baukontrolle zu erarbeiten.

Die CBA-Methode wurde gewählt, da sie eine objektive Entscheidungsfindung bietet, indem sie sich nicht auf eine absolute Bewertung jeder Methode konzentriert, sondern stattdessen die relativen Vorteile der einzelnen Ansätze in den Vordergrund stellt. Dies ist besonders sinnvoll, weil keine Methode alle Anforderungen einer BFK allein abdecken kann. Statt eine starre Gewichtung vorzunehmen, hebt die CBA-Methode hervor, welche Methoden in welchen Bereichen besser geeignet sind und wie sie sich ergänzen können, um ein optimales Ergebnis zu erzielen.

Kriterium	3DGS	BLK360 (Laserscanner)	Dalux (SiteWalks:360°-Kamera)	NEXT-BIM (AR)
Messgenauigkeit (<i>Je präziser, desto besser</i>)	Niedrig, wegen <i>LiDAR</i> Sensor.	Sehr hoch (4mm in 10m Genauigkeit)	Keine metrische Abmessung.	Hoch, je nach Referenzierungsstabilität.
Referenzierungsstabilität (<i>Je stabiler, desto weniger Neuausrichtung erforderlich</i>)	Keine exakte Referenzierung möglich.	Sehr stabil, Scanpunktebasiert (kartesisches KS).	Interne Referenzierung mit 3D-Modell.	Stabil, lässt sich schnell neuausrichten.
Benutzerfreundlichkeit (<i>Je intuitiver, desto einfacher einsetzbar für verschiedene Nutzergruppen</i>)	Sehr einfach und intuitiv.	Erfordert Expertenwissen, komplexe Verarbeitung.	Sehr intuitiv, kleine Schulung reicht.	Intuitiv, aber Schulung ist notwendig. <i>Tablet</i> ist einfacher.
Ergonomie (<i>Je weniger belastend, desto besser für längere Nutzung</i>)	Ergonomisch, jedoch bei längeren Einsätzen belastend.	Bequem, Equipment ist nicht so schwer.	Die <i>SiteWalks</i> sind anstrengend bei einem langen Einsatz.	<i>AR</i> -Brille kann belastend sein, <i>Tablet</i> ist ergonomischer.
Dokumentation-Export (<i>Je strukturierter, desto besser für die Nachverfolgung</i>)	Keine nativen <i>BCF</i> -Exports, erschwerte Integration.	<i>BCF</i> -Export, digitale Ist-Zustandserfassung gewährleistet.	Nur visuelle Dokumentation, keine digitale Erfassung.	<i>BCF</i> -Export möglich, keine digitale Erfassung.
Automatisierung der Abweichungserkennung (<i>Je automatisierter, desto effizienter für die BFK</i>)	Keine	Automatische Erkennung durch <i>BIM</i> -Vergleich	Keine, nur visuelle Überprüfung	Keine, nur visuelle Überprüfung aber viel besser als bei Dalux

Digitale Erfassung und Überlagerung <i>(Je exakter die Erfassung, desto präziser die Ist-Soll-Analyse)</i>	Ja, aber nicht vertrauenswürdige Erfassung.	Sehr detailliert, hochauflösende Punktwolken.	Keine digitale Erfassung.	Keine digitale Erfassung. Aber sehr gute Überlappung <i>BIM</i> -Modell – reale Umgebung.
Sicherheitsaspekte <i>(Je sicherer, desto geringer das Unfallrisiko)</i>	Niedrige Gefahr	Keine Gefahr, aber Stolperfallen durch Equipment möglich	Niedrige Gefahr	Sichtbehinderung durch <i>AR</i> -Brille. Sicherer mit <i>Tablet</i> .
Skalierbarkeit <i>(Je flexibler für grosse Projekte, desto besser einsetzbar für komplexe Bauprozesse)</i>	Hoch für kleine Bereiche, aber nicht für grosse Projekte.	Sehr gut, ideal für grosse Projekte	Gut, aber nur für visuelle Fortschrittskontrolle.	Mittel bis gut, je nach Projektgrösse. Geeignet für spezifische Bauelementkontrolle (z.B. Elektroelemente).

Tabelle 9: CBA-Vergleich aller betrachteter Methoden zur Ist-Soll Auswertung

Anhang 7: Zeiterfassung von SiteWalks, Laserscanning und mögliche Kosteneinsparungen in Phase Zwei

Die Entwicklung der Zeiterfassung für *SiteWalks* und *Laserscans* war ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit und zeigt deutlich, wie sich der Prozess durch wiederholte Durchführung und den sogenannten Lernkurveneffekt (*Learning by Doing*) kontinuierlich verbessert hat. In den nachfolgenden Abbildungen und Tabellen wird ersichtlich, wie viel Zeit die Datenerfassung in verschiedenen Bereichen bzw. Geschossen in Anspruch nahm und welche Flächen dabei erfasst werden konnten.

SiteWalks

In Tabelle 10 ist die zeitliche Entwicklung der Datenerfassung mittels *SiteWalks* nach Geschossen und in chronologischer Abfolge entsprechend den Baumeilensteinen dargestellt. Zwar können die Zeitangaben je nach baustellenspezifischen Umständen variieren, dennoch lassen sich auf Basis der vorliegenden Daten durchschnittliche Werte ableiten. Zu Beginn war unklar, ob die Qualität der automatisch generierten 360°-Bilder bei zügigem Gehen ausreichend ist – aus diesem Grund benötigte die erste Aufnahme eines Geschosses mit ca. 4'500 m² rund 1,5 Stunden. Im Vergleich zur früheren Methode, der manuellen Aufnahme einzelner 360°-Bilder, die ca. 3,5 Stunden beanspruchte, bedeutet dies eine merkliche Zeitersparnis. Letztere Methode erforderte eine vollständige manuelle Durchführung jeder einzelnen Aufnahme, während bei *SiteWalks* das Bildmaterial automatisch aus dem Video extrahiert wird.

Entscheidend für die Dauer ist jedoch auch die Bildauflösung, unzureichende Qualität macht die gesamte Aufnahme unbrauchbar. Nach mehreren Monaten im Einsatz zeigte sich, dass ein Geschoss mit 127 Räumen und acht Korridoren (insgesamt 4'500 m²) im Durchschnitt in 2,5 Stunden vollständig dokumentiert werden kann (siehe Tabelle 10).

SiteWalks			
Bereich	Fläche (m ²)		Zeit (h)
OG06	4'500		1,5
OG05	4'500		2
OG07	4'500		3
AEMP	1'250		0,28
OG01_OP_Bereich	3'150		1
OG03 N_M	9'000		2
OG08	4'500		2,5
OG09	4'500		2,5
Total	35'900		15
Fläche pro Stunde	2'275	m²/h	

Tabelle 10: Zeiterfassung der SiteWalks und abgedeckte Flächen

Abbildung 55 visualisiert die Bereiche, die vollständig per *SiteWalks* dokumentiert wurden. Dabei wurden alle Räume erfasst, während beim *Laserscanning* nur Korridore sowie ausgewählte, relevante Bereiche berücksichtigt wurden. Die Erfassung erfolgte mithilfe von Dalux.



Abbildung 55: Übersicht der durch *SiteWalks* und *Scanning* erfassten Bereiche (Korridore und bestimmte Bereiche)

Laserscanning

In Abbildung 56 wird ein Überblick über die *Scan*-Durchläufe gegeben, wobei die kontinuierliche Prozessoptimierung deutlich wird, insbesondere durch die Reduktion der benötigten Zeit. Wie bereits erwähnt, braucht es anfangs etwas Zeit, um mit dem Prozess vertraut zu werden. Hinzu kommen externe Faktoren, die den *Scan*-prozess behindern können, etwa Materiallagerungen, grosse Gerätschaften oder Baustellenlogistik. Diese Hindernisse müssen oft vor Beginn des *Scan*-vorgangs beseitigt werden, da eine saubere Überlagerung von Punktwolke und *BIM*-Modell ansonsten nicht gewährleistet ist.

Scans - Überblick					
Bereich	Fläche (m ²)	#	Akkuladungen	Scans	Zeit (h)
OG06	1'700	1	8	150	7
OG07	1'700	2	7	155	7
OG05	1'700	3	6	160	6
OG01_Nord	3'200	4	2	97	2
		5	3	140	3
		6	3	140	3
AEMP	5'560	7	2	95	2,5
OG08	1'700	8	7	305	6,5
OG09	900	9	3	150	2,5
OG09	800	10	3	160	2,5
OG02_Süd	1'200	11	3,5	250	5
		Total	47	1'802	47
		Fläche	18'460	m²	
				3'928	m² in 10 Stunden
				39	Scans pro Akku
				1,56	Minuten pro Scan
				38	Scans pro Stunde
				393	m² pro Stunde

Abbildung 56: Überblick der Scanprozesse pro Geschoss und Bereich

Die Auswertung zeigt eine Verbesserung in der Flächenabdeckung. Innerhalb von zehn Stunden konnten anfangs etwa 4'000 m² und später bis zu 5'350 m² erfasst werden, eine Steigerung von rund 100 m² pro Stunde (siehe Abbildung 57). Die reine Scanzeit stellt jedoch nur einen Teil des Gesamtaufwands dar, hinzu kommen Bearbeitungszeiten (siehe Tabelle 11), die je nach Geschoss, Bereich und Gewerk variieren.

Scans der letzten Aufnahmen und Fortschritte					
Bereich	Fläche (m²)	#	Akkuladungen	Scans	Zeit (h)
AEMP	5'560	7	2	95	2,5
OG08	1'700	8	7	305	6,5
OG09	900	9	3	150	2,5
OG09	800	10	3	160	2,5
OG02_Süd	1'200	11	3,5	250	5
		Total	18	960	19
		Fläche	10'160	m²	
				5'347	m² in 10 Stunden
				55	Scans pro Akku
				1,19	Minuten pro Scan
				51	Scans pro Stunde
				535	m² pro Stunde

Abbildung 57: Verbesserung der Flächenabdeckung durch Optimierung der Scans

Schätzung der Bearbeitungsdauer für den Ist-Soll-Vergleich durch Laserscanning

In der Übersicht der Tabelle 11 wird der zeitliche Aufwand für den Ist-Soll-Vergleich in zwei exemplarisch ausgewählten Geschossen detailliert aufgezeigt: OG05, welches stellvertretend für die identisch geplanten Bettengeschosse OG05 bis OG09 steht, sowie OG02-Süd, welches als Referenz für den variantenreichen Sockelbereich (EG00 bis OG03) sowie Teile der Untergeschosse (UG01–UG02) dient. Die angegebenen Zeiten basieren auf praktischen Erfahrungswerten und umfassen sämtliche Schritte, vom *Laserscanning* über die Datenübertragung und Registrierung bis hin zur Analyse in 3DR Cyclone.

Die Auswertung zeigt, dass für die Bettengeschosse nach mehreren Iterationen eine durchschnittliche Bearbeitungsdauer ermittelt werden konnte, da diese in Grundriss und Ausbaustand weitgehend identisch sind. Zwar können externe Faktoren, etwa baustellenspezifische Hindernisse, die Bearbeitungszeit beeinflussen, dennoch bieten die ermittelten Werte eine verlässliche Grundlage für die zeitliche Planung weiterer Ist-Soll-Vergleiche.

Demgegenüber zeichnen sich die Sockel- und Untergeschosse durch eine hohe Heterogenität aus, die beispielsweise durch Funktionsbereiche wie OP-Räume oder Technikzentralen bedingt ist. Aus diesem Grund ist eine Übertragung der ermittelten Zeitwerte aus OG02-Süd oder OG01-OP-Nord auf andere Abschnitte nur bedingt möglich. Nichtsdestotrotz erlauben sie eine realistische Prognose des zu erwartenden Aufwands und stellen eine wertvolle Unterstützung für die Planung benachbarter Aktivitäten dar.

Es sei darauf hingewiesen, dass der in Tabelle 11 dargestellte Aufwand ausschliesslich die Durchführung des Ist-Soll-Vergleichs abbildet. Massnahmen, die sich aus den festgestellten Abweichungen ergeben und in Form von Modellanpassungen ergriffen werden, sind in der dargestellten Tabelle nicht enthalten, stellen jedoch einen relevanten Bestandteil des Gesamtprozesses dar.

Übersicht Dauer									
Geschoss	Bereich	Etappen	Laser-scanning (h)	Übertragung der Daten (h)	Regis-ter (h)	3DR Cyclone (h)	Total (h)	Ar-beits-tage	Total (Tage)
OG05	--	--	6	3	3	25,5	37,5	4,4	4,4
OG02-Süd	Süd	8	6	3	3	25,5	37,5	4,4	14,4
	Mitte	12	9	4	4	30	47	5,5	
	Nord	8	6	3	3	25,5	37,5	4,4	

Tabelle 11: Übersicht und Schätzung der Dauer des Ist-Soll Vergleichs bestimmter Geschosse

Auf Basis der vorliegenden Informationen lässt sich eine erste Einschätzung für alle Bettengeschosse (OG05 bis OG09) sowie für die Sockelgeschosse (EG00 bis OG03) und die Untergeschosse (UG01–UG02) ableiten. Die in Tabelle 12 dargestellte Zusammenfassung der erwarteten Gesamtbearbeitungsdauer fasst die ermittelten Werte zusammen. Für den Ist-Soll-Vergleich der Betten-, Sockel- und Untergeschosse wird eine Gesamtdauer von ungefähr 72 Stunden veranschlagt. Es sei darauf hingewiesen, dass es sich bei der Schätzung der Gesamtbearbeitungsdauer um eine Prognose handelt, die unter gewissen Umständen einer Variation unterliegen kann.

Bettengeschosse		Sockelgeschosse	
Geschoss	Dauer (in Arbeitstagen)	Geschoss	Dauer (in Arbeitstagen)
OG05	4,4	EG00	14,4
OG06	4,4	OG01	14,4
OG07	4,4	OG02	14,4
OG08	4,4	OG03	14,4
OG09	4,4	UG01	14,4
Total	22	Total	72

Tabelle 12: Geschätzte Bearbeitungsdauer des Ist-Soll-Vergleichs nach Geschossen

Kostenabschätzung und potenzielle Einsparungen durch Laserscanning

Tabelle 13 stellt eine Gesamtkalkulation dar, die sowohl die Dauer als auch die Kosten des *Laserscanning*-Prozesses inkl. Auswertung der Abweichungen berücksichtigt. Grundlage ist eine Laufzeit von fünf Monaten, mit einem bezahlten Mitarbeiter sowie dem Einsatz des *Laserscanners* BLK360 G2. Die Gesamtkosten belaufen sich auf rund CHF 60'000.

Gemäss aktuellen Studien und Fachquellen liegen die Kosten für Nachbesserungen in *BIM*-Projekten bei etwa 10 % der gesamten Projektkosten. Beim Projektvolumen des KSA-Projekts «Dreiklang» von CHF 563'000'000 ergibt sich ein Einsparungspotenzial von etwa CHF 56'242'500. Dies erscheint nach einem signifikanten Vorteil durch den frühzeitigen Einsatz des *Laserscannings* für den Ist-Soll-Vergleich im HLK-Bereich. In dieser Berechnung wurden jedoch nur einige Kriterien berücksichtigt; darunter die Anschaffung des *Laserscanners*, die Lohnkosten für einen Werkstudenten, sowie die Hochrechnung des Aufwands für den *Laserscanning*-Prozess inkl. Auswertung bei einer 100%-Anstellung (42-Stunden-Woche) für eine hypothetische *Laserscanning*-Dauer von fünf Monaten. Nicht berücksichtigte Kosten wären somit Softwarelizenzen, Hardware und IT-Infrastruktur, Wartung des *Laserscanners*, Schulung und Einarbeitung, sowie Personalkosten in Form von Sozialabzügen seitens Arbeitgeber. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist, dass in dieser Masterarbeit der Fokus auf dem HLK-Bereich lag und somit mögliche Einsparungen durch den Einsatz von *Laserscanning* in anderen Bereichen nicht miteinberechnet wurden. Dadurch sind die Ergebnisse der potenziellen Einsparungen in der nachfolgenden Tabelle mit Vorsicht zu geniessen.

Es ist zudem zu beachten, dass in dieser Abschätzung ausschliesslich Nachbesserungskosten berücksichtigt wurden, die durch die in dieser Masterarbeit betrachteten Ursachen entstehen könnten. Andere potenzielle Nachbesserungskosten, die auf abweichende Ursachen zurückzuführen sind, wurden in die Betrachtung nicht einbezogen.

Dauer, Kosten und Einsparungen durch Laserscanning im HLK-Bereich				
		Dauer	Kosten	CHF
Bettengeschosse	22	94 Arbeitstage	Lohn Werkstudent (5x CHF 5'500)	27'500
Sockelgeschosse	72		Laserscanner BLK 360 G2	30'000
		19 Wochen		
		5 Monate	Total	57'500
Gesamtkosten KSA-Projekt «Dreiklang»				563'000'000
Kosten wegen Nachbesserungen			10%	56'300'000
Kosten Ist-Soll Vergleich von Laserscanning			+-	57'500
Einsparung durch Laserscanning im HLK-Bereich			+-	56'242'500

Tabelle 13: Grobe Schätzung von Dauer, Kosten und potenzieller Einsparung durch Laserscanning im HLK-Bereich

Anhang 8: Leitfaden Register (Leica)

In Register werden die im **Feld** mit dem **BLK360-Laserscanner** erfassten **Punktwolken** geladen, **Verbindungen** geprüft, **Rauschen** bereinigt und schliesslich eine **LAS-Datei** erstellt. Der Prozess besteht aus vier Schritten: **Importieren, Überprüfen und Optimieren, Abschliessen und Berichterstellung**.

1. Punktwolke Importieren (Importieren)

- **Klicken** Sie auf „**Projekt öffnen**“, erstellen Sie ein neues Projekt und geben Sie einen Namen ein.
- **Ziehen** Sie den Ordner mit den Punktwolken **per Drag & Drop** in das Register „**Importieren**“ (links).
- **Entfernen** Sie alle voreingestellten **Häkchen** (diese sind nicht erforderlich).

2. Verbindung von Punkten (Überprüfen und Optimieren)

- **Wählen** Sie den Modus „**Übersichtskarte**“.
- **Überprüfen** Sie isolierte Punkte; **löschen** Sie irrelevante Punkte oder **verbinden** Sie diese korrekt mit anderen Punkten. Wenn eine Verbindung nicht sofort möglich ist, ändern Sie die Ansicht und versuchen Sie es erneut.
- Erscheinen die Verbindungen zwischen den Punktwolken nicht stabil genug, erstellen Sie zusätzliche Verbindungen zwischen verschiedenen Punkten, insbesondere an Ecken oder in Korridoren.

3. Bereinigung von Geräuschen (Überprüfen und Optimieren)

- **Wählen** Sie den Modus „**Punktwolken**“ und **bearbeiten** Sie die **Ansicht**.
- **Stellen** Sie „**Top-Übersicht**“ (links) ein.
- **Löschen** Sie Punkte, die ausserhalb des gewünschten Bereichs liegen. Verwenden Sie hierfür die Werkzeuge:
 - o **Polygon**
 - o **Rechteck**
- Diese Schaltflächen befinden sich oben. Entscheiden Sie nach Auswahl der unerwünschten Punkte, ob Sie **innerhalb** oder **ausserhalb** des Bereichs löschen möchten.

4. Abschliessen

- Wenn die Arbeit abgeschlossen ist, **klicken** Sie zweimal auf „**Akzeptieren**“.
- Unter „**Bericht**“ auf „**Export Optionen**“ **klicken**.
- **Wählen** Sie das **LAS-Format** und **speichern** Sie die Datei.
- **Klicken** Sie auf „**Standpunkte/Punktwolke dezimieren**“ und geben Sie **3 mm** ein.
- Abschliessend **publizieren**.

Schliessen Sie das Projekt und erstellen Sie gegebenenfalls ein neues Projekt für eine weitere Etappe derselben Etage oder einer anderen Etage, indem Sie die beschriebenen Schritte wiederholen.

Anhang 9: Leitfaden 3DR Cyclone (Leica)

Erste Bedingungen:

Der Rechner, auf dem 3D Cyclone genutzt wird, sollte flüssig mit grossen Dateien arbeiten können (Anwendung von *OID* auch möglich). Dazu sind ausreichend *RAM*, ein leistungsstarker Prozessor und eine leistungsfähige Grafikkarte erforderlich. 3D Cyclone ist eine anspruchsvolle Software, die speziell für *CAD*-Notebooks konzipiert wurde. Die Schritte für den Leitfaden folgen:

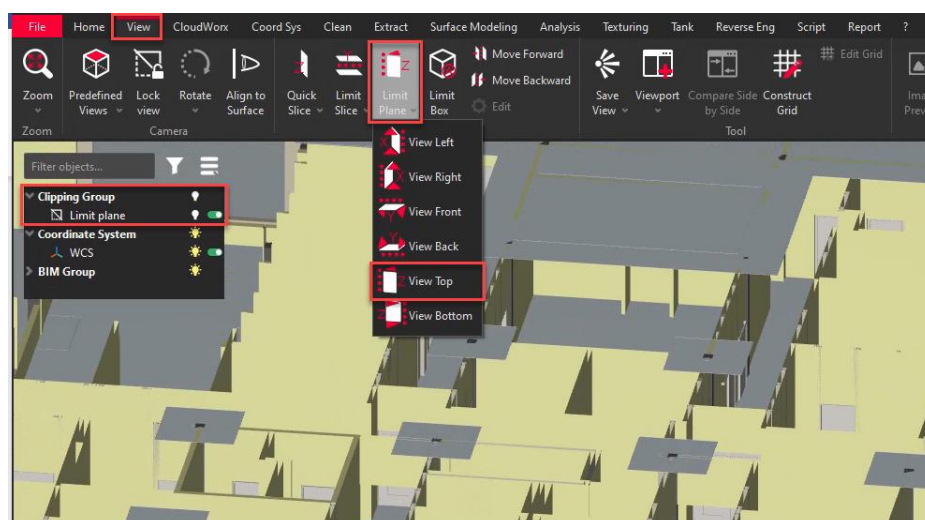
I. Laden der Modelle:

- Unter *File* die Dateien per *Drag-and-Drop* einzeln ins Programm ziehen und importieren. Schritt wiederholen für das Laden jedes Modells (inkl. *BIM*-Modelle und *LAS*-Dateien).

II. Erstellung einer Schnittebene (z.B. unter der Rohdecke):

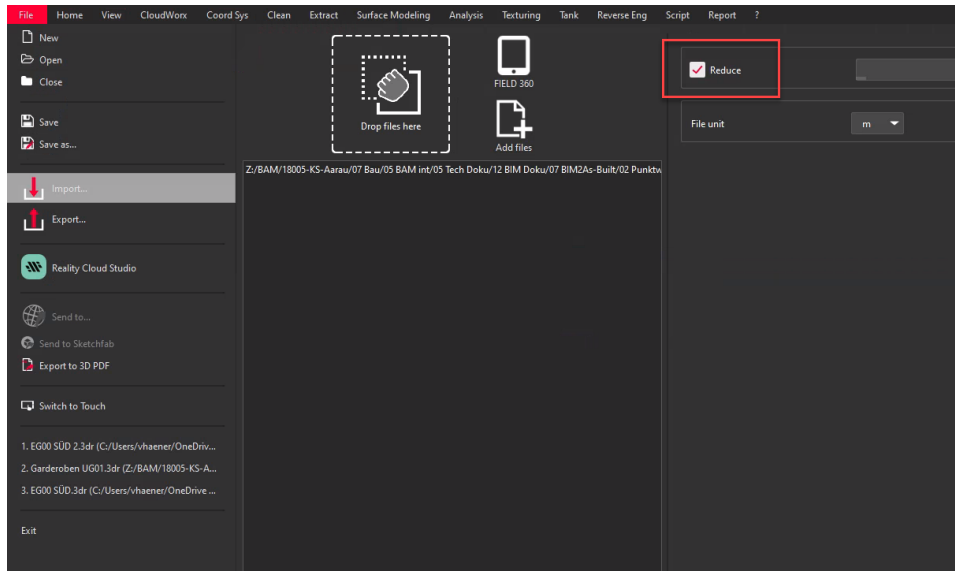
- **Ansichtsoption öffnen:**
Gehen Sie im Menü auf **View** und wählen Sie **Limit Plane** aus.
- **Ansicht auswählen:**
Wählen Sie die Ansicht **View Top** aus, um die Schnittebene aus der Draufsicht zu erstellen.
- **Schnittebene platzieren:**
Klicken Sie im Modell auf den Punkt, an dem die Schnittebene erstellt werden soll (z.B. in der Nähe des Randes einer Stütze).
- **Schnittebene ein- und ausschalten:**
Unter **Clipping Group** können Sie die Schnittebene aktivieren oder deaktivieren, um die Ansicht flexibel anzupassen.

Note: Die ersten beiden Schritte dienen der Erstellung einer Grundlagendatei, die als Basis für die Analyse der Punktwolken jedes Geschosses verwendet wird. Alle später aufgenommenen Punktwolken der jeweiligen Geschosse müssen in diese Datei integriert werden.



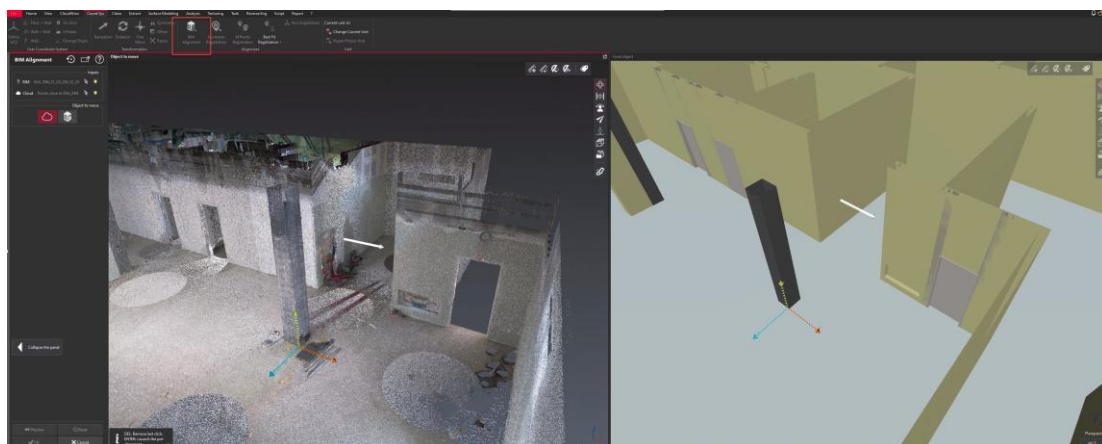
III. Laden der Punktwolke in 3dR:

- **Format prüfen:** Punktwolke muss im Format LAS, E57, PTS, XYZ oder PTX vorliegen (am besten LAS.).
- **Importieren:** Punktwolke per *Drag-and-Drop* in die Software laden.
- **Einstellungen anpassen:** Option *Reduce* **deaktivieren**, um eine Reduktion auf 6 Millionen Punkte zu vermeiden und die **volle Genauigkeit zu erhalten**.
- **Prüfen:** Sicherstellen, dass die Punktwolke vollständig geladen und bearbeitungsbereit ist.



IV. Referenzierung der Punktwolke (Best Fit):

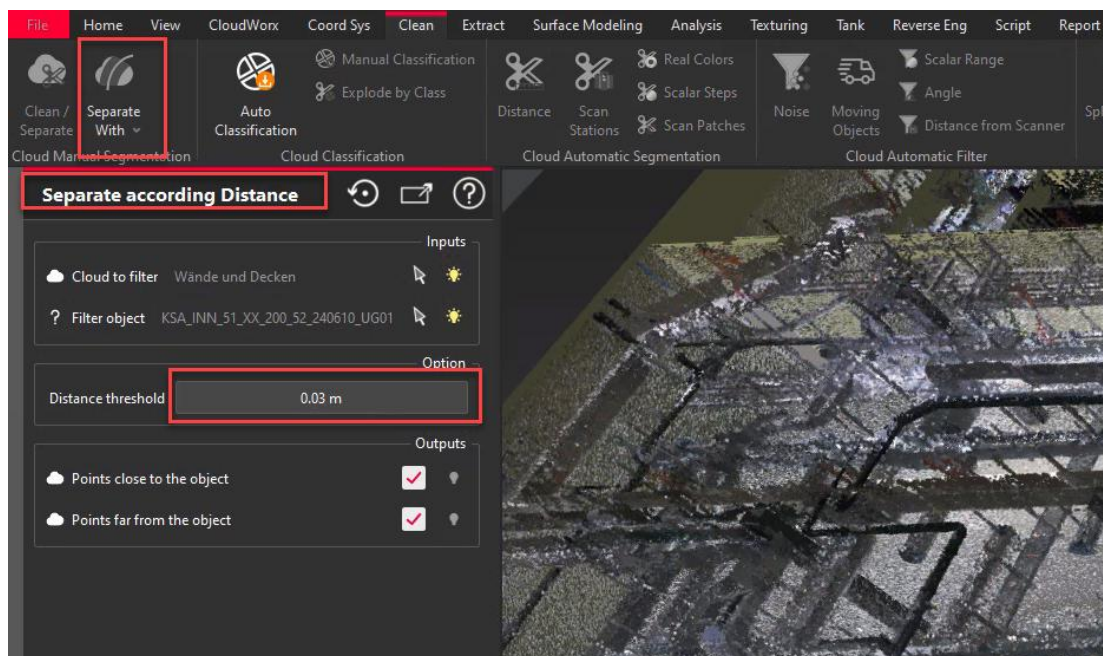
- **Auswahl:** Mit *Strg* (in Tastatur) Punktwolke und Modell anklicken.
- **Referenzierung starten:** *Coord Sys > BIM Alignment* im Menu auswählen.
- **Orientierung (Punktwolke und Modell):** *Ebene/Bereich/Oberfläche* (z. B. Wand) und spezifischen *Punkt/Ecke* (z. B. Stützenecke) in der Punktwolke auswählen und dasselbe beim Modell auswählen und anklicken.
- **Abschliessen:** *Enter (Tastatur)* drücken, **Preview** klicken und die ersten Ergebnisse (Überlappung der Punktwolken über das 3D-Modell) überprüfen und mit OK, wenn alles korrekt ist, bestätigen. Der absolute Fehlerwert kann bis 0,01m liegen, grösser ist nicht empfehlenswert.



V. Bereinigung der Punktwolke anhand eines Modells:

Nach dem Laden des Modells und der Punktwolke wird diese in Sektionen unterteilt, wobei architektonische Elemente wie Wände, Decken und Stützen separiert werden (Architekturmodell).

- **Punktwolke und Modell auswählen:** *Strg*-Taste gedrückt halten und beide anklicken.
- **Clean** → **Separate With** vom **Menu** auswählen.
- **Separate according to distance** wählen.
- **Einstellungen anpassen:** **Distance threshold** auf **0.04m** setzen (nach Bedarf anpassbar - dies behält nur Punkte innerhalb von 4 cm Distanz zum Referenzmodell).
- **Preview**, um die Trennung anzusehen und dann auf **OK** klicken zum Bestätigen.
- **Punktwolke trennen:** Punktwolke wird in zwei Teil-Punktwolken getrennt. Man kann die nach Bedarf umbenennen.



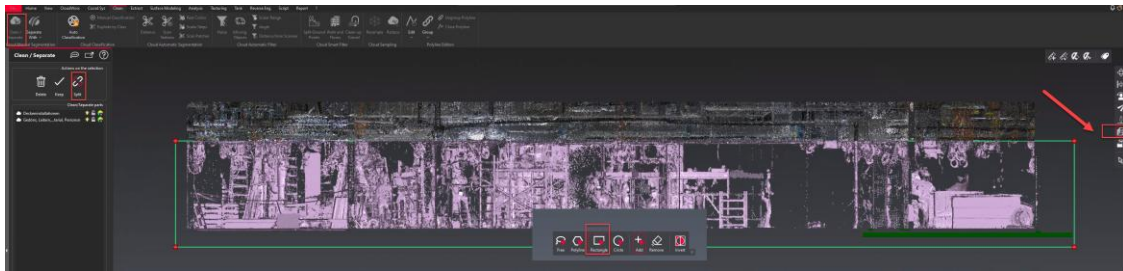
VI. Bereinigung der Punktwolke

Anhand der Höhe:

Das **Clean-Tool** erlaubt die Entfernung sämtlicher Bauteile oder Punkte unterhalb der Abhangdecke. Die können **Haustechnik** und **Sonstiges** genannt werden.

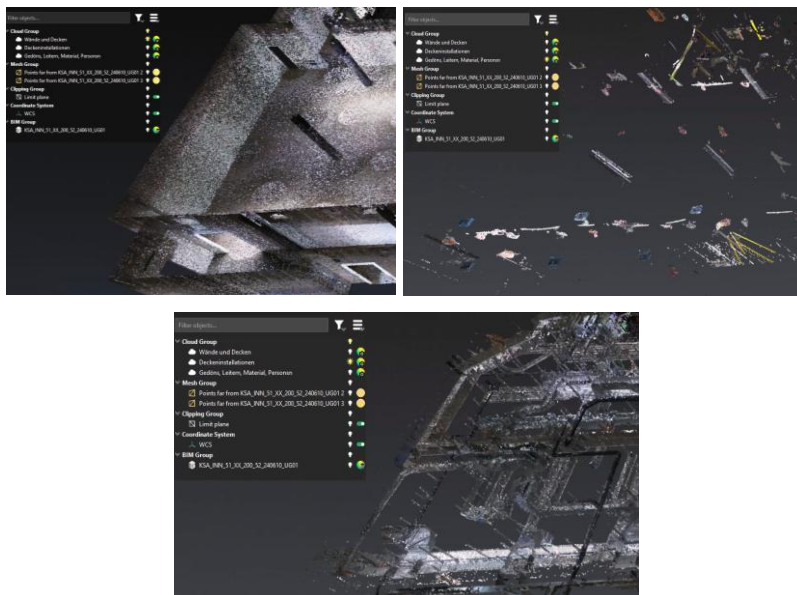
- Punktwolke auswählen (ohne Modell, Modell kann ausgeblendet bleiben).
- **Clean** → **Clean / Separate** im **Menu** auswählen.
- Zur Seitenansicht wechseln.
- Mit der **Rectangle-Funktion** den zu trennenden Bereich markieren.
- **Split** anwenden, um zwei getrennte Punktwolken zu erzeugen.
- **Preview** klicken und mit **OK** bestätigen.
- Optional: Getrennte Punktwolken umbenennen.

- Note: Für Steigzonen soll die Top-Aussicht ausgewählt werden und nochmal ein **Split** vorgenommen werden. Die getrennten Punktwolkengruppen, die miteinander zu tun haben, lassen sich als **Group** gruppieren.



Drei Punktwolkendateien werden erstellt:

- **Architektonisch:** Enthält Boden, Wände, Decken und Stützen.
- **Rauminhalte:** Enthält Baumaterial, Leitern, Personen und sonstiges Gerümpel.
- **Haustechnik:** Enthält Installationen in der Abhangdecke.



Die Auswertung der haustechnischen Installationen erfolgt auf Basis der erstellten Punktwolken und der zugehörigen Modelle. Im nächsten Schritt werden die Punktwolken der einzelnen Geschosse in ein *Mesh* umgewandelt. Dieses wird anschliessend mit den entsprechenden Modellen (Heizung, Lüftung, Elektro, Sanitär, Rohbau, Sprinkler) verglichen, um Abweichungen zu identifizieren. Es würde so folgen:

- *Mesh* «Haustechnik» vs. BIM-Modell (z.B. Heizung): **Haustechnik vs. HEI**

VII. Erstellen Mesh:

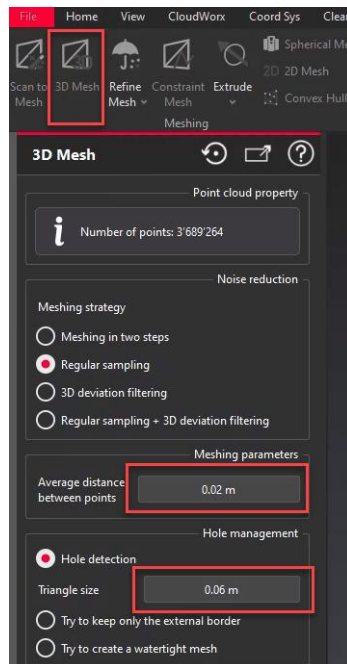
1. Punktwolke auswählen:

- Menü **Surface Modeling** → **3D Mesh** öffnen.

2. Einstellungen für das Mesh festlegen:

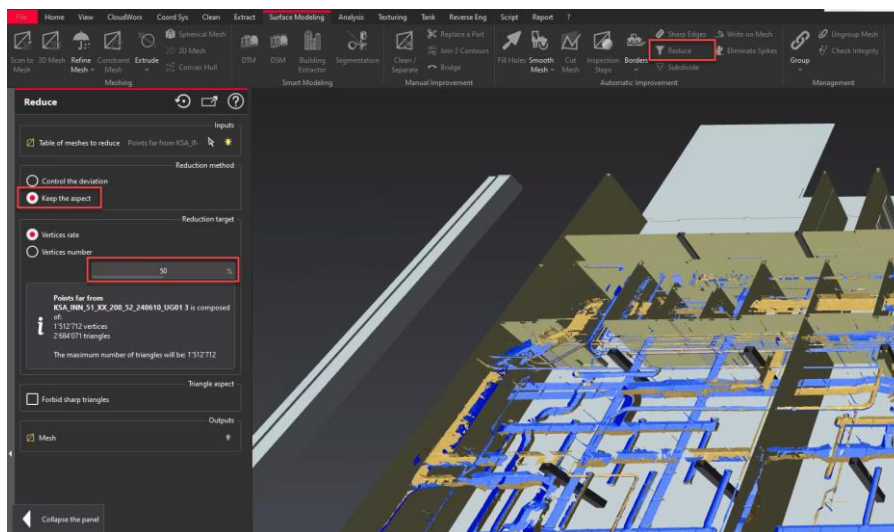
- Standard: (**Regular sampling**) 0.02m (2cm) / 0.06 (**Hole detection**).
- Für höhere Detailgenauigkeit: 0.01m (1cm) / 0.03 for holes (nicht empfohlen für grosse Scandaten).

- **Preview** anklicken und mit **Ok, Exit** die Erstellung vom *Mesh* beenden.



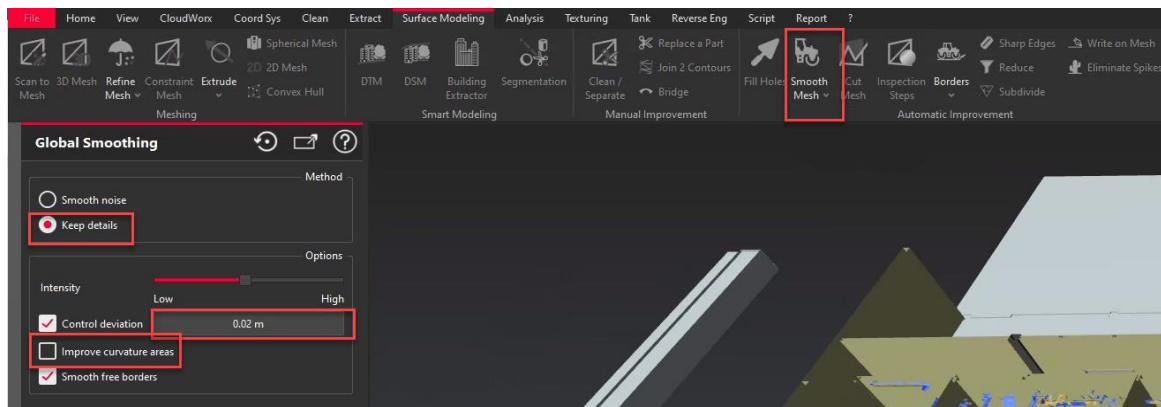
3. Datenmenge reduzieren:

- Dreiecksmenge reduzieren mit **Reduce** im Menu.
- **Keep the aspect**, dann **Vertices rate (50%)** aktivieren, um Details wie Medgasleitungen zu erhalten und grobe Elemente effizient darzustellen.



4. Mesh glätten:

- **Smooth Mesh** im Menu auswählen.
- **Keep details** aktivieren, um Objektdetails zu erhalten.
- **Control deviation** \leq Wert der Mesherstellung (z. B. 0.02m).
- **Improve curvature areas** deaktivieren, um Leitungsführungen in Kurven nicht zu verfälschen.
- **Ok** und fertig.

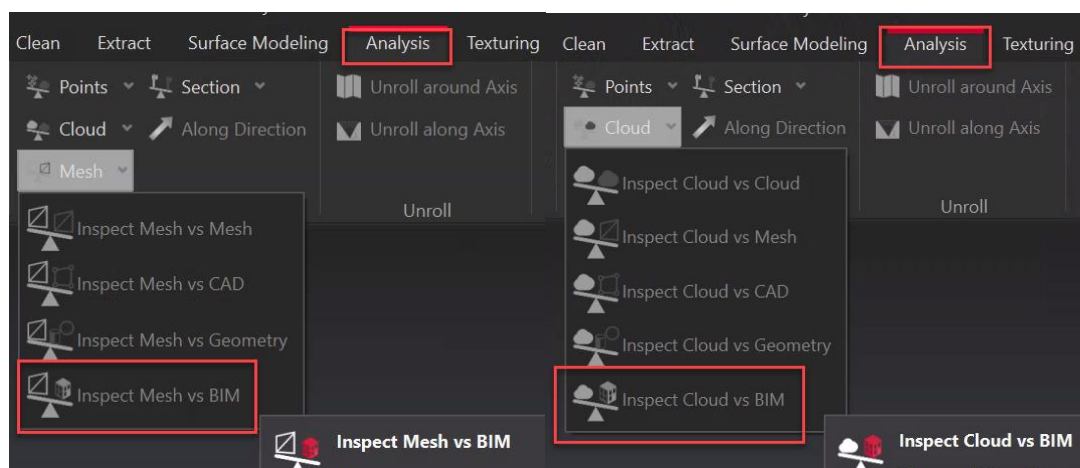


VIII. Mesh oder TGA-Punktwolke exportieren (falls erwünscht):

- Datei auswählen (Punktwolke).
- **File** → **Exportieren** auswählen.
- **Speicherort** und **Dateinamen** festlegen.
- Exportformat (.las) und Formateinstellungen wählen.
- **Export** klicken und den Vorgang abwarten.

IX. Abweichungen vom Vergleich und deren Einfärben:

1. Punktwolke oder *Mesh* und das zu vergleichende *BIM*-Modell auswählen (**Strg** gedrückt halten und beide **anklicken**).
2. Zu **Analyse** gehen und **Punktwolke (Cloud) – Punktwolke (Cloud) vs. BIM** oder **Mesh – Mesh vs BIM** wählen. Der Unterschied ist, **Cloud vs. BIM** ist nur für den Vergleich MEG vs. BIM-Modelle, da die Medizinalgasleitungen besser in den Punktwolken für den Vergleich betrachtet werden können. Dann **Mesh vs. BIM** ist für alle anderen Gewerke.



3. As-Built-Kontrolle durchführen:

- Toleranz den Projektanforderungen anpassen (z.B. Abstände Ist vs. Modell grösser als 15 cm mit rot markieren). Die Toleranzen können angepasst werden, indem man auf **Load** klickt und mit einem vorbereiteten Archiv die Toleranzen importiert und definiert.

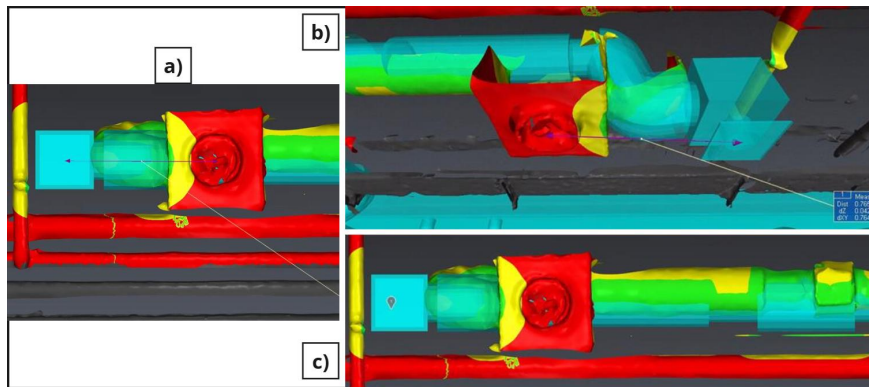


Die Farbskala für den dargestellten *Usecase* ist wie folgt:

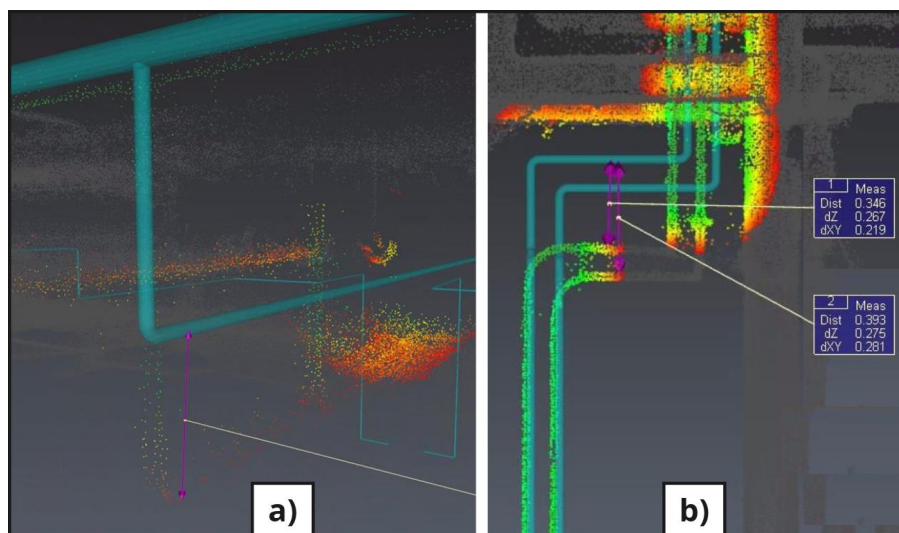
- grau (wird nicht bewertet)
- **40 cm**
- rot
- 15 cm
- gelb
- 5 cm
- grün
- -5 cm
- gelb
- -15 cm
- rot
- -40 cm
- grau (wird nicht bewertet)

- Abweichungen als *BCF* durch **Noten** im **Menu** bereitstellen.

Zur besseren Visualisierung der Abweichung können Bilder von verschiedenen Ansichten zur Verfügung gestellt werden. Hinzufügen von Abmessungen, um den Fehler in der Beschreibung des Hinweises besser zu veranschaulichen.



Dasselbe gilt für die gefundenen Abweichungen des Vergleichs zwischen den Punktwolken von den Medizinalgaselementen und dem *BIM*-Modell.



- Als letztes werden die generierten **Notizen** als **BCF** exportiert durch das Anklicken von **BCF-Export** und Speichern.

Note: Die Toleranz der Abweichungen muss den Anforderungen der Bauherrschaft und den spezifischen Gegebenheiten des Projekts entsprechen. Insbesondere im Haustechnikbereich, wo Bauteile an der Decke befestigt sind und vergleichsweise gross ausfallen, könnte mit den Toleranzen etwas Raum gelassen werden, jedoch am Ende des Projekts ein *As-Built*-Modell erforderlich anzugeben ist. Wesentlich ist, dass die Fachplanenden die Abweichungen in Form von *BCF*-Daten erhalten, um die Modelle entsprechend anzupassen und potenzielle Fehler zu beheben. Dadurch werden präzise, den Ist-Zustand widerspiegelnde Modelle für den späteren Betrieb und Facility Management bereitgestellt.