Vom IST-Zustand zum digitalen Zwilling einer Freiluftschaltanlage

Dominik Sieber

Digitaler Zwilling

Fernando Xatruch

Laserscanning

TEKO Olten

O-TEL-20-S-a / Elektrotechnik

Diplomarbeit

23.10.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Management Summary 6
2 Projektinitialisierung 7
2.1 Ausgangslage 7
2.2 Schulische Anforderungen 8
2.3 Auftrag 9
2.3.1 Vorstellung BENT 9
2.3.2 Dienstleitungen 9
2.3.3 Standorte 10
2.3.4 Kunden 11
2.3.5 Netzwerke 11
2.4 Vorstellung Projektmitarbeiter 12
2.5 Qualifikationsprofil Fernando Xatruch 18
2.6 Qualifikationsprofil Dominik Sieber 20
2.7 Rollendefinition 22
2.8 Teilprojekt «Laserscanning» 23
2.9 Teilprojekt «digitaler Zwilling» 23
2.10 Zielscheibe 24
2.11 Stakeholderanalyse 25
2.12 Projektplanung 27
2.12.1 Projektstrukturplan 27
2.12.2 Projektablaufplan 29
2.13 Kommunikationsplanung 32
2.14 SWOT-Analyse 34
2.15 Risikoanalyse 36
2.16 Budgetplanung 40
2.16.1 Erläuterungen zur Budgetplanung 41
2.16.2 Genehmigung Budget 41
3 Projektrealisierung 42
3.1 Laserscanning 42
3.1.1 Einleitung 42
3.1.2 Grundlagen des Laserscannings 44

3.1.3 Laserscanning-Technologie 47
3.1.4 Anwendungen im Energiesektor 49
3.1.5 Vergleich der bei BENT eingesetzten Laserscanner 50
3.1.6 Genauigkeits- und Toleranzangaben 53
3.1.7 Datenverarbeitung zur Punktwolke 56
3.1.8 Analyse der Genauigkeits- und Toleranzangaben 59
3.1.9 Schulung und Voraussetzungsanforderungen für das Personal 66
3.1.10 Erstellung technische Richtlinie zum Laserscanning 68
3.1.11 Kalkulationstool 69
3.2 Digitaler Zwilling 71
3.2.1 Einführung in die Erstellung digitaler Zwilling 75
3.2.2 Arbeiten mit Primtech 3D 77
3.2.3 Die Freiluftschaltanlage 83
3.2.4 Prüfung der Punktwolke 83
3.2.5 Modellierung digitaler Zwilling 86
3.2.6 Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling 134
3.2.7 Prüfung der Freiluftschaltanlage 137
3.2.8 Qualitätsprüfung 3D-Modell 143
3.2.9 Technische Richtlinie mit Hinweisen und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D 144
3.2.10 Kalkulationstool 144
4 Projektabschluss 145
4.1 Projektüberwachung 145
4.2 Evaluation der Zielerreichung 147
4.3 Abnahmeprotokoll durch BENT 149
4.4 Erkenntnisse und Massnahmen 149
4.4.1 Laserscanner 149
4.4.2 Primtech 3D 149
4.5 Fazit / Lessons learned 150
4.5.1 Fernando Xatruch 150
4.5.2 Dominik Sieber 151
4.6 Ausblick 152
5 Eigenständigkeitserklärung 153

6 Verzeichnisse 154
6.1 Abbildungsverzeichnis 154
6.2 Tabellenverzeichnis 157
6.3 Literatur- und Quellenverzeichnis 158
6.4 Anhangsverzeichnis 158

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
BENT	Bouygues E&S EnerTrans AG
IDZF	Projektname
AIS	Freiluftschaltanlage
PL	Projektleiter
tDMS	technisches Dokumentenverwaltungssystem
MS	Meilenstein
MESH	Darstellungsvariante eines 3D-Modells
XREF	Cross-reference (Externe Referenz)
ChatGPT	Chat Generative Pre-trained Transformer
Augmented Reality	Erweiterte Realität

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis

Gender-Disclaimer

„Das in dieser Arbeit gewählte generische Maskulinum bezieht sich zugleich auf die männliche, die weibliche und andere Geschlechteridentitäten. Zur besseren Lesbarkeit wird auf die Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Alle Geschlechteridentitäten werden ausdrücklich mitgemeint, soweit die Aussagen dies erfordern.“ (Dressler, 2021)

1 Management Summary

Das Hauptziel dieser Arbeit, ist die Erfassung und 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen im Bereich der Hochspannungstechnik mittels Laserscanning-Technologie, sowie dedizierter 3D-Modellierungssoftware zu optimieren und zu standardisieren. Dies soll eine genaue und realitätsnahe virtuelle Abbildung der Anlagen sicherstellen.

Für BENT ergibt sich daraus folgende Nutzen:

Sicherheit: Durch Laserscanning wird die Notwendigkeit, physisch vor Ort zu sein, für Massnahmen wie Abstandsmessungen eliminiert, wodurch das Risiko von Unfällen und Verletzungen erheblich verringert wird (STOPP-Prinzip – S=Substitution).

Effizienz: Die erstellten 3D-Modelle erleichtern die Planung von Schulungen, Neu- und Umbauten, da sie von jedem Standort aus zugänglich sind.

Qualität: Durch die Erfassung sind alle Masse jederzeit abrufbar. Eine ungefähre Schätzung eines Masses wird durch eine genau Massangabe abgelöst.

Optimierung: Durch den digitalen Zwilling können Betriebsprozesse, Erneuerungen und Instandhaltungen effizienter geplant und durchgeführt werden. Dies führt, zu besser koordinierten Zeitplänen, optimaler Ressourcennutzung und reduzierten Stillstandszeiten.

Die vorliegende Arbeit unterteilt sich wie folgt:

Laserscanning:

Fokussiert auf die digitale Erfassung von Freiluftschaltanlagen im Bereich der Hochspannungstechnik.

Das Endprodukt ist eine "Punktwolke", eine detaillierte digitale Darstellung, die Millionen von Datenpunkten enthält. Diese Punktwolke dient als Grundlage für die Erstellung des digitalen Zwillings.

Digitaler Zwilling:

Ein digitales Modell eines physischen Objekts, welches Logik enthält und somit über die blosse Darstellung der Punktwolke hinausgeht. Diese Arbeit konzentriert sich darauf, wie man von der Punktwolke zu einem vollständigen digitalen Zwilling gelangt.

2 Projektinitialisierung

2.1 Ausgangslage

BENT, ein führender Akteur im Hoch- und Höchstspannungsbereich, sieht sich mit wachsenden Herausforderungen konfrontiert, die durch die rasante Entwicklung der Digitalisierung entstehen. Die steigenden Digitalisierungsanfragen vom Markt verlangen innovative und zeitgemässe Lösungen, um den ständig wechselnden Anforderungen und Erwartungen gerecht zu werden. Dabei ist es unabdingbar, moderne Technologien und Prozesse zu integrieren, um den operativen Betrieb zu optimieren und Wettbewerbsvorteile zu sichern.

In Bezug auf die Sicherheit setzt BENT auf fortschrittliche Techniken wie das Laserscanning. Diese Methode minimiert nicht nur das Risiko von Unfällen, indem weniger physische Präsenz vor Ort erforderlich ist, sondern ermöglicht auch eine präzisere und zuverlässigere Datenerfassung. Dies ist besonders wichtig, um den Sicherheitsstandards und Vorschriften in der Branche gerecht zu werden.

Die Effizienz in der Planung und Durchführung von Projekten wird durch die Verwendung von 3D-Modellen deutlich gesteigert. Diese Modelle können von überall aus abgerufen werden und ermöglichen es den Teams, zeit- und ortsunabhängig zu arbeiten. Dies beschleunigt nicht nur den Planungsprozess, sondern erleichtert auch die Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Abteilungen und Stakeholdern.

In Sachen Qualität hat die Digitalerfassung einen neuen Meilenstein gesetzt. Wo früher einige wenige ausgemessene Distanzen zurückgegriffen werden konnte, ermöglicht die Technologie heute den sofortigen Zugriff auf praktisch alle Masse einer Freiluftschaltanlage. Das reduziert nicht nur Fehler und steigert die Genauigkeit, sondern steigert auch das Vertrauen in die erfassten Daten und deren Verwendung in der Planung.

Schliesslich führt die Einführung eines digitalen Zwillings zu einer umfassenden Optimierung des gesamten Betriebs. Dieses digitale Abbild der realen Anlage erlaubt es, Betriebsprozesse, Erneuerungen und Instandhaltungen vorab zu simulieren und zu planen. Das Ergebnis ist eine verbesserte Koordination, eine optimale Nutzung der verfügbaren Ressourcen und reduzierte Stillstandszeiten, was wiederum zu Kosteneinsparungen führt.

2.2 Schulische Anforderungen

Mit der Diplomarbeit werden Sie das, während dem gesamten Studium aufgebaute Grundlagenwissen an einer praxisorientierten Aufgabe in Ihrer Studienrichtung anwenden und vertiefen. Dabei geht es für Sie im Wesentlichen um die konsequente Zielorientierung, die Anwendung der Phasen des Projektmanagements sowie die konsequente Umsetzung von definierten Rahmenbedingungen.

Im Rahmen der Vorbereitungsarbeiten wurden Sie eingehend über diese Rahmenbedingungen sowie die Durchführung der Diplomarbeit informiert. Bei der Realisierung der Diplomarbeit müssen Sie nun den folgenden Punkten besondere Beachtung schenken:

- Die einzelnen Schritte, welche als Summe zum Ergebnis geführt haben, müssen beschrieben sein.
- Wurden im Rahmen der Lösungsfindung verschiedene Varianten entworfen und geprüft, muss die Evaluation der gewählten Variante mittels einer dazu geeigneten Methode dokumentiert und begründet sein.
- Bei der Dokumentation der Diplomarbeit ist auf einen logischen Aufbau, eine saubere Gliederung sowie auf gute Verständlichkeit zu achten. Details sind in den Richtlinien zur Diplomarbeit beschrieben.
- Der Value-add (Mehrwert) des Ergebnisses für den Auftraggeber muss aus der Dokumentation klar erkennbar und nachvollziehbar sein.
- Für die optimale Begleitung muss dem Diplomlehrer ein wöchentlicher Statusbericht (gemässe Vorlage Extranet TEKO) zugestellt werden. Dies ermöglicht dem Diplomlehrer den Verlauf unmittelbar mitzuverfolgen und bei Bedarf gezielt reagieren zu können.
- Der Fachexperte muss die Diplomarbeit gemäss den Kriterien auf dem durch den Diplomlehrer abgegebenen Bewertungsformular beurteilen. Der Fachexperte sendet das Formular bis spätestens eine Woche nach Abgabe der Diplomarbeit an den Diplomlehrer.
- Die Präsentation der Diplomarbeit muss so ausgestaltet sein, dass eine aussenstehende, fachunabhängige Person innerhalb von 12 Minuten die folgenden Punkte erkennen und bewerten kann:
    - Auftrag sowie Sinn und Zweck
    - Endergebnisse und Erfolgskriterien
    - besondere Herausforderungen auf dem Weg zum Ziel inkl. gewählte Lösungsansätze mit Begründung, jedoch ohne sich in Details zu verlieren
    - Demo des Produktes, Prototyps etc.
    - Reflexion: Zielerreichung, Weg zum Ziel, Lessons learned
- Im Anschluss an die Präsentation des Ergebnisses muss innerhalb von 2 Minuten die Onlinepublikation der Diplomarbeit vorgestellt werden. Die Onlinepublikation wird bewertet und muss so ausgestaltet sein, dass Aussenstehende in einer attraktiven, kreativen und leicht verständlichen Form sich über die erarbeitete Diplomarbeit informieren können.

Die Begleitung und die Bewertung der Diplomarbeit durch den Diplomlehrer richten sich konsequent nach dem vom Auftraggeber genehmigten und unterzeichneten Pflichtenheft, den im Dokument "Auftrag zur Konkretisierung des Themas für die Diplomarbeit" definierten Rahmenbedingungen sowie dem im Extranet verfügbaren Beurteilungsraster. (ra, 2023)

2.3 Auftrag

Der detaillierte Auftrag ist im Anhang ANH-001 in Form eines Pflichtenhefts beigelegt. Abweichend zum Pflichtenheft entfällt der Punkt 8 (Vertraulichkeitsvermerk) komplett. Die vertraulichen Dokumente wurden aus der Diplomarbeit entnommen und stehen zur Einsicht bei der Firma BENT zur Verfügung sofern berechtigte Interessen vorliegen.

2.3.1 Vorstellung BENT

Die Wurzeln von BENT liegen in der Schweiz mit der Gründung von Atel und Kummler+Matter zu Beginn des letzten Jahrhunderts. Parallel dazu entstand in Frankreich das Unternehmen von Francis Bouygues, einem Pionier der Nachkriegszeit in der Baubranche. In den letzten Jahren haben sich die Wege der beiden Unternehmen gekreuzt und aus dem Zusammenschluss ist in der Schweiz Bouygues Energies & Services entstanden, ein traditionsreiches und führendes Unternehmen in den Bereichen Gebäudetechnik, Facility und Property Management, Prozessautomation, Green Solutions sowie Energie, Verkehr und Telekommunikation. BENT ist eine Tochtergesellschaft von Bouygues Energies & Services Schweiz und plant und baut Hoch- und Mittelspannungsanlagen für Netzbetreiber, Stadtwerke, Kraftwerke und die Industrie. Das umfassende Leistungsangebot umfasst Studien und Konzepte, Planung und Projektierung, Bau und Inbetriebnahme sowie Betriebsunterstützung und Wartung. Mit rund 150 Mitarbeitenden verfügt EnerTrans über ein grosses Know-how aus zahlreichen realisierten und betreuten Anlagen und zeichnet sich durch Umsetzungsstärke und zukunftssichere Lösungen aus. Weitere Informationen zur Firma Bouygues Energies & Services Schweiz sowie zur BENT finden sich hier: (Bouygues E&S InTec Schweiz AG, 2023)

2.3.2 Dienstleitungen

Das Dienstleistungsportfolio der BENT ist in Abbildung 1 zusammengefasst siehe auch: (Bouygues E&S InTec Schweiz AG, 2023)

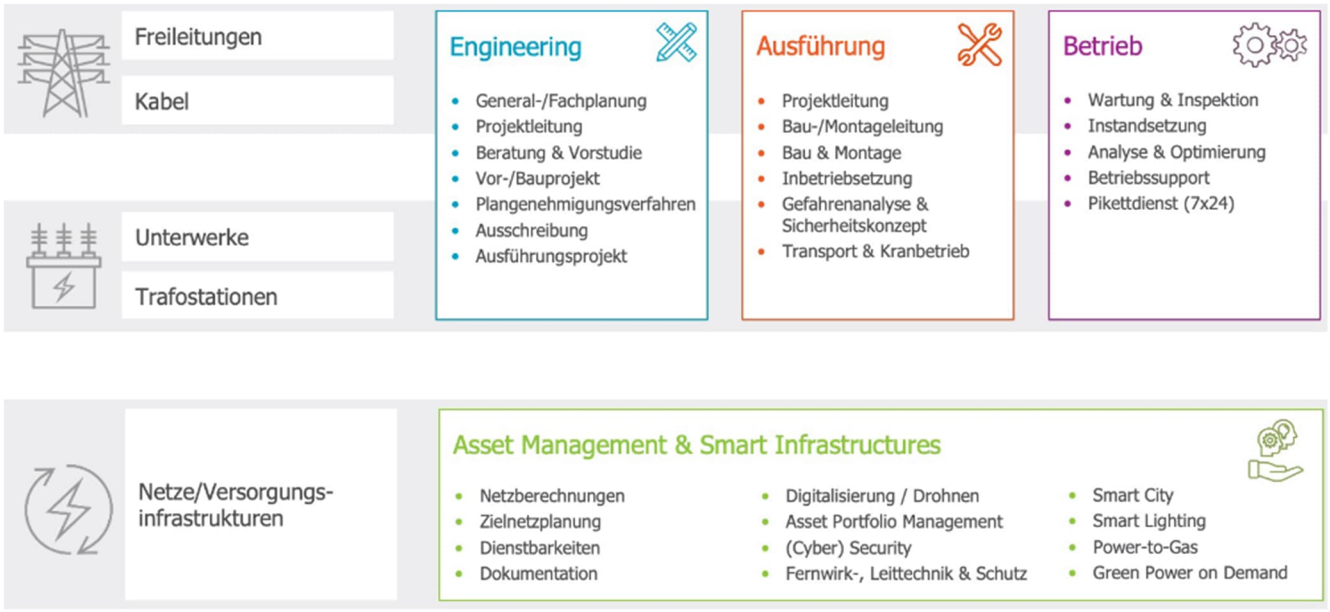


Abbildung 1: Dienstleistungsportfolio BENT

2.3.3 Standorte

Die BENT ist an verschiedenen Standorten in der Schweiz sowie in Deutschland vertreten. Der Hauptsitz befindet sich in Niedergösgen.

Weltpoststrasse 5 3015 Bern Bern (CH)	Industriestrasse 15 9015 St. Gallen St. Gallen (CH)	Oltnerstrasse 61 5013 Niedergösgen Solothurn (CH)
Flüelerstrasse 137 6460 Altdorf Uri (CH)	Route d'Yverdon 4 1032 Romanel-sur-Lausanne Waadt (CH)	Route des Flumeaux 45 1008 Prilly Waadt (CH)
Via Cantonale 6 6805 Mezzovico-Vira Tessin (CH)	Avenue des Grandes-Maresches 106 1920 Martigny Wallis (CH)	Via Industria 22 6745 Giornico Tessin (CH)
Im Breitspiel 7 69126 Heidelberg Baden-Württemberg (DE)	Höhenstrasse 21 70736 Fellbach Baden-Württemberg (DE)	

Tabelle 2: Standorte BENT

2.3.4 Kunden

Dank dem Know-how von BENT und der langjährigen Erfahrung werden für die Kunden massgeschneiderte Lösungen entwickelt. Ein Auszug der wichtigsten Kunden findet sich an Abbildung 2: wichtigste Kunden BENT.Abbildung 2: wichtigste Kunden BENT

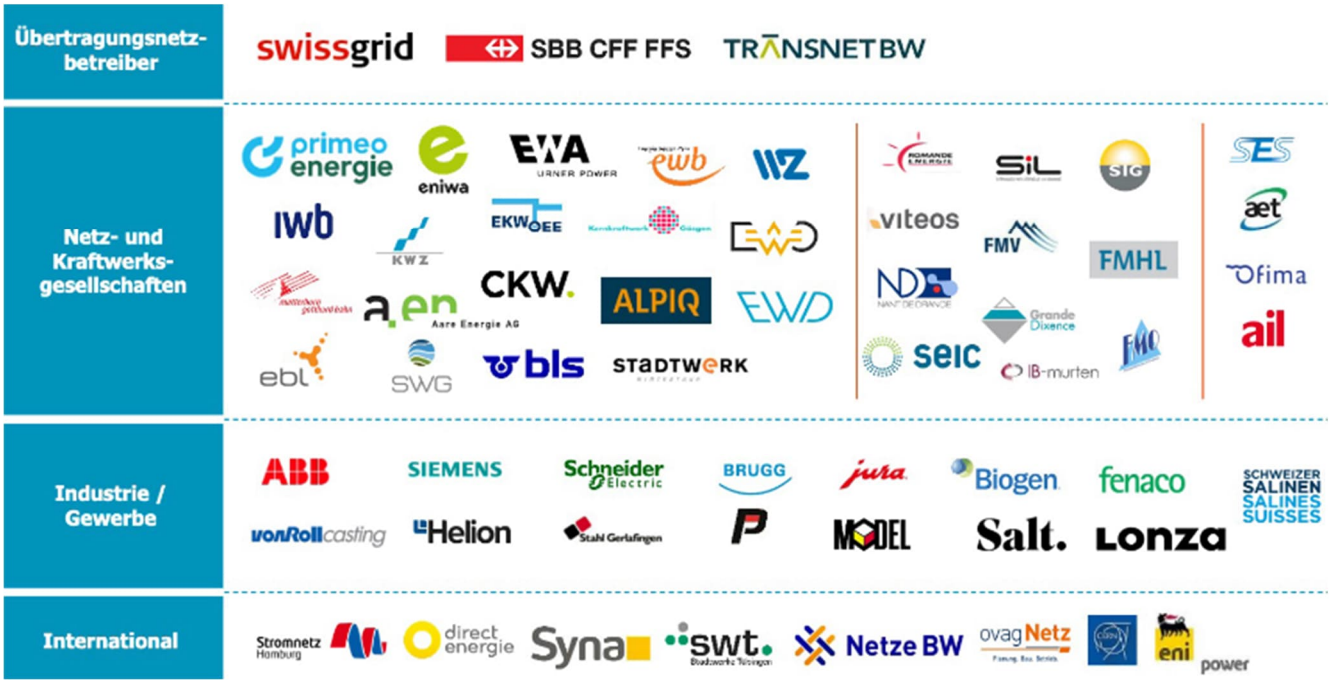


Abbildung 2: wichtigste Kunden BENT

2.3.5 Netzwerke

BENT arbeitet eng mit kompetenten Partnern zusammen und pflegt Beziehungen in relevanten Netzwerken. Auszug unserer Netzwerke und Partner in Abbildung 3: Auszug unserer Netzwerke und Partner.

Abbildung 3: Auszug unserer Netzwerke und Partner

2.4 Vorstellung Projektmitarbeiter

Fernando Xatruch

Projektleiter geboren am 30.05.1978

Beruflicher Werdegang

01.2018 **Bouygues E&S EnerTrans AG (ehemals Alpiq EnerTrans AG)**

Projektleiter bei Asset Management

Lehrlingsausbildner

05.2009 **Alpiq EnerTrans AG (ehemals Atel Netz AG)**

Leiter Dokumentation Anlagen Ost

Lehrlingsausbildner & Berufsbildungsverantwortlicher

05.2004 **Atel Netz AG**

Leiter Dokumentation Anlagen Ost

Lehrlingsausbildner

08.2001 **Securiton AG, Zofingen**

Leiter Dokumentation für Spezialprojekt

„UewSys“ der Schweizer Armee. Mitentwicklung & Konstruktion Komponenten des Systems.

06.1999 **SSE Engineering AG, Gümlingen**

Sachbearbeiter Elektroinstallationen.
Lehrlingsausbildner

Hard Skills

Software

MS Office	■■■■■
Autocad	■■■■■
Revit	■■■□□
Inventor	■■■□□
Adobe Photoshop	■■■■■
Trimble Realworks	■■■■□
Primtech 3D	■■■■□

Sprachen

Deutsch	■■■■■
Englisch	■■■□□
Französisch	■■□□□
Spanisch	■■■■■

Fernando Xatruch

Projektleiter, geboren am 30.05.1978

Ausbildung

2023 **HF Elektrotechnik**
an der TEKO Olten

2017 **Primtech 3D**
Primtech 3D 16 Basistraining

1998 **Elektrozeichner Fachrichtung Energie**
EFZ Elektrozeichner mit Berufsmatur

Hobby & Freizeit

EP
IT
3D Druck
Fotografie

Ehrenamt

2015 **Samichlaus**
Für die Pfadi Johanniter Grenchen

2010 **div. Kurse zum Thema Bullying und Mobbing**
diverse Jugendvereine

Kompetenzen & Soft Skills

Planung von Hochspannungsanlagen
CAD
tDMS
3D Laserscan
Betriebssanitäter

Pflichtbewusst
Organisiert
Flexibel
Zielstrebig
Kommunikativ

Dominik Sieber

Projektleiter geboren am 16.10.1996

Beruflicher Werdegang

08.2021 **Bouygues E&S EnerTrans AG**

Projektleiter, Primärtechnik, Anlagen Ost

08.2020 **Bouygues E&S EnerTrans AG (ehemals Alpiq EnerTrans AG)**

Projektleiter und Elektroplaner, Primärtechnik, Anlagen Ost

08.2017 **Bouygues E&S EnerTrans AG, Niedergösgen**

Elektroplaner, Primärtechnik, Anlagen Ost

Hard Skills

Software

- MS Office
- Autocad
- Revit
- E-Plan
- ReCap
- Trimble Realworks
- Primtech 3D

Sprachen

- Deutsch
- Englisch
- Französisch

Dominik Sieber

Projektleiter geboren am 16.10.1996

Ausbildung

2023 **HF Elektrotechnik**
an der TEKO Olten

2017 **Primtech 3D**
Primtech 3D 16 Basistraining

2013 **Elektroplaner Fachrichtung Energie**
EFZ Elektroplaner

Hobby & Freizeit

Fussball
Joggen
Motorsport

Vereine

2023 **Fussball**
Fussballclub Rothrist

2018 **Fussball**
Fussballclub Oftringen

Kompetenzen & Soft Skills

CAD	Pflichtbewusst
Führung	Organisiert
Projektleitung	Flexibel
3D Modellierung	Zielstrebig
Teamplayer	Kommunikativ

Marc Del Degan

Abteilungsleiter geboren am 14.04.1978

Beruflicher Werdegang

01.2019 **Bouygues E&S EnerTrans AG, Niedergösgen**
Abteilungsleiter Asset Management Support, Mitglied der Geschäftsleitung

01.2018 **Bouygues E&S EnerTrans AG, Niedergösgen**
Leiter Business Development, Teamleiter Asset Related Services (ARS)

05.2016 **Bouygues E&S EnerTrans AG, Niedergösgen**
(vormals Alpiq EnerTrans AG)
Leiter Business Development

08.2008 **AWK Group AG, Zürich**
Unternehmensberatung, Abteilung Energieversorgungsunternehmen

10.2005 **ETH Zürich, Zürich & Hamburg:**
Doktorand am Institut für Teilchenphysik (Mitglied der H1 Kollaboration in Hamburg), Wissenschaftlicher Assistent

Marc Del Degan

Abteilungsleiter geboren am 14.04.1978

Ausbildung

2014 **Zertifizierung IREB CPRE**
SGO, Glattbrugg

2012 **Master of Advanced Studies in Management, Technology and Economics / BWI**
ETH Zürich, Zürich

2012 **Zertifizierung IPMA Level C**
vzpm, Glattbrugg

2010 **Zertifizierung ITIL V3 Expert**
exin, Zürich

2010 **Didaktischer Ausweis**
ETH Zürich, Zürich

2009 **Zertifizierung SAP Solution Architect**
SAP Schweiz, Regensdorf

2008 **Doktorratsstudium, Abschluss als Dr. sc.**
ETH Zürich, Zürich

2004 **Studium der Physik, Abschluss mit Diplom in Physik**
ETH Zürich, Zürich

2.5 Qualifikationsprofil Fernando Xatruch

Prozess	Definition
Menschen führen Prozess 1	Im Projekt «Tonndorf» führte ich eine Gruppe von zwei Zeichnern und einem Sachbearbeiter Als Praxisbilder für Elektroplaner bildete ich über 15 Lehrlinge gemäss Rahmenlehrplan aus und trug Sorge, dass sie die Bildungsziele erreichten.
Entscheidungen fällen Prozess 2	Innerhalb meiner Kompetenzen entschied ich im Projekt tDMS, mittels Kriterienkatalogs und Präferenzmatrix welche Dokumentationssoftware ich der Geschäftsleitung zur Beschaffung vorschlug.
Projekte planen und leiten Prozess 3	Als Projektleiter Elektrotechnik in den Netzebenen 3 bis 7 habe ich das Projekt 3D-Modellierung der Firma TransnetBW ziel- und ergebnisorientiert geleitet und gemäss den Vorgaben erfolgreich abgeschlossen.
Sich sprachlich verständigen Prozess 4	Ich passte Fachbegriffe entsprechend dem Ausbildungsstand der Lehrlinge an, um das zu Erlernende für sie verständlich weiterzugeben. Ich passte Sprache und Fachbegriffe entsprechend dem Gebrauch des Kunden an. Bei Pikett-Einsätzen sprach ich mit der Netzleitstelle der Swissgrid gemäss den Sicherheitsvorgaben, um Missverständnisse zu vermeiden.
Wirkungsvoll präsentieren und kommunizieren Prozess 5	Die von mir gefällten Entscheidungen zum Aufbau des 3D-Modells im Projekt 3D-Modellierung des Kunden TransnetBW hatte ich verständlich, und zielgerecht dem Kunden kommuniziert. Ich präsentierte den Kunden Offerten und hob die Vorteile mit uns als Dienstleister hervor.
Probleme analysieren und lösen Prozess 9	Probleme in der Qualität der extern gelieferten Daten im Projekt 3D-Modelling des Kunden TransnetBW erfasste und analysierte ich. Dabei habe ich die Interessen der Stakeholder abgewogen, um die beste Lösung zu finden.

Sich persönlich weiter entwickeln Prozess 10	Die neu benötigte Software Trimble RealWorks brachte ich mir autodidaktisch bei und habe sie unmittelbar gewinnbringend in Projekt Umbau UW Lachmatt angewendet. Ich besuchte den Lehrgang BIM-Konstrukteur der Firma Mensch und Maschine, um für die zukünftige Anforderung betreffend BIM in Kundenprojekten vorbereitet zu sein.
Produkte entwickeln Prozess 11	Ich habe die Kundenbedürfnisse für ein Dokumentenverwaltungssystem in der Vertragsabteilung (ALS) abgeklärt und auf dieser Basis ein marktreifes Konzept erstellt, welches dann von mir umgesetzt wurde und der Abteilung ALS fü den Kunden Primeo diente.
Programme entwickeln Prozess 12	Für die bestehende Dokumentenverwaltung Keytech hatte ich ein Programm entwickelt und geschrieben, welches in der SQL von Keytech anhand der Dokumentennummer den Speicherort und den Dokumentennamen des Dokumentes ausgibt. Diese Informationen sind direkt im Programm nicht zu erhalten. Wurde das Dokument versehentlich überschrieben, konnte so der IT mitgeteilt werden welche Datei aus dem Backup entnommen werden soll.
Anlagen projektieren Prozess 13	Als Elektroplaner in Unterwerksprojekten aller Netzebenen konnte ich anhand vorgegebener elektrischer Komponenten und ihrem Platzbedarf die notwenigen Gebäude und Räume im Projekt Bonaduz für den Kunden Swissgrid evaluieren und in Autodesk Revit projektieren.
Elektrotechnische Anlagen unterhalten Prozess 15	In meiner Funktion war ich Teil des Piketts für Schaltanlagen der Swissgrid (380kV-220kV). Wurde ich aufgeboten, musste ich anhand der gegebenen Informationen die Störung analysieren und innerhalb meiner Fähigkeiten beheben, bzw. die weiteren Schritte einleiten und koordinieren.

Tabelle 3: Qualifikationsprofil Fernando Xatruch

2.6 Qualifikationsprofil Dominik Sieber

Prozess	Definition
Menschen führen Prozess 1	In meinem Projekt «Parzutt», Erneuerung einer 72.5kV Freiluftschaltanlage in Churwalden, führte ich zwei interne sowie zwei externe Mitarbeiter. Dabei durfte ich mit einem Projektteam zusammenarbeiten. Unabhängig, ob dies interne oder externe Projektbeteiligte waren, konnte ich als verantwortlicher Projektleiter die Führung des Teams übernehmen.
Entscheidungen fällen Prozess 2	In meiner Rolle als Projektleiter im Projekt «Marxheim», hatte ich erfolgreich zahlreiche Entscheidungen getroffen, um sicherzustellen, dass das Projekt termingerecht unter Einhaltung der Kosten und der geforderten Qualität abgewickelt wird. Dabei spielten diverse Entscheidungen eine Rolle. Aufgrund der Gegebenheiten vor Ort, musste entschieden werden, an welchen Ort der neue Transformator gestellt werden soll, bis hin zu Terminentscheidungen aufgrund des Winters, ob nun noch das Transformatorfundament betoniert werden kann oder nicht.
Projekte planen und leiten Prozess 3	Als Projektleiter durfte ich das Projekt «Güterstrasse» über alle SIA-Phasen durchführen. Die Durchführung erfolgte von der Erstellung einer Machbarkeitsstudie mit verschiedenen Varianten bis hin zur Inbetriebnahme der neuen Transformatorenstation. Der Bau des Gebäudes, sowie die Erstellung der gesamten Einrichtung der Station wurde durch mich geplant, organisiert sowie geleitet.
Sich sprachlich verständigen Prozess 4	Der Kunde hatte keine grosse Erfahrung und Knowhow im Bereich von Hochspannungsanlagen im Projekt «Klybeck». Für mich einfach verständliche Wörter, wie beispielsweise ein Leistungsschalter, waren für den Kunde kaum verständlich. Dementsprechend musste ich Fachbegriffe vermeiden und mithilfe von Skizzen und Bildern die Lösungsansätze für seine Probleme erläutern.
Wirkungsvoll präsentieren und kommunizieren Prozess 5	Bei meiner Tätigkeit als Projektleiter und dem Führen des Projektes «Redundanzerweiterung WKL170», musste ich eine Machbarkeitsstudie erarbeiten, für die Redundanzerweiterung einer 50kV Freiluftschaltanlage. Die unterschiedlichen Varianten durfte ich anschliessend dem Kunde präsentieren und erläutern.

Probleme analysieren und lösen Prozess 9	Beim Neubau einer Mittelspannungsanlage für das Projekt «Güterstrasse», wurden Platzprobleme festgestellt. Die gewünschte Anlage des Kunden war zu gross und hatte keinen Platz an den von ihm vorgesehenen Standort. Mit einem Austausch von diversen Lieferanten konnte eine ähnliche Anlage gefunden werden, welche eine kompaktere Bauweise aufweiste. Dementsprechend konnte diese eingebaut und die Platzverhältnisse eingehalten werden.
Sich persönlich weiterentwickeln Prozess 10	Durch die Beschaffung der neuen Software Primtech 3D in unserem Unternehmen, wurde ich als einer der Poweruser geschult. Als Pilotprojekt durfte ich die Modellierung einer neuen Teilanlage für das Projekt «Laufenburg» in 3D durchführen.
Anlagen projektieren Prozess 13	Als gelernter Elektroplaner konnte ich ein neues Unterwerk für das Projekt «Sissach» unter Vorgaben und Wünsche des Kunden planen. Die Hochspannungsanlage sowie die Transformatoren mussten neu projektiert und ausgelegt werden. Für das Projekt hatte ich diverse Varianten erarbeitet, welche für die Anforderungen und Gegebenheiten realistisch waren.
In Betrieb setzen Prozess 14	Bei der Inbetriebsetzung der Freiluftschaltanlage «Parzutt», habe ich zusammen mit meinem Projektteam die Anlage geprüft. Fehlfunktionen konnten wir vor Ort feststellen und beheben: Bei der Inbetriebsetzung wurde nur ein Verdrahtungsfehler gefunden und korrigiert. Anschliessend konnte die Anlage in Betrieb genommen werden.
Elektrotechnische Anlagen unterhalten Prozess 15	Im Projekt «Bonaduz», durfte ich aufgrund der Alterung der Freiluftschaltanlage ein Umbaukonzept für die Erneuerung der gesamten Anlage erstellen. Unter Einhaltung der möglichen Abschaltzeiten und den Platzverhältnissen, musste diese etappenweise projektiert und umgebaut werden.
Testeinrichtungen konzipieren und herstellen Prozess 16	Für die Abnahme der «P2G-Anlage» auf unserem Firmengrundstück, konnte ich für den Endkunde Abnahmeprotokolle erstellen. Diese sollten die Funktionstüchtigkeit der Anlage protokollieren. Die Subunternehmer mussten die Punkte in den Protokollen kontrollieren und bestätigen. Mängel oder noch offene Punkte konnten dokumentiert werden und den Unternehmen zur Fertigstellung weitergegeben werden.

Tabelle 4: Qualifikationsprofil Dominik Sieber

2.7 Rollendefinition

Das Projekt besteht aus einer sogenannten Doppelprojektorganisation.

Der Auftraggeber BENT wird durch Herrn Dr. Marc Del Degan vertreten. Er dient als Kundenvertretung, Fachexperte und Bewerter der Arbeit.

Herr Josef Räber fungiert als Diplomexperte und führt ebenfalls die Bewertung der Arbeit durch. Er dient als Ansprechperson für die Diplomarbeit und vertritt die TEKO.

Das Projekt ist sehr arbeitsintensiv und kann gemäss den Vorgaben der TEKO (Arbeitsaufwand von 150 – 250 Stunden) nicht durch eine Person alleine durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden zwei Projektleiter für zwei Teilprojekte definiert.

Herr Fernando Xatruch wird das Teilprojekt «Laserscanning» als Projektleiter führen, abwickeln und dokumentieren.

Herr Dominik Sieber wird das Teilprojekt «digitaler Zwilling» als Projektleiter führen, abwickeln und dokumentieren.

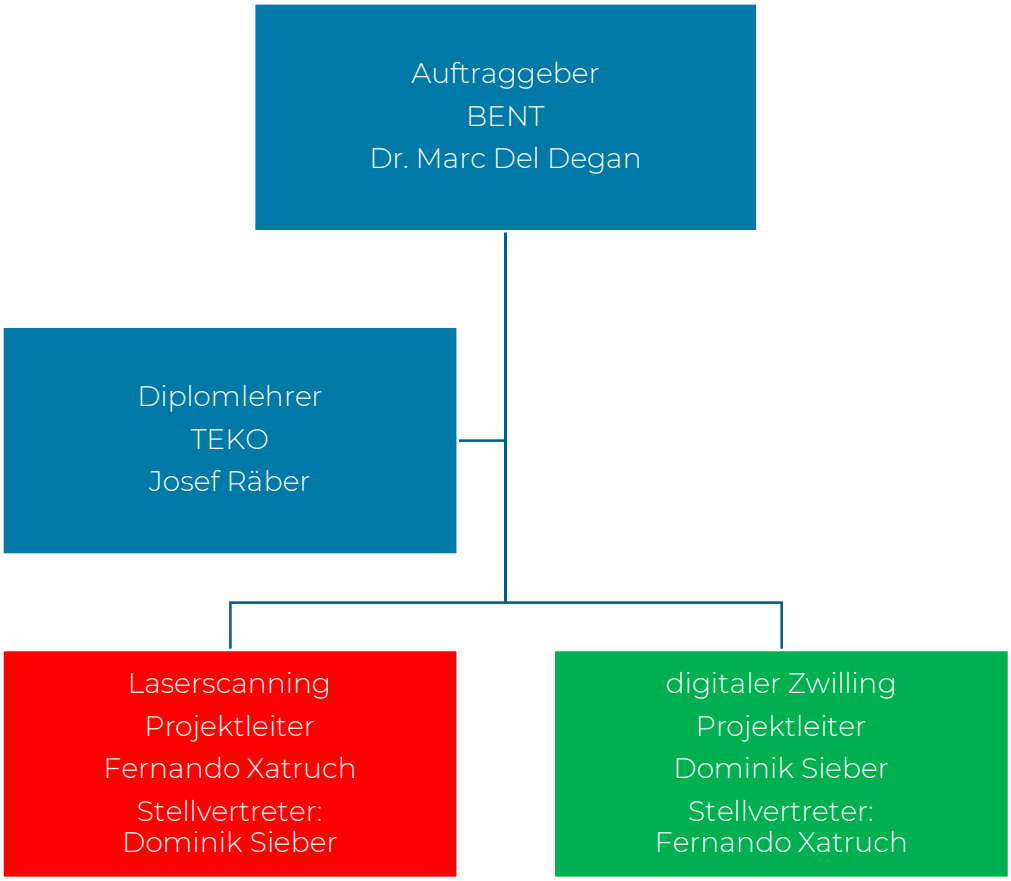


Abbildung 4: Projektorganisation

2.8 Teilprojekt «Laserscanning»

Der Begriff "Laserscanning" bezieht sich auf die moderne Methode der digitalen Erfassung mittels eines Laserscanners. Laserscanning ermöglicht die äusserst präzise Aufnahme physischer Objekte wie Gebäude, Statuen oder sogar ganzer Städte. In diesem speziellen Vorhaben liegt der Fokus auf der Erstellung eines Laserscans für eine Freiluftschaltanlagen im Bereich der Hochspannungstechnik. Der Methodik folgend beginnt die Datenerfassung mit mehreren Einzelscans aus verschiedenen Blickwinkeln und Positionen, um eine lückenlose und genaue Aufnahme des Objekts sicherzustellen. Jeder dieser Scans erzeugt eine eigene Punktwolke, die eine spezifische Region oder einen Abschnitt des Objekts darstellt. Nach der Erfassung werden diese Einzelpunktwolken in einer konsolidierten und vollständigen Punktwolke zusammengeführt. Hierbei ist es entscheidend, Überschneidungen präzise abzugleichen und eventuelle Abweichungen zu korrigieren, um eine exakte Repräsentation des Gesamtobjekts zu gewährleisten. Das finale Produkt dieses Teilprojekts ist eine digitale Datei, die als "registrierte Punktwolke" bezeichnet wird. Diese Punktwolke besteht aus einer Vielzahl einzelner Punkte im Millionenbereich. Diese digitale Repräsentation wird im Anschluss für die präzise Rekonstruktion eines digitalen Zwillings verwendet. Ein zentraler Aspekt in der Analyse von Scandaten ist die Betrachtung der Punktwolke als reine Sammlung von Messpunkten im Raum ohne inhärente Semantik oder logische Struktur. In diesem Kontext dient die Punktwolke primär als Ausgangsmaterial zur Generierung eines digitalen Zwillings. Dieser digitale Zwilling stellt ein quantifizierbares, simulierbares und kontrollierbares Modell dar, welches eine optimierte Auswertung und Integration der erfassten Daten in technischen Workflows erlaubt.

2.9 Teilprojekt «digitaler Zwilling»

Der Begriff "digitaler Zwilling" ist bereits seit einigen Jahren im Gebrauch, dennoch fällt es vielen immer noch schwer, sich eine genaue Vorstellung davon zu machen und seine Anwendungsmöglichkeiten zu verstehen. Ein digitaler Zwilling stellt ein digitales Abbild eines physischen Objekts dar. Als Beispiel kann hier ein einfacher Baum dienen, der mithilfe einer passenden Software präzise nachmodelliert wird. Der digitale Zwilling fungiert als digitales Spiegelbild eines realen Objekts und enthält im Gegensatz zur Punktwolke eine Logik. Zur Erstellung eines solchen digitalen Zwillings können einfache Objekte manuell vermessen und daraufhin nachgebildet werden. Jedoch existieren auch komplexere Szenarien wie ganze Städte oder in unserem Fall, umfangreiche Freiluftschaltanlagen für die Energieübertragung, die nicht manuell vermessen werden können. Für die Erstellung von digitalen Zwillingen komplexer Objekte kommt das Verfahren des Laserscannings zum Einsatz. Durch Laserscanning können Objekte äusserst präzise erfasst und im Anschluss detailgetreu nachgebaut werden. Dieses Teilprojekt konzentriert sich auf den Prozess, wie man von einem Laserscan zu einem vollständigen digitalen Zwilling gelangt.

2.10 Zielscheibe

Die Verwendung der Zielscheibe für die Definition von Zielen in einem Projekt ist eines der wichtigsten Instrumente, um klare und messbare Ziele zu definieren. Genauso wie ein Schütze seine Treffsicherheit auf einer Zielscheibe verbessert, strebt ein Projektteam danach, seine Bemühungen und Ressourcen auf klare Ziele auszurichten, um erfolgreich zu sein.

Richtziel: Das übergeordnete Ziel dieser Diplomarbeit ist, die Erfassung und 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen der Hochspannungstechnik mittels Laserscanning-Technologie zu untersuchen, zu optimieren und zu dokumentieren, um eine effiziente, detaillierte und realitätsnahe virtuelle Abbildung der Anlagen zu gewährleisten. Zielscheibenlayout: @TEKO Olten

1. Die Laserscanner der verschiedenen Anbieter wurden verglichen hinsichtlich:
   a. Genauigkeit
   b. Geschwindigkeit
   c. Einsatzgebiet
2. Eine konsolidierte Punktwolke als ReCap-Datei auf deren Grundlage ein digitaler Zwilling erstellt werden kann, steht zur Verfügung.
3. Verbesserungsvorschläge für die Schulung der Scanoperatoren, welche in AIS Laserscanning durchführen.
4. Eine technische Richtlinie, welche konkrete Anweisungen gibt, wie eine AIS am besten mittels Laserscanner zu erfassen ist.
5. Ein einfaches Kalkulationstool auf Excelbasis, mit welchem die Kosten für ein Scanprojekt abgeschätzt werden können.
6. Eine Anleitung mit Tipps und Tricks, sowie den wichtigsten Funktionen der verwendeten Modellierungssoftware Primtech 3D.
7. Erstellung einer Checkliste zur Prüfung und Abnahme der erstellten Punktwolke.
8. Dokumentation der Modellierung des digitalen Zwillings anhand der Punktwolke.
9. Ein Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling.
10. Eine technische Richtlinie, welche konkrete Hinweise gibt, wie eine AIS am effizientesten modelliert werden kann.
11. Ein einfaches Kalkulationstool auf Excelbasis, mit welchem die Kosten für die Erstellung des digitalen Zwillings anhand einer Punktwolke abgeschätzt werden können.

Endergebnisse

Bouygues E&S EnerTrans AG (BENT)

Kunde

Sinn und Zweck

Der Nutzen für unseren Kunden BENT besteht darin, dass durch die Erfassung von Schaltanlagen mittels Laserscanning gefährliche Situationen vermieden werden können, da nach der Erstellung der Punktwolke kein Personal mehr physisch vor Ort sein muss, um beispielsweise Abstandsmessungen durchzuführen. Dadurch wird das Risiko von Unfällen und Personenschäden deutlich reduziert. Die erstellten 3D-Modelle ermöglichen eine realitätsnahe virtuelle Darstellung der Schaltanlagen. Notwendige Schulungen, aber auch anstehende Neu- und Umbauten können so effizient und präzise vom Büro aus geplant werden. Auch Sicherheitsrisiken, wie die Unterschreitung von Mindestabständen bei Arbeiten in der Anlage können anhand des Modells erkannt und vermieden werden. Mit Hilfe des digitalen Zwillings können somit die Effizienz, die Sicherheit und auch die Planbarkeit von Erneuerungs-, Instandhaltungs- und Betriebsprozessen verbessert werden. Das Ergebnis ist: besser koordinierbare Zeitpläne, optimale Nutzung der Ressourcen und Minimierung der Stillstands Zeiten.

Erfolgskriterien

1. Es wurden mindestens zwei Laserscanner verglichen.
   a. Es wurden mindestens 10 Distanzen pro Laserscanner gemessen und mittels Distanzmessgerät verglichen.
   b. Es wurde pro Laserscanner festgehalten, wie lange es dauert zwei Scans zu erstellen. Dies auf einer hohen, mittleren und einer tiefen Auflösungsstufe.
   c. Für mindestens drei Einsatzgebiete besteht eine eindeutige Empfehlung für den zu verwendeten Laserscanner.
2. Die Punktwolke lässt sich in Primtech 3D (Modellierungssoftware) ohne Fehlermeldung öffnen. Alle zu modellierenden Anlageteile sind abgebildet. Die im Projekt unter Punkt 4 noch zu erarbeitenden minimalen Qualitätspunkte sollen erfüllt sein.
3. Es liegen mindestens fünf Verbesserungsvorschläge vor.
4. Die technische Richtlinie enthält mindestens fünf konkrete Anweisungen zum effizienten Scannen und mindestens fünf einzuhaltende Qualitätsmerkmale der Punktwolke.
5. Das Kalkulationstool ermöglicht eine präzise Abschätzung von ±10% der Kosten und Aufwände für die Erstellung der Punktwolke.
6. Der Auftraggeber bestätigt, dass die Anleitung die wichtigsten Funktionen der Software abdeckt und das Feedback von mindestens 95% der Anwender von Primtech 3D positiv ausfällt.
7. Die Punktwolke wird mit mindestens 90% als qualitativ hoch genug für die Erstellung des digitalen Zwillings bewertet. Die Bewertung (Checkliste) umfasst mindestens 20 Kriterien.
8. Mithilfe der Dokumentation kann ein Nutzer von Primtech 3D die ausgewählte AIS vollständig nachkonstruieren (Grundkenntnisse in Primtech 3D vorausgesetzt).
9. Der Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling soll ergeben, dass sich diese nicht mehr als ±20 mm voneinander unterscheiden.
10. Die technische Richtlinie enthält mindestens 10 konkrete Hinweise und Empfehlungen zur effizienten Modellierung.
11. Das Kalkulationstool ermöglicht eine präzise Abschätzung von ±10% der Kosten und Aufwände für die Erstellung des digitalen Zwillings.

Abbildung 5: Zieldefinition mittels Zielscheibe -Orignalvorlage: TEKO

2.11 Stakeholderanalyse

Die Stakeholderanalyse ist ein Prozess, bei dem die Interessen, Bedürfnisse, Erwartungen und Einflussfaktoren aller relevanten Stakeholder oder Interessengruppen in Bezug auf ein bestimmtes Projekt, eine Organisation oder eine Initiative identifiziert, bewertet und dokumentiert werden. Diese Analyse ermöglicht es, die Interaktionen und Beziehungen zwischen den Stakeholdern und dem Projekt oder der Organisation zu verstehen und zu managen.

Firma	• Geschäftsleitung • Projektleiter • Teamchefs • Projektmitarbeiter • Mitarbeiter
Mitarbeiter	• Elektroplaner und Projektleiter (Modellierer der Anlagen)
Kunden	• Anlageninhaber
Lieferanten	• Laserscanner-Vermietung • Softwareentwickler

Stakeholder	Erwartungen Stakeholder an das Projekt	Erwartungen Projekt an den Stakeholder
Auftraggeber	• Zielerreichung • Zwischenberichte • Termineinhaltungen	• Klare Zielsetzung • Keine Projektänderungen während des Projektes • Erreichbarkeit • Definierte Abgabetermine
Diplomlehrer	• Projektmanagement • Kommunikation • Selbstständigkeit • Zielerreichung	• Unterstützung • Beratung • Bewertung • Erreichbarkeit
Projektteam	• Ressourcenverfügbarkeit • Abgrenzungen	• Konzept • Termineinhaltung • Terminplanung • Kommunikation
Teamchefs	• Mitarbeitereinbindung • Ressourcenplanung • Terminplanung	• Umfragen • Feedbacks • Ressourcen
Lieferanten	• Zeitplanung • Liefertermin	• Pünktlichkeit • Qualität • Funktionierende Technik
Expertenteam	• Argumentation realistisch	• Konstruktives und ehrliches Feedback • Beratung und Rückmeldung

Tabelle 5: Projekt-Stakeholderanalyse

2.12 Projektplanung

2.12.1 Projektstrukturplan

Ein Projektstrukturplan (PSP) ist ein essenzielles Instrument in der Projektplanung und -durchführung. Er ermöglicht die effiziente Koordination verschiedener Aufgaben, Meilensteine und Ressourcen. Der Projektstrukturplan dient als Grundlage für die gesamte Projektsteuerung und ermöglicht es, das Projekt in überschaubare Teilaufgaben zu gliedern. Dabei wird das Gesamtziel in kleinere, handhabbare Schritte unterteilt, um die Planung und Überwachung zu erleichtern.

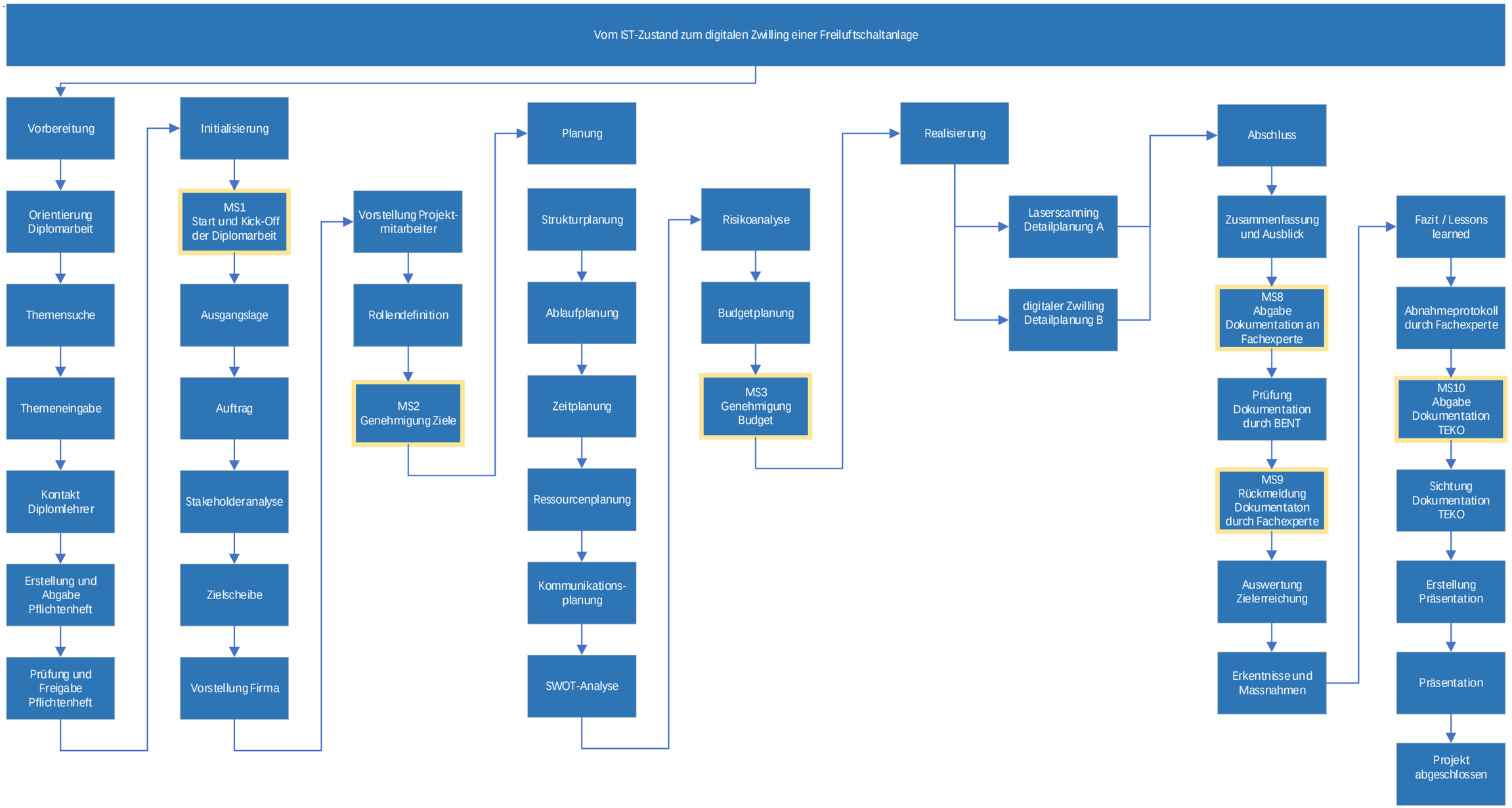


Abbildung 6: Projekstrukturplan Hauptübersicht

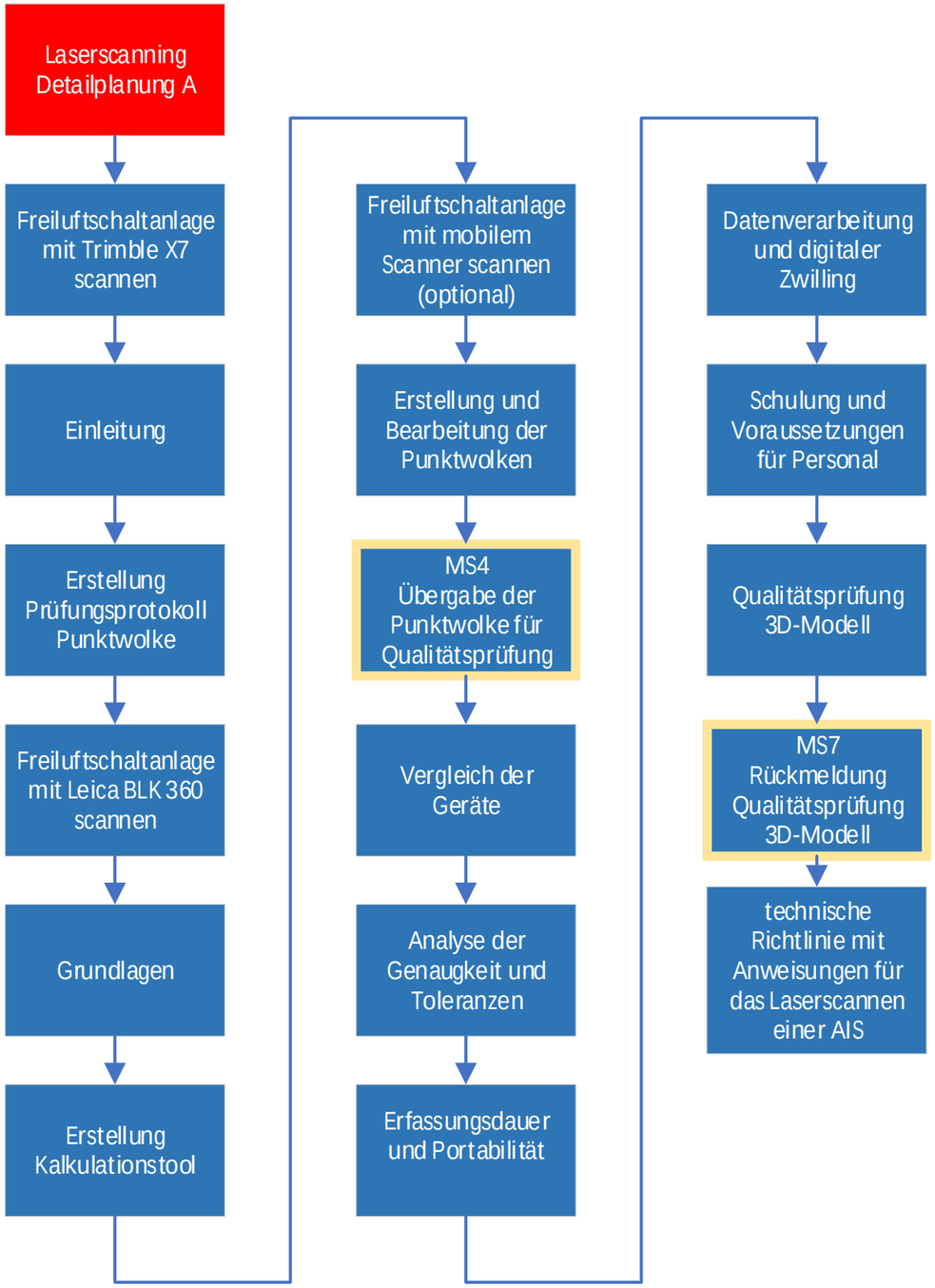


Abbildung 7: Projekstrukturplan Teil Laserscanning

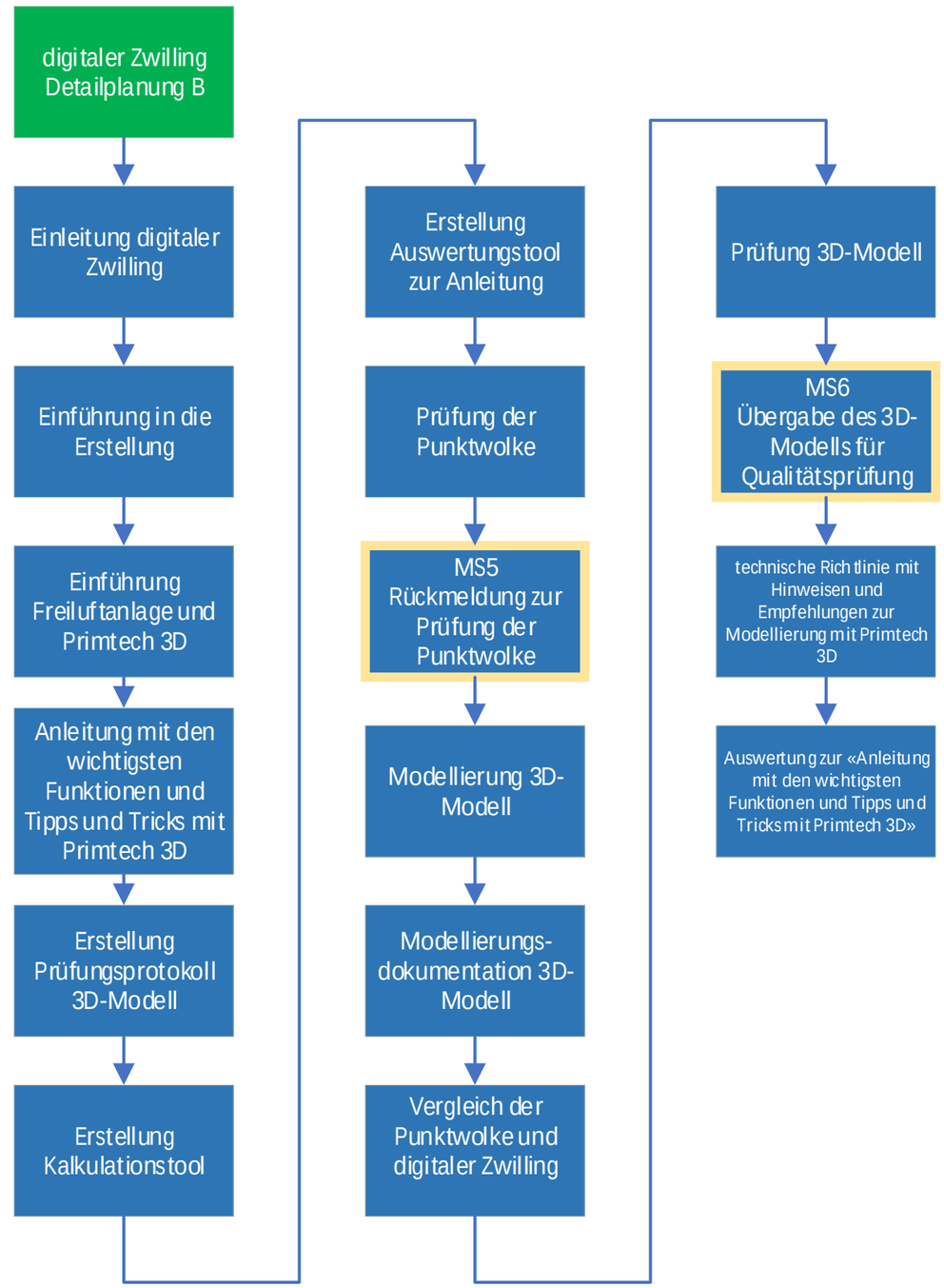
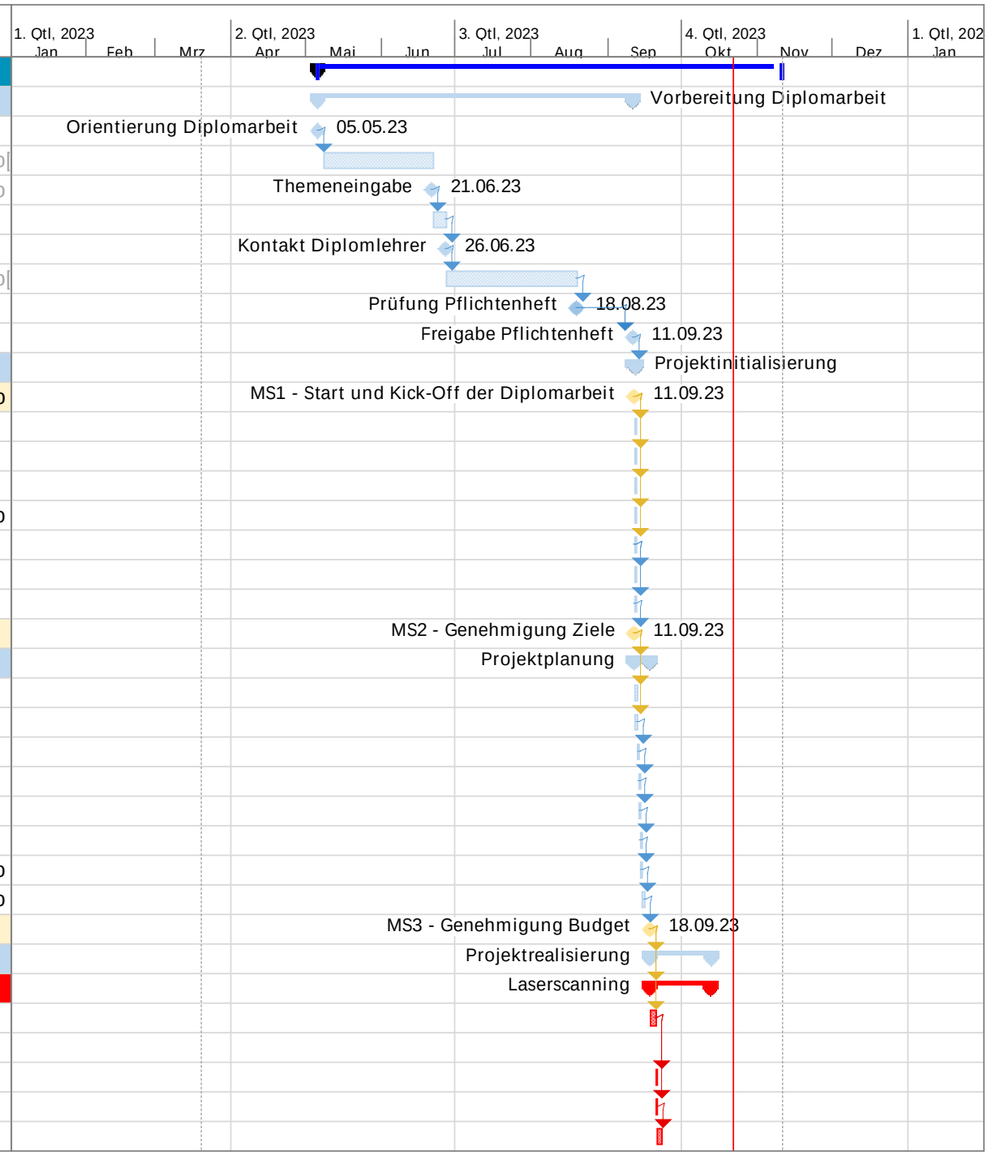


Abbildung 8:Projekstrukturplan Teil digitaler Zwilling

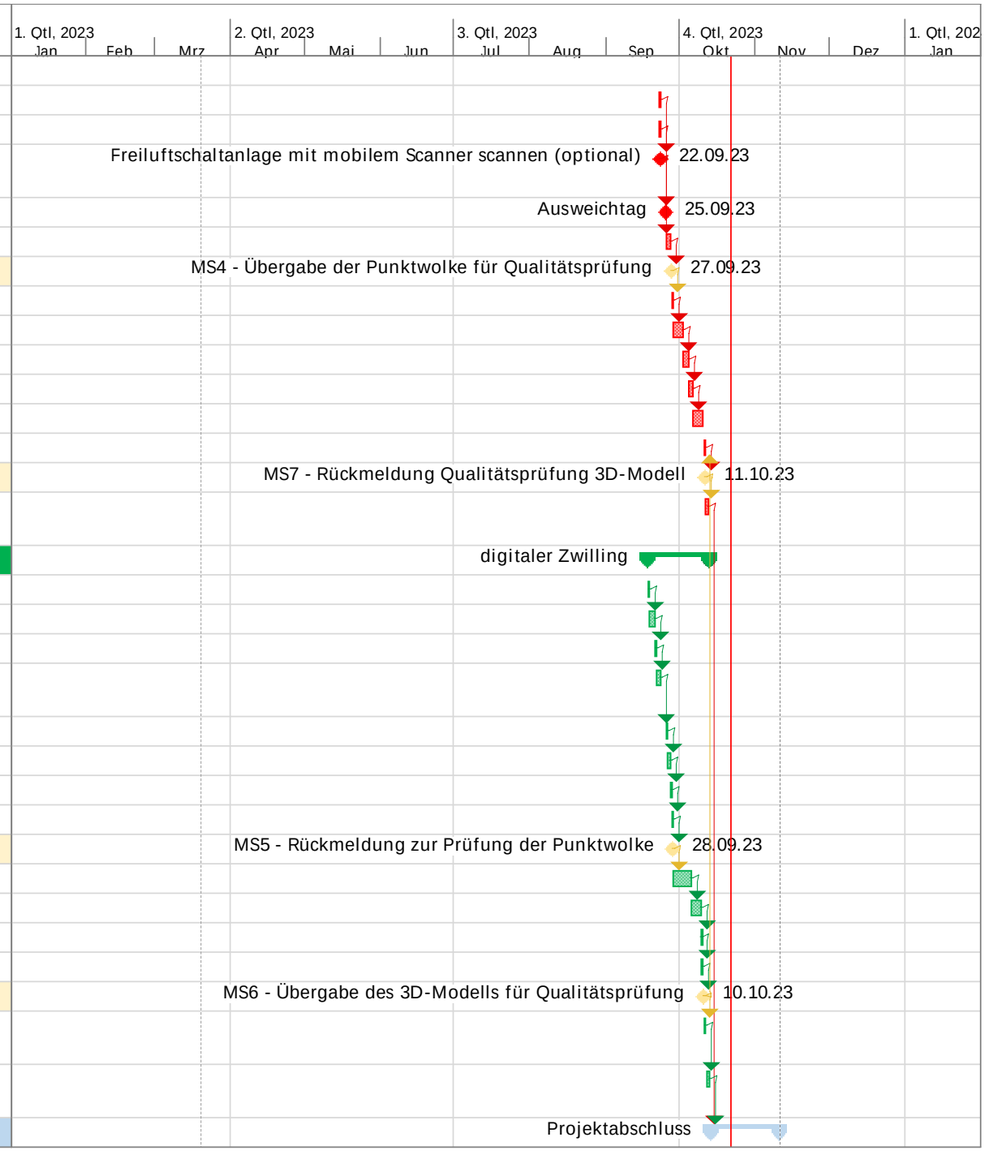
2.12.2 Projektablaufplan

Der Projektablaufplan definiert den Weg zum Ziel in einem Projekt. Mithilfe von ihm, haben alle Projektbeteiligte jederzeit die Übersicht und den Stand zum Projekt. Er definiert die einzelnen Arbeitspakete, Personen- und Zeitressourcen sowie die wichtigsten Meilensteine, welche eingehalten werden müssen.

Nr.	Vorgangsname	Dauer	Anfang	Ende	Arbeit SOLL	Arbeit IST	Ressourcen
0	Vom IST-Zustand zum digitalen Zwilling einer Freiluftanlage	134.38 Tage	Fre 05.05.23	Fre 10.11.23	423 Std.	450 Std.	
1	Vorbereitung Diplomarbeit	90 Tage	Fre 05.05.23	Mon 11.09.23	6 Std.	6 Std.	
2	Orientierung Diplomarbeit	0 Tage	Fre 05.05.23	Fre 05.05.23	0 Std.	0 Std.	TEKO
3	Themensuche	33 Tage	Mon 08.05.23	Mit 21.06.23	1 Std.	1 Std.	Dominik/Fernando[
4	Themeneingabe	0.13 Tage	Mit 21.06.23	Mit 21.06.23	1 Std.	1 Std.	Dominik/Fernando
5	Wartezeit	3 Tage	Don 22.06.23	Mon 26.06.23	0 Std.	0 Std.	
6	Kontakt Diplomlehrer	0 Tage	Mon 26.06.23	Mon 26.06.23	0 Std.	0 Std.	Diplomlehrer
7	Erstellung und Abgabe Pflichtenheft	39 Tage	Die 27.06.23	Fre 18.08.23	4 Std.	4 Std.	Dominik/Fernando[
8	Prüfung Pflichtenheft	0 Tage	Fre 18.08.23	Fre 18.08.23	0 Std.	0 Std.	Diplomlehrer[0%]
9	Freigabe Pflichtenheft	0 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	0 Std.	0 Std.	Diplomlehrer[0%]
10	Projektinitialisierung	1 Tag	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	16 Std.	16 Std.	
11	MS1 - Start und Kick-Off der Diplomarbeit	0.5 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	4 Std.	3 Std.	Dominik/Fernando
12	Ausgangslage	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik
13	Auftrag	0.13 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	1 Std.	0.5 Std.	Dominik
14	Stakeholderanalyse	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	2.5 Std.	Dominik
15	Zielscheibe	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando
16	Vorstellung Firma	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	1 Std.	Fernando
17	Vorstellung Projektmitarbeiter	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	4 Std.	Fernando
18	Rollendefinition	0.13 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
19	MS2 - Genehmigung Ziele	0 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	0 Std.	0 Std.	Fachexperte
20	Projektplanung	4.13 Tage	Mon 11.09.23	Mon 18.09.23	40 Std.	49 Std.	
21	Strukturplanung	1 Tag	Mon 11.09.23	Die 12.09.23	8 Std.	12 Std.	Fernando
22	Ablaufplanung	1 Tag	Mon 11.09.23	Die 12.09.23	8 Std.	16 Std.	Dominik
23	Zeitplanung	0.25 Tage	Die 12.09.23	Mit 13.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik
24	Ressourcenplanung	0.25 Tage	Mit 13.09.23	Mit 13.09.23	2 Std.	1.5 Std.	Dominik
25	Kommunikationsplanung	0.25 Tage	Mit 13.09.23	Mit 13.09.23	2 Std.	1.5 Std.	Dominik
26	SWOT-Analyse	0.25 Tage	Mit 13.09.23	Mit 13.09.23	2 Std.	2 Std.	Fernando
27	Risikoanalyse	1 Tag	Mit 13.09.23	Don 14.09.23	8 Std.	8 Std.	Dominik/Fernando
28	Budgetplanung	1 Tag	Don 14.09.23	Fre 15.09.23	8 Std.	6 Std.	Dominik/Fernando
29	MS3 - Genehmigung Budget	0 Tage	Mon 18.09.23	Mon 18.09.23	0 Std.	0 Std.	Fachexperte
30	Projektrealisierung	19 Tage	Mon 18.09.23	Don 12.10.23	298 Std.	325 Std.	
31	Laserscanning	18.38 Tage	Mon 18.09.23	Don 12.10.23	152 Std.	160 Std.	
32	Freiluftschaltanlage mit Trimble X7 scannen	2 Tage	Mon 18.09.23	Die 19.09.23	16 Std.	6 Std.	Fernando
33	*Ausweichtag*	*0 Tage*	*Die 19.09.23*	*Die 19.09.23*	*0 Std.*	*0 Std.*	*Fernando*
34	Einleitung	0.25 Tage	Mit 20.09.23	Mit 20.09.23	2 Std.	2 Std.	Fernando
35	Erstellung Prüfungsprotokoll Punktwolke	0.5 Tage	Mit 20.09.23	Mit 20.09.23	4 Std.	6 Std.	Fernando
36	Freiluftschaltanlage mit Leica BLK 360 scannen	2 Tage	Mit 20.09.23	Fre 22.09.23	16 Std.	10 Std.	Fernando



Nr.	Vorgangsname	Dauer	Anfang	Ende	Arbeit SOLL	Arbeit IST	Ressourcen
37	*Ausweichtag*	*0 Tage*	*Fre 22.09.23*	*Fre 22.09.23*	*0 Std.*	*0 Std.*	*Fernando*
38	Grundlagen	0.5 Tage	Fre 22.09.23	Fre 22.09.23	4 Std.	10 Std.	Fernando
39	Erstellung Kalkulationstool	0.5 Tage	Fre 22.09.23	Fre 22.09.23	4 Std.	6 Std.	Fernando
40	*Freiluftschaltanlage mit mobilem Scanner scannen (optional)*	*0 Tage*	*Fre 22.09.23*	*Fre 22.09.23*	*0 Std.*	*0 Std.*	*Fernando*
41	*Ausweichtag*	*0 Tage*	*Mon 25.09.23*	*Mon 25.09.23*	*0 Std.*	*6 Std.*	*Fernando*
42	Erstellung und Bearbeitung der Punktwolken	2 Tage	Mon 25.09.23	Die 26.09.23	16 Std.	12 Std.	Fernando
43	MS4 - Übergabe der Punktwolke für Qualitätsprüfung	0.13 Tage	Mit 27.09.23	Mit 27.09.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
44	Vergleich der Geräte	1 Tag	Mit 27.09.23	Don 28.09.23	8 Std.	16 Std.	Fernando
45	Analyse der Genauigkeit und Toleranzen	2 Tage	Don 28.09.23	Mon 02.10.23	16 Std.	16 Std.	Fernando
46	Erfassungsdauer und Portabilität	2 Tage	Mon 02.10.23	Mit 04.10.23	16 Std.	12 Std.	Fernando
47	Datenverarbeitung und digitale Zwilling	2 Tage	Mit 04.10.23	Fre 06.10.23	16 Std.	16 Std.	Fernando
48	Schulung und Voraussetzungen für Personal	2 Tage	Fre 06.10.23	Die 10.10.23	16 Std.	16 Std.	Fernando
49	Qualitätsprüfung 3D-Modell	1 Tag	Die 10.10.23	Mit 11.10.23	8 Std.	8 Std.	Fernando
50	MS7 - Rückmeldung Qualitätsprüfung 3D-Modell	0.13 Tage	Mit 11.10.23	Mit 11.10.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
51	Technische Richtlinie mit Anweisungen für das Laserscannen einer AIS	1 Tag	Mit 11.10.23	Don 12.10.23	8 Std.	16 Std.	Fernando
52	digitaler Zwilling	19 Tage	Mon 18.09.23	Don 12.10.23	146 Std.	165 Std.	
53	Einleitung digitaler Zwilling	0.5 Tage	Mon 18.09.23	Mon 18.09.23	4 Std.	4 Std.	Dominik
54	Einführung in die Erstellung	2 Tage	Mon 18.09.23	Mit 20.09.23	16 Std.	16 Std.	Dominik
55	Einführung Freiluftanlage und Primtech 3D	0.5 Tage	Mit 20.09.23	Mit 20.09.23	4 Std.	2 Std.	Dominik
56	Anleitung mit den wichtigsten Funktionen und Tipps und Tricks mit Primtech3d	2 Tage	Don 21.09.23	Fre 22.09.23	16 Std.	16 Std.	Dominik
57	Erstellung Prüfungsprotokoll 3D-Modell	1 Tag	Mon 25.09.23	Mon 25.09.23	8 Std.	6 Std.	Dominik
58	Erstellung Kalkulationstool	1 Tag	Die 26.09.23	Die 26.09.23	8 Std.	8 Std.	Dominik
59	Erstellung Auswertungstool zur Anleitung	0.5 Tage	Mit 27.09.23	Mit 27.09.23	4 Std.	6 Std.	Dominik
60	Prüfung der Punktwolke	0.5 Tage	Mit 27.09.23	Mit 27.09.23	4 Std.	4 Std.	Dominik
61	MS5 - Rückmeldung zur Prüfung der Punktwolke	0.13 Tage	Don 28.09.23	Don 28.09.23	1 Std.	1 Std.	Dominik
62	Modellierung 3D-Modell	5 Tage	Don 28.09.23	Don 05.10.23	40 Std.	48 Std.	Dominik
63	Modellierungsdokumentation 3D-Modell	2 Tage	Don 05.10.23	Mon 09.10.23	16 Std.	20 Std.	Dominik
64	Vergleich der Punktwolke und digitale Zwilling	0.5 Tage	Mon 09.10.23	Mon 09.10.23	4 Std.	8 Std.	Dominik
65	Prüfung 3D-Modell	0.5 Tage	Mon 09.10.23	Die 10.10.23	4 Std.	3 Std.	Dominik
66	MS6 - Übergabe des 3D-Modells für Qualitätsprüfung	0.13 Tage	Die 10.10.23	Die 10.10.23	1 Std.	1 Std.	Dominik
67	technische Richtlinie mit Hinweisen und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D	1 Tag	Die 10.10.23	Mit 11.10.23	8 Std.	16 Std.	Dominik
68	Auswertung zur «Anleitung mit den wichtigsten Funktionen und Tipps und Tricks mit Primtech 3D»	1 Tag	Don 12.10.23	Don 12.10.23	8 Std.	8 Std.	Dominik
69	Projektabschluss	19.88 Tage	Fre 13.10.23	Fre 10.11.23	32 Std.	28 Std.	



Nr.	Vorgangsname	Dauer	Anfang	Ende	Arbeit SOLL	Arbeit IST	Ressourcen
70	Zusammenfassung und Ausblick	0.5 Tage	Fre 13.10.23	Fre 13.10.23	4 Std.	4 Std.	Dominik
71	MS8 - Abgabe Dokumentation an Fachexperte (BENT)	0.13 Tage	Mon 16.10.23	Mon 16.10.23	1 Std.	1 Std.	Dominik
72	Prüfung Dokumentation durch BENT	2 Tage	Mon 16.10.23	Mit 18.10.23	0 Std.	0 Std.	Fachexperte
73	MS9 - Rückmeldungen Dokumentation von Fachexperte (BENT)	0 Tage	Mit 18.10.23	Mit 18.10.23	0 Std.	0 Std.	Fachexperte
74	Auswertung Zielerreichung	0.5 Tage	Mit 18.10.23	Mit 18.10.23	4 Std.	4 Std.	Fernando
75	Erkenntnisse und Massnahmen	2 Tage	Mit 18.10.23	Fre 20.10.23	8 Std.	4 Std.	Dominik/Fernando[
76	Fazit / Lessons learned	0.5 Tage	Fre 20.10.23	Fre 20.10.23	4 Std.	4 Std.	Dominik/Fernando
77	Abnahmeprotokoll durch Fachexperte (BENT)	0 Tage	Fre 20.10.23	Fre 20.10.23	0 Std.	0 Std.	Fachexperte
78	MS10 - Abgabe Dokumentation TEKO	0.13 Tage	Mon 23.10.23	Mon 23.10.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
79	Sichtung Dokumentation Diplomlehrer (TEKO)	0 Tage	Mon 23.10.23	Mon 23.10.23	0 Std.	0 Std.	Diplomlehrer
80	Erstellung Präsentation	14 Tage	Mon 23.10.23	Fre 10.11.23	8 Std.	8 Std.	Dominik/Fernando[
81	Präsentation	0.25 Tage	Fre 10.11.23	Fre 10.11.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando
82	Projekt abgeschlossen	0 Tage	Fre 10.11.23	Fre 10.11.23	0 Std.	0 Std.	Dominik/Fernando
83	Kommunikation	31 Tage	Mon 11.09.23	Mon 23.10.23	31 Std.	32 Std.	
84	Teamsitzung Diplomarbeit	30.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 23.10.23	26 Std.	27 Std.	
85	Kick-Off	0.25 Tage	Mon 11.09.23	Mon 11.09.23	2 Std.	3 Std.	Dominik/Fernando
86	Sitzung 2	0.26 Tage	Fre 15.09.23	Fre 15.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
87	Sitzung 3	0.26 Tage	Mon 18.09.23	Mon 18.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
88	Sitzung 4	0.26 Tage	Fre 22.09.23	Fre 22.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
89	Sitzung 5	0.26 Tage	Mon 25.09.23	Mon 25.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
90	Sitzung 6	0.26 Tage	Fre 29.09.23	Fre 29.09.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
91	Sitzung 7	0.26 Tage	Mon 02.10.23	Mon 02.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
92	Sitzung 8	0.26 Tage	Fre 06.10.23	Fre 06.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
93	Sitzung 9	0.26 Tage	Mon 09.10.23	Mon 09.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
94	Sitzung 10	0.26 Tage	Fre 13.10.23	Fre 13.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
95	Sitzung 11	0.26 Tage	Mon 16.10.23	Mon 16.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
96	Sitzung 12	0.26 Tage	Fre 20.10.23	Fre 20.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando[
97	Abschlusssitzung	0.25 Tage	Mon 23.10.23	Mon 23.10.23	2 Std.	2 Std.	Dominik/Fernando
98	Statusberichte	20 Tage	Son 17.09.23	Son 15.10.23	5 Std.	5 Std.	
99	Projektstatusbericht 1	0.13 Tage	Son 17.09.23	Son 17.09.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
100	Projektstatusbericht 2	0.13 Tage	Son 24.09.23	Son 24.09.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
101	Projektstatusbericht 3	0.13 Tage	Son 01.10.23	Son 01.10.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
102	Projektstatusbericht 4	0.13 Tage	Son 08.10.23	Son 08.10.23	1 Std.	1 Std.	Fernando
103	Projektstatusbericht 5	0.13 Tage	Son 15.10.23	Son 15.10.23	1 Std.	1 Std.	Fernando

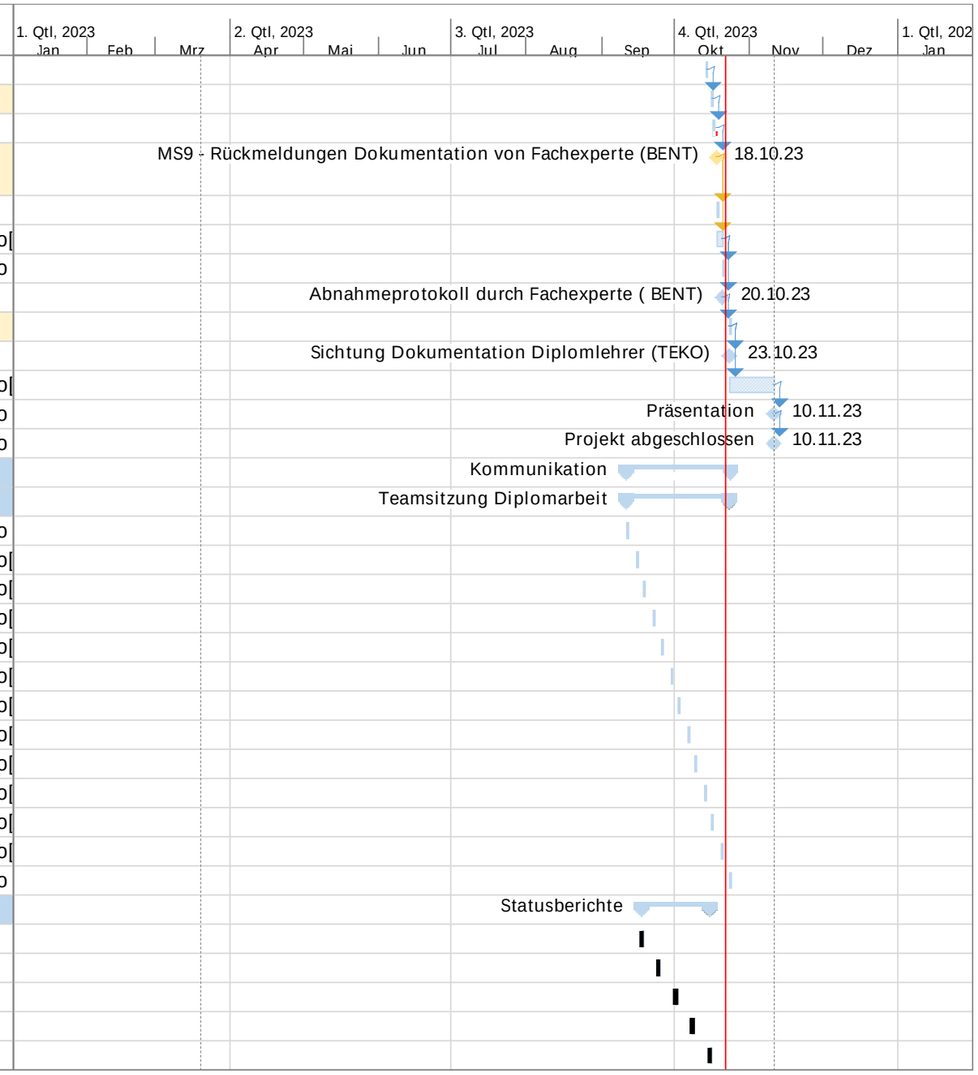


Abbildung 9: Projektablaufplan Gesamtprojekt

Legende:

Projektsammelvorgang	Meilenstein	Themendauer

Tabelle 6: Legende zu Projektablaufplan

2.13 Kommunikationsplanung

Die Kommunikationsplanung ist ein entscheidender Aspekt in der Projekt- und Unternehmensführung, der massgeblich dazu beiträgt, dass Informationen effektiv und zielgerichtet übermittelt werden. Ähnlich wie ein Kompass in der Navigation den richtigen Kurs bestimmt, hilft die Kommunikationsplanung dabei, den Informationsfluss innerhalb eines Projekts oder einer Organisation zu steuern und sicherzustellen, dass alle relevanten Stakeholder die notwendigen Informationen erhalten. Sie ist das Bindeglied zwischen den verschiedenen Akteuren in einem Projekt. Sie definiert, wer welche Informationen benötigt, wann sie benötigt werden und auf welche Weise sie am besten übermittelt werden.

Bezeichnung / Plattform	Teilnehmer	Ziele / Inhalte	Frequenz / Termine
Kick-Off Vor Ort	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch	• Ausgangslage besprechen • Projektziele erfassen • Terminklärungen • Arbeitseinteilung	Einmalig 11.09.2023
Auftragserteilung Teams	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Josef Räber	• Abgabe Beurteilung Fachexperte • Abgabe schriftliche Aufgabenstellung	Einmalig 11.09.2023
Teamsitzung (Mo) vor Ort / (Fr) Teams	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Marc Del Degan (bei Bedarf)	• Projektverlauf aufzeigen • Pendenzen besprechen und verteilen • Agieren auf auftretende Herausforderungen	Jeweils Montag und Freitag wöchentlich
MS3 - Genehmigung Budget Vor Ort	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Marc Del Degan	• Kontrolle und Freigabe Budget für weitere Projektarbeit	Einmalig 15.09.2023
Statusbericht E-Mail	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Josef Räber • Marc Del Degan	• Verlauf des Projektes unmittelbar mitverfolgen • Gemäss Template TEKO	Wöchentlich jeweils Sonntag

Vorzeigetermin 1 Teams	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Josef Räber	• Ziele mit konkreten Endergebnissen und Erfolgskriterien • Projektstruktur- sowie Projektablaufplanung inkl. Meilensteine • Aufzeigen allfälliger aufgetretenen Probleme mit Lösungsvorschlägen • Fragen und Verschiedenes	Einmalig 22.09.2023 / 18.05-18.30
Vorzeigetermin 2 Teams	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Josef Räber	• Standortbestimmung in Bezug auf die genehmigten Ziele inkl. allfällige Zielanpassungen Aufbau und Struktur der Dokumentation • Fragen und Verschiedenes inkl. Abgabe des spezifischen Beurteilungsformulars für den Fachbetreuer	Einmalig 22.09.2023 / 16.50-17.15
Abgabe Diplomarbeit E-Mail /PDF Gebundene Ausgabe (optional)	• TEKO-Sekretariat • Josef Räber	• Resultat der Arbeit übergeben zur Beurteilung	Einmalig 23.10.2023 / 18:00
Präsentation Diplomarbeit Vor Ort	• Dominik Sieber • Fernando Xatruch • Josef Räber • Thomas Bouchard	• Präsentation der Resultate der Diplomarbeit	Einmalig 11.11.2023 / 8:15-8:50

Tabelle 7: Kommunikationsplan während des Projektes

2.14 SWOT-Analyse

Die SWOT-Analyse ist eine Methode, bei dem die Stärken und Schwächen des Projekts wie Ressourcen, Kompetenzen und Einschränkungen, sowie die Chancen und Risiken in der externen Umgebung, wie Marktbedingungen, Wettbewerb und gesetzliche Rahmenbedingungen analysiert werden. Dieser Analyseprozess ist von entscheidender Bedeutung, da er Projektteams dabei hilft, die richtigen Entscheidungen zu treffen, Prioritäten zu setzen und eine solide Grundlage für den Projekterfolg zu schaffen.

S (Stärken)

- Die Verwendung von Laserscanning reduziert das Risiko von Unfällen und Personenschäden erheblich, da die physische Präsenz vor Ort minimiert wird.
- Die erstellten 3D-Modelle ermöglichen die effiziente Planung von Schulungen, Neu- und Umbauten sowie Instandhaltungs- und Betriebsprozessen.
- Die virtuelle Abbildung der Anlagen ermöglicht eine bessere Koordination von Zeitplänen und Ressourcennutzung, was zu geringeren Stillstandszeiten führt.
- Die Technologie ermöglicht eine genaue Erfassung der Anlagen und die Einhaltung minimaler Qualitätsstandards.
- Die geplanten Schulungen für Scanoperatoren werden mittels Schulungsunterlagen und konkreten Verbesserungsvorschläge optimiert.
- Die Erstellung von Richtlinien für das Scannen und die Modellierung trägt zur Standardisierung und Effizienz bei.

W (Schwächen)

- Die Anschaffung von Laserscannern und Schulungen für Operatoren ist aufwändig.
- Das Projekt hängt stark von der Leistung und Genauigkeit der verwendeten Laserscannern ab.
- Die Schulung der Scanoperatoren erfordert Zeit und Ressourcen.
- Die 3D-Modellierung erfordert spezifische Fähigkeiten und Kenntnisse.
- Die 3D-Modellierung ist sehr zeitintensiv und teuer betreffend der Anschaffung der Modellierungstools.

O (Chancen) • Die Technologie kann in verschiedenen Branchen Anwendung finden, was das Marktpotenzial erhöht. • Die Technologie und das Know-how könnten sich auf internationale Märkte ausdehnen, was zu einem breiteren Kundenstamm und globalen Geschäftsmöglichkeiten führt. • Die verbesserte Sicherheit und Effizienz werden neue Kunden anziehen und bestehende Kunden binden.	T (Risiken) • Schnelle Fortschritte in der Laserscanning-Technologie könnten die Lebensdauer der aktuellen Ausrüstung begrenzen. • Andere Unternehmen könnten ähnliche Dienstleistungen anbieten und den Wettbewerbsdruck erhöhen. • Fehlinterpretationen der Punktwolke oder Modellierungsfehler könnten zu ungenauen Ergebnissen führen und das Vertrauen der Kunden gefährden.

Tabelle 8: SWOT-Analyse für das Projekt

2.15 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse ist ein entscheidender Bestandteil für eine erfolgreiche Projektplanung und -durchführung. Sie hilft dabei, mögliche Risiken zu identifizieren, zu bewerten und Strategien zur Risikominimierung zu entwickeln. Sie ist ein proaktiver Ansatz, um potenzielle Hindernisse und Unsicherheiten in einem Projekt zu erkennen und zu bewältigen.

Nr.	Bezeichnung des Risikos	Beschreibung des Risikos und der möglichen Folgen	Eintritts-wahrschein-lichkeit	Schadens-auswirkung	Risiko	Gegenmaßnahmen (GM)	Eintritts-wahrschein-lichkeit nach GM	Schadensaus-wirkung nach GM	Risiko nach GM
	Qualität								
R01	Punktwolkenauflösung	Eine schlechte Auflösung kann zu ungenauen Daten und fehlerhaften Modellierungen führen.	2	4	8	Aufgrund der Miete des Scanners werden diese jederzeit kontrolliert und gewartet und dementsprechend kann die Qualität der Punktwolke sichergestellt werden. Eine sorgfältige Überprüfung und Nachbearbeitung der Daten erhöht die Sicherstellung der Qualität noch einmal.	2	2	4
R02	Unvollständigkeit	Eine unvollständige Punktwolke oder ein unvollständiges 3D-Modell kann dazu führen, dass mögliche Gefahrenbereiche verbergen bleiben und zu einer fehlerhaften Planung führen.	3	3	9	Gründliche Vorplanung zur Erstellung der Punktwolke notwendig. Zudem eine gründliche Prüfung der Punktwolke und der Modellierung vornehmen, um sicherzustellen, dass keine Unvollständigkeiten vorliegen. Dies kann mithilfe von Checklisten, Prüfprotokollen oder ähnlichem erfolgen.	2	2	4
R03	Sicherheit	Schäden an der Freiluftschaltanlage oder Unfälle könnten die Personensicherheit beeinflussen.	2	3	6	Das Personal darf nur die Anlage betreten, wenn es geschult wurde betreffend Sicherheitsmassnahmen und den aktuellen Normen und Vorschriften. Regelmässige Prüfungen der Anlagen können helfen, Schäden oder Defizite zu erkennen und beheben.	1	2	2
R04	Daten	Die Qualität der gescannten Daten können durch die Umgebungsbedingungen in der Anlage verringern. Aufgrund von elektromagnetischen Feldern können diese beeinflusst oder beschädigt werden.	3	3	9	Die Intensität der Qualitätskontrolle während des Scannens erhöhen, um Auswirkungen von Umgebungsbedingungen auf die Daten zu minimieren.	2	2	4

	Kosten								
R05	Höhere Equipmentkosten	Die Mietkosten der Laserscanner im Verlauf des Projektes könnten angepasst werden und würden somit das Budget überschreiten.	2	2	4	Vorabklärungen und Prüfungen der nötigen Scanner helfen dabei die Kosten vorgängig zu kalkulieren.	1	2	2
R06	Höhere Personalkosten	Der Aufwand für das Scannen und Modellieren der Anlage könnte höher sein als erwartet, was zu einer Überschreitung des Budgets führen würde.	2	3	6	Vorabklärungen zur Anlage sowie einer Vorplanung der ausstehenden Arbeiten.	1	3	3
R07	Projektänderungskosten	Es könnten mögliche Projektänderungen durch den Auftraggeber erfolgen, was zu höheren Kosten führen würde.	1	3	3	Ständiger Austausch mit dem Auftraggeber, um frühzeitig mögliche Projektänderungen zu identifizieren und bewerten. Die Änderungen und daraus resultierende Mehraufwände schriftlich festhalten und bestätigen lassen	1	2	2
R08	Projektumfangkosten	Es könnten mögliche Projektumfanganpassungen geben, was zu mehr Arbeit und höheren Kosten führen würde.	1	3	3	Klares und schriftliches Änderungsmanagement, der Änderungen überprüft und genehmigt. Zusätzlich die Aufwände und Mehrkosten anmelden.	1	2	2
	Termine								
R09	Zeit- und Ressourcenknappheit	Es können Projektverzögerungen eintreffend aufgrund von schlechtem Wetter für das Scannen, Krankheit von Projektbeteiligten, Probleme mit der Modellierungssoftware, etc.	2	3	6	Detaillierte Projekt- und Ressourcenplanung, um Verzögerungen und Engpässe zu vermeiden. Die Aufgaben priorisieren und mögliche Pufferzeiten einplanen.	2	2	4
R10	Wetterbedingungen	Schlechtes Wetter kann verhindern, dass die Anlage gescannt werden kann und so den Zeitplan gefährden.	3	3	9	Vorgängige Prüfung der Wetterbedingungen und Ausweichtermine einplanen.	2	2	4
R11	Wartungsarbeiten an der Anlage	Es kann möglich sein, dass Wartungen oder Umbauten an der Anlage vorgenommen werden, wenn die Anlage betreten und gescannt werden möchte.	2	3	6	Eine vorzeitige Anmeldung beim Anlageninhaber wann gescannt werden kann. So wird die Verfügbarkeit sichergestellt.	1	3	3

R12	Sofwareprobleme	Probleme mit der Modellierungssoftware wie beispielsweise Wartungen oder Performanceprobleme, können das Modellieren verlangsamen oder unterbrechen.	1	3	3	Vorgängige Prüfung über den Stand der Software um mögliche Wartungen zu identifizieren.	1	2	2
R13	Längere Scan- und Modellierungsaufwände	Eine fehlerhafte Planung für das Scannen und Modellieren der Anlage kann verursachen, dass die Termine nicht eingehalten werden können.	2	3	6	Detaillierte Vorbereitung für das Scannen, um den Aufwand abschätzen zu können.	2	2	4
R14	Anpassungen im Projektablaufplan	Änderungen des Projektablaufplans durch den Auftraggeber können den ursprünglichen Zeitplan gefährden.	1	3	3	Klare Kommunikation mit dem Auftraggeber bei Änderungen am Projektablaufplan. Anschliessend diesen aktualisieren und zusätzliche Ressourcen einplanen, sofern notwendig.	1	2	2
R15	Kommunikationsprobleme	Eine unklare Kommunikation zwischen den Teammitgliedern untereinander, aber auch mit dem Auftraggeber, können zu Missverständnissen und anschliessenden Verzögerungen führen.	1	2	2	Detaillierte Kommunikationsplanung mithilfe von Mails, Protokolle, etc. Regelmässige Meetings für den Austausch, um Missverständnisse zu verhindern.	1	1	1
R16	IT-Migration	Eine mögliche IT-Migration während des Projektes ist möglich und kann zum Unterbruch des Projektes führen.	3	3	9	Die Daten des Projektes können jederzeit auf OneDrive abgespeichert und gesichert werden. Sofern die IT-Migration eintrifft, können andere Arbeiten vorgezogen werden, sofern die Migration einen längeren Zeitraum benötigt.	1	3	2

Tabelle 9: Projekt-Risikoanalyse

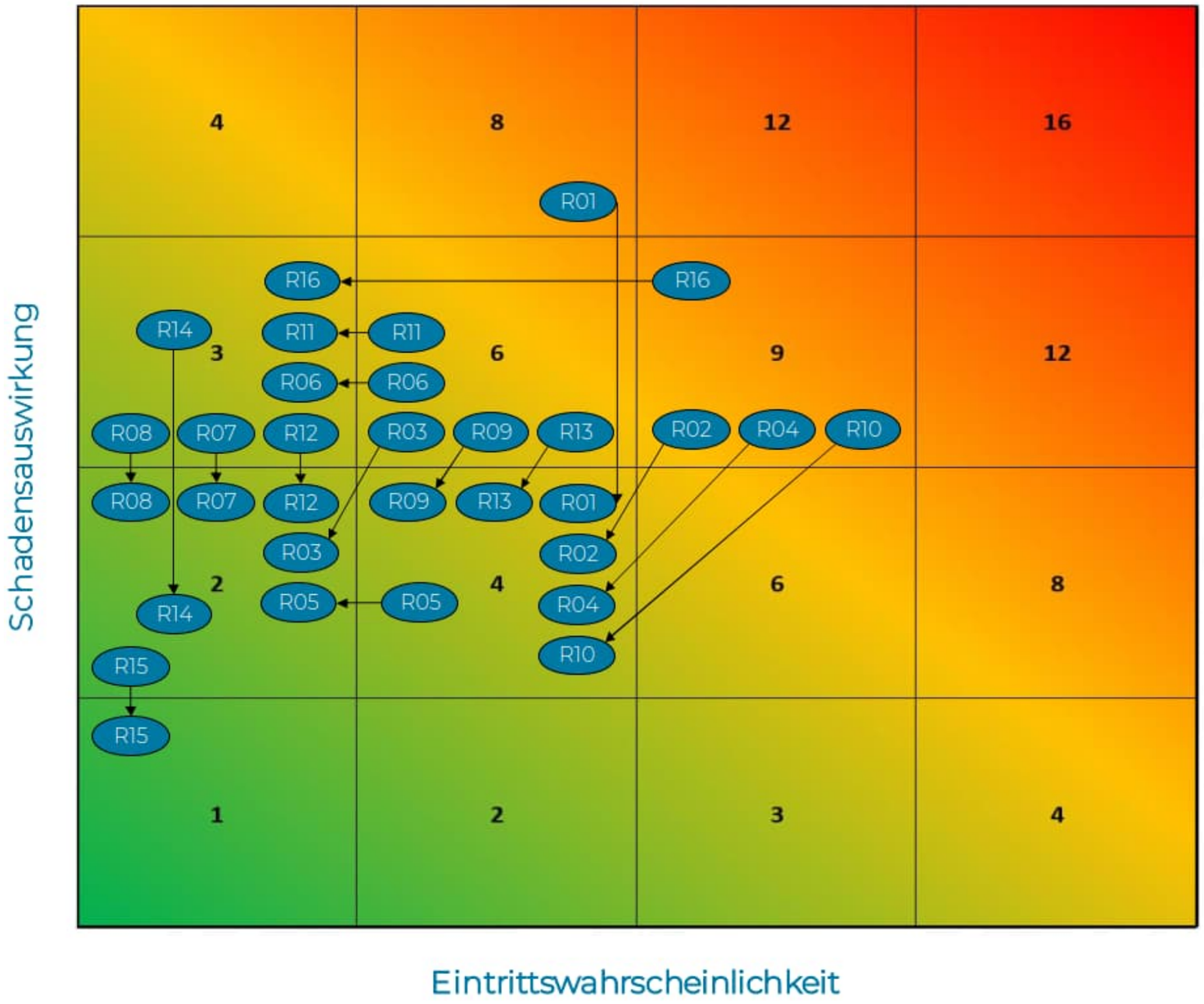


Abbildung 10: Auswertung der Risikoanalyse

Eintrittswahrscheinlichkeit	
1 = unwahrscheinlich	in <5 von 50 Projekten
2 = möglich	in <20 von 50 Projekten
3 = wahrscheinlich	in <40 von 50 Projekten
4 = sehr wahrscheinlich	in >40 von 50 Projekten

Schadensauswirkung	
1 = annehmbar	<200 CHF
2 = erträglich	<1000 CHF
3 = beträchtlich	<2500 CHF
4 = unerwünscht	>2500 CHF

Tabelle 10: Legende zur Risikoanalyse

2.16 Budgetplanung

Die Budgetplanung dient zur Identifizierung der finanziellen Ressourcen für die Durchführung des Projektes. Sie hilft dem Unternehmen, sowie den Projektbeteiligten, die Kosten für das Projekt zu erkennen und die Investitionen zu tätigen.

Pos.	*Aufwand*	*Bezeichnung*	*Einh.*	*Interne Kosten*	*Total*
1		**Personalkosten**			**CHF 39'720.00**
		Dokumentation + Teilprojekt "digitale Zwilling"			
	220	Dominik Sieber	Std	85.00	CHF 18'700.00
		Dokumentation + Teilprojekt "Laserscanning"			
	220	Fernando Xatruch	Std	85.00	CHF 18'700.00
	32	Monteur	Std	72.50	CHF 2'320.00
2		**Verpflegungspauschalen (Laserscanning)**			**CHF 120.00**
	4	Mittagessen	Tg	30.00	CHF 120.00
3		**Reisekosten (Laserscanning)**			**CHF 1'832.00**
	8	An- und Rückfahrt	h	85.00	CHF 680.00
	640	Servicefahrzeug	km	1.80	CHF 1'152.00
4		**Tools**			**CHF 300.00**
	1	Primtech 3D	Pau	150.00	CHF 150.00
	1	Trimble RealWorks	Pau	125.00	CHF 125.00
	1	Recap	Pau	25.00	CHF 25.00
5		**Laserscanner**			**CHF 2'500.00**
	1	Trimble X7	Pau	2'150.00	CHF 2'150.00
	1	Leica BLK 360	Pau	350.00	CHF 350.00
5		**Unvorhergesehenes**			**CHF 4'922.40**
	1	Reserve	Pau	10%	CHF 4'922.40
Total					**CHF 49'394.40**

Tabelle 11: Budgetzusammenstellung

2.16.1 Erläuterungen zur Budgetplanung

Die Personalkosten wurden an den Projektablaufplan angelehnt. Es handelt sich um eine grobe Schätzung.

Für das Laserscanning in der Anlage wurde aus Sicherheitsgründen eine Zweitperson beigezogen und eingerechnet.

Die Verpflegungspauschalen gehören zum Teilprojekt "Laserscanning». Es wurde mit einem Mittagessen pro Tag gerechnet.

Die Reisekosten wurden mit jeweils 1h Hin- und 1h Rückfahrt berechnet. Pro Tag wurde eine Hin- und eine Rückfahrt eingerechnet. Dasselbe gilt bei dem Servicefahrzeug (80km pro Weg).

Die Tools werden pauschal verrechnet, unabhängig von der Länge des Gebrauchs.

Die Miete des Trimble X7 Laserscanners enthält sämtliches Equipment inkl. Versicherung. Der Leica BLK360 ist in Besitz von BENT, wird aber trotzdem aufgrund von Versicherungskosten und Abnutzung pauschal dem Projekt verrechnet.

2.16.2 Genehmigung Budget

Der Budgetantrag wurde am 15.09.2023 am Fachexperten zur Durchsicht und Freigabe übergeben. Die Freigabe des Budgets wurde am 18.09.2023 mittels Unterschrift erteilt. Die Budgetfreigabe ist im Anhang ANH-002 beigelegt.

3 Projektrealisierung

3.1 Laserscanning

3.1.1 Einleitung

Freiluftschaltanlagen spielen als zentrale Knotenpunkte in elektrischen Energieübertragungssystemen eine entscheidende Rolle für eine sichere und zuverlässige Energieversorgung.

Freiluftschaltanlage

Eine Freiluftschaltanlage ist eine Schlüsselkomponente im Stromnetz und dient der Verteilung und Schaltung von elektrischer Energie unter freiem Himmel. Hierbei erfolgt die Isolation durch die umgebende Luft. Nun zum technischen Aufbau:

Felder

Die Schaltanlage ist in mehrere Felder unterteilt. Ein Feld kann als eine eigenständige Einheit betrachtet werden, die bestimmte Komponenten und Funktionen enthält. Es gibt unterschiedliche Arten von Feldern, wobei zwei häufig vorkommende Typen "Leitungsfelder" und "Trafofelder" sind.

Leitungsfeld: Wie der Name schon andeutet, sind Leitungsfelder an Übertragungs- oder Verteilungsleitungen angeschlossen. Sie steuern und schützen diese Leitungen und sind mit den notwendigen Komponenten ausgestattet, um dies effektiv zu tun.

Trafofeld: Diese Felder sind direkt an Transformatoren angeschlossen und steuern sowie schützen diese. Transformatoren sind für die Änderung der Spannungspegel im Netz unerlässlich.

Kuppelfeld: Ein Kuppelfeld ermöglicht das flexible Schalten zwischen verschiedenen Anlagenteile. Üblicherweise sind es Sammelschienen die so je nach Betriebsanforderungen isoliert oder verbunden werden können. Dies ist insbesondere nützlich, um Redundanzen zu schaffen.

Hauptkomponenten eines Feldes

Je nach Design und Anforderung können Felder verschiedene Komponenten enthalten:

Transformator: Eine Schlüsselkomponente in einem Trafofeld. Transformatoren sind dafür verantwortlich, die Spannung im Stromnetz zu erhöhen oder zu verringern, je nach Bedarf.

Trenner: Ein Gerät, das eine sichtbare Trennstrecke in einer Schaltanlage schafft, um sicherzustellen, dass bestimmte Teile stromlos sind für Wartungsarbeiten.

Leistungsschalter: Dieses Gerät schaltet den Stromfluss unter Lastbedingungen und bietet Schutz bei Überlast oder Kurzschluss.

Strommesser (Stromwandler): Diese Geräte messen den aktuellen Stromfluss und wandeln ihn in ein nutzbares Signal um, das dann zur Überwachung oder zum Schutz verwendet wird.

Spannungsmesser (Spannungswandler): Diese messen die aktuelle Spannung und wandeln sie in ein nutzbares Signal um.

Kombimesser: Ein integriertes Messinstrument, welches sowohl Strom- als auch Spannungsmessfunktionen in einer Einheit vereint. Bietet Vorteile hinsichtlich des Platzbedarfs gegenüber separaten Messgeräten. Es besteht ein erhöhtes Risiko hinsichtlich potentiellen Defekts aufgrund der kombinierten Funktionalität.

Sammelschienen

Das Herzstück einer jeden Schaltanlage. Es handelt sich hierbei um Leiterbahnen, an die alle Felder angeschlossen sind. Sie ermöglichen den Stromfluss zwischen den verschiedenen Feldern und damit die Verteilung von Energie im gesamten System.

In komplexeren Anlagen können auch zwei Sammelschienen vorhanden sein, um eine Redundanz zu gewährleisten. In solchen Fällen gibt es oft auch eine Umgehungsschiene, die es ermöglicht, einen der Hauptbussysteme für Wartungsarbeiten oder im Falle eines Fehlers zu umgehen, ohne die gesamte Anlage ausser Betrieb zu nehmen.

Zusammenfassend bildet die Freiluftschaltanlage das zentrale Organ im Netzwerk, das nicht nur den Stromfluss steuert und verteilt, sondern auch wichtige Schutz- und Überwachungsfunktionen bietet.

Laserscanning

Die vorliegende Arbeit gibt einen Einblick in die Laserscanning-Technologie, welche bei BENT genutzt wird. Sie erörtert die sich daraus ergebenden Vorteile und Herausforderungen. Dabei wird sowohl auf die technische Seite des Scannens als auch auf die nachfolgenden Schritte der Datenverarbeitung und -analyse eingegangen. Darüber hinaus werden die Relevanz und der Einfluss der resultierenden Daten auf die Planung hervorgehoben.

Mit dem Ziel, eine Brücke zwischen der Theorie des Laserscannings und unserer praktischen Anwendung in der realen Welt zu schlagen, wird diese Arbeit nicht nur den Scann Operatoren, sondern auch für Entscheidungsträger, Betriebsingenieure und andere Beteiligte in unserer Firma von Nutzen sein. Es wird ein klarer Weg aufgezeigt, wie moderne Technologie dazu beitragen kann, einige der aktuellen Herausforderungen anzugehen und sich auf die Anforderungen von morgen vorzubereiten.

Das Verständnis der Technologie, ihrer Anwendung und ihrer Vorteile ist entscheidend für unser Dienstleistungsportfolio, Offerterstellung und Ausführung. Mit dieser Arbeit möchten wir dazu beitragen, dieses Verständnis zu vertiefen und die Möglichkeiten aufzuzeigen, die sich mit Laserscanning ergeben.

- Das Stromnetz ähnelt einem Strassennetz, wobei Freiluftschaltanlagen als zentrale Knotenpunkte dienen, um Strom effizient zu verteilen und bei Ausfällen von Leitungen, Umleitungen ermöglichen.
- Laserscanning ermöglicht eine präzise Erfassung von Freiluftschaltanlagen und bildet die Grundlage für vielfältige Anwendungen, einschliesslich digitaler Zwillinge.
- BENT nutzt Laserscanning-Technologie, um den aktuellen und zukünftigen Herausforderungen der Energieversorgung zu begegnen und die Effizienz zu steigern.

3.1.2 Grundlagen des Laserscannings

Laserscanning, auch bekannt als Lidar (Light Detection and Ranging), ist eine Vermessungstechnologie, die Laserlicht zur präzisen Erfassung dreidimensionaler Objekte und Strukturen nutzt. Durch die Kombination von Geschwindigkeit, Genauigkeit und Vielseitigkeit hat sich das Laserscanning in einer Vielzahl von Branchen und Anwendungen etabliert, von der Geoinformatik und dem Bauwesen bis hin zur Forstwirtschaft, Archäologie oder in unserem Fall in Freiluftschaltanlagen.

Funktionsprinzip

Das Herzstück der Laserscanning-Technologie ist der Lidar-Sensor, der Laserlicht aussendet und das von Objekten reflektierte Licht empfängt. Durch Messung der Laufzeit des Lichts vom Sensor zum Objekt und zurück kann die Entfernung zum Objekt genau berechnet werden. Der Laserscanner erfasst auch Winkelinformationen, indem er seine Position und Orientierung während des Scanvorgangs kontinuierlich ändert und überwacht. Aus der Kombination von Entfernungs- und Winkelinformation entsteht eine dreidimensionale Punktwolke, die die räumliche Struktur des gescannten Objektes oder Gebietes repräsentiert.

Laserscanner-Typen

Es gibt verschiedene Arten von Laserscannern, die je nach Anwendung und Plattform eingesetzt werden können:

Terrestrische Laserscanner

Diese Scanner sind auf einem festen Stativ montiert und werden in der Regel zur Erfassung von Gebäuden, Brücken, Denkmälern und anderen statischen Objekten eingesetzt. Sie bieten die hohe Genauigkeit und Reichweite, die für viele Anwendungen im Bauwesen, in der Architektur und im Denkmalschutz erforderlich sind.

Mobile Laserscanner

Mobile Laserscanner werden auf Fahrzeugen wie Autos oder Zügen montiert und ermöglichen die schnelle Erfassung grosser Gebiete und Verkehrswege. Sie eignen sich besonders für die Kartierung von Strassen, Schienen und Infrastruktur.

Airborne Laserscanner

Diese Scanner sind auf Flugzeugen oder Drohnen montiert und ermöglichen die Erfassung grosser Gebiete aus der Luft. Sie werden häufig in der Topografie, Geologie und Umweltüberwachung eingesetzt.

Datenaufbereitung und -analyse

Nach der Erfassung der Punktwolke müssen die Daten weiter aufbereitet und analysiert werden. Dies umfasst die Registrierung und Kalibrierung der einzelnen Scans, die Filterung von Rauschen und Artefakten sowie die Ableitung der Punktwolke in nutzbare Formate, wie z.B. dreidimensionale Modelle oder digitale Geländemodelle. Die Punktwolkendaten können auch mit anderen Geodaten wie GPS- Daten verknüpft werden, um räumliche Analysen und Visualisierungen, im Kontext der Umgebung, zu ermöglichen. Moderne Softwarelösungen bieten zahlreiche Werkzeuge für die Verarbeitung und Analyse von Laserscanning-Daten, wie z.B. die automatische Erkennung und Klassifizierung von Objekten oder die Erstellung von Höhenlinien und Volumenberechnungen.

Anwendungen des Laserscannings

Die Vielseitigkeit und Genauigkeit der Laserscanning-Technologie haben zu einer Vielzahl von Anwendungen in unterschiedlichen Branchen geführt:

Bauwesen und Architektur

Im Bauwesen und in der Architektur ermöglicht das Laserscanning die präzise Erfassung von Gebäuden und Bauwerken zur Erstellung von Bestandsplänen, zur Planung von Umbauten oder zur Überwachung des Baufortschritts. Es kann auch zur Untersuchung von Bauschäden wie Rissen oder Verformungen eingesetzt werden.

Denkmalpflege und Archäologie

Laserscanning wird zunehmend zur Dokumentation und Erforschung von Kulturgütern und archäologischen Stätten eingesetzt. Die berührungslose Vermessung schützt empfindliche Strukturen vor Beschädigungen, während die hochauflösenden 3D-Punktwolken neue Möglichkeiten zur Analyse und Visualisierung historischer Stätten bieten.

Forstwirtschaft und Umwelt

In der Forstwirtschaft und den Umweltwissenschaften ermöglicht Laserscanning die Erfassung von Vegetationsstrukturen wie Baumhöhen, Kronendichten und weitere Biomasse. Diese Informationen können für die Waldbewirtschaftung, die Kartierung von Lebensräumen oder die Überwachung von Umweltveränderungen genutzt werden.

Bergbau und Geologie

Im Bergbau und in der Geologie wird Laserscanning zur Kartierung von Tagebauen, Tunneln und Abraumhalden eingesetzt. Die präzisen 3D-Modelle unterstützen die Planung und Überwachung von Abbauprozessen, die Analyse geologischer Strukturen oder die Erstellung von Sicherheits- und Stabilitätsbewertungen.

Vorteile des Laserscannings

Die Laserscanning-Technologie bietet eine Reihe von Vorteilen gegenüber herkömmlichen Vermessungsmethoden.

Geschwindigkeit und Effizienz

Laserscanner können grosse Datenmengen in kurzer Zeit erfassen, was die Vermessungsarbeiten erheblich beschleunigt und die Kosten reduziert. Mit mobilen oder luftgestützten Laserscannern können sogar grosse Gebiete in wenigen Stunden oder Tagen erfasst werden.

Genauigkeit und Auflösung

Durch die hohe räumliche Auflösung und Genauigkeit von Laserscanning-Daten können Objekte und Strukturen in einer Detailgenauigkeit erfasst werden, die mit herkömmlichen Methoden oft nur mit einem unverhältnismässigen Aufwand zu erreichen ist. Dies ermöglicht eine genauere Analyse und Planung von Projekten und Prozessen.

Sicherheit

Da Laserscanning berührungslos arbeitet, können Inspektionen und Messungen aus sicherer Entfernung durchgeführt werden. Dies reduziert Sicherheitsrisiken für das Vermessungspersonal, insbesondere in schwierigen oder gefährlichen Umgebungen wie Baustellen, Bergbauanlagen oder bei der Inspektion von Hochspannungsleitungen oder Hochspannungsanlagen.

Flexibilität und Vielseitigkeit

Die Laserscanning-Technologie kann in einer Vielzahl von Anwendungen und Umgebungen eingesetzt werden, von dicht besiedelten städtischen Gebieten bis hin zu abgelegenen Naturlandschaften. Alle Gebiete mit ungefähren Umgebungstemperaturen zwischen -20 Grad und +50 Grad. Die verschiedenen Arten von Laserscannern ermöglichen zudem die Anpassung an spezifische Projektanforderungen und Plattformen wie terrestrische, mobile oder luftgestützte Vermessung.

Laserscanning ist eine leistungsfähige und vielseitige Vermessungstechnologie, die in vielen Branchen und für viele verschiedene Anwendungszwecke zum Einsatz kommt. Die Kombination von Geschwindigkeit, Genauigkeit und Flexibilität bietet erhebliche Vorteile gegenüber traditionellen Vermessungsmethoden und eröffnet neue Möglichkeiten für die Erfassung und Analyse von raumbezogenen Daten. Die stetige Weiterentwicklung der Laserscanning-Technologie und die zunehmende Integration mit anderen Geodaten und Systemen werden in Zukunft weitere Anwendungsfelder und Potenziale erschliessen und die Rolle des Laserscannings als Schlüsseltechnologie in der modernen Geoinformatik und Vermessung weiter stärken.

- Laserscanning, auch Lidar genannt, nutzt Laserlicht zur präzisen Erfassung dreidimensionaler Objekte durch Messung der Laufzeit des Lichts zwischen dem Sensor und dem Objekt.
- Es existieren terrestrische, mobile und luftgestützte Laserscanner für verschiedenste Anwendungsgebiete. Bsp.: Gebäudeerfassung, Kartierung grosser Gebiete oder Vegetationskontrolle.
- Die Technologie bietet gegenüber traditionellen Vermessungsmethoden Vorteile in Geschwindigkeit, Genauigkeit, Sicherheit und Messumfang

3.1.3 Laserscanning-Technologie

Ein Laserscanner ist ein Gerät, das auf dem Prinzip der Lichtlaufzeitmessung basiert. Das Verfahren basiert auf der Messung der Zeit, die ein Laserstrahl benötigt, um von seiner Quelle zum Ziel und wieder zurückzugelangen. Die gemessene Zeit wird dann zur Bestimmung der Entfernung zwischen dem Laserscanner und dem Zielobjekt genutzt. Die Genauigkeit eines Laserscanners hängt dabei von einer Reihe von Faktoren ab, darunter die Wellenlänge des Lasers, die Leistung des Lasers, die Grösse der Messfläche, der Abstand vom Messobjekt zum Sensor, dem Abstrahlverhalten der Messoberfläche und die Bewegung des Scanners.

Um den Laserstrahl zu lenken, verwenden Laserscanner einen rotierenden Spiegel, um den Laserstrahl in verschiedene Richtungen abzulenken. Für die Achsen werden meistens folgende Technologien verwendet:

Horizontale Bewegung (Azimut): Ein Spiegel lenkt den Laserstrahl über eine horizontale Ebene, wodurch eine Scanlinie entsteht. Die Geschwindigkeit und der Winkel der Rotation bestimmen die horizontale Auflösung und das Sichtfeld des Scans.

Vertikale Bewegung (Elevation): Während der Spiegel den Strahl horizontal lenkt, dreht sich der gesamte Scanner oder ein Teil davon vertikal. Dies erzeugt eine zweite Dimension des Scans und ermöglicht es dem Scanner, ein vollständiges 360-Grad-Bild der Umgebung zu erstellen.

Durch die Kombination dieser beiden Bewegungen kann der Scanner eine Punktwolke seiner Umgebung erfassen. Die genaue Position jedes Punktes in der Punktwolke wird dann durch die Kombination der gemessenen Entfernung zum Zielobjekt, des Azimut Winkels (horizontal) und des Elevationswinkels (vertikal) bestimmt. Mit zusätzlichen

Fotoaufnahmen, welcher ein Laserscanner während des Scannens macht, kann jedem gemessenem Punkt zusätzlich eine Farbinformation mitgegeben werden

Ein vereinfachter Ablaufprozess sieht wie folgt aus:

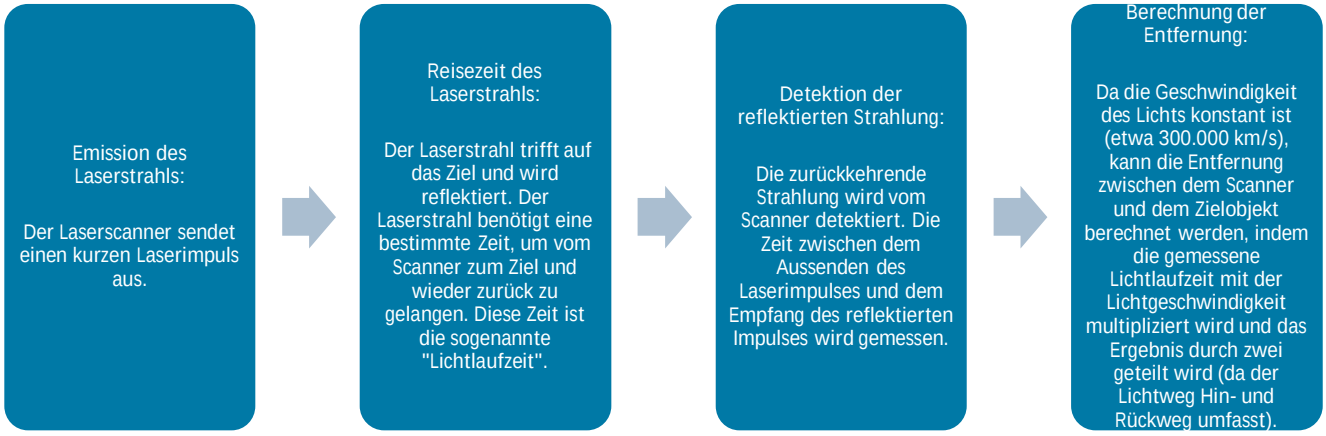


Abbildung 11: Ablaufprozess der Laserscanning-Technologie

Messungenauigkeit:

Wie bei allen Messungen entsteht durch äussere Einflüsse eine Messungenauigkeit. Bei Laserscanning sind die wichtigsten Faktoren:

Oberflächenbeschaffenheit

Die Oberflächenbeschaffenheit der vom Laser angestrahlten Objekte kann die Genauigkeit der Messung beeinflussen. Einige Materialien absorbieren mehr Licht, während andere es stärker reflektieren (Spiegel). Auch Oberflächen, die das Licht stark streuen, wie raue oder unebene Oberflächen, können die Messgenauigkeit verringern. Zudem reflektiert Glas kaum, was dazu führt, dass es in Scans kaum sichtbar ist.

Atmosphärische Bedingungen

Faktoren wie Temperatur, Luftdruck und Luftfeuchtigkeit können die Geschwindigkeit des Lichts beeinflussen und somit zu Ungenauigkeiten in der Messung führen. Insbesondere bei Messungen über grosse Entfernungen können diese Faktoren einen geringen Einfluss haben.

Lichtverhältnisse

Starke Helligkeit oder direkte Sonneneinstrahlung können die Detektion der reflektierten Laserstrahlen beeinträchtigen und dadurch zu Messfehlern führen.

Systematische Fehler

Diese Art von Fehlern ist auf das Messsystem selbst zurückzuführen und kann beispielsweise durch Kalibrierungsfehler, Zeitmessfehler oder Fehler in der Signalverarbeitung verursacht werden. Dies geschieht, unter anderem, da viele elektronische Elemente einem Alterungsprozess ausgesetzt sind, welches ihre Eigenschaften verändert und dadurch die Messung verfälschen.

3.1.4 Anwendungen im Energiesektor

Laserscanner werden in der Energiewirtschaft vielfältig eingesetzt.

Zum Beispiel bei der Überwachung von Stromleitungen. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Kontrolle auf Bewuchs, der die Stromleitungen beeinträchtigen kann. Mit Laserscannern können Gehölze und Vegetation präzise erfasst und Vermessungsdaten erstellt werden. Potenzielle Gefahrenstellen können so identifiziert werden. Die Technik hilft, die Leitungen effizient zu überwachen und so den sicheren Betrieb der Anlagen zu gewährleisten. Üblicherweise werden in diesem Bereich luftgestützte Laserscanner eingesetzt. Diese befinden sich entweder auf einem bemannten Hubschrauber oder auf einem unbemannten, ferngesteuerten Multikopter.

Darüber hinaus ermöglicht die Laserscannertechnologie eine effektive Vermessung von Freileitungen. Dabei werden dreidimensionale Modelle der Leitungen erstellt und präzise Messungen durchgeführt, um den genauen Zustand und die Lage der Leitungen zu ermitteln. Dies kann bei der Planung von Wartungs- und Reparaturarbeiten helfen.

Eine weitere Anwendung von Laserscannern ist die Vermessung des Innenraums von Unterwerk. Mit Hilfe der Technologie können genaue 3D-Modelle der Räume und Vorplätze erstellt werden, um die Masse zu bestimmen. Dies ist wichtig, um festzustellen, ob eine Erweiterung der Hochspannungsanlage noch möglich ist und ob die Transportwege innerhalb der Hochspannungsanlage, insbesondere für Transformatoren, gewährleistet sind. Die genauen Daten, die mit Laserscannern erfasst werden, sind für eine effiziente Planung und Wartung der Anlagen von grosser Bedeutung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Einsatz von Laserscannern im Energiesektor vielfältig ist und eine wichtige Rolle bei der Vermessung von Anlagen spielt. Laserscanner sind somit ein wichtiges Instrument, um eine zuverlässige Planung zu gewährleisten.

3.1.5 Vergleich der bei BENT eingesetzten Laserscanner

Trimble X7

Der Trimble X7 ist ein hochpräzises 3D-Laserscanning-System, das speziell für die Anforderungen von Vermessungs- und Bauingenieuren entwickelt wurde. Es bietet eine Reihe von Vorteilen für den Einsatz in Freiluftschaltanlage, die im Folgenden näher erläutert werden.

Technische Spezifikationen

Der Trimble X7 zeichnet sich durch seine hohe Genauigkeit und schnelle Erfassungsgeschwindigkeit aus. Er verfügt über eine Genauigkeit von bis zu <3 mm auf 60m Entfernung und eine Scann Rate von bis zu 1 Million Punkte pro Sekunde. Das Gerät besitzt eine integrierte HDR-Farbkamera für fotorealistische Punktwolken und verfügt über einen robusten, wetterfesten IP55-Schutz.

Automatische Registrierung und Kalibrierung

Ein wesentlicher Vorteil des Trimble X7 ist die automatische Registrierung und Kalibrierung der Scan-Daten, die eine erhebliche Zeitersparnis bei der Verarbeitung ermöglicht. Das Gerät nutzt die Trimble X-Drive-Technologie, um die Scan-Daten automatisch in Echtzeit zu registrieren und zu kalibrieren, wodurch die Notwendigkeit einer manuellen Nachbearbeitung entfällt.

Benutzerfreundlichkeit und Mobilität

Der Trimble X7 ist für seine einfache Handhabung und Mobilität bekannt. Das Gerät ist kompakt und mit einem Gewicht von etwa 5.8 kg relativ leicht, und lässt sich problemlos in einem Flugzeug transportieren. Der integrierte Tablet-PC ermöglicht eine intuitive Bedienung und Steuerung des Scanners, während die drahtlose Kommunikation die Kontrolle aus sicherer Entfernung ermöglicht.

Kompatibilität mit Software

Die vom Trimble X7 erfassten Daten sind kompatibel mit Trimble RealWorks, einer leistungsfähigen Software zur Verarbeitung und Analyse von 3D-Punktwolken. Die enge Integration mit Trimble RealWorks ermöglicht eine effiziente Datenverarbeitung.

Zusammenfassung

Insgesamt bietet der Trimble X7 eine leistungsfähige Lösung für das Laserscanning von Freiluftschaltanlagen, mit hervorragender Genauigkeit, schneller Erfassungsgeschwindigkeit und benutzerfreundlicher Handhabung.

Der Leica BLK360 ist ein kompaktes und leichtes 3D-Laserscanning-System, das sich durch seine einfache Bedienung und Vielseitigkeit auszeichnet. In diesem Abschnitt werden die technischen Spezifikationen, die Bedienung sowie die Kompatibilität mit Software des Leica BLK360 näher beleuchtet und dessen Eignung für das Scannen von 380-kV-Freiluft-Unterwerken bewertet.

Technische Spezifikationen

Der Leica BLK360 zeichnet sich durch seine kompakte Bauweise und sein geringes Gewicht von nur etwa 1 kg aus. Er verfügt über eine Genauigkeit von 4 mm auf 10 m Entfernung und kann bis zu 360’000 Punkte pro Sekunde erfassen. Zudem besitzt das Gerät eine integrierte HDR-Farbkamera für fotorealistische Punktwolken. Hinsichtlich der Umgebungstauglichkeit weist der Leica BLK360 einen IP54-Schutz auf, was ihn für den Einsatz in Freiluft-Unterwerken geeignet macht.

Benutzerfreundlichkeit und Mobilität

Die Bedienung des Leica BLK360 erfolgt über eine mobile App, die für iOS und Android verfügbar ist. Dadurch ist eine intuitive und unkomplizierte Steuerung des Scanners möglich. Dank seiner kompakten Abmessungen und des geringen Gewichts von einem Kilo, ist der Leica BLK360 leicht transportierbar und auch für Einsatzorte geeignet, welche mit dem Flugzeug oder zu Fuss erreicht werden müssen.

Kompatibilität mit Software

Der Leica BLK360 ist mit der Cyclone REGISTER 360 Software von Leica kompatibel, die eine effiziente Verarbeitung und Analyse der erfassten 3D-Punktwolken ermöglicht. Die erzeugten Punktwolken können in das ReCap-Format oder E57-Format konvertiert werden. Mittels dieser Formate ist die Kompatibilität mit Trimble RealWorks gegeben, sodass eine einheitliche Datenverarbeitung über verschiedene Geräte möglich ist.

Zusammenfassung

Insgesamt zeigt der Leica BLK360 als kompaktes und leichtes Laserscanning-System gute Ergebnisse für das Scannen von 380-kV-Freiluft-Unterwerken. Seine Genauigkeit, einfache Bedienung und Mobilität machen ihn zu einer interessanten Alternative zum Trimble X7, wenn einige Abstriche in der Auflösung der Punktwolke gemacht werden können.

Der NavVis VLX 2 ist ein mobiles Mapping-System, das sich durch seine Flexibilität und Schnelligkeit auszeichnet. Er wurde entwickelt, um das Scannen von Innen- und Aussenbereichen, einschliesslich 380-kV-Freiluft-Unterwerken, zu optimieren. In diesem Abschnitt werden die technischen Spezifikationen, die Bedienung sowie die Kompatibilität mit Software des NavVis VLX 2 näher beleuchtet und dessen Eignung für das Scannen von Freiluft-Unterwerken bewertet.

Technische Spezifikationen

Der NavVis VLX 2 ist ein mobiles Mapping-System auf SLAM Basis, das mit zwei hochpräzisen Laserscannern ausgestattet ist und eine Genauigkeit von 6 mm auf 10 m Entfernung bietet. Das Gerät verfügt über eine Scann Rate von bis zu 300’000 Punkten pro Sekunde und ist mit einer HDR-Farbkamera für fotorealistische Punktwolken ausgestattet. Zusätzlich besitzt der NavVis VLX 2 integrierte GNSS- und IMU-Sensoren, um eine präzise Positionierung und Orientierung der erfassten Daten sicherzustellen.

Flexibilität und Effizienz

Ein wesentlicher Vorteil des NavVis VLX 2 ist seine Flexibilität und Effizienz bei der Datenerfassung. Da es sich um ein mobiles System handelt, kann es entweder von einer Person getragen oder auf einem Fahrzeug montiert werden, um Daten während der Bewegung zu erfassen. Diese Eigenschaft ermöglicht es, grosse Flächen in kurzer Zeit abzudecken und somit die Scanning-Zeit insbesondere bei grossflächigen Freiluftschaltanlagen zu reduzieren.

Mobilität und Transportfähigkeit

Der NavVis VLX 2 ist kompakt und leicht, mit einem Gewicht von etwa 8.7 kg, was den Transport und die Handhabung erleichtert Das System kann problemlos im aufgegebenen Gepäck eines Flugzeugs transportiert werden, was es zu einer praktischen Lösung für Projekte an verschiedenen Standorten macht. Einzig die Akkus müssen ins Handgepäck

Kompatibilität mit Software

Der NavVis VLX 2 ist kompatibel mit der NavVis Indoor Viewer-Software, die eine effiziente Verarbeitung und Analyse der erfassten 3D-Punktwolken ermöglicht. Die erzeugten Punktwolken können in das ReCap-Format konvertiert werden, um eine nahtlose Integration in die Primtech 3D-Software für die Erstellung digitaler Zwillinge zu gewährleisten. Zudem ist die Kompatibilität mit Trimble RealWorks und Leica Cyclone REGISTER 360 gegeben, sodass eine einheitliche Datenverarbeitung über verschiedene Geräte möglich ist.

Zusammenfassung

Insgesamt zeigt der NavVis VLX 2 als mobiles Mapping-System gute Ergebnisse für das Scannen von 380-kV-Freiluft-Unterwerken. Seine Flexibilität, Genauigkeit und Mobilität machen ihn zu einer vielversprechenden Alternative zu den stationären Laserscannern Trimble X7 und Leica BLK360, wenn Geschwindigkeit ein entscheidender Faktor bei der Punktwolkengenerierung ist.

Eigenschaft/Funktion	Trimble X7	Leica BLK360	NavVis VLX 2
Genauigkeit	<3 mm auf 60m	4 mm auf 10m 7 mm auf 20m	6 mm auf 10m
Scanrate	1 Million Punkte/Sekunde	360'000 Punkte/Sekunde	300'000 Punkte/Sekunde
Gewicht	5.8 kg	1 kg	8.7 kg
Schutzklasse	IP55	IP54	Nicht angegeben
Kamera	Drei HDR-Farbkameras	Eine HDR-Farbkameras Eine Wärmebildkamera	Vier HDR-Farbkameras
Registrierung/Kalibrierung	Automatisch	App-basiert	SLAM-basiert
Steuerung	Tablet-PC mit trimble Field Link	Mobile App (iOS) Cyclon Field	Integrierter Touchdisplay
Bevorzugte Software	Trimble RealWorks	Cyclone REGISTER 360	NavVis Capture Solution
Besondere Merkmale	X-Drive-Technologie, robust	Kompakt & leicht	Mobil, GNSS & IMU integriert, schnell

Tabelle 12: Eigenschaft/Funktion der einzelnen Scanner

3.1.6 Genauigkeits- und Toleranzangaben

In der Messtechnik wird die Messabweichung als die Differenz zwischen einem ermittelten Messwert und dem entsprechenden Referenzwert definiert. Die Präzision einer Messung ist unmittelbar von der Genauigkeit der aufgenommenen Messwerte abhängig. Wenn die Anzahl der Messungen zunimmt, verbessert sich die Genauigkeit durch Mittelwertsbildung.

Angaben in Datenblättern und fehlende Standards

Bislang gibt es keine verbindlichen Standards für die Messgenauigkeit von Laserscannern. Eine Internet-Recherche sowie eine Anfrage bei unserem Partner ALLNAV bestätigten diesen Sachverhalt. Eine Veröffentlichung (Wunderlich, Wasmeier, Ohlmann-Lauber, Schäfer, & Reidl, 2013) zeigte auf, dass zu diesem Zeitpunkt keine verbindlichen Standards existierten, und es scheint, dass sich daran bis heute nichts geändert hat.

Hersteller von Laserscannern sind in der Gestaltung ihrer Spezifikationen zur Messgenauigkeit frei, was zu unterschiedlichen Angaben je nach Hersteller führt. Die Überprüfung und Vergleichbarkeit dieser Werte gestalteten sich schwierig.

Bisher wurde auf die technischen Daten der Scanner Hersteller vertraut. Diese Angaben, insbesondere zu Genauigkeit und Toleranzen, wurden durch umfangreiche Tests der Hersteller ermittelt. Die Reputation und der langjährige Markterfolg der Marken Trimble und Leica werden als starker Indikator für die Verlässlichkeit ihrer Angaben betrachtet. Dennoch wurde es im Rahmen der Arbeit für notwendig erachtet, eigene Überprüfungen durchzuführen, um sicherzustellen, dass die erwarteten Werte und Toleranzen tatsächlich erreicht werden. Die Ergebnisse sind im Kapitel «3.1.8 Analyse der Genauigkeits- und Toleranzangaben» dargelegt

Es wurde bewusst entschieden, lediglich eine begrenzte Anzahl von Kontrollmessungen durchzuführen. Für eine statistisch belastbare Analyse hätte es einer Durchführung von mehreren tausend Kontrollmessungen bedurft, wobei viele Faktoren zu berücksichtigen gewesen wären. Das Ziel war nicht, die Herstellerangaben zu widerlegen oder zu bestätigen, sondern ein realistisches Bild der erwarteten Ergebnisse in der spezifischen Anwendungssituation zu erhalten. Durch diesen pragmatischen Ansatz konnte innerhalb der TEKO-Aufwandsgrenzen geblieben und dennoch aussagekräftige Ergebnisse erzielt werden.

Das Hauptaugenmerk wurde auf die Messwertabweichung der Punktwolke gelegt, die für den Prozess der Erstellung eines digitalen Zwillings von Bedeutung ist. Die Punktwolke repräsentiert die Summe aller Messabweichungen, die beim Scannen auftreten können. Zu diesen Abweichungen gehören (nicht abschliessend):

- Umwelteinflüsse: Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit und atmosphärischer Druck können die Ausbreitung des Laserstrahls beeinflussen, was zu relevanten Abweichungen führen kann.
- Oberflächenbeschaffenheit: Unebenheiten oder Reflexionen auf der zu scannenden Oberfläche können die Messgenauigkeit reduzieren.
- Winkel- und Sensorgenauigkeit: Die Genauigkeit von Laserscannern hängt auch von der Präzision ihrer Sensoren und der Winkelauflösung ab. Ungenauigkeiten in diesen Komponenten können sich auf die Gesamtgenauigkeit auswirken.
- Verarbeitung der Messdaten: Die Verarbeitung der erfassten Daten in der Registrierungssoftware kann ebenfalls zu Ungenauigkeiten führen, insbesondere wenn die Algorithmen nicht optimal auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sind.
- Menschliche Faktoren: Die Bedienung des Laserscanners durch den Operator und die Interpretation der Ergebnisse können ebenfalls Einfluss auf die Genauigkeit der Messungen haben.

Zusammenfassung

Die Messabweichung hängt direkt mit den Toleranzen der Laserscanner zusammen. Es gibt derzeit keine festgelegten Standards für die Messgenauigkeit von Laserscannern. Die Angaben der Hersteller basieren auf umfangreichen eigenen Tests. Diese Angaben sind untereinander nicht vergleichbar. Im Rahmen dieser Arbeit wurden einige Kontrollmessungen durchgeführt, um ein realistisches Bild der zu erwartenden Werte und Toleranzen zu erhalten, wobei der Fokus auf der Messwertabweichung der Punktwolke lag. Verschiedene Faktoren, einschliesslich Umwelteinflüsse, Oberflächenbeschaffenheit, Winkel- und Sensorgenauigkeit, Datenverarbeitung und menschliche Faktoren, können die Genauigkeit der Messungen beeinflussen, sind jedoch als Summe in der Punktwolke abgebildet.

- Ein direkter Vergleich der möglichen Messfehler wird durch die unterschiedlichen Angaben der Hersteller in ihren Datenblätter verunmöglicht.
- Das Hauptinteresse für die Diplomarbeit liegt in der Genauigkeit der erstellten Punktwolke, da sie die Grundlage für den digitalen Zwilling bildet.
- Um die Messgenauigkeiten der Punktwolke unseren Kunden zusichern zu können, wurde eine Kontrollmessung durchgeführt.

3.1.7 Datenverarbeitung zur Punktwolke

Eine weit verbreitete Software zur Verarbeitung von Laserscandaten ist Trimble RealWorks. Dies sowohl für Daten der eigenen Laserscanner-Serie als auch für Daten anderer Laserscanner-Hersteller.

Mit RealWorks können Punktwolkendaten nicht nur verarbeitet, sondern auch umfassend analysiert und aufbereitet werden.

Registrierung

Eine registrierte Punktwolke entsteht, indem die Scans zu einer zusammenhängenden Gesamtpunktwolke kombiniert werden. Dabei werden die einzelnen Scans, wie z.B. Scan 1, Scan 2, Scan 3 usw. miteinander verknüpft und ausgerichtet. Die Registrierung erfolgt über einen mathematischen Prozess. Dieser ist hochkomplex und es wird in dieser Diplomarbeit nicht näher darauf eingegangen. Früher benötigte man beim Scannen, Kugeln und Scan-Tafeln. Dadurch konnte die Software die einzelnen Scans zueinander ausrichten und verbinden. Aktuelle Laserscanner und ihre Software benötigen nur noch bei sehr monotonen Umgebungen solche Hilfsmittel (Beispiel: schmale Tunnel). Die Verknüpfung der Scans ist somit ein entscheidender Schritt, um die volle Funktionalität und Nutzung der Punktwolkendaten in entsprechender CAD-Software zu gewährleisten.

Punktwolkenbearbeitung

Je grösser die Datensätze sind, desto schwieriger ist es, sie später in Primtech 3D (Modellierungssoftware) zu verwenden. Der Grund dafür ist, dass der Bildaufbau von Primtech 3D massiv verlangsamt wird. Dies geht so weit, dass ein Wechsel der Ansicht in Primtech 3D bis zu 10 Minuten dauern kann. Um effizient arbeiten zu können, ist es wichtig, häufig die Ansicht zu wechseln, um sich in der Dreidimensionalität zurechtzufinden. Es muss also ein Kompromiss zwischen Datenmenge und Punktdichte gefunden werden. Es hat sich gezeigt, dass das Arbeiten mit einer Punktdichte von durchschnittlich einem Punkt pro 10 mm, räumlicher Distanz, ideal ist. Die Geschwindigkeit von Primtech 3D wird nur gering verlangsamt und für den Konstrukteur ist ein genug klares Bild vorhanden, um die Anlage modellieren zu können. Diese Reduktion wird durch ein entsprechendes Programm in der Software erreicht. Eine zusätzliche Punktwolke mit voller Auflösung wird für die Modellierung komplizierter und detailreicher Passagen innerhalb der Scandaten vorgehalten. Diese vollaufgelöste Punktwolke wird auf Wunsch des Konstrukteurs komplett oder in Teilen nach den Bedürfnissen des Konstrukteurs zur Verfügung gestellt.

Punktwolkenexport

Für die Weiterverarbeitung in Primtech 3D, muss die Punktwolke im Format von ReCap (RCP) vorliegen. Diese Umwandlung erfolgt ebenfalls in RealWorks.

Weitere mögliche Arbeiten in Primtech 3D

Falls der Kunde keine Weiterverarbeitung zum digitalen Zwilling wünscht, stehen auch in RealWorks Tools zur Messung zur Verfügung. Abstände, Flächen und Volumen lassen sich einfach bestimmen. Eine bei den Kunden ebenfalls gern gewählte Option, ist die Erstellung eines Geländemodells als Mesh. Je nach Kundenwunsch kann die Dichte des Meshes von einigen Dezimetern bis hin zu einigen Metern erfolgen. Die Einschränkung dabei ist, dass AutoCAD nur Mesh mit einer Anzahl von ungefähr 32'000 verarbeiten kann. Dies reicht jedoch meistens, um eine adäquate Abbildung des Untergrundes nachzubilden. Wo dies nicht genügt, müssen mehrere Meshes erzeugt werden, welche dann über die AutoCAD-Funktion «Xref» eingebunden werden können.

Weitere Software

Neben Trimble RealWorks steht auch Autodesk ReCap zur Verfügung. Diese Software ist bereits in den Lizenzen für andere Autodesk-Produkte inkludiert und steht innerhalb der Firma zur Verfügung. Die Erstellung und Bearbeitung von Punktwolken ist rudimentärer als mit RealWorks. Aus diesem Grund wird die Software nicht produktiv eingesetzt.

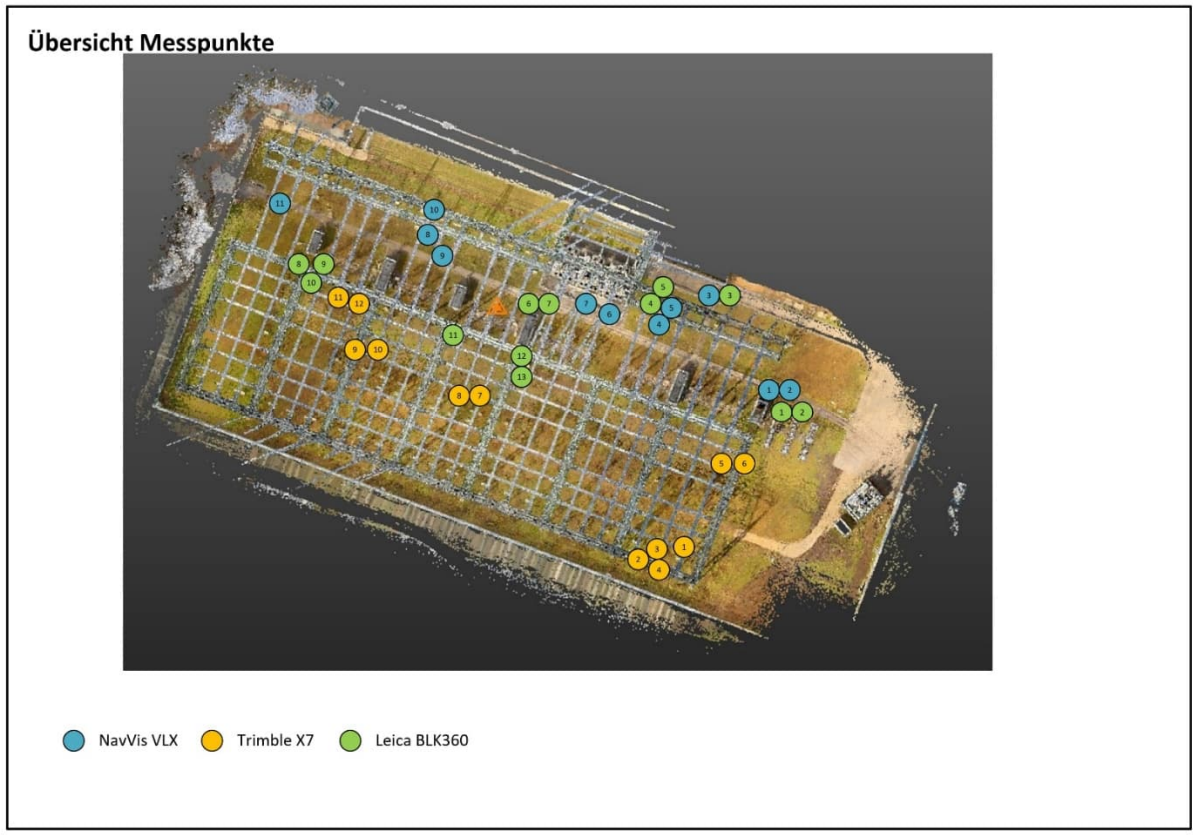


Abbildung 12: Verweis auf den Anhang betreffend Kontrollmessungen

3.1.8 Analyse der Genauigkeits- und Toleranzangaben

Die Punktwolken wurden weitestgehend mit tiefen Auflösungen der Scanner erstellt. Nur für die Zeittests wurden einzelne Scans mit anderen Einstellungen durchgefürt. Auch bei diesem Test wurde unsere eigene Methode genutzt, um die Zeit für einen Scan zu messen. Die Zeit wird mit dem Beginn eines neuen Scans gestartet und gestoppt, nachdem der Scanner an seine nächste Position gestellt wurde und dort den Scann beendet hat. Somit wird die Zeit zweier Scans erfasst. Die Laserscanner wurden jeweils immer 10 Meter versetzt. Diese Versetzung dauerte immer genau eine Minute. Bei allen Geräten wurde die Option Farbig/Foto angewählt. Es hat sich aus früheren Projekten herausgestellt, dass bei S/W-Punktwolken die Lesbarkeit für den Modellierer schlecht war und es dadurch zu qualitativen Problemen im Modell kam oder nachträglich Fotos vor Ort gemacht werden mussten. Aus diesen Gründen werden heute alle unsere Punktwolken farbig erstellt und der zusätzliche Zeitaufwand in Kauf genommen.

Folgende Werte konnten ermittelt werden:

Trimble X7

Einstellung	Dauer (min)
2 Minuten	6:08
4 Minuten	10:01
7 Minuten	16:08
15 Minuten	32:08

Tabelle 13: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben Trimble X7

Leica BLK360

Einstellung	Dauer (min)
Low /Schnell	4:30
Medium / Standard	5:47
High / Hohe Dichte	10:21

Tabelle 14: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben Leica BLK360

NavVis VLX 2

Einstellung	Dauer (min)
Die Auflösung wird erst im Postprozess definiert und ist für alle Auflösungen gleich.	fortlaufende Aufnahme

Tabelle 15: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben NavVis VLX 2

Anhand der Kontrollmessungen, siehe ANH-003, ergaben sich folgende Abweichungen:

Trimble X7

Messung	Länge / Höhe	Distanz	Abweichung
01	Höhe	2619mm	+3.92mm
02	Höhe	6417mm	-2.94mm
03	Länge	3825mm	+3.74mm
04	Länge	3796mm	+2.67mm
05	Länge	8405mm	-2.06mm
06	Länge	8285mm	+0.73mm
07	Länge	5902mm	-3.10mm
08	Höhe	993mm	+1.36mm
09	Höhe	3247mm	-2.04mm
10	Höhe	12667mm	-3.95mm
11	Länge	1000mm	-0.96mm
12	Höhe	1609mm	+1.14mm

Tabelle 16: Auswertung Abweichungen Trimble X7

Leica BLK 360

Messung	Länge / Höhe	Distanz	Abweichung
01	Länge	998mm	+7.84mm
02	Höhe	2091	+1.63mm
03	Länge	24641mm	-2.90mm
04	Höhe	12662	-7.96mm
05	Höhe	23192mm	-10.52mm
06	Länge	1515mm	-3.08mm
07	Höhe	7190mm	+6.00mm
08	Länge	5218mm	+3.12mm
09	Höhe	7244mm	+3.00mm
10	Höhe	6835mm	-16.00mm
11	Breite	2886mm	+1.22mm
12	Länge	2886mm	+1.22mm
13	Höhe	12990mm	-.5.00mm

Tabelle 17: Auswertung Abweichungen Leica BLK 360

NavVis VLX 2

Messung	Länge / Höhe	Distanz	Abweichung
01	Länge	998mm	+2.61mm
02	Höhe	2091	-0.16mm
03	Länge	24641mm	-5.76mm
04	Höhe	12662	-4.58mm
05	Höhe	23192mm	-5.94mm
06	Länge	1091mm	-1.95mm
07	Länge	2002mm	+6.97mm
08	Länge	7083mm	-0.80mm
09	Länge	1090mm	-4.60mm
10	Länge	3178mm	-3.05mm
11	Breite	45mm	-5.01mm

Tabelle 18: Auswertung Abweichungen NavVis VLX 2

Die Daten wurden ChatGPT (ChatGPT, persönliche Kommunikation, 02. Oktober 2023) zur Analyse übergeben. Folgender Prompt wurde dabei genutzt:

Untersuchung der Abweichungen im Vergleich der verschiedenen Laserscanner:
Visualisierung der Abweichungen für jedes Gerät.
Vergleich der Abweichungen zwischen Höhe und Länge:
Visualisierung der Abweichungen zwischen den Messungen von Höhe und Länge.
Berechnung der durchschnittlichen Abweichung pro Laserscanner:
Berechnung der durchschnittlichen Abweichung für jedes Gerät.
Untersuchung des Verhältnisses der Abweichung zur Distanz:
Visualisierung des Verhältnisses der Abweichung zur Distanz für jedes Gerät.
Halte die Visualisierungen in Türkisakzenten

Hier die Auswertung mittels ChatGPT

Untersuchung der Abweichungen im Vergleich der verschiedenen Laserscanner:

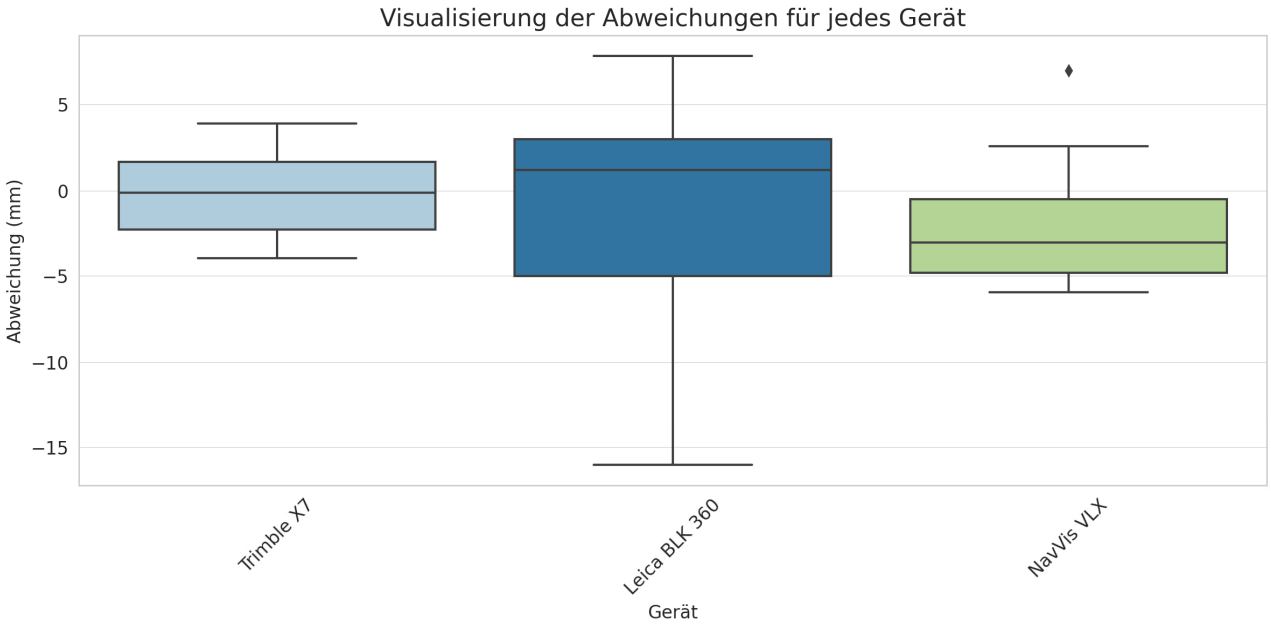


Abbildung 13: Vergleich der Laserscanner anhand der Abweichungen

Die Boxplot-Visualisierung zeigt die Verteilung der Abweichungen für jedes Gerät. Es scheint, dass die Abweichungen beim Trimble X7 und beim NavVis VLX ziemlich ähnlich sind, während die Abweichungen beim Leica BLK360 etwas größer sind.

Vergleich der Abweichungen zwischen Höhe und Länge:

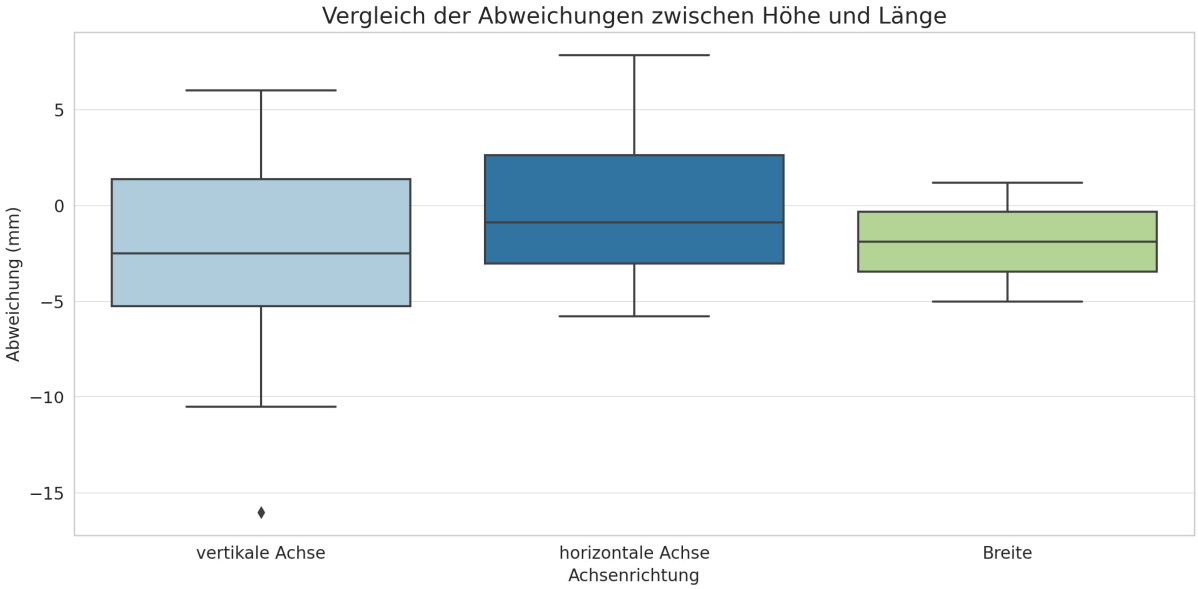


Abbildung 14: Vergleich der Abweichungen zwischen Höhe und Länge der Laserscanner

Die Boxplots zeigen, dass die Abweichungen in der horizontalen Ebene (Länge) im Allgemeinen geringer sind als in der vertikalen Ebene (Höhe).

Durchschnittliche Abweichung pro Laserscanner:

Leica BLK 360: 5.36 mm

NavVis VLX: 3.77 mm

Trimble X7: 2.38 mm

Der Laserscanner Trimble X7 hat die geringste durchschnittliche Abweichung, gefolgt von NavVis VLX und Leica BLK 360.

Verhältnis der Abweichung zur Distanz:

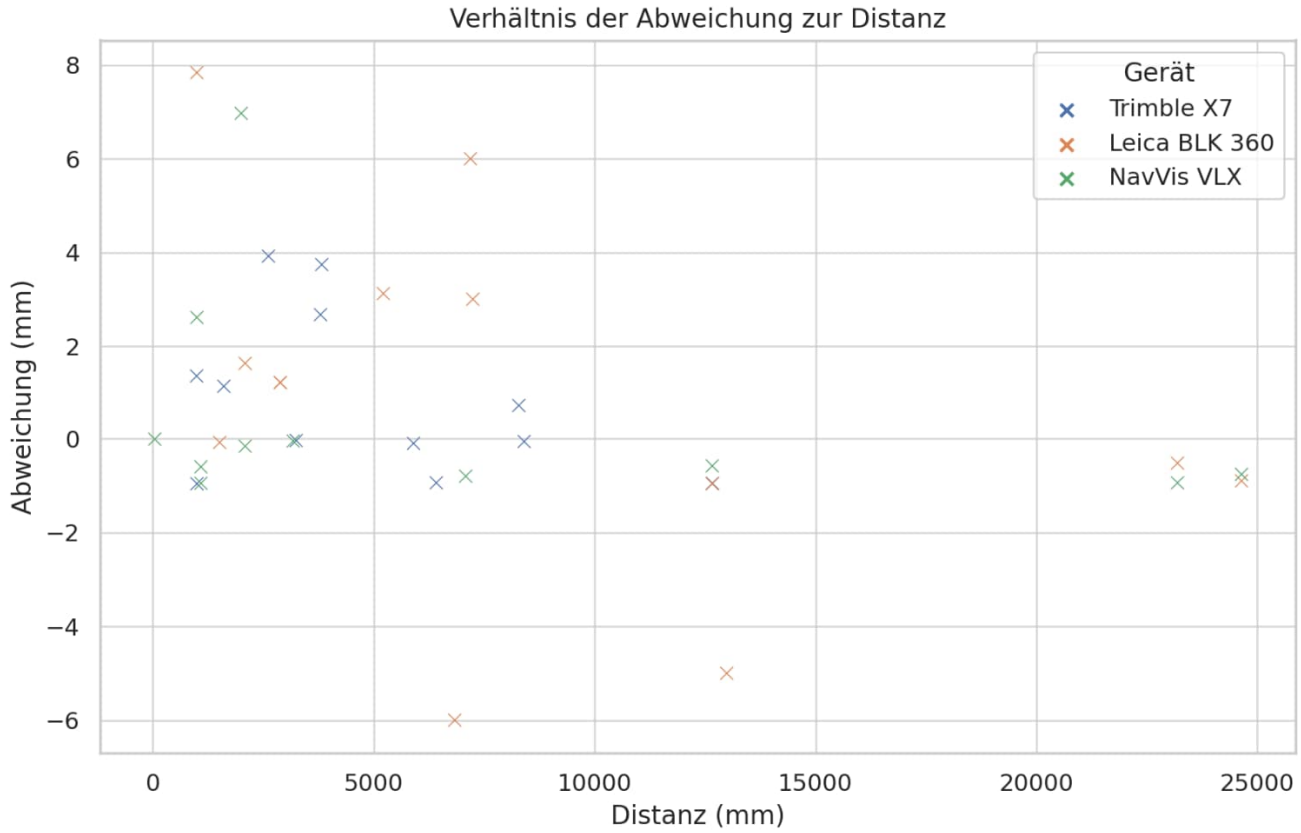


Abbildung 15: Vergleich der Laserscanner anhand des Verhältnisses der Abweichung zur Distanz

Die Scatter-Plot-Visualisierung zeigt das Verhältnis zwischen der Abweichung und der Distanz für jedes Gerät. Es gibt keine klare Tendenz, die darauf hindeutet, dass die Abweichung mit der Distanz zunimmt oder abnimmt. Die Punkte scheinen gleichmäßig über den gesamten Distanzbereich verteilt zu sein, und es gibt keine sichtbare Korrelation zwischen der Abweichung und der Distanz.

Die Analysefunktion von ChatGPT brachte einen Mehrwert für die Auswertung. Die reinen Daten sind aufschlussreich. Sie zeigen, dass mit Abweichungen im Millimeterbereich gerechnet werden kann, wie von den Herstellern angegeben. Es wurde auch keine signifikante Abweichung der Messabweichungen in der horizontalen und vertikalen Ebene festgestellt. Ebenso sind grössere Messabstände nicht mit grösseren Abweichungen gleichzusetzen. Dies ist erklärbar, da für die Messabweichung nicht die Entfernung der Messpunkte, sondern die Entfernung der Messpunkte zum Standort des Laserscanners und die Anzahl der Scans zwischen den Messpunkten ausschlaggebend ist. Die auffällig höhere Messabweichung des BLK360 lässt sich auf zwei Messungen zurückführen. Bei Messung 10 wird davon ausgegangen, dass nicht der tiefste Punkt der Leitung mit dem Laserdistanzmessgerät gemessen wurde. Und bei den Messungen 4 & 5 wurde nochmals in Trimble RealView nachgemessen. Je nach anvisiertem Punkt ist auch eine kleinere Abweichung möglich. Damit wird der wichtigste Einflussfaktor der Messung sichtbar: die Auswahl der zu messenden Punkte in der Software Trimble RealView. Um eine möglichst genaue Messung in der Software durchzuführen, müssen viele vorbereitende Schritte durchgeführt werden. Aber selbst dann sind Abweichungen von mehreren Millimetern pro Messung der gleichen Strecke möglich. Je geringer die Punktdichte ist, desto schwieriger ist die Messung und desto grösser ist die Messungenauigkeit. Dies erklärt auch das gute Abschneiden des VLX von NavVis. Dessen Punktwolke ist bezüglich Dichte mit Abstand am homogensten und damit am einfachsten zu messen.

Empfehlung für Einsatzgebiete

Unterwerk

Der NavVis VLX kann eine Freiluftschaltanlage in einem Drittel der Zeit eines klassischen Laserscanners erfassen. Die Genauigkeit ist dabei für die meisten Kunden ausreichend. Darum eine klare Empfehlung in dieser Situation.

Masten ab 40 Meter Höhe

Der Trimble X7 hat, gemäss technischer Spezifikation, auf höheren Auflösungsstufen genügend Reserven auch solche Masten mit guter Genauigkeit zu erfassen. Obwohl dafür bis zu 16 Minuten pro Scan benötigt werden, ist er die einzige Option für diese Distanzen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden jedoch keine diesbezügliche Messungen durchgeführt.

Tunnel

Aus bisherigen Aufträgen ist bekannt, dass sich in diesem Einsatzgebiet, sowohl der Trimble X7, wie auch der BLK 360 eignen. Es werden jedoch entsprechende Referenzpunkte benötigt. Dies macht die Vorbereitung zeitintensiver. Diese Referenzpunkte kann die Software von NavVis VLX nicht verarbeiten. Somit ist der VLX nicht geeignet für Tunnel.

Auslandseinsätze mittels Flugzeug zu erreichen

Das geringe Gewicht des BLK 360 ist vorteilhaft. Die elektrische Kapazität seiner Lithium-Ionen-Akkus ist gering. Der Scanner und die Batterien können im Handgepäck transportiert werden. Der Zeitaufwand entspricht einem klassischen Scan und kann so offeriert werden. Ein spezielles Stativ ist ebenfalls handgepäcktauglich. Daher ist der BLK 360 klar empfohlen. Der NavVis VLX hat eine Transportbox. Diese wurde speziell für den Flugzeugtransport entwickelt. Viele Stellen in der Gepäckabwicklung an Flughäfen sind aktuell offen. Dies führt zu verspäteten Gepäcklieferung oder sogar zur Nichtbeförderung. Der Transport im aufgegebenen Gepäck ist darum riskanter und wird, zumindest bei Erstellung der Diplomarbeit, nicht empfohlen.

Fazit

Wie bereits erwähnt, war das Ziel nicht, statistisch relevante Daten zu erheben. Es ging lediglich darum, zu kontrollieren, ob durch den angewendeten Workflow unbewusst grössere Messfehler in die Punktwolken einfliessen. Durch die Kontrollmessungen wurde jedoch bestätigt. dass die Messabweichungen innerhalb der von den Herstellern angegebenen Toleranzen geblieben sind. Dabei wurde jedoch bemerkt, wie schwierig es ist, in der Software Trimble RealWorks korrekt zu messen. Kleine Bewegungen mit der Maus können schon zu Abweichungen im Zentimeterbereich führen! Für eine korrekte Messung sind oft sogar mehrere Minuten der Vorbereitung notwendig, um nicht Punkte in einer falschen Ebene zu nutzen. Dieser Umstand wurde ebenfalls nochmals mittels Autodesk ReCap, einer anderen Software für Punktwolkenauswertung getestet. Auch dort waren bei minimalen Mausbewegungen Abweichungen im Zentimeterbereich möglich. Es wurde festgestellt, dass Messfehler also hauptsächlich durch Punkt-zu-Punkt-Messungen in Punktwolken-Software entstehen. Was sich für die Messung einer Punktwolke dramatisch anhört, relativiert sich wieder bei der Erstellung eines digitalen Zwillings. Dort werden nicht einzelne Massen verwendet. Der digitale Zwilling wird visuell gezeichnet. Dabei nimmt der Konstrukteur als menschlicher Faktor eine ausgleichende Funktion (Mittelwertbildung) ein. Je geringer die Streuung, wie höher die Punktdichte und je klarer diese Bereiche abgegrenzt werden können, desto präziser können die einzelnen Objekte nachgebildet werden Dadurch stimmen die digitalen Zwillinge meistens bis auf wenige Millimeter mit der realen Anlage überein. Die Mittelung aller Fehler führt zu einer geringeren Gesamtabweichung. Es zeigt sich dadurch, dass der Mehrwert eines digitalen Zwillings auch darin liegt, dass die Messungen am selbigen auch von weniger erfahrenen Personen durchgeführt werden können. Messungen direkt in einer Punktwolke erfordern erfahrene Bediener mit genügend Zeit die Messung in der Software vorzubereiten.

- Messungen direkt in der Punktwolke sind schwierig, zeitaufwendig und grösster Messunsicherheitsfaktor
- Dichte der Punktwolke für Messgenauigkeit sehr entscheidend
- Messungen im digitalen Zwilling sind einfacher und Messabweichungen ebenfalls nur im Millimeterbereich

3.1.9 Schulung und Voraussetzungsanforderungen für das Personal

Wie mehrmals in den letzten Kapiteln festgehalten, bringt die Nutzung von Laserscanning-Technologien im Bereich der Freiluft-Unterwerke viele Vorteile mit sich. Für das eingesetzte Personal besteht ein geringeres Risiko als bei einer klassischen Vermessung. Trotzdem bleibt der Sicherheitsaspekt der wichtigste Punkt in der Schulung. Zusätzliche Herausforderungen sind das räumliche Vorstellungsvermögen und ein gewisses Verständnis für das zu erstellende Endprodukt.

Anforderungen an das Personal

Folgendes Anforderungsprofil soll bei der Suche nach geeignetem Personal als Scanner Operator verwendet werden:

Technische Kenntnisse

- Ausbildung oder Erfahrung im Bereich Elektrotechnik. Von Vorteil in Hochspannungsanlagen.
- Kenntnisse in der Bedienung von Laserscannern und der dazugehörigen Software (wie Trimble RealWorks oder Leica Cyclone)

Detailorientierung

- Hohes Mass an Genauigkeit und Aufmerksamkeit für Details
- Fähigkeit, Scandaten auf Fehler zu überprüfen und diese zu korrigieren
- Fähigkeit, Scanauftrag mit den Anforderungen der Kunden in Einklang zu bringen

Geduld und Ausdauer

- Fähigkeit, längere Wartezeiten zwischen den Scanning-Prozessen geduldig und fokussiert zu überbrücken
- Fähigkeit, auch unter schwierigen Bedingungen konzentriert zu bleiben

Problemlösungsfähigkeiten

- Fähigkeit, bei technischen Problemen oder Unklarheiten Lösungen zu finden und diese effektiv umzusetzen
- Fähigkeit, Probleme selbstständig zu lösen oder Hilfe zu suchen, wenn dies erforderlich ist

Kommunikationsfähigkeiten

- Fähigkeit, klar und effektiv mit Teammitgliedern, Auftraggebern und anderen relevanten Personen zu kommunizieren
- Fähigkeit, technische Sachverhalte in einer verständlichen Sprache zu erklären

Mobilität

- Bereitschaft, zu verschiedenen Standorten zu reisen, eventuell auch im Ausland mit dem Flugzeug
- Fähigkeit, mittelschwere (um 20 kg) und sperrige Ausrüstung zu tragen und zu installieren

Schulungsmöglichkeiten

Grundvoraussetzung für Arbeiten in Hochspannungsanlagen ist der Einsatz von instruierten Personen (SR 734.2 Art 12). Die Instruktionen müssen dabei folgende Kenntnisse vermitteln:

- die Gefahren bei Annäherung an unter Spannung stehende Teile
- die Sofortmassnahmen und Hilfeleistungen bei Unfällen
- die zu betretenden Anlagen mit Hinweisen auf Fluchtwege und Notrufstellen
- die durch das Personal vorzunehmenden betrieblichen Handlungen und Arbeiten
- das Vorgehen bei Brandausbruch

Bei der Arbeit wird das Bedienpersonal stets von sachkundigen Personen oder von Personen, die mit den Anlagen vertraut und vom Betriebsinhaber ermächtigt sind, begleitet. Dies, sofern sie nicht selbst mit der Anlage vertraut sind und vom Betriebsinhaber ermächtigt wurden.

Ein weiterer bedeutsamer Aspekt ist die Schulung zur Bedienung der eingesetzten Laserscanner. Diese wird üblicherweise durch externe Dienstleister durchgeführt. Während längerer Zeit werden dem Laserscanner keine Updates zuteil. Allerdings ist jedem Laserscanner eine Bedieneinheit beigelegt. Beim Trimble X7 handelt es sich um ein externes Tablet auf Windows-Basis. Beim Leica BLK 360 wird ein Tablet von Apple als Bedieneinheit verwendet. Beim NavVis VLX ist die Bedieneinheit im Gerät integriert und befindet sich vor dem Körper auf Bauchhöhe in Form eines Touchdisplays. Es ist aus Erfahrung bekannt, dass die Software in den Bedieneinheiten regelmässig Updates erhält. Auf diese Weise können neue Funktionen implementiert oder Fehler korrigiert werden. Aus diesem Grund erscheint es sinnvoll, neben einer Grundschulung für Laserscanner und Bedieneinheit, bei entsprechenden Updates das Bedienpersonal in gesonderten Schulungen über Neuerungen und Verbesserungen zu informieren. Dies kann je nach Umfang durch interne Schulungsprogramme, externe Kurse oder Selbstlernmaterialien erfolgen.

Optimierung der Schulung

Die Optimierung der Schulungsprozesse ist ein kontinuierlicher Prozess, der auf der Basis von Rückmeldungen, Erfahrungen und Veränderungen in Technologie und Verfahren erfolgen sollte. Wichtig ist, dass die Schulungsinhalte stets aktuell und relevant bleiben. Die Implementierung von Praxissimulationen und regelmässigen Auffrischungskursen können dazu beitragen, die Qualität der Schulung zu erhöhen und sicherzustellen, dass unser Personal die notwendigen Fähigkeiten und Kenntnisse besitzt, um Laserscanning-Aufgaben effektiv und sicher durchzuführen.

Über ein einfaches Feedback-Formular (Google Forms), haben wir die aktuelle Situation abgefragt.
Darin haben wir folgendes gefragt:

- Fanden Sie den Inhalt der Schulung relevant und hilfreich für Ihre Arbeit?
- Welche Themen fanden Sie am nützlichsten und warum?
- Gibt es Themen, die Sie gerne noch vertieft hätten oder die in der Schulung gefehlt haben?
- Wie würden Sie die Kompetenz und die Präsentationsfähigkeit des Schulungsleiters bewerten?
- Haben Sie Vorschläge zur Verbesserung der Präsentation des Schulungsleiters?
- Wie würden Sie die Organisation und den Ablauf der Schulung bewerten?
- Haben Sie Vorschläge zur Verbesserung der Organisation oder des Ablaufs?
- Bitte teilen Sie uns Ihre allgemeinen Eindrücke von der Schulung und alle weiteren Anregungen mit, die Sie haben.

Aus dieser Umfrage und unserer eigenen bisherigen Erfahrung haben wir folgende Ergänzung zum aktuellen Vorgehen abgeleitet:

- Definition eines Verantwortlichen für die Weiterbildung und Schulung unserer Mitarbeite im Bereich Laserscanning.
- Einführung einer Lernmanagementsystems (LMS). Beispiel: Moodle, Canvas oder Blackboard.
- Eröffnung einer internen SharePoint-Seite mit Sammlung aller Schulungsunterlagen und Best-Practice Beispielen
- Einführung eines Prozesses und Formulars zur kontinuierlichen Verbesserung (KVP) für die Schulung im Bereich Laserscanning
- Bessere Kommunikation mit Lieferanten, um schneller neue, relevante Funktionen schulen zu können. Die Lieferanten werden angehalten, Neuerungen direkt zu kommunizieren.

Die Schulung der Sicherheitsaspekte und des praktischen Laserscannings sollen konsolidiert werden um kohärente Informationen erhalten und so die Anwendung im Arbeitsalltag zu erleichtern.

3.1.10 Erstellung technische Richtlinie zum Laserscanning

Die Erstellung einer technischen Richtlinie für Laserscanning in Bereich eines Unterwerks erfordert eine gründliche Erfassung und Bewertung aller relevanten Aspekte, die die Qualität und Sicherheit des Scanprozesses und der resultierenden Daten beeinflussen könnten. Um eine entsprechende technische Anforderung zu schreiben sind folgende Überlegungen eingeflossen:

Literatur- und Best-Practices-Recherche

Es erfolgte eine Literaturrecherche. Dabei wurde insbesondere folgende Fachliteratur genutzt.

Leitfaden Laserscanning im Anlagenbau (Schenk, 2016)

Ebenfalls fand im Vorfeld ein Austausch der Scanoperateuren statt um ihre Erfahrung einfliessen zu lassen.

Ein Treffen mit den Konstrukteuren fand ebenfalls im Vorfeld statt um auch die Anforderung der Weiterverarbeitung in die Richtlinie einfliessen zu lassen.

Resultat

Es folgte die Aufstellung der technischen Anforderungen und Spezifikationen für die Laserscanner basierend auf den Anforderungen des Projekts.

Dabei wurden die etablierten Verfahren und neueste Erkenntnisse zusammengeführt und schriftlich festgehalten. Aus Gründen des geistigen Eigentums und der Wahrung kommerzieller Interessen kann dieses Dokument nicht innerhalb dieser Arbeit präsentiert oder offengelegt werden. Es wurde dem Fachexperten zur Bewertung und Durchsicht zur Verfügung gestellt und wurde in unserem Dokumentenverwaltungssystem Keytech unter der Nummer: «BENT-000274850» als «technische Richtlinie zur Erstellung einer 3D-Punktwolke» abgelegt. Das Bewertungsraster für die technische Richtlinie ist im Anhang ANH-004 zu finden.

3.1.11 Kalkulationstool

Um ein effektives Kalkulationstool für Laserscanning zu erstellen, war es wichtig, alle relevanten Parameter und Variablen zu berücksichtigen, die die Kosten und den Umfang des Scanning-Projekts beeinflussen könnten. Folgend eine Aufzählung der Schritte und Überlegungen, die in Betracht gezogen wurden, um ein solches Tool zu entwerfen

Parameter

Es wurden alle relevanten Parameter, welche in der Diplomarbeit aufgeführt sind, erfasst. Dazu gehören:

- Gesamtfläche, welche es zu scannen gilt
- Gewünschte Präzision
- Gewünschte Auflösung
- Maximalhöhe der zu scannenden Objekte

Formeln

Anhand der Auswertungen der Laserscanner kann die typische Zeit errechnet werden, welche für die Scans benötigt wird. Die Angaben zur Präzision und zur Auflösung ergeben weitere wichtige Informationen über benötigte Scannzeiten und den Musskriterien bezogen auf die Genauigkeit und Punktdichte.

Resultat

Es folgte die Erstellung der Kalkulation. Dabei wurden die internen Stundensätze, sowie weitere Kostenfaktoren wie Verpflegung, Reisekosten, Mietpreise und Verbrauchsmaterial eingerechnet.

Aus Gründen des geistigen Eigentums und der Wahrung kommerzieller Interessen kann dieses Dokument nicht innerhalb dieser Arbeit präsentiert oder offengelegt werden. Es wurde dem Fachexperten zur Bewertung und Durchsicht zur Verfügung gestellt und wurde in unserem Dokumentenverwaltungssystem Keytech unter der Nummer: «BENT-000274851» als «Kalkulationstool für Laserscanningofferten» abgelegt. Das Bewertungsraster für die Kalkulation Laserscanning ist im Anhang ANH-005 zu finden.

3.2 Digitaler Zwilling

Die Definition sowie Funktion eines digitalen Zwillings kann aus dem Kapitel «2.9 Teilprojekt digitaler Zwilling» entnommen werden.

Abbildung 16: Vergleich zwischen Realität und Digitalisierung

3D-Modellierung

Die 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen wird immer mehr in der Energiebranche eingesetzt, um Anlagen zu digitalisieren und Planungen vorzunehmen. Dies kann helfen, die Planung, den Bau sowie den Betrieb zu optimieren.

Sie ermöglicht es ein möglichst präzises digitales Modell zu erstellen, welches sämtliche Komponenten und Strukturen des Systems enthält. Mithilfe der Punktwolke können die darin enthaltenen Informationen aufgenommen und modelliert werden. Auf diese Weise können potenzielle und aktuelle Probleme erkannt werden, um anschliessend geeignete Lösungen zu finden und erarbeiten. Darüber hinaus kann das digitale Modell für Schulungszwecke eingesetzt werden. Hierbei können Mitarbeiter mit der Anlage vertraut und auf Gefahren aufmerksam gemacht werden. Mit dem Blick in die Zukunft, kann das Modell auch für die Überwachung der Anlage während des Betriebs dienen. Hierbei können Simulationen vorgenommen werden, um das Verhalten der Anlage zu überprüfen, indem beispielsweise ein Anlagenteil spannungslos geschaltet wird.

Zusammenfassend bietet die 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen einen erheblichen Mehrwert für die Planung, den Bau und den Betrieb der Anlage. Zusätzlich fördert sie die Schulung und Sicherheit sowie die Zuverlässigkeit und Effizienz.

Anwendungsbereich

Die 3D-Modellierung von Hochspannungsanlagen kann in der Energiewirtschaft eine wichtige Rolle spielen, da sie verschiedene Anwendungsbereiche bietet. Hier sind einige mögliche Anwendungsbereiche der 3D-Modellierung von Hochspannungsanlagen:

Planung und Design

Die 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen kann bei der Planung und dem Design von Anlagen helfen. Es ermöglicht verschiedene Konfigurationen und Entwürfe in einer virtuellen Umgebung zu testen, bevor sie in die physische Welt umgesetzt werden. Dies kann die Genauigkeit und Effizienz der Planung erhöhen und helfen, potenzielle Probleme frühzeitig zu erkennen und zu lösen.

Wartung und Reparatur

Die Modelle können auch für Wartungs- und Reparaturzwecke eingesetzt werden. Techniker können die Modelle verwenden, um die Anlagen zu inspizieren und Probleme zu identifizieren, ohne physisch anwesend zu sein. Dies kann die Zeit und Kosten für die Wartung reduzieren, da Techniker nicht immer vor Ort sein müssen.

Schulungen und Simulationen

Sie können auch für Schulungen und Simulationen verwendet werden. Neue Mitarbeiter können mit den Modellen vertraut gemacht werden, bevor sie tatsächlich mit der physischen Anlage arbeiten. Darüber hinaus können Simulationen durchgeführt werden, um verschiedene Szenarien zu testen und mögliche Probleme zu identifizieren.

Sicherheit

In Bezug auf die Sicherheit und Einhaltung von Vorschriften, können die Modelle helfen. Sie können verwendet werden, um potenzielle Gefahrenbereiche zu identifizieren und sicherzustellen, dass die Anlage den geltenden Vorschriften entspricht.

Manuelle Ausmessung

Die manuelle Ausmessung von Freiluftschaltanlagen wurde bereits vor mehreren Jahren eingesetzt. Schon in sehr frühen Jahren wurden Techniken wie die Wasserwaage und das Lot verwendet, um beispielsweise die Höhe von Gebäuden zu messen. Auch der Einsatz von Massbändern und Winkelmessern zur Vermessung von Flächen und Winkeln waren bekannt.

Abbildung 17: Hand-Laserdistanzmessgerät @iStock Credit: kalasek

Als erstes muss ein Plan auf Papier der Freiluftschaltanlage erstellt werden. Dieser dient als Vermessungsaufnahme und Grobübersicht. Hierbei werden alle relevanten Informationen und Daten dokumentiert und festgehalten. Sollte der Fall eintreffen, dass keine Unterlagen zur Anlage vorhanden sind, wird der Plan vor Ort in Kombination mit der Vermessung erstellt.

Nach der Erstellung des Übersichtsplans, wird mithilfe von Massbändern, Handlasergeräten, Winkelmesser, und weitere Werkzeuge das Gelände, die Anlage sowie Gebäude ausgemessen. Die gemessenen Ergebnisse werden im Plan festgehalten.

Nach der Vermessung kann die Modellierung in 3D gestartet werden.

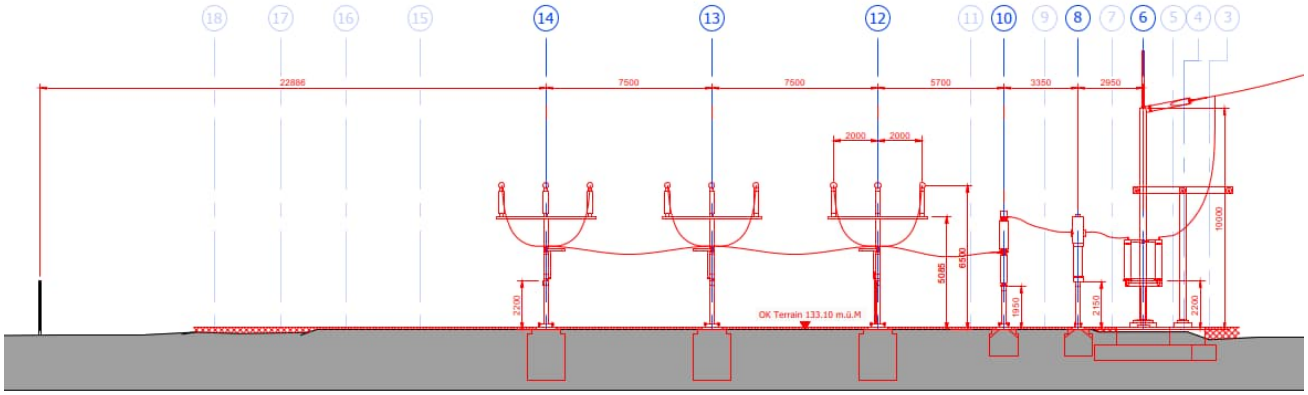


Abbildung 18: 2D-Schnittplan eines Anlagenfeldes

2D-Bestandspläne

Die Modellierung eines digitalen Zwillings aus bestehenden Plänen, richtet sich am vorgängigen Modellierungsprozess von der manuellen Ausmessung aus. Hierbei benötigt es jedoch keine Ausmessung vor Ort.

Mithilfe der 2D-Bestandsplänen, kann ein digitaler Zwilling «nachgezeichnet» werden. Hierbei werden die Pläne herangezogen und 1:1 mithilfe einer 3D-Modellierungssoftware nachgebildet, vorausgesetzt die Bestandspläne enthalten alle relevanten Abmessungsinformationen.

Laserscanning

Heute werden Laserscanner zur Vermessung von Freiluftschaltanlagen sowie von Strassen, Brücken, Gebäuden und sogar ganzen Städten eingesetzt. Die Laserscanner sind in der Lage, präzise Punktwolken von Gebäuden und Umgebungen zu erstellen.

Die genaue Funktion eines Laserscanners ist bereits im Kapitel «3.1.2 Grundlagen des Laserscannings» beschrieben. Dasselbe gilt für den Ablauf des Laserscannens, welches im Kapitel «3.1.3 Laserscanning-Technologie» beschrieben wird.

Nach Abschluss der Vorbereitung wird die Anlage mithilfe des Laserscans ausgemessen. Der Laserscanner erzeugt eine Punktewolke, welche anschliessend für die Modellierung der Anlage benötigt wird. Mit diesen Daten kann die Modellierung unter Verwendung geeigneter 3D-Modellierungssoftware gestartet werden. Die Abmessungen werden aus der Punktewolke entnommen und modelliert.

Abbildung 19: Laserscanner Trimble X7 @ shutterstock.com 2004946592

- Die Erstellung eines digitalen Zwillings beginnt mit der Datensammlung aus verschiedenen Quellen und ermöglicht virtuelle Tests zur Optimierung von Prozessen.
- 3D-Modellierung von Freiluftschaltanlagen verbessert die Planung, Bau und Betrieb von Anlagen, fördert Schulungen und Sicherheit sowie die Effizienz des Stromnetzes.

3.2.1 Einführung in die Erstellung digitaler Zwilling

Für eine erfolgreiche sowie effiziente Modellierung einer Freiluftschaltanlage ist die Vorbereitung sowie eine strukturierte Planung entscheidend. Mit einer genauen und geplanten Vorbereitung können bereits Schwierigkeiten oder zeitaufwendige Faktoren evaluiert und erste Massnahmen getroffen werden. Nachstehend ist ein grober Ablauf sowie ein einfaches Diagramm aufgezeigt, wie man zu einem vollständigen digitalen Zwilling kommt.

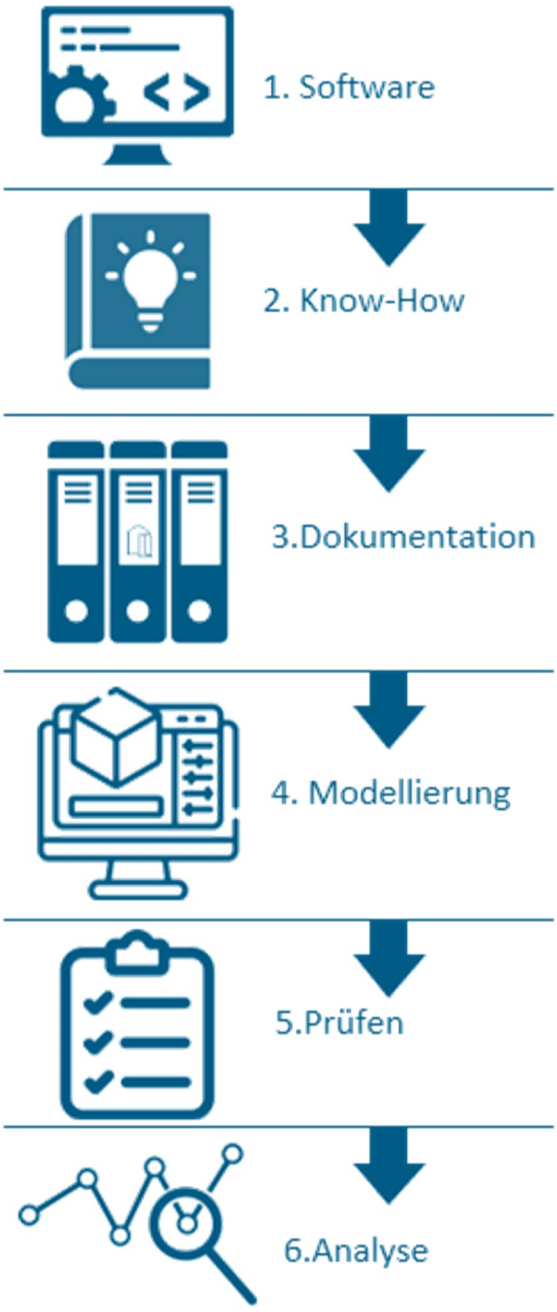


Abbildung 20: Ablauf für die Erstellung eines digitalen Zwillings

1. Software

Je nach Anwendungsbereich gibt es unterschiedliche Programme, welche gemäss den vorliegenden Anforderungen evaluiert werden müssen. Der Kundenwunsch sowie die Anforderungen an den digitalen Zwilling sind die beiden Schlüsselfaktoren für die korrekte Wahl der geeigneten Software.

2. Know-How

Für eine korrekte sowie effiziente Erstellung eines digitalen Zwillings, muss ein breites Grundwissen vorhanden sein. Dazu gehören Kenntnisse über die gewählte Software, sowie ein solides Wissen über Freiluftschaltanlagen. Ist das Wissen nicht vorhanden, müssen Schulungen und Kurse organisiert werden, damit eine solide Basis geschaffen werden kann. Bei der Modellierung des Zwillings gibt es diverse Herausforderungen, welche nur Fachpersonen von Freiluftschaltanlagen erkennen und beantworten können. Zudem sollte der digitale Zwilling funktionstüchtig, in Bezug der physikalischen Anlage, sein.

3. Dokumentation

Die Dokumentation ist einer der entscheidenden Faktoren für die Erstellung des digitalen Zwillings. Sie bezieht sich auf die Informationen welche zu einer Anlage vorhanden sind. Die Dokumentation bezieht sich auf Unterlagen zum Objekt wie Übersichtspläne, Schemas, technische Spezifikationen und Beschreibungen zu sämtlichen Fundamenten, Geräte, Stahlbauten, Gebäuden und vielem mehr.

4. Modellierung

Die Modellierung in Bezug auf den digitalen Zwilling bezieht sich auf den Prozess der Erstellung eines virtuellen Modells eines physischen Objekts. Durch die Modellierung des digitalen Zwillings können Unternehmen und Organisationen komplexe Systeme und Prozesse besser verstehen und verwalten, indem sie ein virtuelles Abbild verwenden, um Entscheidungen zu treffen, Risiken zu minimieren und Effizienzverbesserungen zu identifizieren.

5. Prüfen

Um die Qualität eines digitalen Zwillings zu gewährleisten, muss sichergestellt werden, dass die Daten zuverlässig und vollständig sind. Die Ergebnisse des digitalen Zwillings müssen überprüft werden, um sicherzustellen, dass sie mit den tatsächlichen Ergebnissen übereinstimmen.

6. Analyse

Die Analyse ist der letzte Schritt in der Erstellung des digitalen Zwillings. Hierbei geht es darum, das Modell zu analysieren. Sie beinhaltet oftmals Berechnungen und Prüfungen im Bereich des Blitzschutzes, Phasenlage oder der Kurzschlussberechnung. Mithilfe dieser kann die Funktionalität der Anlage nachgewiesen werden, sowie die Einhaltung der Normen überprüft werden.

- Sorgfältige Vorbereitung und Planung sind entscheidend, um Probleme frühzeitig zu erkennen und Massnahmen zu treffen.
- Die richtige Softwarewahl und ausreichendes Know-how sind unerlässlich, um effizient und korrekt zu modellieren.
- Dokumentation, Qualitätsprüfung und die Analyse sind wichtige Schritte zur Sicherstellung der Qualität des digitalen Zwillings und zur Gewinnung von Einblicken in die Anlage.

3.2.2 Arbeiten mit Primtech 3D

Abbildung 21: Software-Symbol

Primtech 3D ist ein leistungsstarkes CAD-System, das den gesamten Planungsprozess einer Schaltanlage unterstützt, angefangen von der Ausschreibung oder einem ersten Entwurf für ein Angebot über die Ausführungsplanung bis hin zur Abnahme der Anlage. Basierend auf AutoCAD ermöglicht diese Software die effiziente Planung, Konstruktion und Dokumentation von Freiluftschaltanlage. Die Verwendung von Primtech 3D-Werkzeugen beschleunigt den Planungsprozess erheblich, wobei die 3D-Modellierung einer Freiluftschaltanlage optimal unterstützt wird.

Primtech 3D ist eine Engineering Software zur Planung, Konstruktion und Dokumentation von Freiluftschaltanlagen.

Hochspannungsgeräte, Unterkonstruktionen, Kabelkanäle, Seile, Rohre, Klemmen bis hin zu Straßen und Zäunen werden ganz einfach aus der umfangreichen Bibliothek ausgewählt und als intelligente 3D-Objekte auf einem spannungsabhängigen Raster platziert.

(entegra, 2023)

Weitere Informationen zur Software können der Homepage entnommen werden.

Primtech 3D bei BENT

Primtech 3D ist seit sechs Jahren bei BENT im Einsatz. Im Jahr 2017 wurden drei Personen der BENT vom Softwarehersteller entegra geschult. Zwei der drei Personen waren Dominik Sieber und Fernando Xatruch, welche als erstes die Basisschulung des neuen Programms erhielten und die Software gründlich prüfen durften.
Die Software ist nun seit mehreren Jahren im Einsatz und wird von den Kunden zunehmend genutzt und angefragt.

Mittlerweile wird die Software bei BENT vielseitig eingesetzt und es wurden weitere Mitarbeiter geschult.
Primtech 3D wird für Angebote verwendet, wenn z.B. ein Neubau einer Freiluftschaltanlage oder ein Umbau angefragt wird. Hier wird für das Angebot ein erstes Modell erstellt, um dem Kunde seine zukünftige Anlage visuell zu präsentieren. Zudem können mithilfe des Modells auch technisch weniger versierte Personen, wie Leute aus dem Einkauf oder Management, sich die Anlage visuell vorstellen. Oft gewinnt man durch solche «Eyecatcher» die Aufmerksamkeit des Kunden und eine Zusammenarbeit wird wahrscheinlicher.
Der heutige Markt verlangt immer mehr, dass Modelle in 3D erarbeitet werden. Die Kunden möchten ihre Projekte in 3D bearbeiten lassen, da dies einige Vorteile mit sich bringt. Mit Primtech 3D ist es möglich, vom ersten Anlagenentwurf bis zum digitalen Zwilling der neu gebauten Anlage alles in 3D abzuwickeln.

Als Anhang ANH-006 wurde das Dokument «Anleitung mit Tipps und Tricks sowie die wichtigsten Funktionen in Primtech 3D» erstellt. Die Anleitung ist für Anwender von Primtech 3D ausgelegt, welche bereits eine Basisschulung abgeschlossen haben.

Auswertung der Anleitung

Die Anleitung wurde den Anwendern von Primtech 3D bei BENT abgegeben. Nach der Sichtung der Anleitung, haben alle eine Auswertung mithilfe eines Bewertungsbogens erstellt.

Ziel war es, ein positives Feedback von mindestens 95% der befragten Anwender zu erreichen. Es wurden verschiedene Fragen zu einzelnen Kategorien erstellt und anschliessend mit einem Mittelwert ausgewertet.

Die Fragen konnten mit fünf unterschiedlichen Stufen der Zufriedenheit beantwortet werden:

- 0% = gar nicht rot
- 25% = wenig orange
- 50% = genügend gelb
- 75% = gut hellgrün
- 100% = sehr gut grün

Die Fragen wurden in vier Bereiche unterteilt:

- Verständlichkeit
- Nützlichkeit der Tipps und Tricks
- Wichtigsten Funktionen
- Gesamteindruck

Es wurden die nachstehenden Fragen gestellt:

Verständlichkeit:

1. Wie gut war die Lesbarkeit der Anleitung?
2. Wie gut konntest du die Anleitung verstehen und ihr folgen?
3. Gab es Abschnitte, welche für dich schwer verständlich waren?
4. Waren die verwendeten Fachbegriffe klar und eindeutig?
5. Wurden komplexe Themenbereiche für dich genügend gut erklärt?
6. Waren die Hilfsmittel (Bilder, etc.) für dich klar?

Nützlichkeit der Tipps und Tricks

1. Wie nützlich empfindest du die Anleitung in Bezug auf die gewählten Tipps und Tricks?
2. Können sie in deine Arbeitsweise integriert werden?
3. Sind sie hilfreich für deine Projekte?
4. Können sie deine Effizienz bei der Nutzung steigern?
5. Sind sie in deinen Augen innovativ und hilfreich?

Wichtigste Funktionen

1. Wie nützlich empfindest du die Anleitung in Bezug auf die gewählten wichtigsten Funktionen?
2. Können sie in deine Arbeitsweise integriert werden?
3. Sind sie hilfreich für deine Projekte?
4. Können sie deine Effizienz bei der Nutzung steigern?
5. Sind sie in deinen Augen innovativ und hilfreich?

Gesamteindruck

1. Wie klar und präzise war dein Gesamteindruck?
2. Hat sie deine Erwartungen erfüllt?
3. Erfüllt sie deinen Bedarf an neuen Informationen?
4. Wie zufrieden bist du mit dem Ergebnis der Anleitung?

Es wurden nachstehende Mitarbeiter befragt:

Mitarbeiter 1 – Abteilung Anlagenbau – Elektroplaner - Anwender seit 4 Jahren
Mitarbeiter 2 – Abteilung Anlagenbau – Elektroplaner - Anwender seit 6 Jahren
Mitarbeiter 3 – Abteilung Anlagenbau – Projektleiter - Anwender seit 6 Jahren
Mitarbeiter 4 – Abteilung AMS – Projektleiter – Anwender seit 6 Jahren

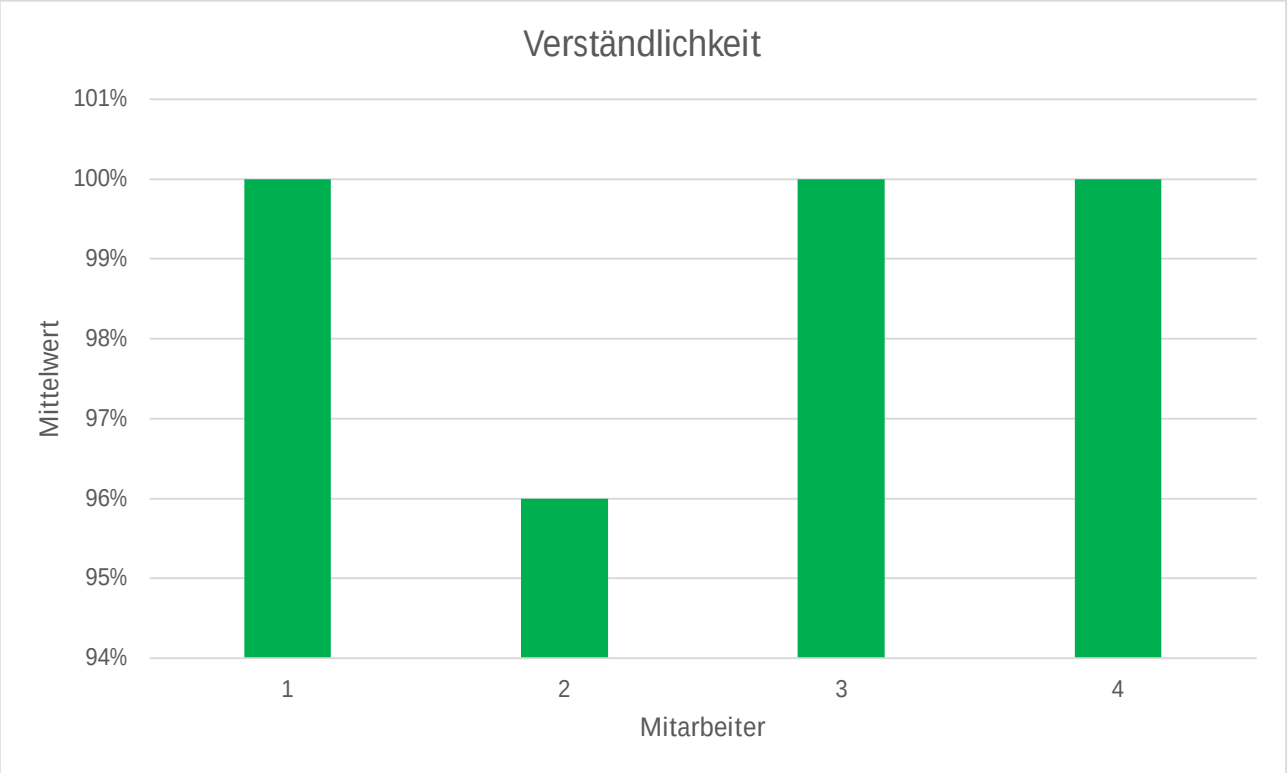


Abbildung 22: Auswertung Verständlichkeit

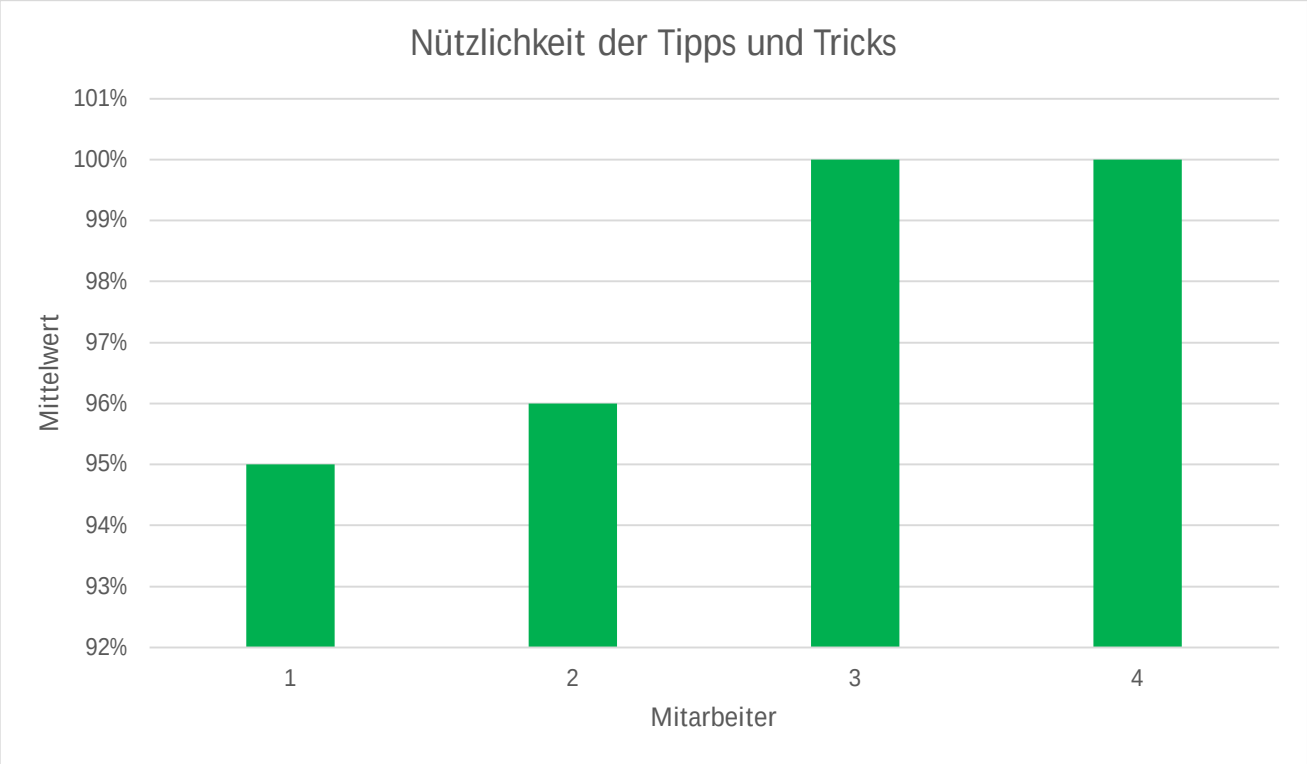


Abbildung 23: Auswertung Nützlichkeit der Tipps und Tricks

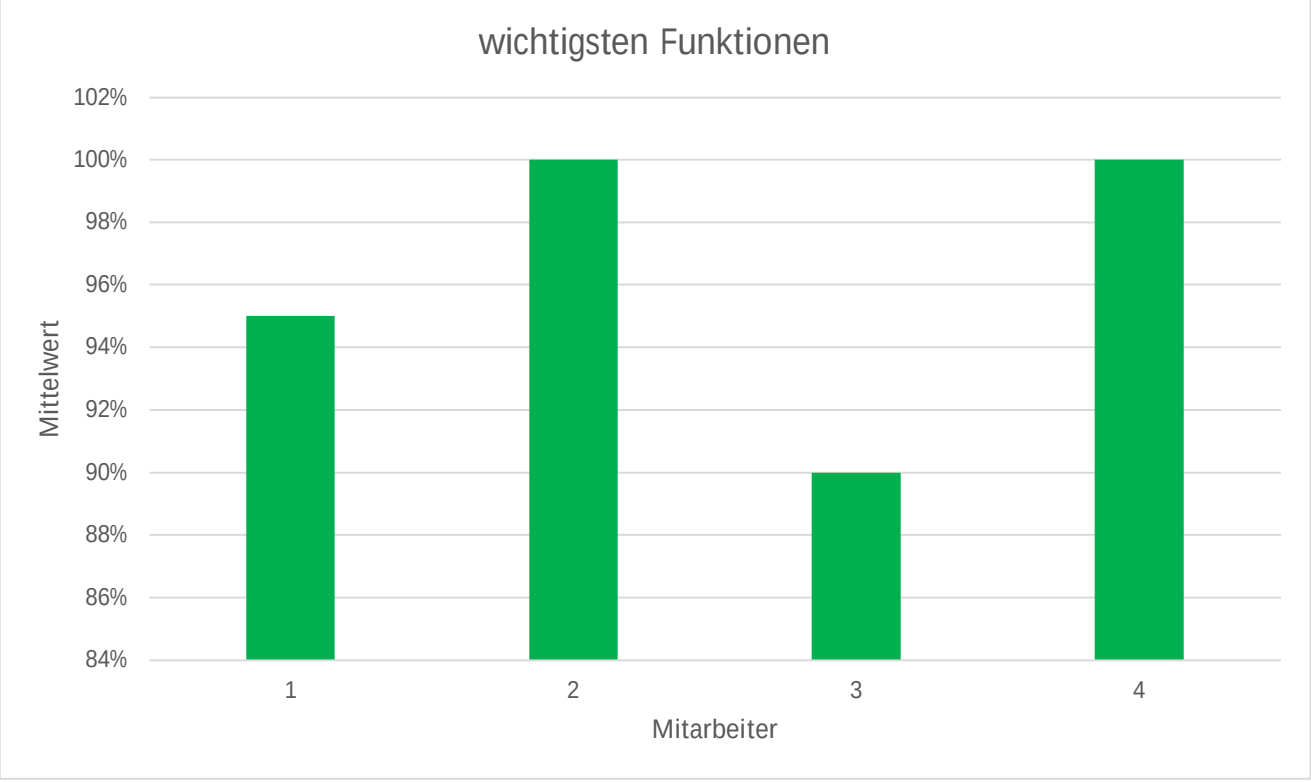


Abbildung 24: Auswertung der wichtigsten Funktionen

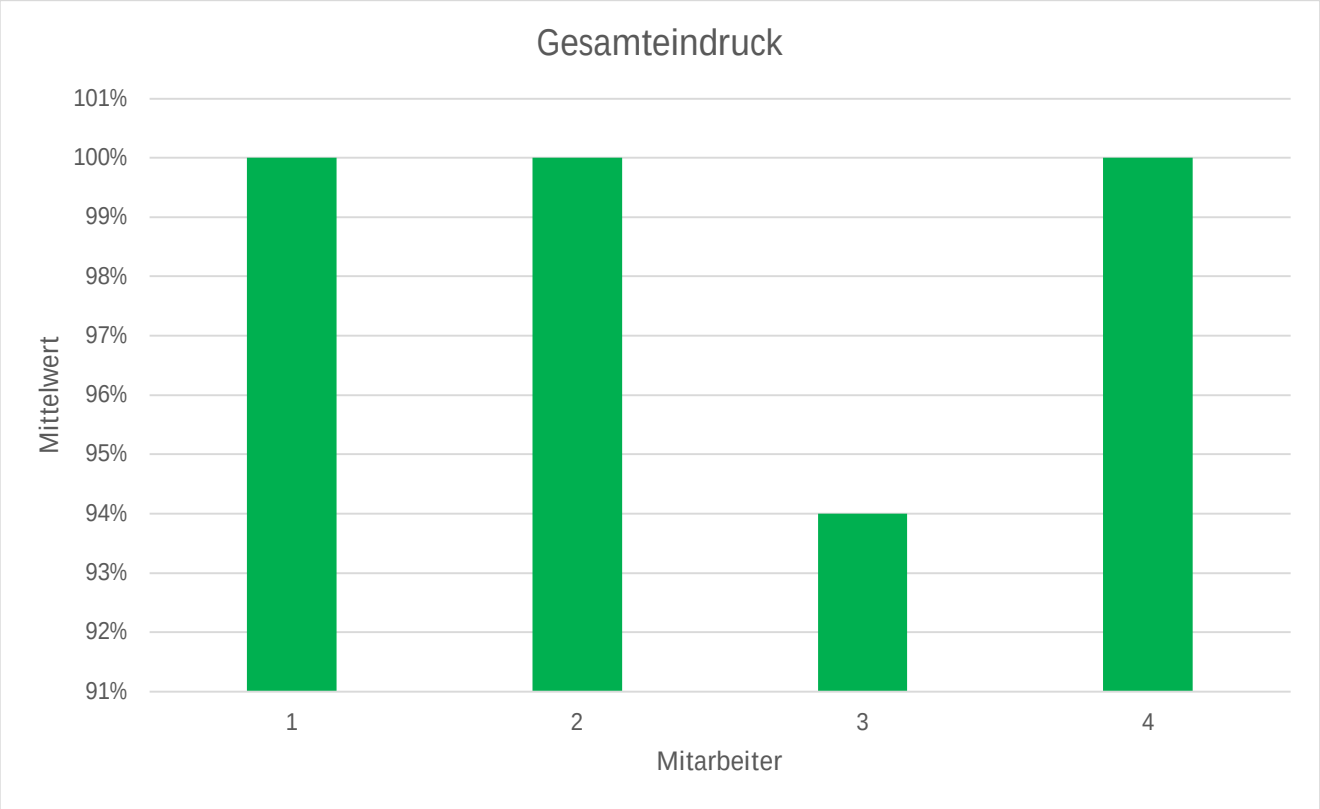


Abbildung 25: Auswertung Gesamteindruck

Die Detailauswertung der befragten Mitarbeiter zu den Fragen ist im Anhang ANH-007 abgelegt.

Kommentare zur Anleitung

Verständlichkeit:

2. Wie gut konntest du die Anleitung verstehen und ihr folgen?
   Für mein Empfinden hätte ich die Tipps und Tricks in einer besseren Reihenfolge aufgegliedert. Zum Teil werden Tipps erklärt, welche mit dem vorgängigen Tipp gar nichts zu tun haben und anschliessend kommt ein Tipp, welcher mit dem vorgängigen ähnlich oder Berührungspunkte hat. Ich hätte diese etwas zusammengenommen, welche Berührungspunkte haben.

Nützlichkeit der Tipps und Tricks:

3. Sind sie hilfreich für deine Projekte?
   Grundsätzlich schon, jedoch kannte ich einige der Tipps und Tricks, welche ich auch bereits anwende.
   Einige der Tipps verwende ich etwas anders. Jedoch ergeben sie im Grundsatz das gleiche Ergebnis.
5. Sind sie in deinen Augen innovativ und hilfreich?
   Hilfreich sicherlich. Innovativ kann ich noch nicht richtig bewerten, da ich neue Tipps noch nicht anwenden konnte.

Wichtigsten Funktionen:

1. Wie nützlich empfindest du die Anleitung in Bezug auf die gewählten wichtigsten Funktionen?
   Diese Frage ist für mich schwierig zu beantworten. Grundsätzlich ist in meiner Ansicht das meiste enthalten. Die Wichtigkeit der Funktionen ist eine Betrachtung des Anwenders.
2. Können sie in deine Arbeitsweise integriert werden?
   Ich denke schon, ausprobieren muss ich es nur noch.

Gesamteindruck:

3. Erfüllt sie deinen Bedarf an neuen Informationen?
   Ich habe neue Erkenntnisse und Informationen erhalten. Ich denke jedoch es gibt im Verlauf von weiteren Projekten sicherlich noch weitere Tipps und Tricks.

Ergebnis

Das Ziel des positiven Feedbacks von 95% wurde mit einem Mittelwert von 98% erreicht.

Die Kommentare der einzelnen Mitarbeiter können bei einer Überarbeitung der Anleitung integriert werden.

Die Anleitung ist in unserem Dokumentenverwaltungssystem Keytech abgelegt unter dem Name: BENT-000279235_A.01_Anleitung mit Tipps und Tricks sowie die wichtigsten Funktionen in Primtech 3D.

Ergebnis Fachexperte

Die Anleitung wurde ebenfalls dem Fachexperten zur Beurteilung abgegeben.

Es sollte geprüft werden, ob die wichtigsten Funktionen der Software Primtech 3D vorhanden sind. Dies wurde durch den Fachexperten überprüft und mit dem im Anhang ANH-008 beigelegten Dokument bestätigt.

- Primtech 3D ist eine leistungsstarke CAD-Software für die Planung von Freiluftschaltanlagen, die den gesamten Planungsprozess unterstützt.
- Die Software bietet effiziente Planung, Konstruktion und Dokumentation von Schaltanlagen, unterstützt die 3D-Modellierung und enthält eine erweiterbare Bibliothek.
- Mitarbeiterbewertungen der Anleitung zur Primtech 3D-Software ergaben eine hohe Zufriedenheit mit Verständlichkeit, Nützlichkeit der Tipps und Tricks, Wichtigkeit der Funktionen und Gesamteindruck. Das Ziel von positivem Feedback wurde erreicht.
- Die Anleitung wurde auch von einem Fachexperten überprüft und bestätigt, dass die wichtigsten Funktionen der Software vorhanden sind.

3.2.3 Die Freiluftschaltanlage

Informationen zum Aufbau und den Funktionen von Freiluftschaltanlagen können aus dem Kapitel «3.1.1 Einleitung» entnommen werden.

Abbildung 26: Know-How-Symbol

Freiluftschaltanlage mit Primtech 3D

Für den Aufbau einer Freiluftschaltanlage muss ein gewisses Know-How vorhanden sein. Es muss verstanden werden, wie die Anlage funktioniert und wie sie aufgebaut ist. Die Anlagen können unterschiedliche Spannungsebenen haben und dementsprechend andere Dimensionen der Geräte, Seile, Konstruktionen, etc. aufweisen. Die Geräte sehen oftmals visuell ähnlich aus, haben aber je nach Spannungseben andere Dimensionen. In Freiluftschaltanlagen gibt es viele Verbindungen und Verknüpfungen unter den einzelnen Geräten und Komponenten, wobei die Übersicht ohne geschultes Auge sehr schnell verloren geht. Demensprechend empfiehlt es sich, nur eine Anlage zu modellieren, wenn ein gewisses Grundwissen vorhanden ist.

- Freiluftschaltanlagen sind entscheidend für die Übertragung, Verteilung und Erzeugung von elektrischer Energie im Freien und haben eine wichtige Rolle bei der Aufrechterhaltung einer zuverlässigen Stromversorgung.
- Freiluftschaltanlagen werden in verschiedenen Bereichen des Energiesektors eingesetzt.
- Der Aufbau einer Freiluftschaltanlage erfordert ein grundlegendes Verständnis der Komponenten, Felder und Sammelschienen, die für den sicheren Betrieb und die Überwachung des Stromflusses verantwortlich sind.
- Für die Modellierung einer Freiluftschaltanlage mit Primtech 3D, muss ein gewisses Grundwissen erforderlich sein, da die Anlagen unterschiedliche Spannungsebenen und Dimensionen der Geräte aufweisen, die sorgfältig berücksichtigt werden müssen.

3.2.4 Prüfung der Punktwolke

Die "Prüfung der Punktwolke" bezieht sich auf den Prozess der Bewertung und Beurteilung.

Abbildung 27: Dokumentation-Symbol

Prüfungsablauf

In unserer Arbeit bezieht sich die Prüfung der Punktwolke auf die Freiluftschaltanlage «Bravo». In der Projektrealisierung des Teils «Laserscanning» wurde ausschliesslich mit dem NavVis VLX eine komplette Punktwolke erstellt. Diese wurde zur 3D-Modellierung herangezogen. Um die Vollständigkeit sowie Genauigkeit der Punktwolke zu prüfen und gewährleisten, wir diese anhand einer Checkliste durchgeführt. Einerseits wird auf die Vollständigkeit und andererseits auf die Genauigkeit der Punktwolke eingegangen.

Die Punktwolke benötigt ein Prüfungsergebnis von mindestens >=90% anhand der zu prüfenden Punkte in der Checkliste. Diese wurden so ausgewählt, dass die Modellierung mithilfe der Punktwolke möglichst genau erfolgen kann.

Die Prüfung der Punktwolke wird nie durch den Ersteller der Punktwolke vorgenommen. Der Prüfer ist immer eine andere Person. Hier wird der Ansatz des vier-Augen-Prinzips angewendet.

Wird kein Ergebnis von mindestens >=90% erreicht, so wird die Punktwolke abgelehnt und es erfolgt eine Ausbesserung.

Nach erneuter Zustellung der Punktwolke, wird das komplette Verfahren nochmals durchgeführt. Wichtig hierbei ist, dass nicht nur die Punkte überprüft werden, welche nicht erfüllt wurden, sondern sämtliche Punkte erneut geprüft werden. Bei der Bearbeitung oder Ausbesserung der Punktwolke, können sich neue Fehler einschleichen, welche so gefunden werden können.

Erfüllt die Punktwolke die 90%-Anforderung, so wird die Checkliste an den Ersteller der Punktwolke zugesandt und archiviert. Dies dient als schriftliche Abnahme der Punktwolke.

Prüfung

Wie bereits im vorigen Kapitel genannt, wird die Prüfung der Punktwolke anhand einer Checkliste absolviert. Die Checkliste enthält die wichtigsten Punkte für die vollständige Erstellung des digitalen Zwillings. Je nach Anforderungen an den digitalen Zwilling, kann diese jedoch variieren.

Ergebnis

Die Punktwolke wurde mithilfe der Checkliste geprüft und ausgewertet mit einer Vollständigkeit von 98.8%. Dies entspricht dem geforderten Wert von >=90% und wird somit zugelassen.
Wichtig dabei zu beachten ist, dass die Punkte eine Indikation ist. Die Entscheidung der Vollständigkeit liegt schlussendlich beim Modellierer, ob er mit der Punktwolke arbeiten kann.

Checkliste - Prüfung Punktwolke

Allgemeine Informationen

Anlage	Anlagentyp	Ersteller Punktwolke	Prüfer Punktwolke*
Bravo	Freiluftanlage	Xatruch Fernando	Sieber Dominik

Checkpunkte

*Bemerkung: Prüfer darf nicht der Ersteller sein (4-Augen-Prinzip)!

Nr.	Thema	Geprüft?	Korrekt?	Bemerkung
01	Datei lässt sich öffnen	Ja	100%	in primtech3d
02	Datei lässt sich importieren	Ja	100%	in Primtech3d
03	Datei ist vollständig	Ja	100%	keine offensichtlichen Lücken, Objekte innerhalb des Anlagenzauns sind aufgenommen
04	Punktwolkedichte in Ordnung	Ja	100%	
05	keine Schattierungen	Ja	95%	unvollständige Objekte oder schwarze
06	keine Doppelbildungen	Ja	100%	Objekte unscharf oder doppelt
07	Fundamente erkennbar	Ja	100%	
08	Stahlunterkonstruktionen erkennbar	Ja	100%	
09	Portale erkennbar	Ja	100%	
10	Geräte erkennbar	Ja	100%	
11	Geräte identifizierbar	Ja	100%	Gerätetyp
12	Seilverbindungen erkennbar	Ja	100%	
13	Rohrverbindungen erkennbar	Ja	100%	
14	Ketten erkennbar	Ja	100%	
15	Abstandshalter erkennbar	Ja	100%	
16	Blitzschutz erkennbar	Ja	75%	
17	Gebäude erkennbar	Ja	100%	
18	Beleuchtung erkennbar	Ja	100%	
19	Strassen erkennbar	Ja	100%	
20	Kabelkanäle erkennbar	Ja	100%	
21	Zaun erkennbar	Ja	60%	
22	sonstige Einrichtungen identifizierbar	Ja	100%	

Nr.	Kommentar / Auffälligkeiten	Korrektur notwendig?
05	zum Teil kleinere Schattierungen / Doppelbildungen an den Stahlunterkonstruktionen	Nein, da sämtliche Objekte gut erkennbar sind und die Doppelbildungen für die Modellierung kein Problem sind.
16	Blitzschutzseile, welche in die Anlage kommen sind nicht alle vorhanden.	Nein, da die Blitzschutzseile ein System haben, und daher die Modellierung an dieses angelehnt modelliert werden kann.
21	Zaun ist nicht vollständig gescannt.	Nein, da der Zaun keinen grossen Einfluss auf die Funktionalität der Freiluftschaltanlage enthält.

Ergebnis	Ja	96.8%	>=90% - Punktwolke OK

Datum: 27.09.2023

Prüfer: Dominik Sieber

Abbildung 28: Ergebnis und Freigabe anhand der Prüfung der Punktwolke

- Die Punktwolkenprüfung stellt sicher, dass dreidimensionale Punktdaten vollständig und präzise sind. Sie erfordert mindestens >=90% Erfüllung der Checkliste durch eine unabhängige Person gemäss dem vier-Augen-Prinzip. Bei Nichterfüllung erfolgt eine Überarbeitung und erneute Prüfung.

3.2.5 Modellierung digitaler Zwilling

Anforderungen an den digitalen Zwilling

Abbildung 29: Modellierung-Symbol

Der digitale Zwilling muss ein Abbild der physikalischen Anlage darstellen.

Das Ziel des digitalen Zwillings ist es, einen möglichst realitätsnahen Bezug zur Punktwolke herzustellen.

Die zulässigen Toleranzen zwischen dem 3D-Modell und der Punktwolke wurden wie folgt definiert:

Thema	Toleranz
Symbol Fundamente	± 20mm
Symbol Unterkonstruktion	± 20mm
Symbol elektrische Einrichtungen	± 20mm
Assemblies	± 20mm
Leiterseile	± 20mm
Rohrleiter	± 20mm
Ketten	± 20mm
Gebäude	± 50mm
Strassen	± 50mm
Kabelkanäle	± 50mm
Steuerschränke	± 50mm

Tabelle 19: zulässige Toleranzen zwischen der Punktwolke und dem 3D-Modell

Objekte, welche keine Funktionalität zur Anlage enthalten, werden nicht modelliert. Dementsprechend werden nachstehende Objekte nicht modelliert (Auflistung nicht abschliessend):

- Gebäude ohne Einfluss auf die Anlage (steht ausserhalb der Anlage oder hat keine Funktion zur Anlage wie ein Lager oder ähnliches).
- Reservekomponenten auf dem Gelände
- Objekte welche sich ausserhalb des Anlagenzauns befinden

Administrative Vorbereitung

Bevor die Modellierungsvorbereitung und das Anlegen des Projektes in Primtech 3D erfolgt, muss nachstehender Punkt kontrolliert werden:

- Prüfprotokoll Punktwolke vorhanden und genehmigt

Sofern dieser Schritt gemacht wurde, kann mit der Vorbereitung für die Modellierung des digitalen Zwillings begonnen werden.

Modellierungsvorbereitung

Die Modellierungsvorbereitung umfasst mehrere Schritte, um genau und effizient die Freiluftschaltanlage zu modellieren.

Für diese Vorbereitung halten wir uns an folgendes Schema:

1. Anlagenübersicht

Im ersten Schritt soll die Punktwolke der Anlage geöffnet und visuell geprüft werden. Hierbei geht es noch nicht darum, die gesamte Anlage zu verstehen, sondern sich einen ersten Überblick zu verschaffen. Oftmals treten hier auch schon die ersten Fragen und Erkenntnisse auf. Diese sollen jedoch noch nicht geklärt werden, da sich diese im Verlauf der Vorbereitung klären werden. Jedoch dürfen sich bereits erste Notizen oder Schwierigkeiten notiert werden, welche bei der Modellierung zu beachten sind.

Bemerkung:
Wenn die Prüfung der Punktwolke durch den Modellierer erfolgt ist, kann dieser Schritt vernachlässigt werden.

Abbildung 30: Ablauf für die Übersichtsbeschaffung der Anlage

2. Anlagenfunktion

Nach der ersten Sichtung soll die Anlage etwas genauer unter die Lupe genommen werden. Im Grundsatz funktioniert eine Freiluftschaltanlage immer gleich. Jedoch ist jede einzigartig und unterschiedlich. Deshalb soll hier die Funktion der Anlage gesichtet werden.

Hierbei wird ebenfalls überprüft, was zur Anlage gehört und was nicht. Sehr oft sind irgendwelche Reservematerialien auf dem Gelände gelagert, welche nicht zur Funktionalität der Anlage gehören und somit nicht modelliert werden müssen.

3. Anlagenidentifizierung

In diesem Abschnitt soll der Einstieg in die Technik der Anlage gelingen. Die Anlage soll übergeordnet eingeteilt werden. Was gibt es für Schaltfelder? Sind es einfache Leitungsfelder welche nur eine Hochspannungsleitung durch die Anlage schlauft oder geht es um ein Transformatorfeld, welches die eingehende Spannung auf ein anderes Niveau transformiert? Mit dieser Einteilung können ebenfalls sogenannte Typicals erkannt werden. Von Typicals spricht man vor allem bei Anlagenfelder wie einem Leitungsfeld. In einer Anlage ist es möglich, dass Leitungsfelder immer gleich aufgebaut sind. Dementsprechend spricht man dann vom Typical «Leitungsfeld», welches auch bei der Modellierung nur einmal modelliert werden muss und anschliessend kopiert und wiederverwendet werden kann.

4. Komponentenidentifizierung

Da nun die Anlageneinteilung erfolgt ist, kann genauer ins Detail gegangen werden. Die Komponentenidentifizierung ist der aufwendigste Schritt in der ganzen Vorbereitung. Nachdem die Anlage in verschiedene Anlagenfelder aufgeteilt wurde, kann hier eine Auflistung der einzelnen Komponenten erfolgen. Hierbei geht es darum die Komponenten zu identifizieren. Damit die Modellierung effizient erfolgen kann, empfiehlt es sich hierbei die Komponenten aufzulisten und zu beschriften.

5. Seil-/Rohridentifizierung

Bei der Seil-/Rohridentifizierung oder auch Verbindungsidentifizierung sollen die Verbindungen angeschaut werden. Dies erfolgt grundsätzlich schon einmal oberflächlich in der Anlagenfunktion, jedoch noch nicht im Detail. Hier soll grob angeschaut werden, wie die Anlage und die Komponenten untereinander verbunden sind und welche Verbindungstypen es gibt.

6. Nebenanlagenidentifizierung

In jeder Anlage gibt es auch sogenannte Nebenanlagen. Unter den Nebenanlagen werden oft Gebäude gemeint. Für die Steuerung und Überwachung der Anlage werden sogenannte Relaishäuser eingesetzt. Diese werden meistens direkt in die Anlage gebaut und müssen ebenfalls aufgenommen werden. Zudem gibt es weitere Komponenten wie die Beleuchtung, welche ebenfalls einen indirekten Bezug zur Anlage haben. Zusätzlich gehören auch hier Kabelkanäle oder ähnliches dazu.

7. Umgebungsidentifizierung

Zum Schluss soll nochmals die Umgebung geprüft werden. Hier gehört beispielsweise der Zaun oder die Strassen dazu. Je nach Anforderung gibt es zum Teil auch Versickerungsgruben welche ersichtlich sind. Hier wird nochmals überprüft, welche Objekte nicht zur Funktionalität der Anlage dienen und somit vernachlässigt werden können.

Im folgenden Abschnitt werden die sieben Prüfpunkte auf die Punktwolke der Freiluftschaltanlage «Bravo» angewendet.

Anlagenübersicht verschaffen

Die Verschaffung einer Anlagenübersicht kann in diesem Projekt vernachlässigt werden, da der Modellierer der Anlage die Prüfung der Punktwolke durchgeführt hat. Durch die Prüfung der Punktwolke konnte bereits eine Übersicht der Anlage verschafft werden.

Abbildung 31: Anlagenübersicht-Symbol

Anlagenfunktion

Die Freiluftschaltanlage wird von zwei unabhängigen 380-kV-Freileitungen gespeist, die elektrische Energie von entfernten Erzeugungsquellen oder anderen Hochspannungsanlagen transportieren. Diese Freileitungen tragen die Energie und leiten sie in die Freiluftschaltanlage ein.

Abbildung 32: Anlagenfunktion-Symbol

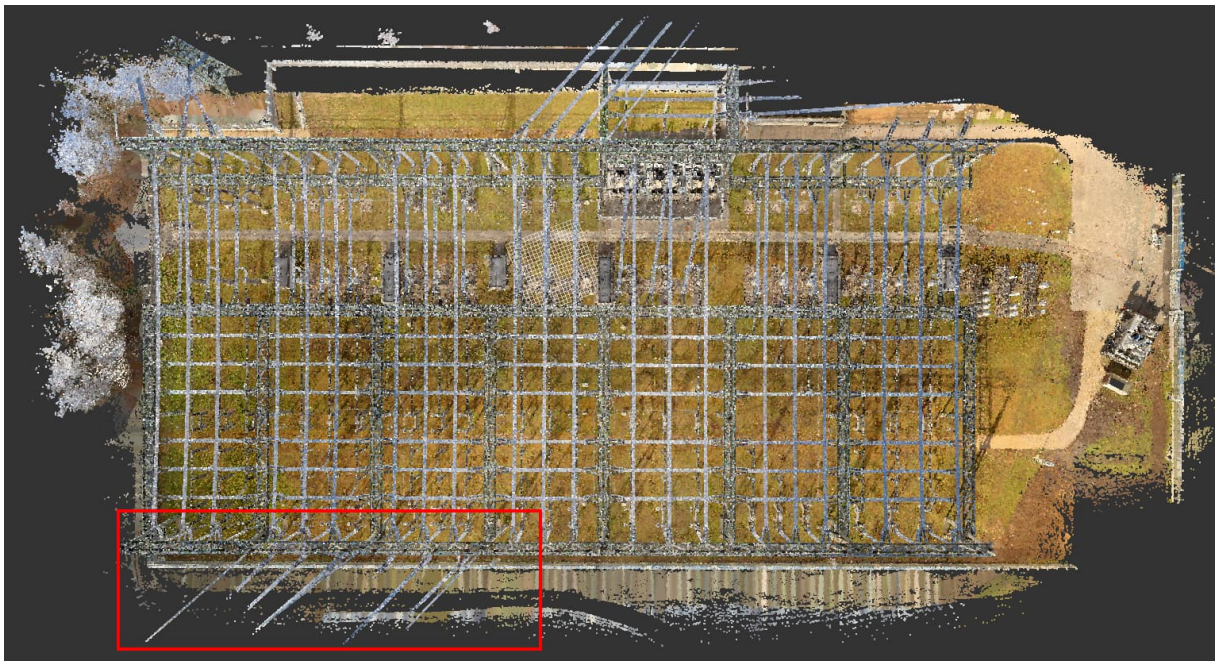


Abbildung 33: Grundriss Punktwolke - Analyse Freileitungen unten

In der Freiluftschaltanlage befindet sich ein Transformator (3-polig), welcher in der Lage ist, die Energie auf eine niedrigere Spannung zu transformieren. Dieser Schritt ist entscheidend, da die Energie auf eine Ebene heruntertransformiert wird, die für die Verteilung in städtische und industrielle Bereiche geeignet ist. Der Transformator ist dafür ausgelegt, die Spannung auf das erforderliche Niveau zu bringen, während die Leistung der Energie erhalten bleibt. Nach der Spannungstransformation wird die Energie aus der Freiluftschaltanlage herausgeführt. Diese Freileitungen sind mit dem übergeordneten Stromnetz verbunden und tragen die heruntertransformierte Energie zu Verbrauchszentren und Industriegebieten in der Region. Die Verteilung erfolgt in Abhängigkeit von den jeweiligen Netzbelastungen und Anforderungen.

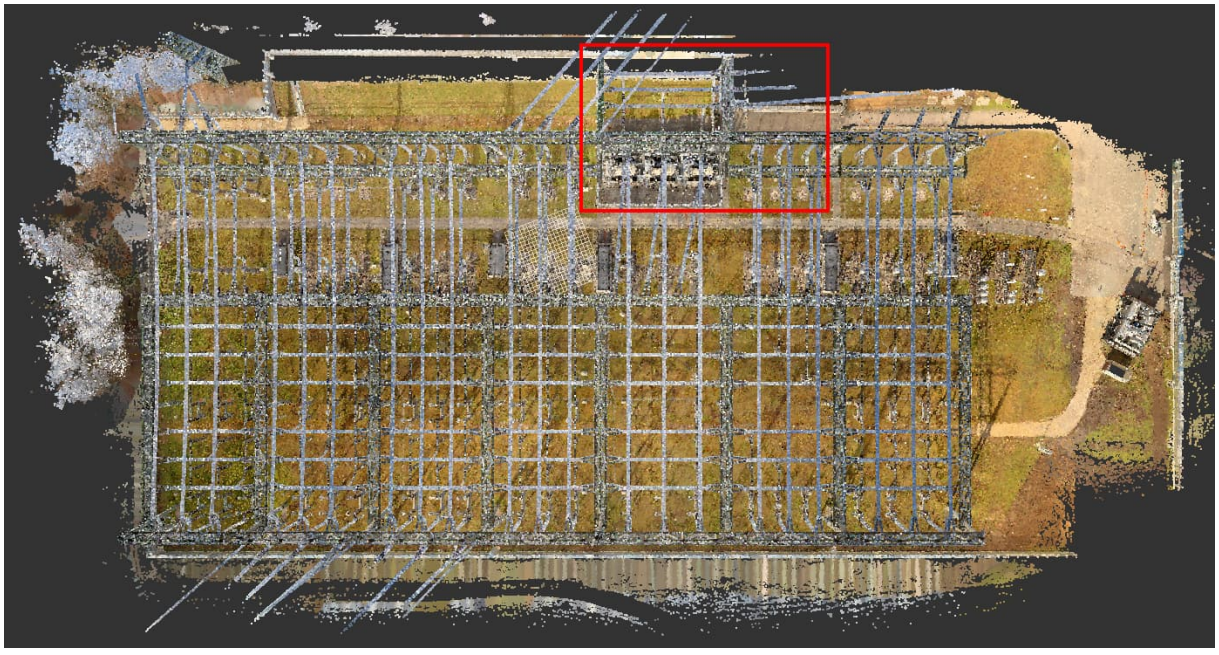


Abbildung 34: Grundriss Punktwolke - Analyse Transformatoren

Die Energie in der Freiluftschaltanlage wird über drei separate Freileitungen wieder aus der Anlage herausgeführt. Jede dieser Freileitungen stellt eine unabhängige Route dar, über die die Energie zu verschiedenen Zielpunkten transportiert wird. Diese Leitungen sind strategisch platziert, um verschiedene Regionen zu bedienen und eine ausgewogene Verteilung der Energie sicherzustellen.

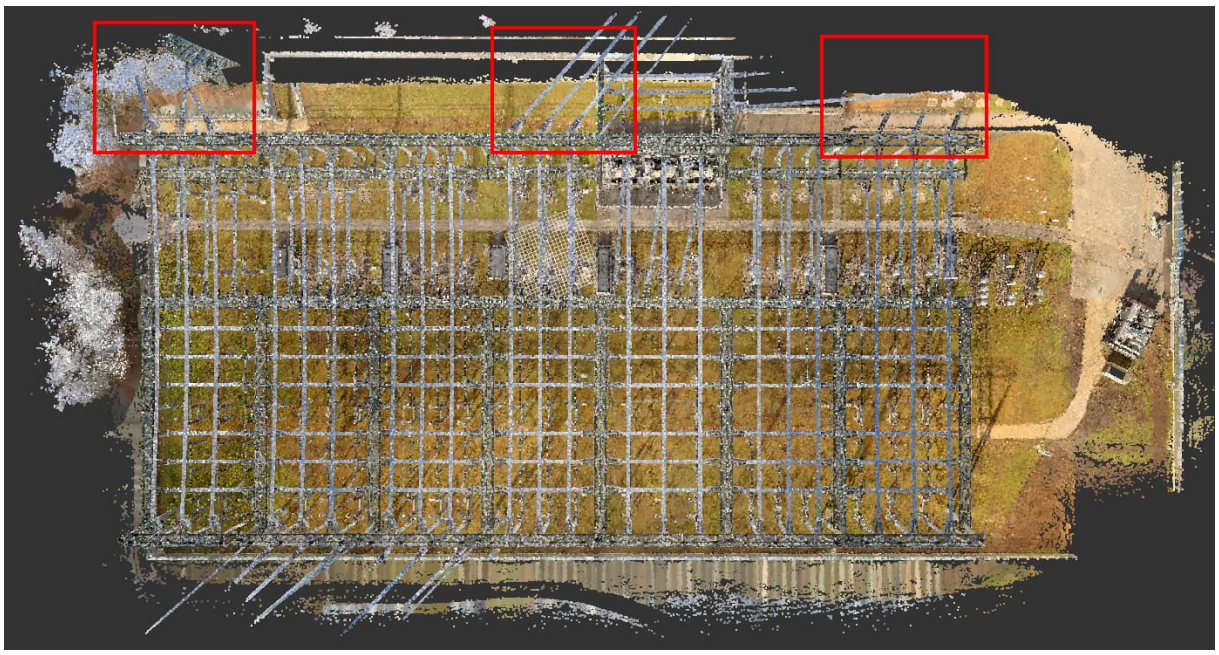


Abbildung 35: Grundriss Punktwolke - Analyse Freileitungen oben

Anlagenidentifizierung

Wie bereits bei der Anlagenfunktion sichtbar wurde, werden zwei Freileitungen in die Freiluftschaltanlage und drei aus der Anlage geführt. Dementsprechend enthält die Anlage fünf Leitungsfelder. Am oberen Rand der Anlage, ziemlich zentral, wird sichtbar, dass die Anlage mit einem Transformator ausgerüstet ist. In diesem Fall wird dies als Transformatorfeld angesehen. Das letzte in der Anlage fehlende Feld ist das Kuppelfeld.

Abbildung 36: Anlagenidentifizierung-Symbol

Nr.	Feldtyp	Feldname
01	Leitungsfeld	Leitung 1
02	Leitungsfeld	Leitung 2
03	Leitungsfeld	Leitung 3
04	Leitungsfeld	Leitung 4
05	Transformatorfeld	Transformator 1
06	Kuppelfeld	Kupplung 1
07	Leitungsfeld	Leitung 5

Tabelle 20: Bezeichnung Anlagenfelder

Die Sammelschiene mit der Umgehungsschiene erstreckt sich über die gesamte Anlage und ist mit allen Feldern verbunden.

Die Umgehungsschiene hat die Aufgabe, den Stromfluss von einer Sammelschiene zu einer anderen zu ermöglichen oder zu umgehen, um beispielsweise Wartungsarbeiten oder Reparaturen durchzuführen, ohne den gesamten Schaltanlagenbetrieb zu unterbrechen.

Die Funktion der einzelnen Felder können dem Kapitel «3.1.1 Einleitung» entnommen werden.

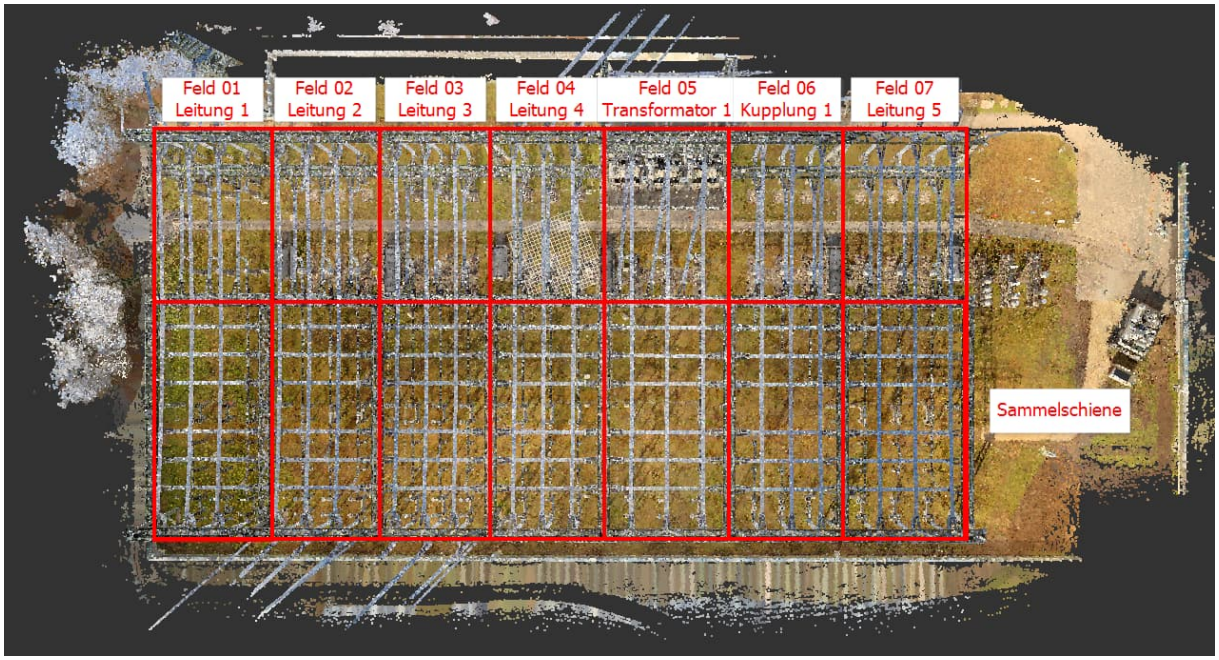


Abbildung 37: Definition Feldnamen

Um die einzelnen Komponenten der Felder zu identifizieren, wird die Punktwolke so zugeschnitten, dass nur das zu untersuchende Feld sichtbar ist. So kann das Feld effizient gedreht und die Komponenten erkannt werden.

Abbildung 38: Komponentenidentifizierung-Symbol

Abbildung 39: Beispielausschnitt für die Komponentenidentifizierung

Feldkomponenten

Im Anhang ANH-009 ist eine erstelle Liste, welche bei der Komponentenidentifizierung erstellt wurde. Die Auflistung der Komponenten betrifft die nachstehenden Felder:

- Feld 01 - Leitung 1
- Feld 02 - Leitung 2
- Feld 03 - Leitung 3
- Feld 04 - Leitung 4
- Feld 05 - Transformator 1
- Feld 06 - Kupplung 1
- Feld 07 - Leitung 5

Nachstehend werden die Felder kurz beschrieben, da einzelne Felder identisch oder ähnlich sind.

Feld 01 – Leitung 1

Das Feld 01 ist das Feld ganz links.
Es ist ein Leitungsfeld, da eine Freiluftleitung von der Anlage weggeführt wird.

Feld 02 – Leitung 2

Das Feld 02 ist das Feld rechts vom Feld 01.
Es ist ein Leitungsfeld, da eine Freiluftleitung in die Anlage geführt wird.
Bezogen auf die Komponenten ist es fast identisch zum Feld 01. Die Komponenten sind vom Typ und dem Bau nicht immer identisch, jedoch wird hier nur die Auflistung der Komponenten und nicht die Bauart aufgelistet.

Der einzige Unterschied, bezogen auf die Komponenten ist der Wegfall der Spannungswandler und die Verschiebung der Ketten von der Freileitung auf die linke Seite. Dementsprechend entfallen die Spannungswandler und die Ketten werden auf der anderen Seite verwendet.

Nr.	Komponente
~~42~~	~~Spannungswandler~~
~~43~~	~~Spannungswandler~~
~~44~~	~~Spannungswandler~~

Tabelle 21: Feld 02 - Leitung 2 - entfallene Komponenten

Feld 03 – Leitung 3

Das Feld 03 ist das Feld rechts vom Feld 02.
Es ist ein Leitungsfeld, da eine Freiluftleitung in die Anlage geführt wird.
Bezogen auf die Komponenten ist es fast identisch zum Feld 02. Die Komponenten sind vom Typ und dem Bau nicht immer identisch, jedoch wird hier nur die Auflistung der Komponenten und nicht die Bauart aufgelistet.

Der einzige Unterschied, bezogen auf die Komponenten, ist die Ergänzung der Spannungswandler, welche sich ebenfalls im Feld 01 befinden.

Nr.	Komponente
-	Spannungswandler
-	Spannungswandler
-	Spannungswandler

Tabelle 22: Feld 03 - Leitung 3 -ergänzende Komponenten

Feld 04 – Leitung 4

Das Feld 04 ist das Feld rechts vom Feld 03.
Es ist ein Leitungsfeld, da eine Freiluftleitung von der Anlage weggeführt wird.
Bezogen auf die Komponenten ist es identisch zum Feld 01. Die Komponenten sind vom Typ und dem Bau nicht immer identisch, jedoch wird hier nur die Auflistung der Komponenten und nicht die Bauart aufgelistet.

Feld 05 – Transformator 1

Das Feld 05 ist das Feld rechts vom Feld 04.
Es ist ein Transformatorfeld, da dies mit einem Transformator ausgerüstet ist.
Das Feld ist zum Teil identisch mit den anderen Felder, weicht aber im Bereich vom Transformator komplett ab.

Feld 06 – Kupplung 1

Das Feld 06 ist das Feld rechts vom Feld 05.
Es ist ein Kupplungsfeld, da es die verschiedenen Stromkreise zusammenführt oder trennt.
Das Feld ist zum Teil identisch mit den anderen Felder, weicht aber in gewissen Bereichen komplett ab.

Feld 07 – Leitung 5

Das Feld 07 ist das Feld rechts vom Feld 06.
Es ist ein Leitungsfeld da eine Freiluftleitung von der Anlage weggeführt wird.
Bezogen auf die Komponenten ist es fast identisch zum Feld 01. Die Komponenten sind vom Typ und dem Bau nicht immer identisch, jedoch wird hier nur die Auflistung der Komponenten und nicht die Bauart aufgelistet.

Es gibt zwei kleine Unterschiede bezogen auf die Komponenten. Einer der beiden ist der Wegfall der Spannungswandler.

Nr.	Komponente
~~42~~	~~Spannungswandler~~
~~43~~	~~Spannungswandler~~
~~44~~	~~Spannungswandler~~

Tabelle 23: Feld 07 - Leitung 5 - entfallene Komponenten

Der andere Unterschied ist im rechten Bereich bei den Stützer.

~~52~~	~~Stützer~~
53	Stützer
~~54~~	~~Stützer~~

Tabelle 24: Feld 07 - Leitung 5 - entfallene und ergänzende Komponenten

Hier gibt es nicht drei Stützer, sondern nur einer. Die mittlere Phase enthält einen normalen Stützer wie bisher. Die beiden äusseren Phasen enthalten eine V-Kette.

-	V-Kette
-	Stützer
-	V-Kette

Tabelle 25: Feld 07 - Leitung 5 - angepasste Komponenten

Sammelschiene

Die Sammelschiene wird als Ganzes und einheitliches Konstrukt angesehen und deshalb als eine Einheit aufgenommen und modelliert. Diese wird als Assemblie zusammengebaut mithilfe der einzelnen Symbole. Das Assemblie ist eine Zusammenstellung einer Komponente aus einzelnen Symbolen.

Einpolschema

Durch die Erkennung der Komponenten, kann nun ein sogenanntes Einpolschema erstellt werden, welches die Übersicht über die Anlage gibt. Diese hilft bei der Modellierung die Übersicht zu behalten, um nicht mühsam durch die Listen scrollen zu müssen

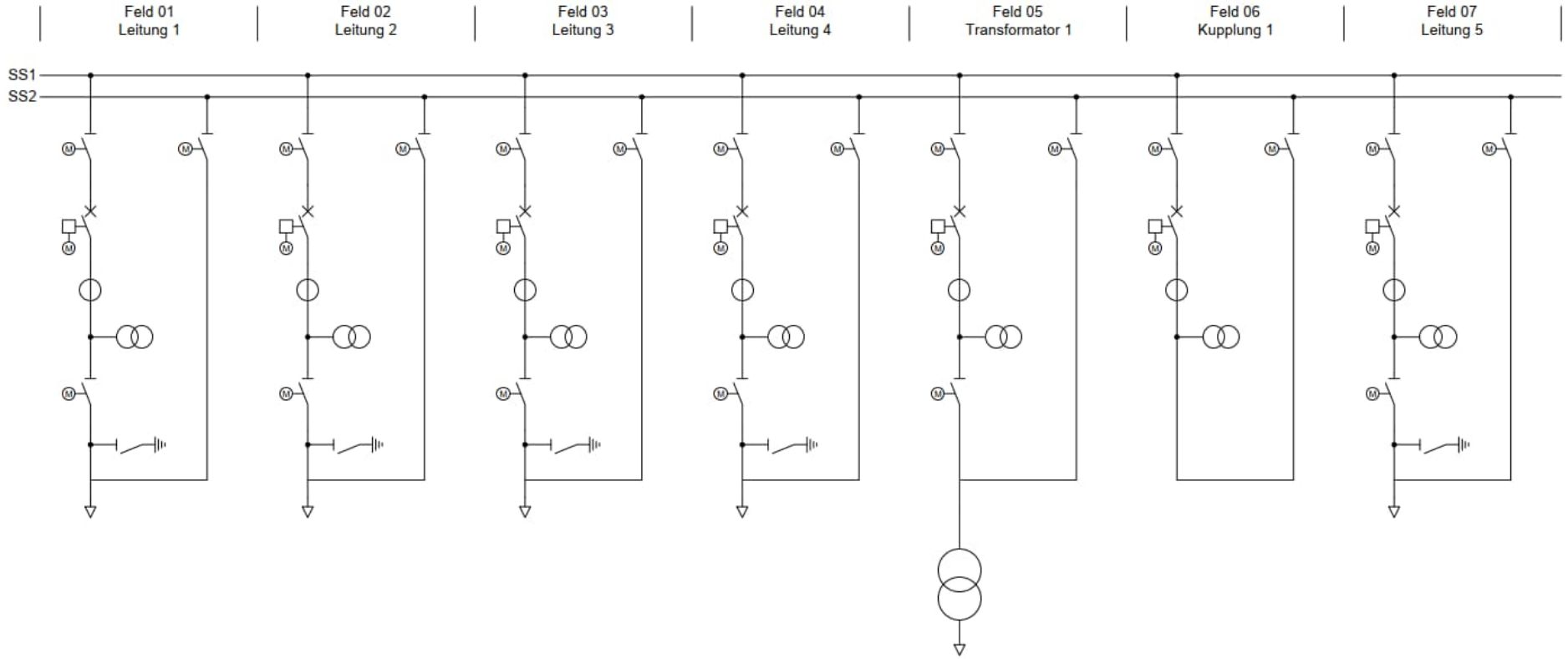


Abbildung 40: Einpolschema nach der Komponentenidentifizierung

Trennschalter	Leistungs-schalter	Stromwandler	Spannungs-wandler	Trennschalter mit Erder	Freileitung	Transformator

Tabelle 26: Legende Symbole zum Einpolschema

Seil-/Rohridentifizierung

Die gesamte Anlage wurde mit Seilverbindungen erschlossen und enthält keine Rohrverbindungen. Bei der Identifizierung der Verbindungen werden diese in verschiedene Gruppen eingeteilt. Bei der Verseilung handelt es sich prinzipiell um folgende Gruppierungen:

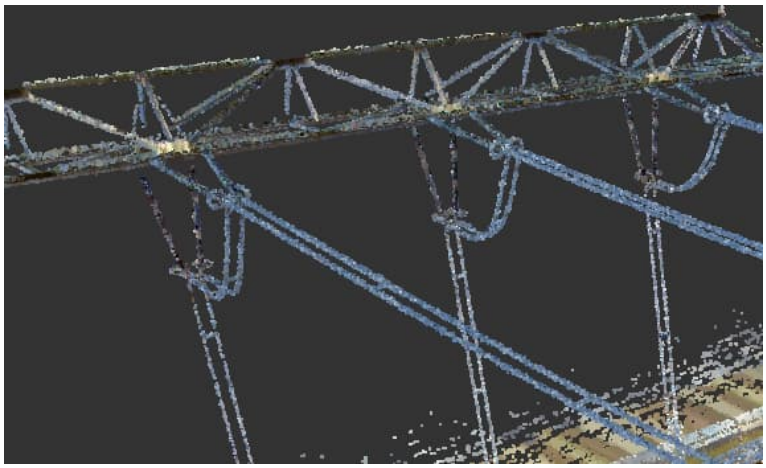
Abbildung 41: Seil-/Rohridentifizierung-Symbol

- Feldverseilung – Verseilung der Komponenten
- Sammelschienenverseilung – Verseilung der Sammelschiene
- Portalverseilung – Verseilung von Portal zu Portal auf die Komponenten

Die Verseilung in der Freiluftschaltanlage wurde gemäss nachstehender Auflistung identifiziert:

Feldverseilung
- 1fach Seil

Portalverseilung
- 2fach Seil



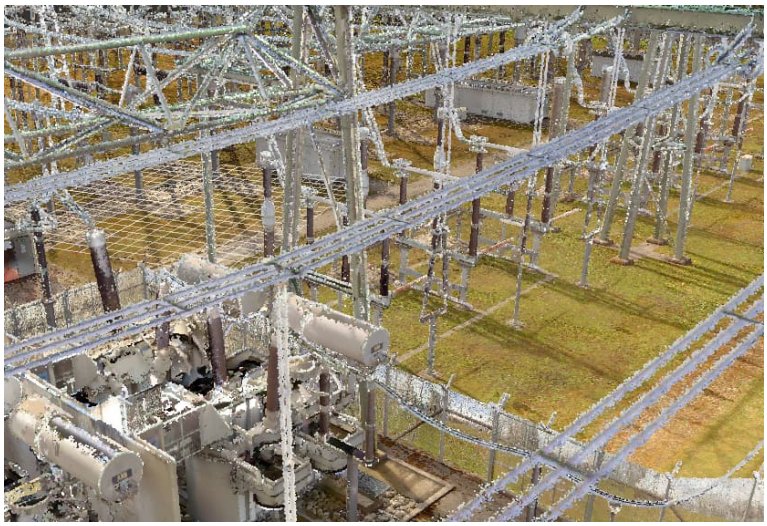
Portalverseilung (Trafo) - 3fach Seil	
Sammelschienen-verseilung - 4fach Seil	

Tabelle 27: Übersicht Seil-/Rohridentifizierung

6. Nebenanlagenidentifizierung

Abbildung 42: Nebenanlagenidentifizierung-Symbol

Wie in der Punktwolke sichtbar ist, wird die Steuerung, der Schutz, sowie die Überwachung der Anlage zentral in sogenannten Relaishäuser geregelt. Oftmals wird in Anlagen ein Betriebsgebäude realisiert, um diese Punkte zentral zu sammeln. In diesem Fall wurden Relaishäuser für die einzelnen Felder erstellt, wobei der Schutz, die Steuerung, etc. direkt im Feld stattfindet. Die Anlage enthält physikalisch vor Ort vier Relaishäuser. Hier wurden jedoch sechs identifiziert, da das Relaishaus vier als Lagerraum genutzt wird. Im Relaishaus sechs befindet sich heute ein Notstromdiesel. Die Bezeichnung Relaishaus wurde jedoch so übernommen, da diese auch vor Ort so beschriftet wurden. Das heisst, dass jeweils zwei Anlagenfelder mit einem Relaishaus ausgestattet sind. Diese werden als Nebenanlagen benannt.

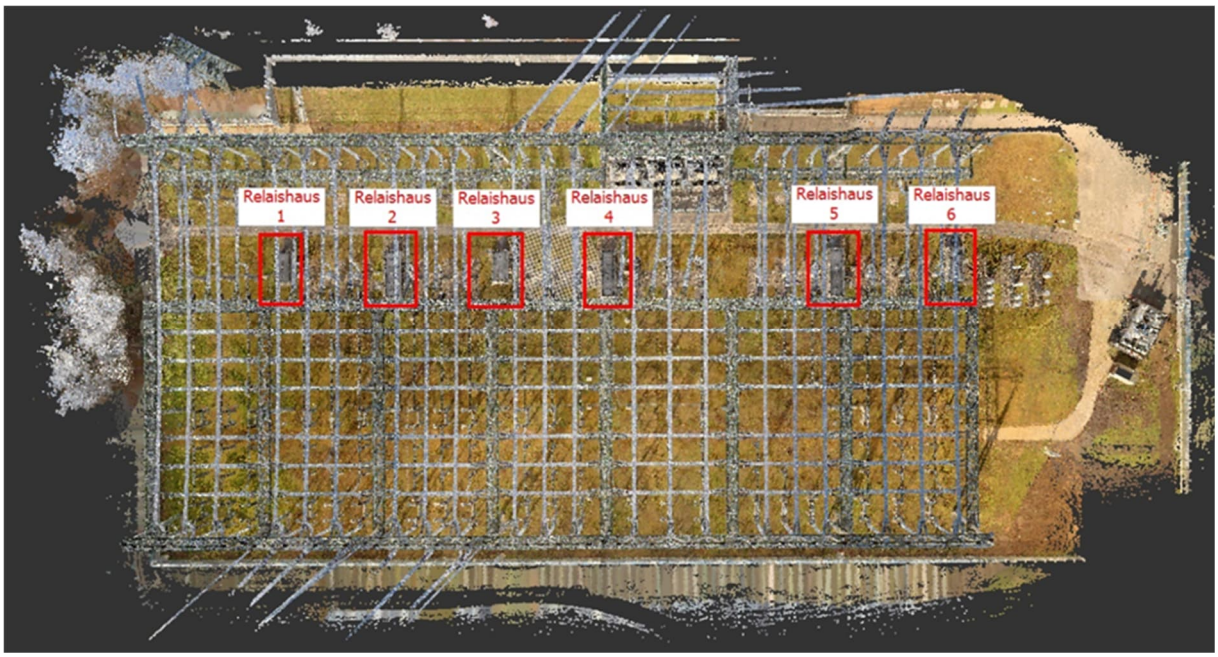


Abbildung 43: Übersicht Relaishäuser

Zu den Nebenanlagen gehören auch Kabelkanäle, welche dazu dienen, die Relaishäuser und die Verbindung zu den Komponenten zu realisieren. Da unterirdische Rohrverbindungen nicht sichtbar sind, können diese vernachlässigt werden. Zudem werden Kabelverbindungen nicht modelliert, sondern nur die Kabelwege mithilfe von Kabelkanälen.

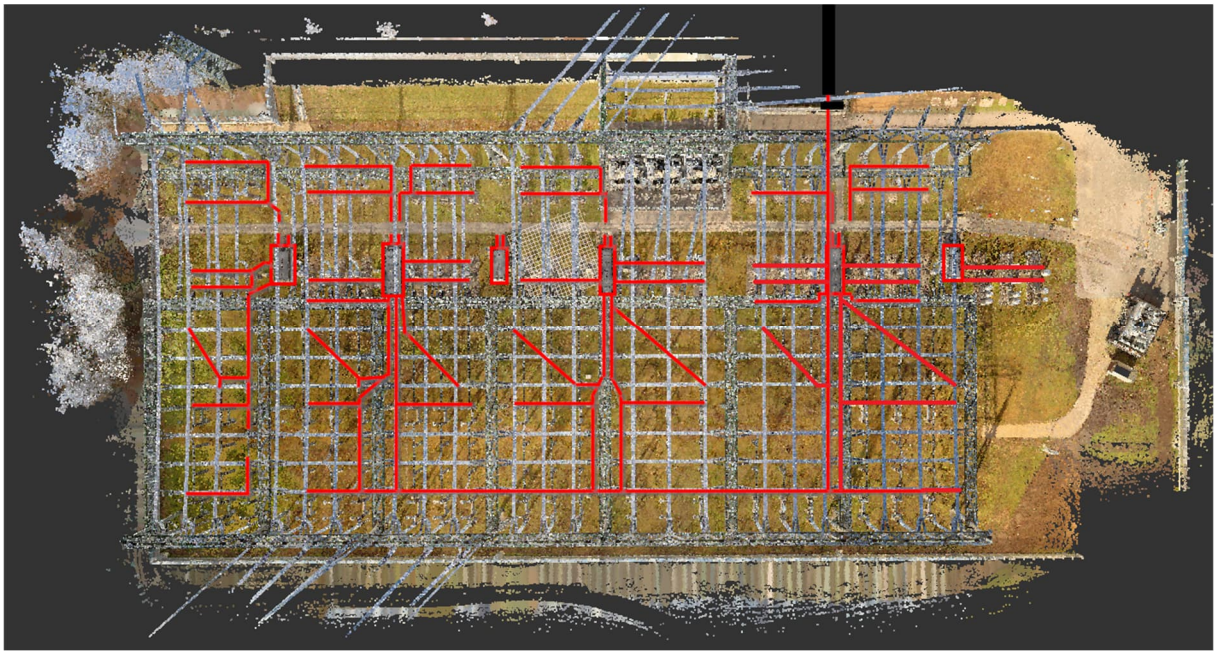


Abbildung 44: Übersicht Kabelkanäle

Für gewisse Komponenten wird oftmals gewünscht, diese in der Anlage vor Ort zu schalten und zu überwachen. Aus diesem Grund werden oft sogenannte vor-Ort-Steuerschränke direkt in Komponentennähe installiert.

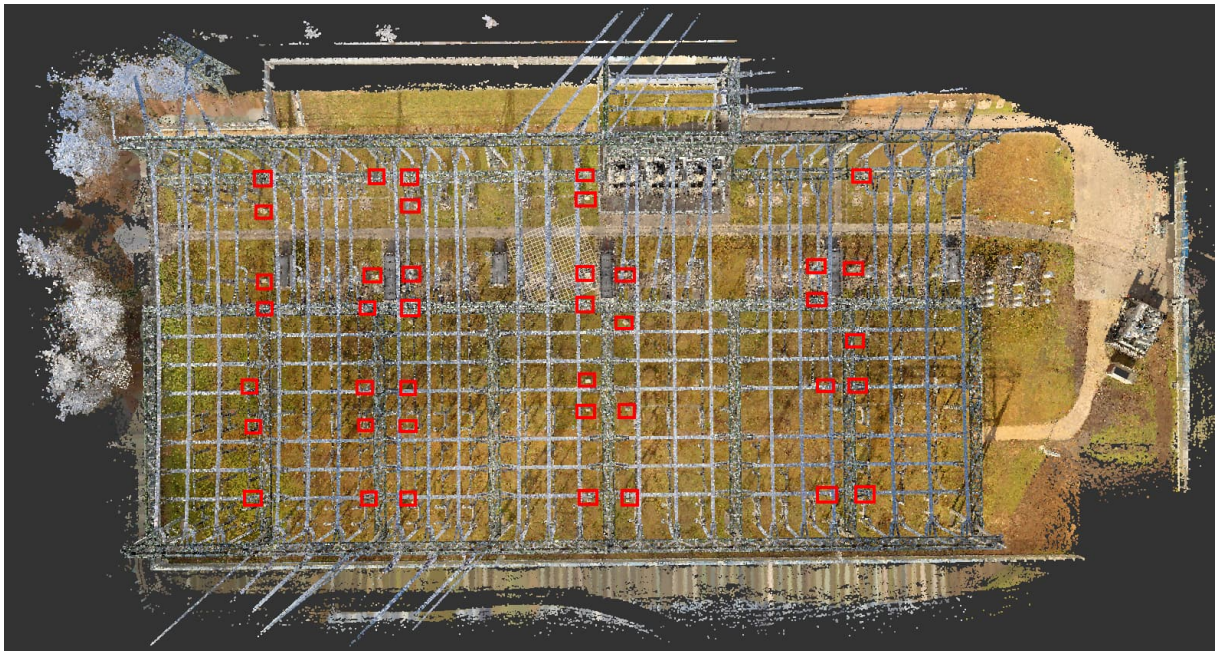


Abbildung 45: Übersicht Steuerschränke

Wie im Grundriss sichtbar ist, gibt es diverse Komponenten oder Teile, welche sich noch in der Anlage befinden und unter dem Punkt der Umgebung laufen.

Abbildung 46: Umgebungsidentifizierung-Symbol

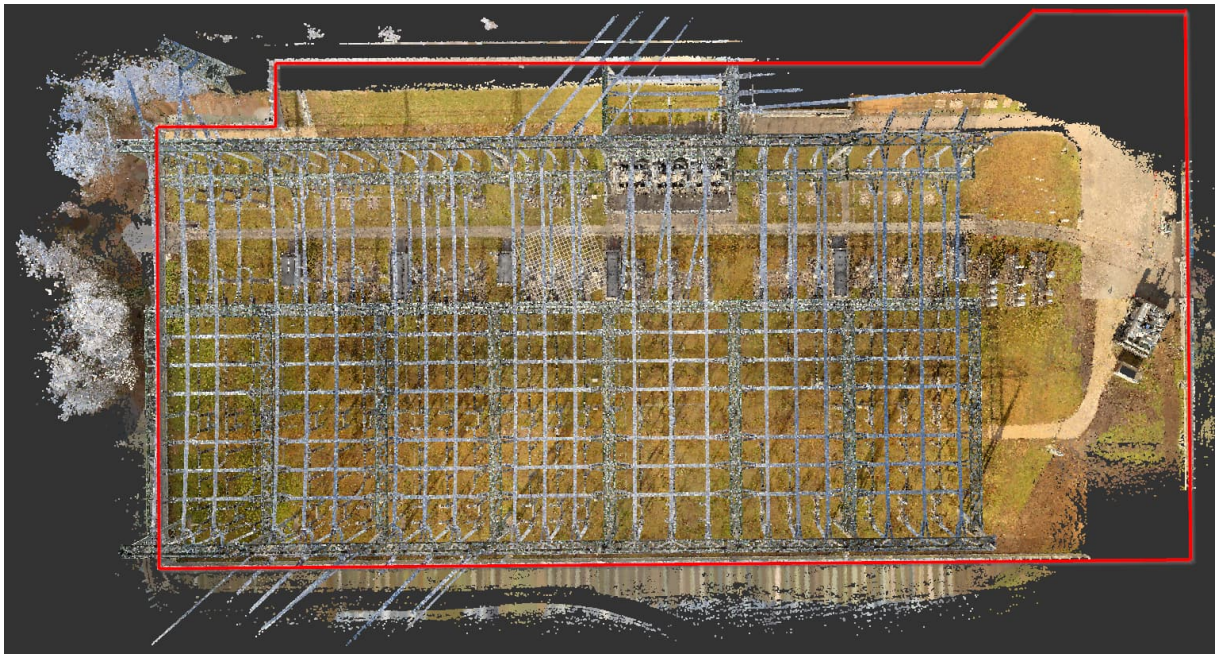


Abbildung 47: Übersicht Zaunanlage

Zu den Nebenanlagen gehört auch die Strasse sowie Vorplätze und Beleuchtungskörper.

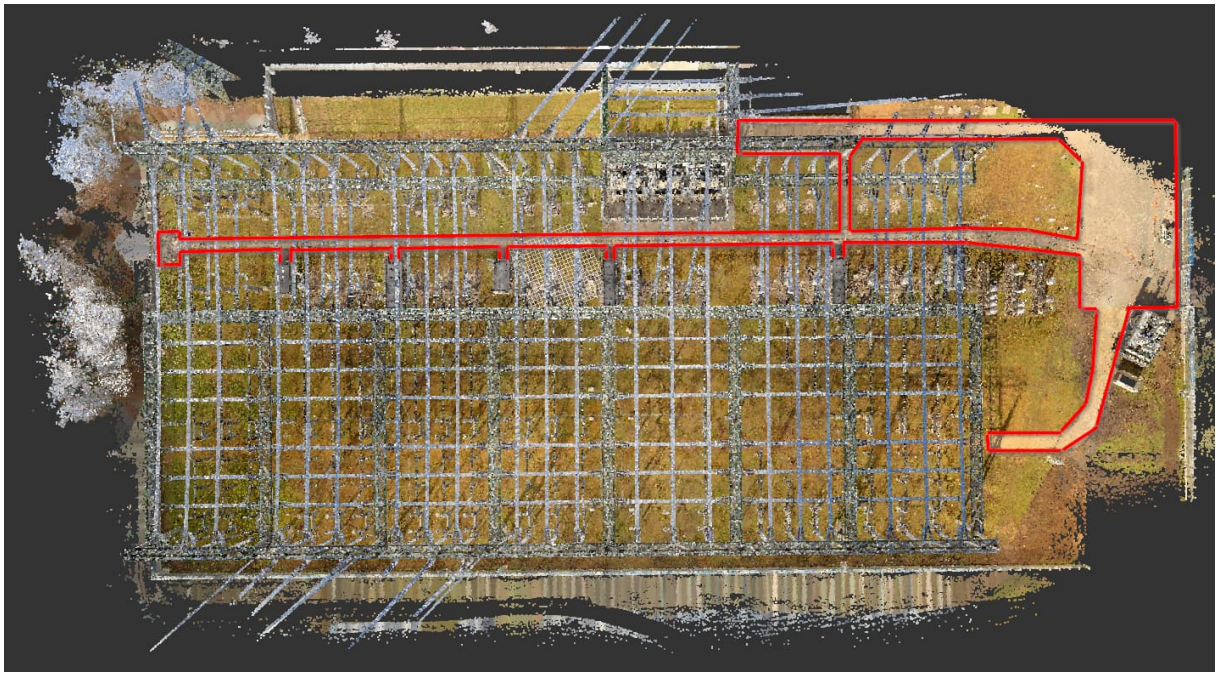


Abbildung 48: Übersicht Strasse

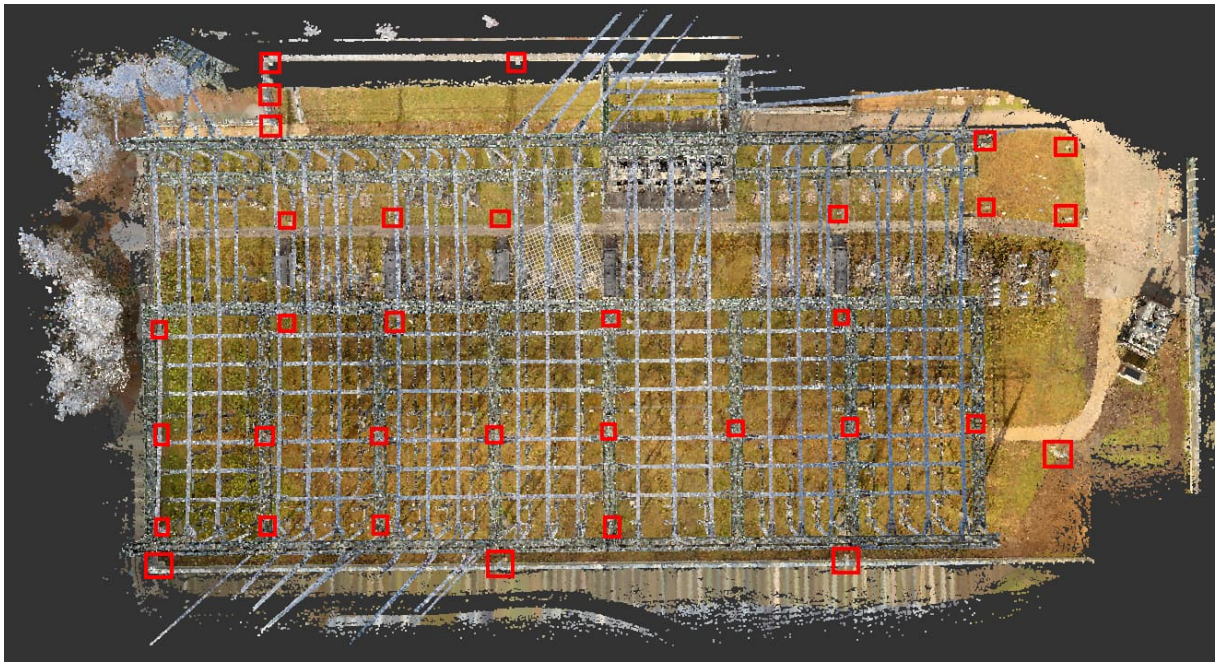


Abbildung 49: Übersicht Beleuchtung

Zusammenfassung der Anlage

Nach der gründlichen Anlagenidentifizierung ist man mit der Anlage sehr vertraut. Es ist nun sichtbar, dass die Anlage bis auf wenige Ausnahmen relativ standardisiert aufgebaut wurde und nur wenige Aspekte im Anlagenaufbau unterschiedlich sind. Zudem sieht man in den Feldern sowie Komponenten, dass diese in einer gewissen Anordnung immer gleich aufgestellt wurden und auch vom Typ her identisch sind. Dies erleichtert die Modellierung, da gewisse Komponenten nur einmal modelliert werden müssen und anschliessend mehrfach verwendet werden können. Sie unterscheiden sich nur von der Position her, nicht vom Aufbau. Die Verseilung wurde immer gleich ausgeführt. Im Feld wurde ein einfaches Seil verwendet, Verbindungen von den Komponenten auf die Überspannungen wurden mit zwei Seilen ausgeführt. Die einzige Überspannung, welche mit drei Leitern ausgeführt wurde, ist beim Transformator. Die Sammelschiene ist mit vier Leitern versehen und wird direkt mit den Pantographentrenner ins Feld angeschlossen. Die Anordnung der Kabelkanäle sowie vor-Ort-Steuerschränke haben grundsätzlich immer die gleiche Logik. Jenachdem welche Komponenten im Feld verbaut wurden, unterscheiden sie sich gemäss diesen Anforderungen.

Einige Komponenten, Gebäude, oder sonstigen Objekte dienen nicht zur Funktionalität der Anlage und werden deshalb vernachlässigt.

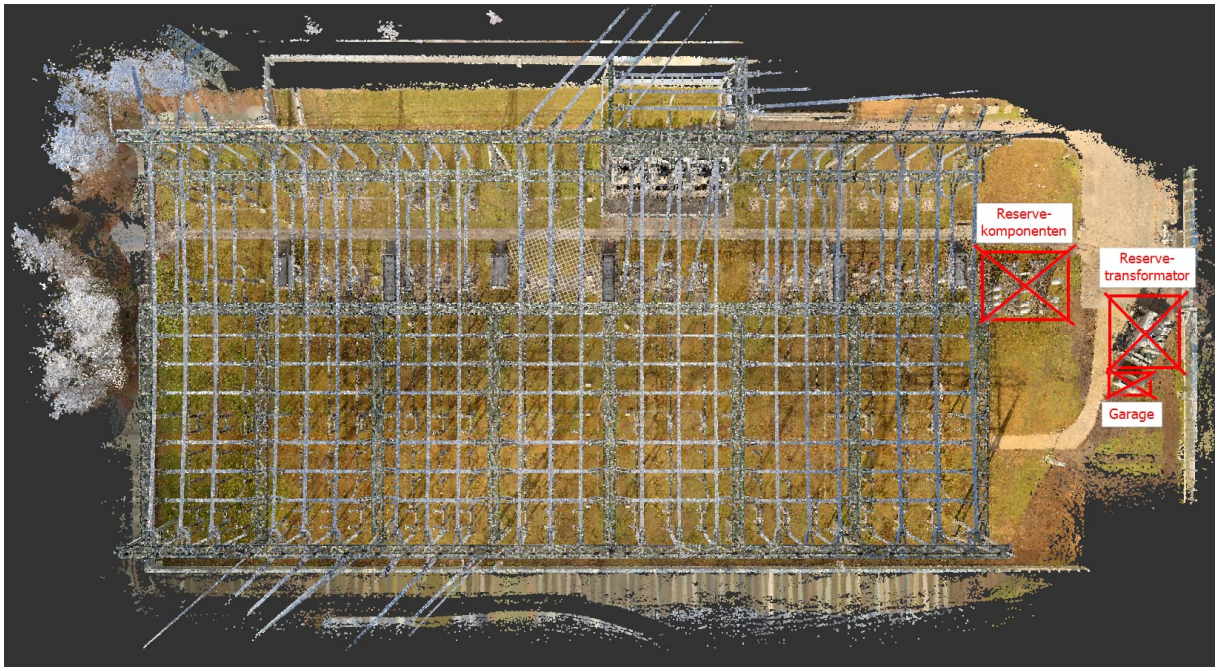


Abbildung 50: Übersicht nicht zu modellierende Objekte

Aufbau des digitalen Zwillings

Die Dokumentation der Erstellung des digitalen Zwillings soll so aufgebaut werden, dass ein Nutzer von Primtech 3D diese nachkonstruieren kann.

Damit die Dokumentation des Modelles nicht zu umfangreich wird, werden einzelne Schritte erläutert und dokumentiert. Schritte oder Prozesse, welche immer wieder den gleichen Aufbau und Ablauf haben, werden nur einmal dokumentiert (beispielsweise die Erstellung eines Fundamentes wird immer gleich sein, obwohl diese sich voneinander unterscheiden).

Ablauf der Modellierung

Die Modellierung einer Freiluftschaltanlage in Primtech 3D läuft immer gleich ab und hält sich an nachstehendes Schema:

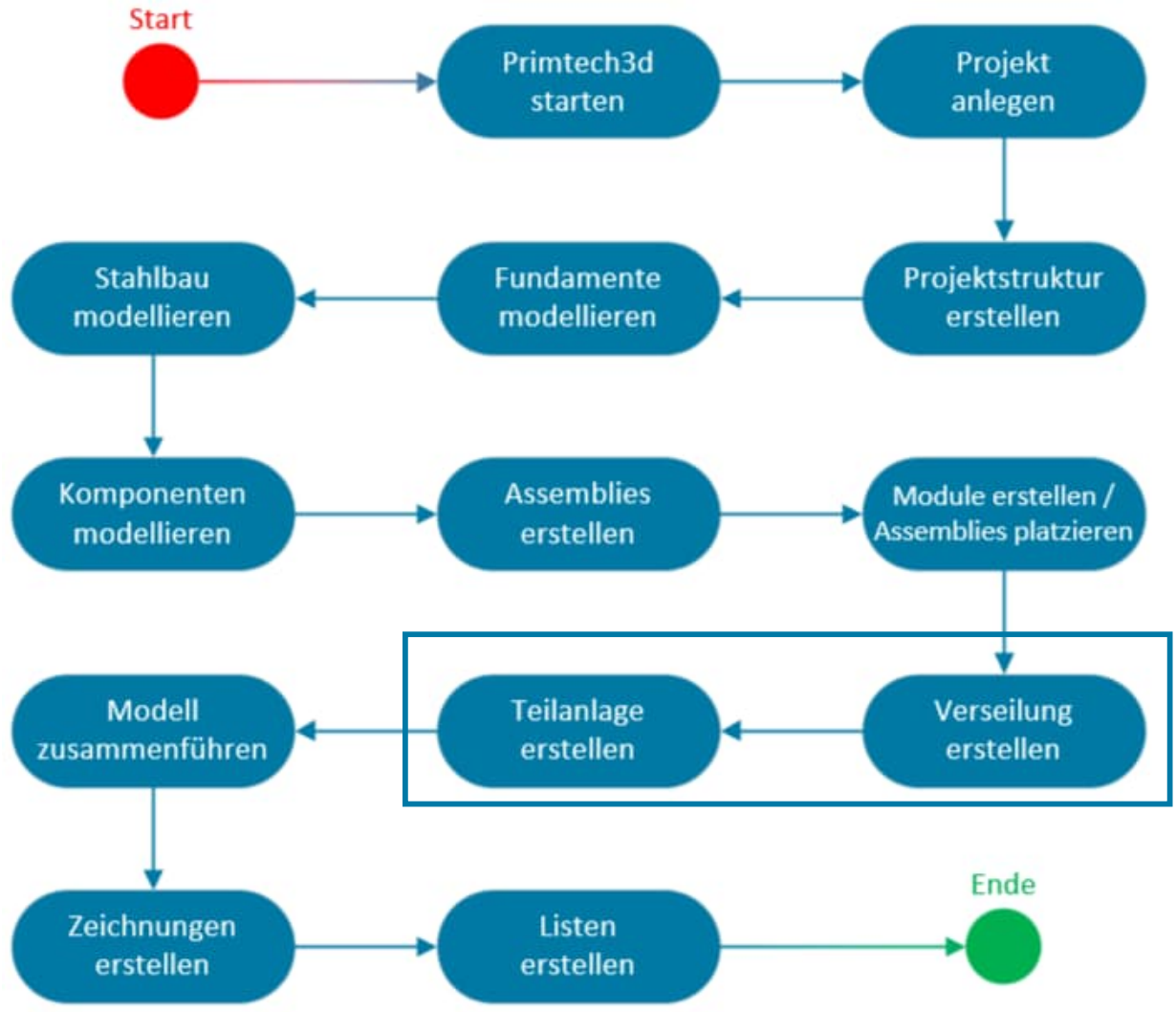


Abbildung 51: Ablauf Modellierung

Die Erstellung der Verseilung sowie der Teilanlagen können oftmals kombiniert oder umgekehrt erfolgen. Dies ist jeweils eine Frage des Anlagenlayouts.

Wichtig ist, dass bei jedem Schritt in der Modellierung die Punktwolke zugezogen wird.

Primtech 3D starten

Für den Start der Modellierung muss das Programm Primtech 3D gestartet werden.

Hinweis: Stellen Sie sicher, dass die Lizenz der Software noch genügend lange gültig ist.

Abbildung 52: Primtech 3D-Startsymbol

Projekt anlegen

Für die effiziente sowie korrekte Erstellung einer Freiluftschaltanlage in Primtech 3D können die beiden Dokumente beigezogen werden:

- Hinweise und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D
- Anleitung mit Tipps und Tricks sowie die wichtigsten Funktionen in Primtech 3D

Für die Modellierung der Freiluftschaltanlage, kann der Anhang ANH-010 beigezogen werden. Mithilfe dieser Unterlagen kann die Anlage mit der gleichen Struktur und der nachstehenden Modellierungsdokumentation nachmodelliert werden.

In der Modellverwaltung sehen Sie auf der linken Seite nun den Ordner «Private Ordner» und «Öffentliche Ordner». Erweitern Sie den «Private Ordner» über das Plus und klicken mit der rechten Maustaste auf den Unterordner «Checked Out». Nun kann über die Steuerung mit der Maus über «Neu» eine neue Komplettanlage ausgewählt werden.

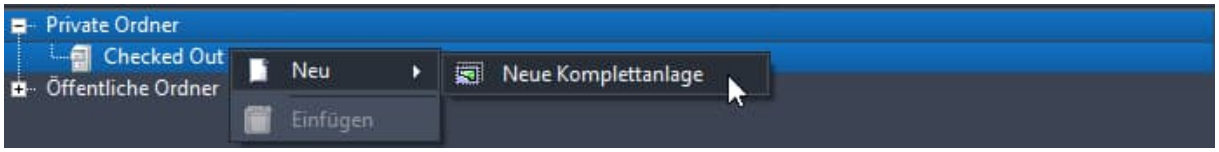


Abbildung 53: Erstellung neues Projekt

Anschliessend wird ein neues Projekt mit einer Standardstruktur erstellt.

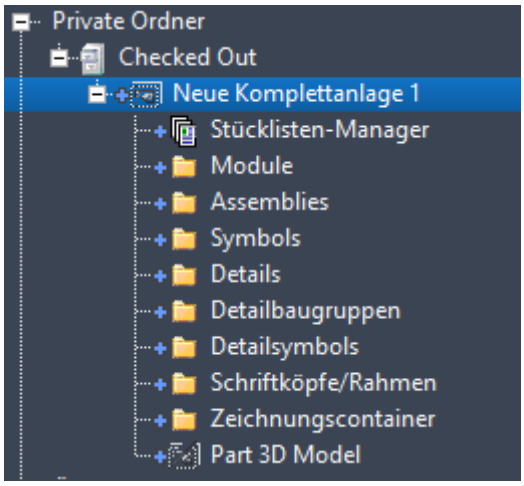


Abbildung 54: neu angelegtes Projekt

Die Metadaten des Projektes können nun, sofern diese bekannt sind, abgefüllt werden.

Details

Bezeichnung	Wert
Matchcode	Kompl 680009999 UW Bravo
Projektnummer	680009999
Projektname	UW Bravo
Anlagentyp	Freiluftschaltanlage
Nennspannung	380 kV
Ort	VERTRAULICH
Kunde	BENT
Schneehöhe [mm]	500
Dateiname	
Charakter	Projekt
Vorlage	☐
Höhe Erdungsanschluss [mm]	
Verlegetiefe Erdleiter [mm]	
Frequenz [Hz]	50
Umgebungstemperatur max [°C]	40
Umgebungstemperatur min [°C]	-20

Abbildung 55: Projektdaten

Projektstruktur anlegen

Um eine Übersicht über die einzelnen Symbole, Assemblies, etc. gewährleisten zu können, werden beim Erstellen eines neues Projektes Ordner angelegt. Diese können umbenannt, gelöscht oder verschoben werden. Jedoch sollen diese beibehalten werden und Unterordner in den einzelnen Teilen erstellt werden. Die wichtigsten Ordner für die Erstellung eines digitalen Zwillings sind:

- Module
- Assemblies
- Symbols

Im Ordner «Module» sollen die vordefinierten Anlagenfelder erstellt und bearbeitet werden. Hier werden die Geräte sowie die Portale an die richtigen Orte platziert.
Im Ordner «Assemblies» werden aus den Symbolen komplette Geräte, wie beispielsweise ein Leistungsschalter mit seinem Stahlbau und Fundament erstellt.
Im Ordner «Symbols» werden alle Konstruktionen für die Anlage modelliert (Stahlbau, Komponenten, Fundamente, etc.).

Am Ende der Struktur gibt es einen sogenannten «Baustein» mit dem Namen «Part 3D Model».
In diesem Baustein werden einzelne Teilanlagen erstellt. Dieser ist schlussendlich das Endprodukt, also der digitale Zwilling. In diesem werden alle Teilanlagen zusammengebracht und als gesamtes Produkt vervollständigt.

Mithilfe des Kapitels «1.3 Modellierungsvorbereitung» können wir hier eine saubere Projektstruktur erstellen. Diese hilft uns bereits die einzelnen Module in den Ordnern zu erstellen.

Per Rechtsklick mit der Maus auf den Ordner «Module» kann nun der Befehl «Neu» und anschliessend «neues Modul» ausgewählt und erstellt werden. So können unsere 7 vordefinierten Felder (5 Leitungsfelder, 1 Kuppelfeld und 1 Transformatorfeld) erstellt und benennt werden.

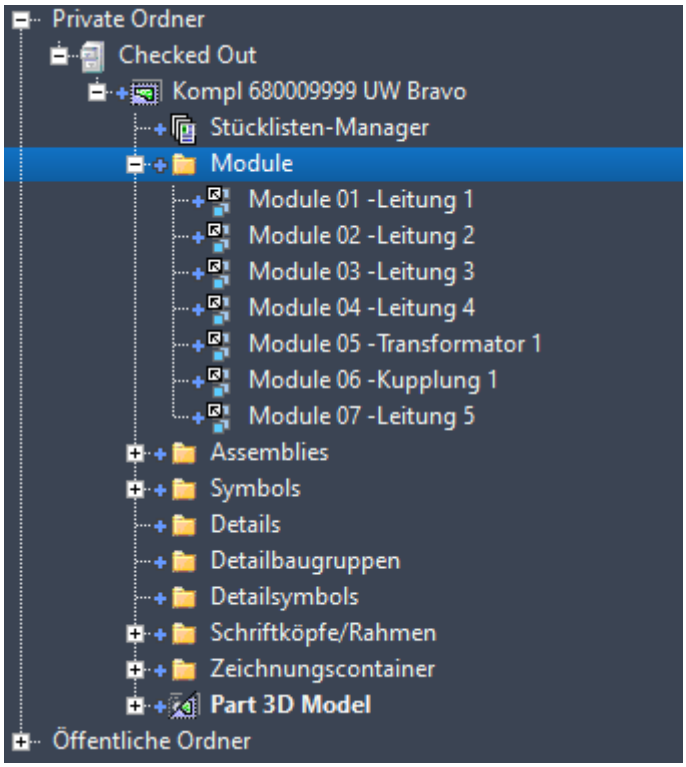


Abbildung 56: Übersicht Module

Im Ordner «Assemblies» können nun die einzelnen Bauteile bereits in Unterordner eingeteilt und angelegt werden. Hier unterscheidet man zwischen Geräte und Portale. Auch hier kann per Rechtsklick mit der Maus auf den Ordner «Assemblies» der Befehl «Neu» und anschliessend «neuer Ordner» ausgewählt und erstellt werden.

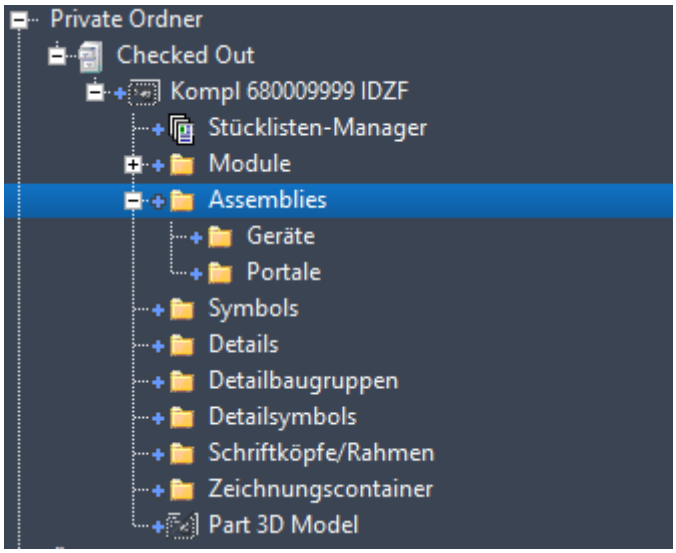


Abbildung 57: Übersicht Assemblies

Im Ordner «Symbols» können die einzelnen zu erstellenden Symbole in Unterordner eingeteilt werden. Hier werden sämtliche zu erstellende Objekte erstellt und abgelegt. Auch hier kann mithilfe des Kapitels «1.3 Modellierungsvorbereitung» die Struktur vorbereitet werden.

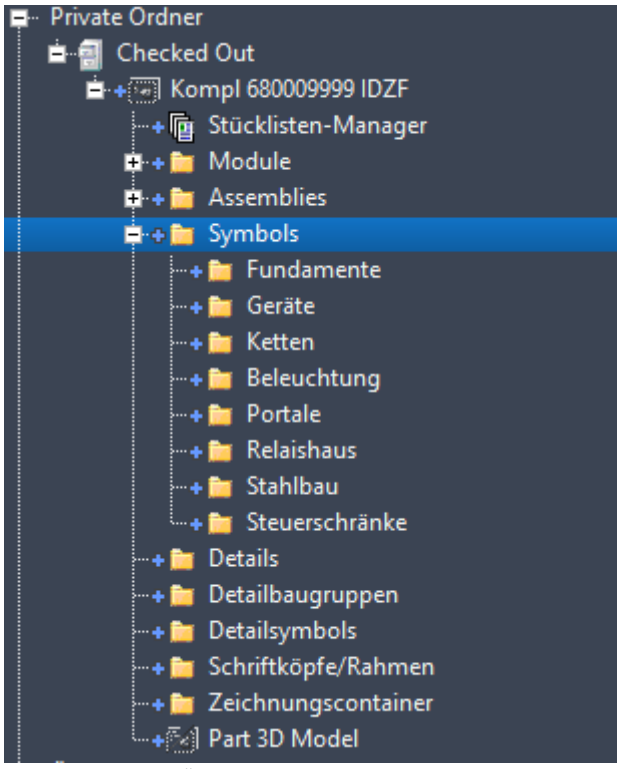


Abbildung 58: Übersicht Symbols

Kabelkanäle, Strassen sowie der Anlagenzaun werden nicht als Symbole erstellt. Diese werden direkt in einer Teilanlage erstellt. Diese können direkt aus der enTis-Bibliothek verwendet und angepasst werden. Hier erhält man keinen Mehrwert, wenn diese als Symbole erstellt und anschliessend in den einzelnen Felder als Referenzen hinterlegt werden. Deshalb werden diese als Ganzes in einer Teilanlage erstellt.

Die nachstehenden, vordefinierten Ordner werden nicht benötigt.

- Details
- Detailbaugruppen
- Detailsymbols
- Schriftköpfe/Rahmen
- Zeichnungscontainer

Der Ordner «Details» dient für die Erstellung und Integration in das Anlagenmodell von Kleinteilen, wie z.B. Schrauben oder Muttern in Form von z.B. Befestigungsdetails oder Erdungsdetails. Die Modellierung von Verschraubungen oder ähnlichem werden nicht beachtet, da diese dem Nutzer des 3D-Modells keinen Mehrwert liefern kann und im Gegenzug einen grossen Aufwand bedingen würde.

Der Ordner «Schriftköpfe/Rahmen» dient zur Hinterlegung von eigenen Schriftköpfen auf Zeichnungen. Wie es der weitere Ordner «Zeichnungscontainer» bereits aussagt, können hier Zeichnungen aus dem Modell erstellt werden. Nachdem eine Zeichnung, beispielsweise ein Grundriss der Anlage, erstellt wurde, kann über die hinterlegten Schriftköpfe und Rahmen diese der Zeichnung zugewiesen werden. So kann das Layout eines Unternehmens auf die Zeichnungen des 3D-Modells übertragen werden. Diese sind in dieser Arbeit jedoch nicht relevant, also kann auf diese ebenfalls verzichtet werden.

Im Baustein «Part 3D Model» kann zum Schluss das ganze Modell wie ein Puzzle zusammengesetzt werden. Dafür werden Teilanlagen definiert und angelegt. Grundsätzlich sind dies Standardteilanlagen, welche es in jeder Freiluftschaltanlage gibt.

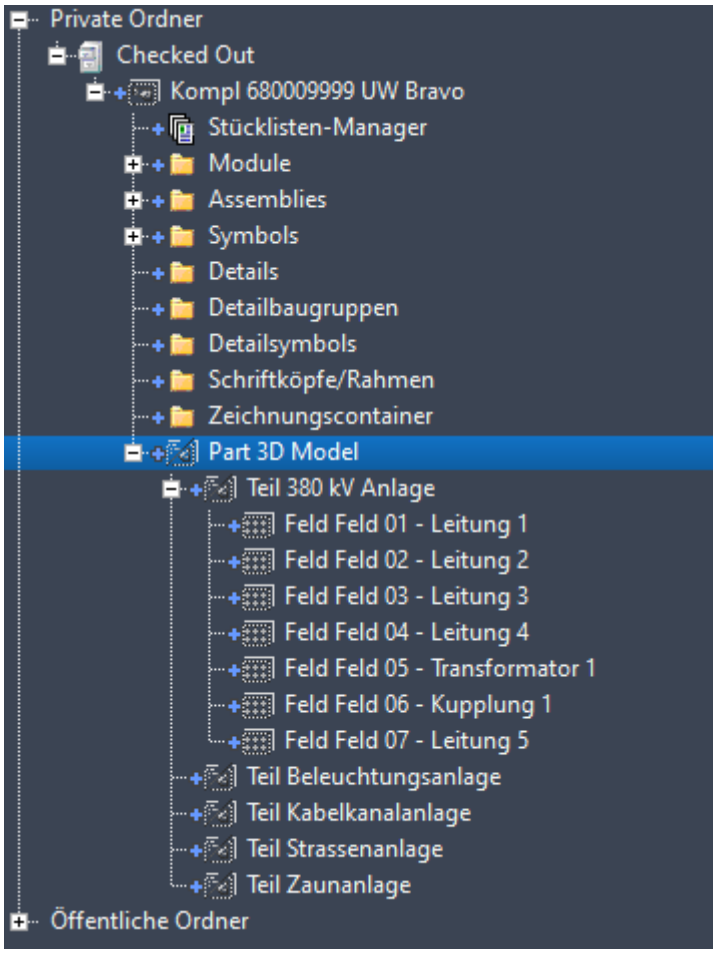


Abbildung 59: Übersicht Zusammenstellung 3D-Modell

Unter der Teilanlage «Teil 380 kV Anlage» wurden die definierten Felder erfasst. In diesen Felder wird das komplette Feld, inklusive ihrem zugehörigen Relaishaus, Steuerschränke sowie die Verseilung erfasst. Anschliessend können in der Teilanlage die Felder referenziert und eingefügt werden.

Fundamente modellieren

Nachdem die Projektstruktur erstellt wurde, kann nun mit der Modellierung des digitalen Zwillings begonnen werden. Wie bereits kurz erläutert, arbeitet Primtech 3D mit dem Bottom-Up-Prinzip. Dementsprechend müssen erst die Fundamente der Objekte, anschliessend die Stahlbauten und anschliessend die Geräte erstellt werden. Hierbei wird immer die Punktwolke herbeigezogen und so zugeschnitten, dass sie dem zu modellierenden Bereich angepasst ist.

Für die Modellierung eines Fundamentes kann im Ordner «Fundamente» unter Symbols ein neues Fundament erstellt werden. Mit Rechtsklick der Maus auf dem Ordner «Fundamente» kann ein neues Symbol erstellt und bezeichnet werden.

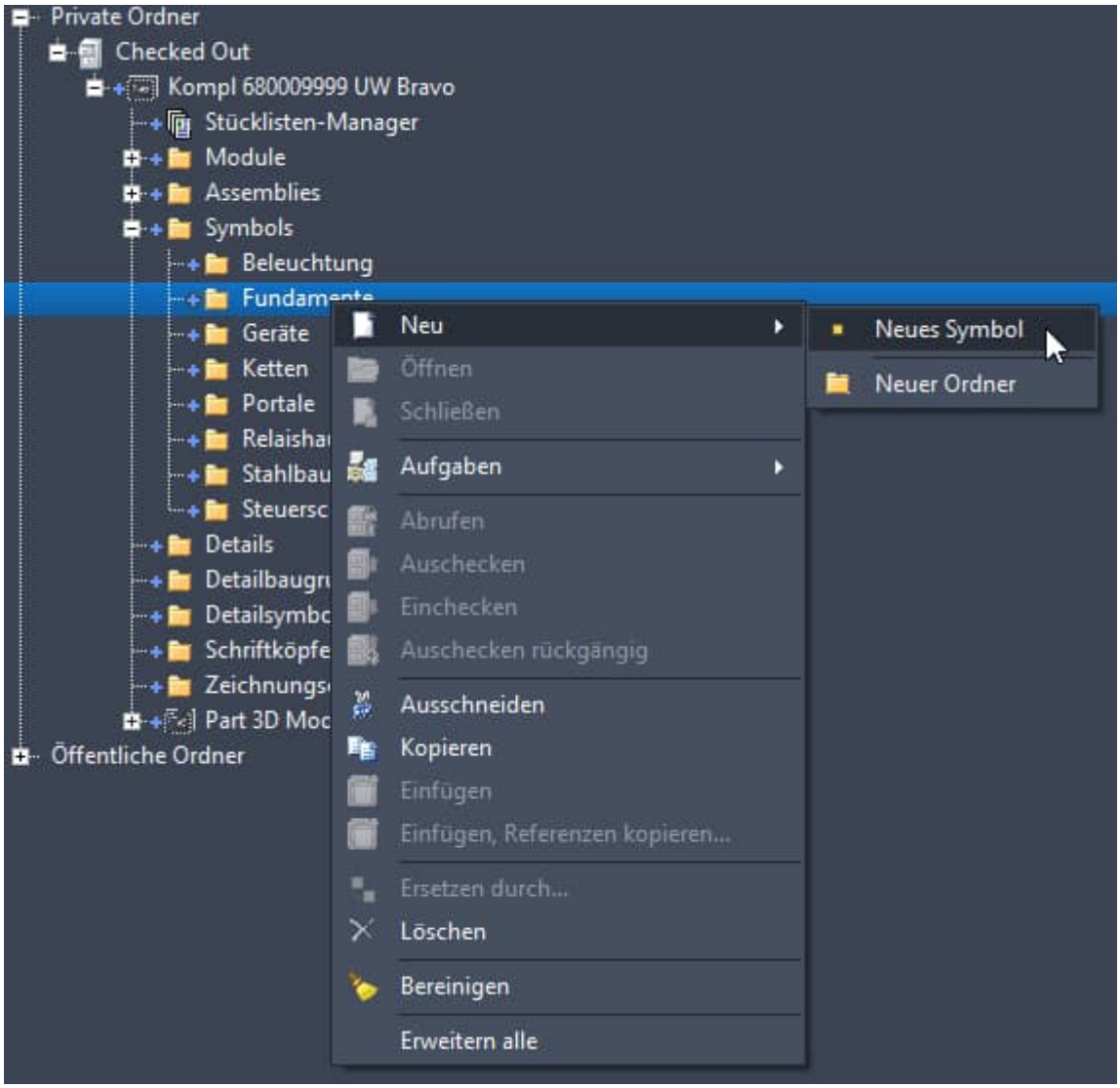


Abbildung 60: Übersicht Erstellung neues Symbol

So können sämtliche Fundamente angelegt werden.

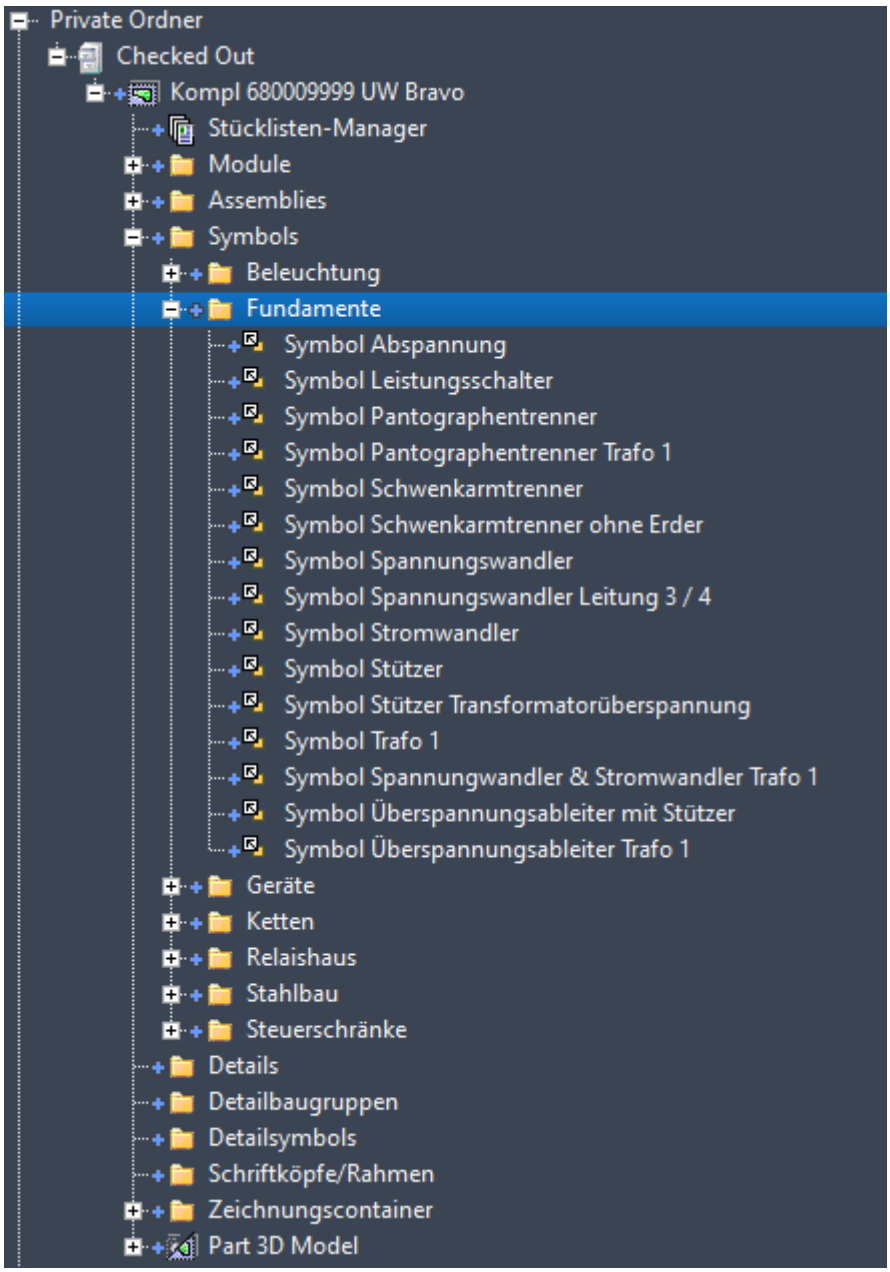


Abbildung 61: Übersicht erstellte Fundamentsymbole

Damit das Fundament in Stücklisten ausgewertet werden kann, muss dies jeweils einer Stücklistengruppe zugewiesen werden. Dies erfolgt in den Metadaten der Eigenschaftenliste.
Das Öffnen des Symbols wird nicht erfolgen, sofern dies nicht gemacht wurde. Beim Versuch des Öffnens, wird ein Meldefenster geöffnet mit einem Hinweis.

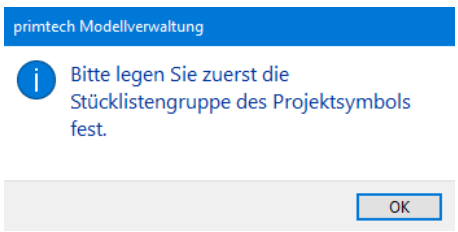


Abbildung 62: Meldefenster - Öffnen des Symbols nicht möglich

Abbildung 63: Zuweisung der Symbole für die Stücklisten

Nach Erstellung des neuen Symbols kann dies ausgewählt und in der Startleiste über den Button «Öffnen» geöffnet werden.

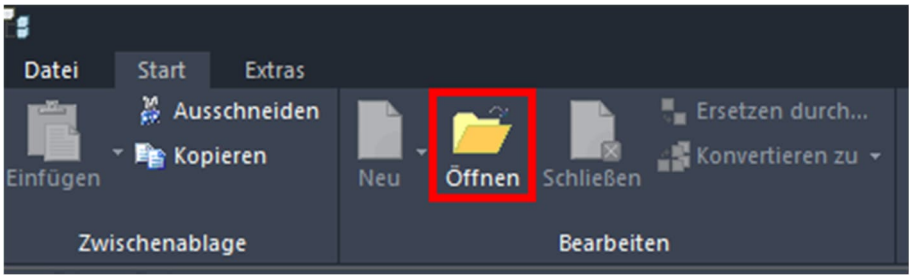


Abbildung 64: Öffnen eines Symbols zum bearbeiten

Nach dem erfolgreichen Öffnen des erstellten Symbols öffnet sich eine leere Zeichnungsdatei. Hier kann nun das Fundament erstellt werden. Bevor eine Vorlage des Fundamentes aus der enTis-Bibliothek geladen wird, soll die Punktwolke zugezogen werden, um die genauen Abmessungen daraus zu nehmen.

Die Punktwolke kann unter dem Reiter «prUmbauprojekte» über den Befehl «Punktwolke» importiert werden.

Abbildung 65: Importieren der Punktwolke in Primtech 3D

Nach dem erfolgreichen Importieren der Punktwolke kann diese für den benötigten Bereich zugeschnitten werden. Durch Klick auf die Punktwolke wird der neue Reiter «Punktwolke» generiert. Hier kann die Punktwolke bearbeitet werden, wie beispielsweise das Zuschneiden. Da bei der Erstellung der Fundamente nur das Gerät oder Portal sichtbar sein muss, kann diese so

zugeschnitten werden, dass nur der Bereich sichtbar ist, welcher modelliert werden muss. Mit diesem Vorgang ist die Übersicht über den zu modellierenden Bereich einfacher.

Nun kann die Punktwolke auf den Bereich des Fundamentes vom Leitungsportal über den Befehl «Rechteckig» zugeschnitten werden.

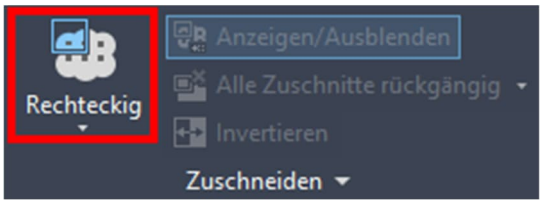


Abbildung 66: Zuschneiden der Punktwolke

Somit kann der Bereich ausgewählt werden, welcher von der Punktwolke sichtbar sein soll.

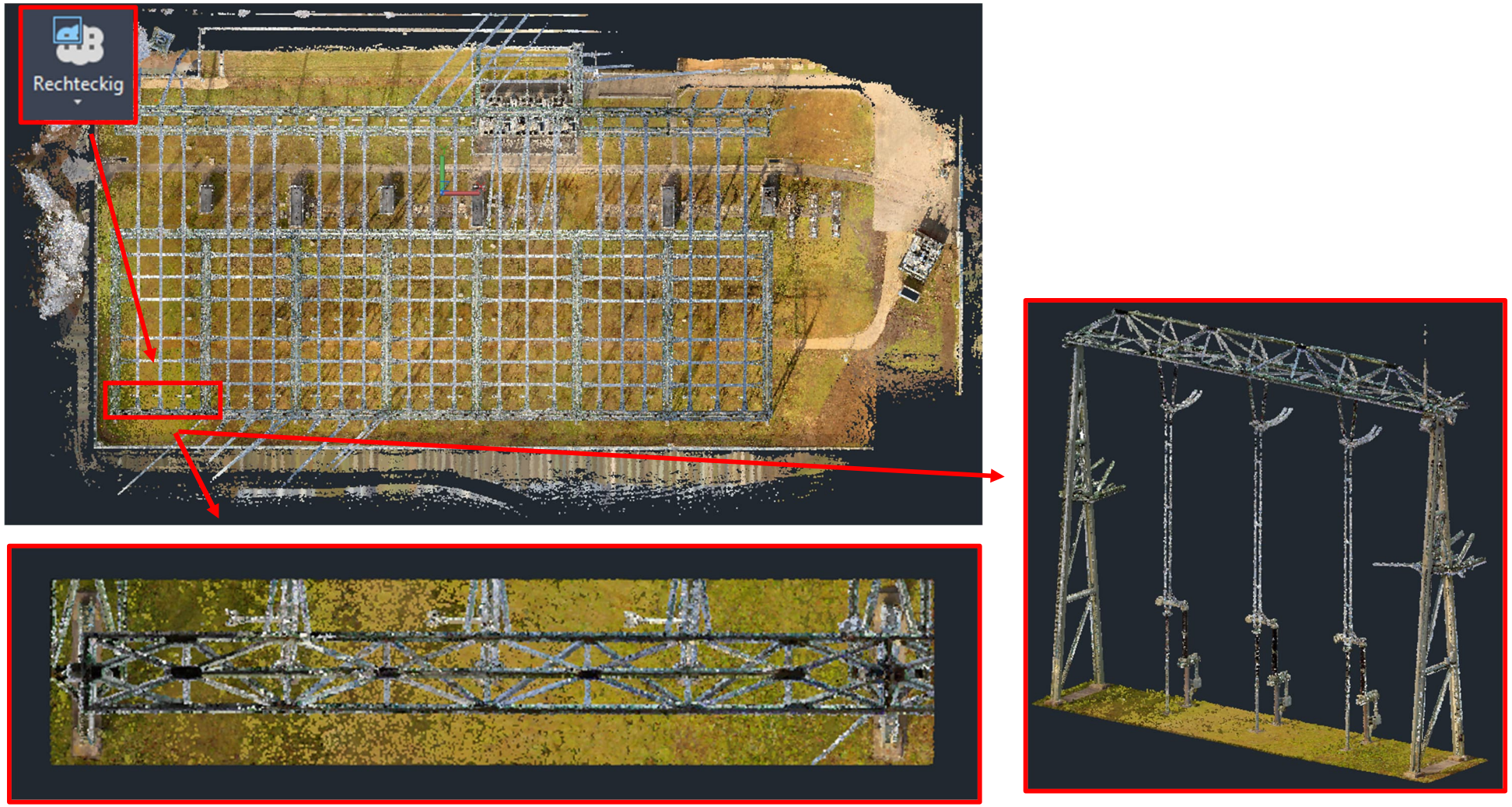


Abbildung 67: Ablauf für das Zuschneiden der Punktwolke

Nun kann über die enTis-Bibliothek ein Standardfundament beigezogen werden und gemäss der Position des Fundamentes in der Punktwolke platziert werden. Dies erfolgt über den Aufruf der enTis-Bibliothek für Fundamente unter prDesign und anschliessend das Symbol des Fundamentes.

Nun öffnet sich die enTis-Bibliothek für Fundamente, welche es bereits in Primtech 3D gibt. Diese können je nach Verwendungszweck ausgewählt und individuell angepasst werden. Durch Doppelklick auf das gewünschte Fundament in der rechten Auflistung, wird dies in die Zeichnung importiert.

Wichtig beim Modellieren ist, dass die Objekte immer auf den Nullpunkt gesetzt werden. Bei der Erstellung der Module können diese dann an die richtige Position gesetzt werden.

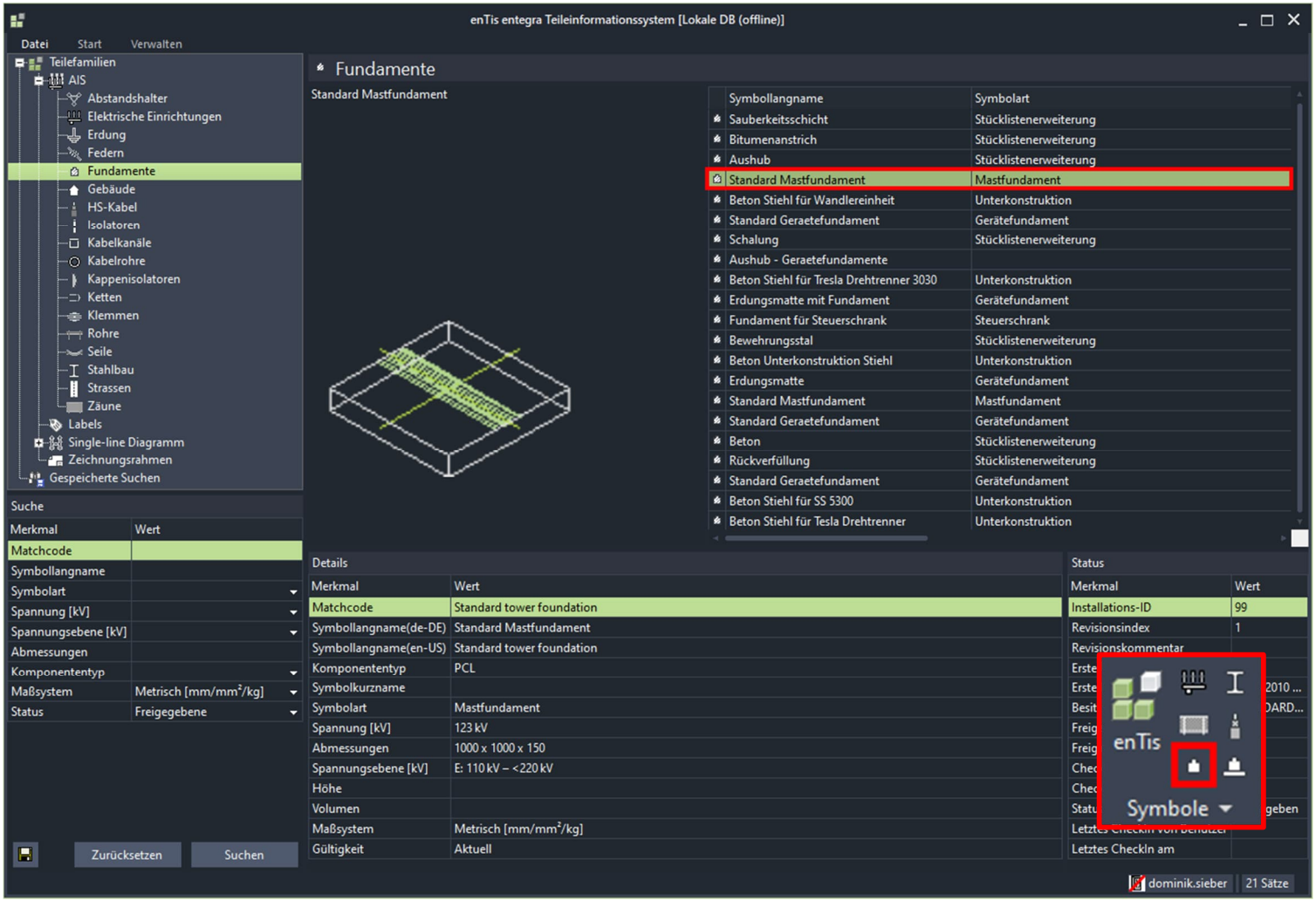


Abbildung 68: Auswahl des Standartfundamentes in der enTis-Bibliothek

Nachdem das gewünschte Fundament in der Bibliothek mit Doppelklick ausgewählt und platziert wurde, kann nun das Fundament angepasst werden.

Das Fundament muss angewählt werden und kann anschliessend über den Befehl «Scale» in prDesign vergrössert oder verkleinert werden.

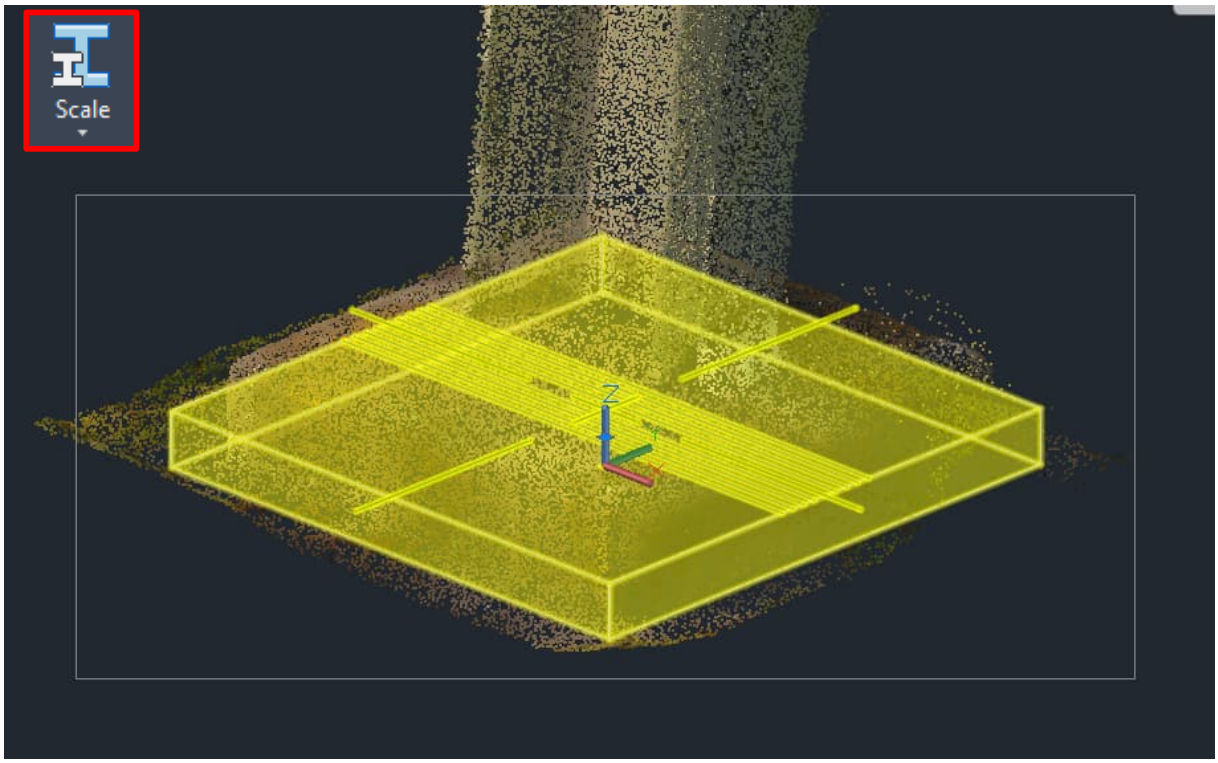


Abbildung 69: Anpassung Fundament

Nun kann anhand der Punktwolke das Fundament angepasst werden.

Mit dem Befehl «Scale» im Reiter «Absolut» können die effektiven Abmessungen, jeweils in der X-, Y- und Z-Achse eingetragen werden.

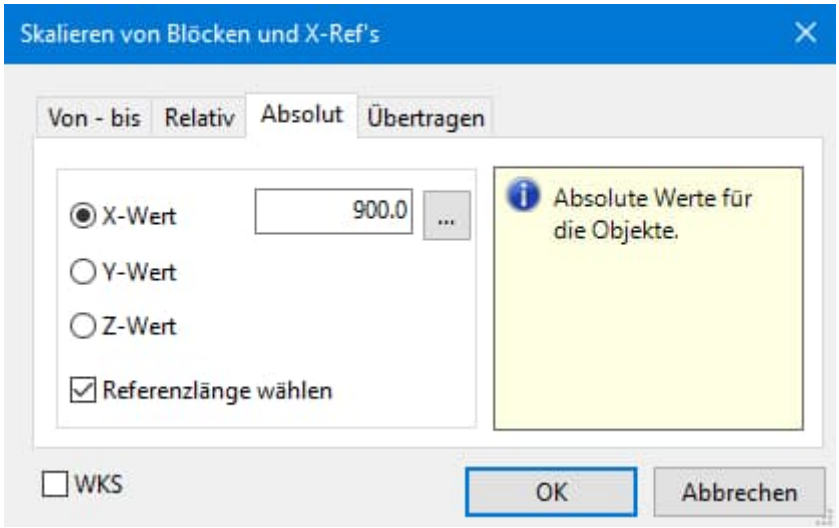


Abbildung 70: Bearbeitungsfenster für das Skalieren von Objekten

Das Fundament wird in allen Achsen angepasst, bis es mit jenem aus der Punktwolke innerhalb der geforderten Genauigkeit übereinstimmt.

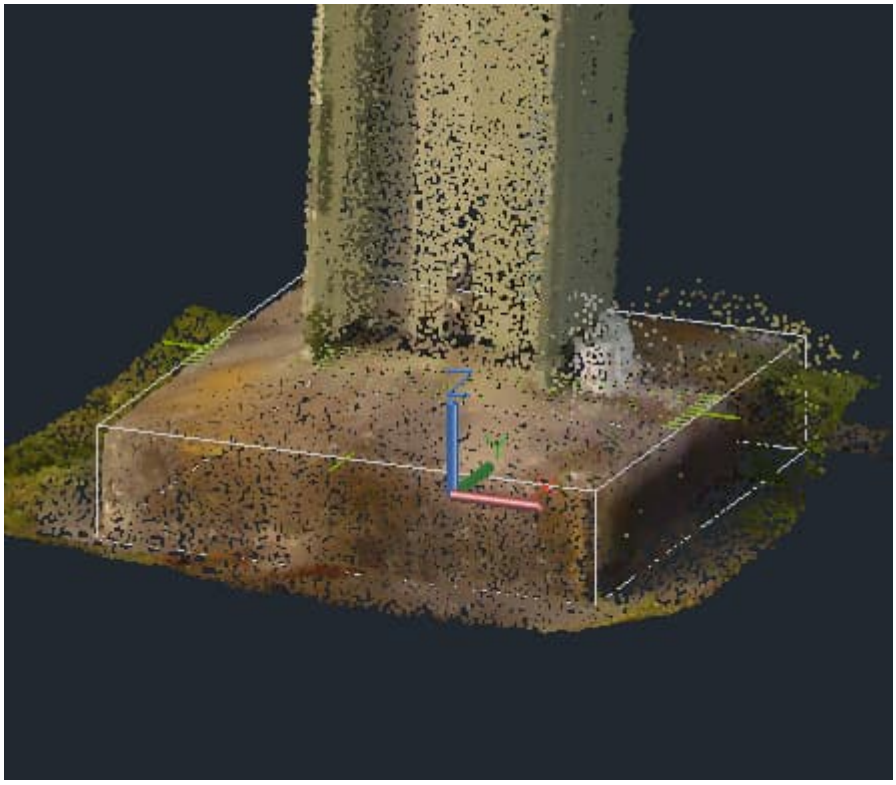


Abbildung 71: Angepasste Fundament anhand der Punktwolke

Somit ist das erste Fundament erstellt und abgespeichert.

Dieses Fundament kann nun als Referenz für die weiteren Fundamente dienen. Das Symbol kann kopiert und anschliessend individuell angepasst werden, damit der Vorgang des Auswählens der Fundamente und platzieren, sowie das Laden der Punktwolke übersprungen und somit effizienter gearbeitet werden kann.

Bevor alle Fundamente in der Anlage einzeln erstellt werden, soll eine Überprüfung der Fundamente erfolgen. Die Leitungsportale sind grundsätzlich gleich aufgebaut, also besteht die Möglichkeit, dass auch die Fundamente immer dieselben sind. Deshalb sollen alle Fundamente überprüft werden und nur diese neu modelliert werden, welche unterschiedlich sind. Somit kann die Effizienz des Modellierens gesteigert werden.

Stahlbau modellieren

Für die Modellierung des Stahlbaus wird der gleiche Ansatz wie im vorherigen Kapitel mit der Modellierung der Fundamente gewählt.

Auch hier kann im Ordner «Stahlbau» unter Symbols ein neues Stahlgerüst erstellt werden. Mit Rechtsklick der Maus auf dem Ordner «Stahlbau» kann ein neues Symbol erstellt und bezeichnet werden.

Nach dem Öffnen des neuen Symbols kann wieder die Punktwolke beigezogen werden und über die enTis-Bibliothek ein Standard-Gerüst ausgewählt werden.

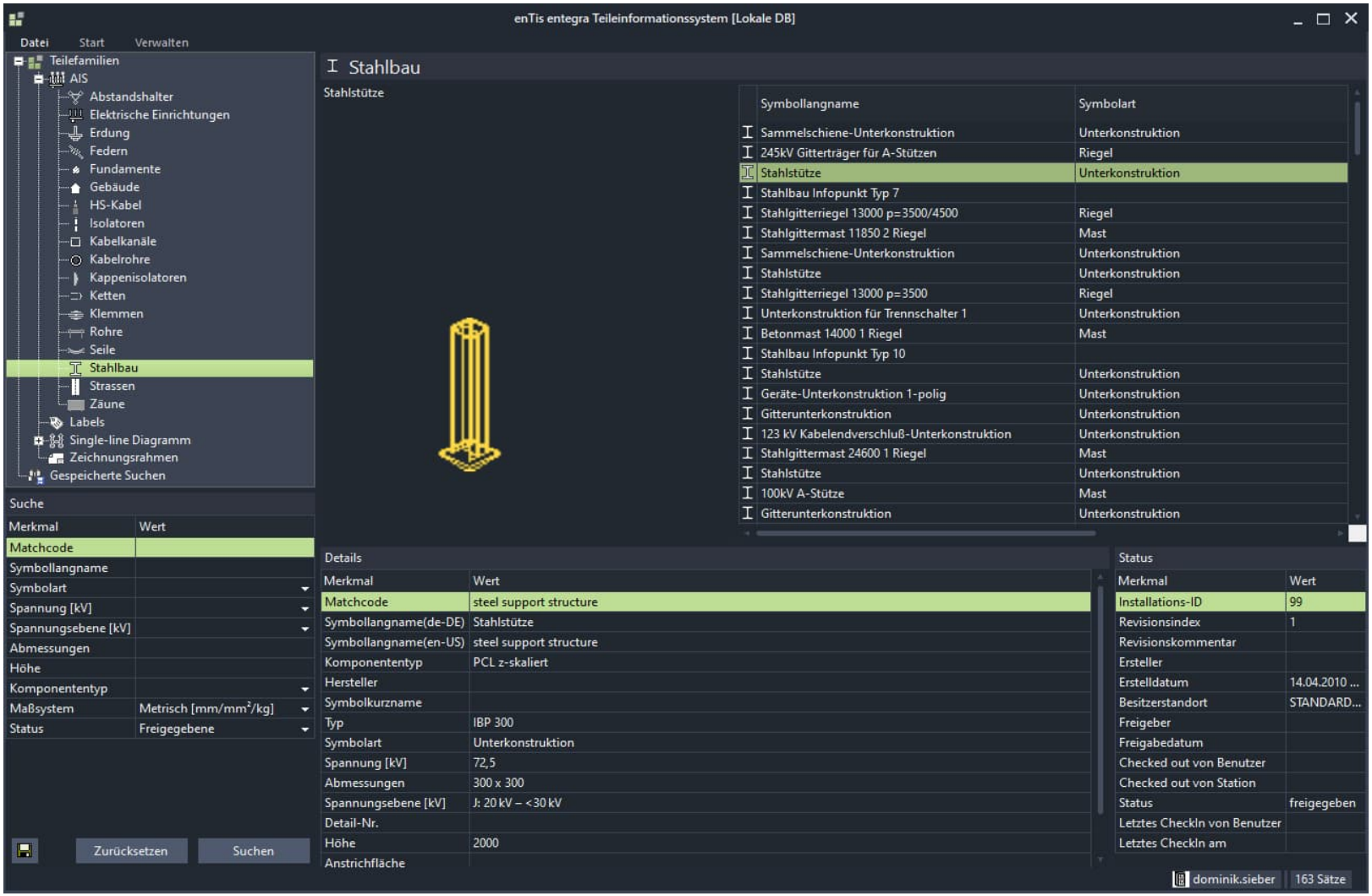


Abbildung 72: Auswahl des Stahlbaus in der enTis-Bibliothek

Nachdem das gewünschte Gerüst in der Bibliothek mit Doppelklick ausgewählt und platziert wurde, kann dies nun angepasst werden. Das Gerüst muss angewählt werden und kann anschliessend über den Befehl «Scale» in prDesign vergrössert oder verkleinert werden.

Abbildung 73: Vergleich des ausgewählten Stahlbaus mit der Punktwolke

Wie nun im Bild sichtbar ist, sind einige Unstimmigkeiten zwischen dem Stahlgerüst und der Punktwolke vorhanden. Mithilfe des Befehls «Ursprung» in prDesign kann das Objekt des Stahlgerüstes in einzelne Teile aufgelöst werden. Somit können Details ergänzt, verschoben oder auch entfernt werden.

Dazu muss das Objekt angewählt werden um anschliessend den Befehl auszuführen.

Bevor alle Stahlgerüste in der Anlage einzeln erstellt werden, soll eine Überprüfung der Gerüste erfolgen. Die Leitungsportale sind gleich aufgebaut, deshalb sollen alle Gerüste überprüft werden und nur diese neu modelliert werden, welche unterschiedlich sind. Somit kann die Effizienz des Modellierens gesteigert werden.

Komponenten modellieren

Für die Modellierung der Komponenten wird der gleiche Ansatz wie in den vorgängigen Kapiteln mit der Modellierung der Fundamente und des Stahlbaus gewählt.

Auch hier kann im Ordner «Geräte» unter Symbols ein neues Gerät erstellt werden. Mit Rechtsklick der Maus auf dem Ordner «Geräte» kann ein neues Symbol erstellt und bezeichnet werden.

Nach dem Öffnen des neuen Symbols, kann wieder die Punktwolke beigezogen werden und über die entis-Bibliothek ein Standard-Gerät ausgewählt werden. Wichtig bei den elektrischen Geräten ist die Vorgabe der Spannung. Die Geräte müssen gemäss der IST-Situation korrekt ausgewählt werden.

In der unteren linken Suchmaske können die Parameter der gesuchten Geräte eingegeben werden. Da Primtech 3D mit unterschiedlichen Spannungen arbeitet, wird jeweils die nächstgrössere Spannung der Anlage ausgewählt. In diesem Beispiel wurde ein Ableiter mit einer Spannung von 420-kV gesucht und rechts mit den möglichen Komponenten angezeigt.

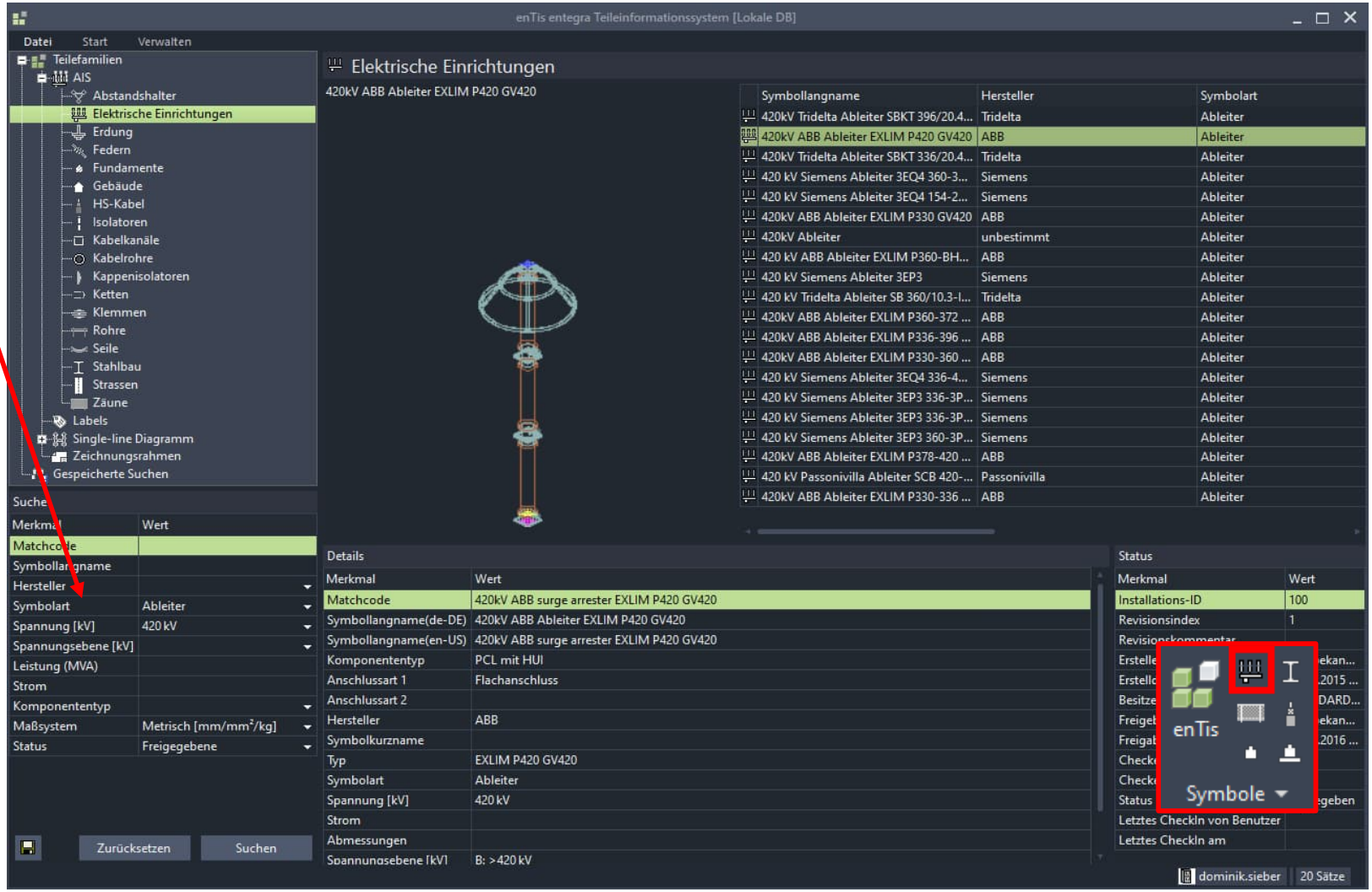


Abbildung 74: Auswahl des Gerätes in der enTis-Bibliothek

Nachdem das gewünschte Gerät in der Bibliothek mit Doppelklick ausgewählt und platziert wurde, kann dies nun angepasst werden. Das Gerät muss angewählt werden und kann anschliessend über den Befehl «Scale» in prDesign vergrössert oder verkleinert werden. Wie auch in diesem Fall gibt es nur ein ähnliches Gerät, welcher der Punktwolke gleicht. Mit dem Befehl «Ursprung» kann auch dieses aufgelöst und angepasst werden.

Nun ist sichtbar, dass der Ableiter individuell angepasst wurde und die Vorgaben für die realitätsnahe Modellierung erfüllt.

Bevor alle Geräte in der Anlage einzeln erstellt werden, soll eine Überprüfung der Komponenten erfolgen. Die Komponenten sind zum Teil gleich aufgebaut, deshalb sollen diese überprüft werden und nur diese neu modelliert werden, welche unterschiedlich sind. Somit kann die Effizienz des Modellierens gesteigert werden.

Abbildung 75: Vergleich zwischen dem Gerät und der Punktwolke

Assemblies erstellen

Ein Assemblie ist die Gruppe von mehreren Symbolen, wie beispielsweise ein Leistungsschalter mit seinem zugehörigen Stahlgerüst und Fundament.

Die Assemblies werden in zwei Unterordner untereilt. Zum einen für die elektrischen Geräte und zum anderen in Stahlbauten wie Leitungsportale oder Masten.

Nach der Erstellung der beiden Ordner können nun die Assemblies zusammengebaut werden.

Nach der Erstellung eines neuen Assemblies kann über den Befehl «Aus MV» die Referenz des Symbols hergeholt werden. Der grosse Vorteil hierbei, ist die automatische Nachführung des Assemblies sofern das Symbol angepasst wird.

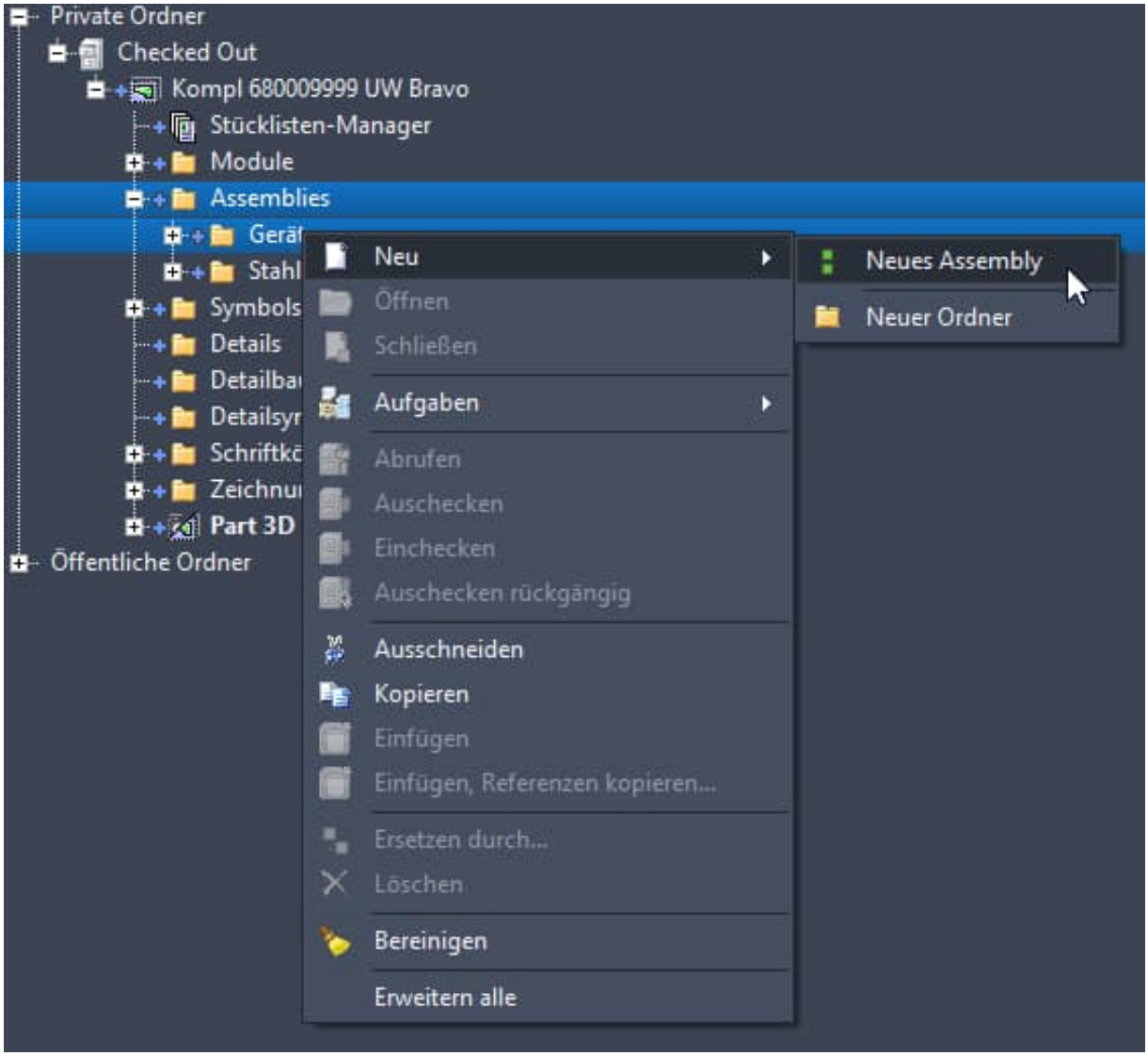


Abbildung 76: Erstellung eines Assemblies

Das Assemblie kann wieder über den Button «Öffnen» geöffnet und bearbeitet werden.

Über den Button «Aus MV» können nun die erstellen Symbole referenziert werden, um das Assemblie zusammen zu bauen. Assemblies für die Geräte bestehen grundsätzlich aus einem Fundament, einem Stahlgerüst und einem Gerät. Diese können nun in das Assemblie referenziert und an die richtige Position geschoben werden.

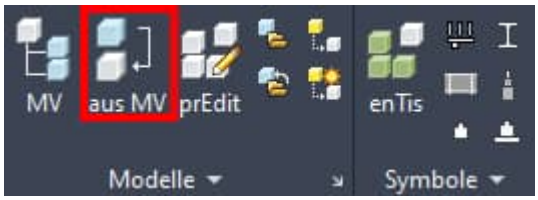


Abbildung 78: Laden von Symbole in das Assemblie

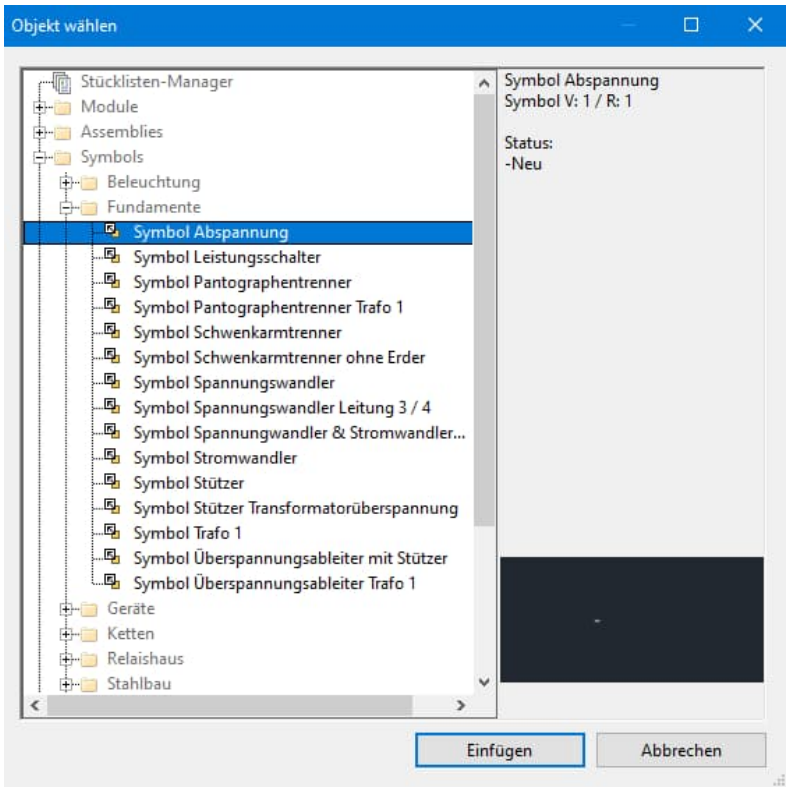


Abbildung 77: Auswahl des Symbols

Dieser Vorgang erfolgt so oft, bis sich alle benötigten Symbole im Assemblie befinden und korrekt zusammengebaut wurden. Dieser Vorgang kann nun für alle benötigen Assemblies durchgeführt werden.

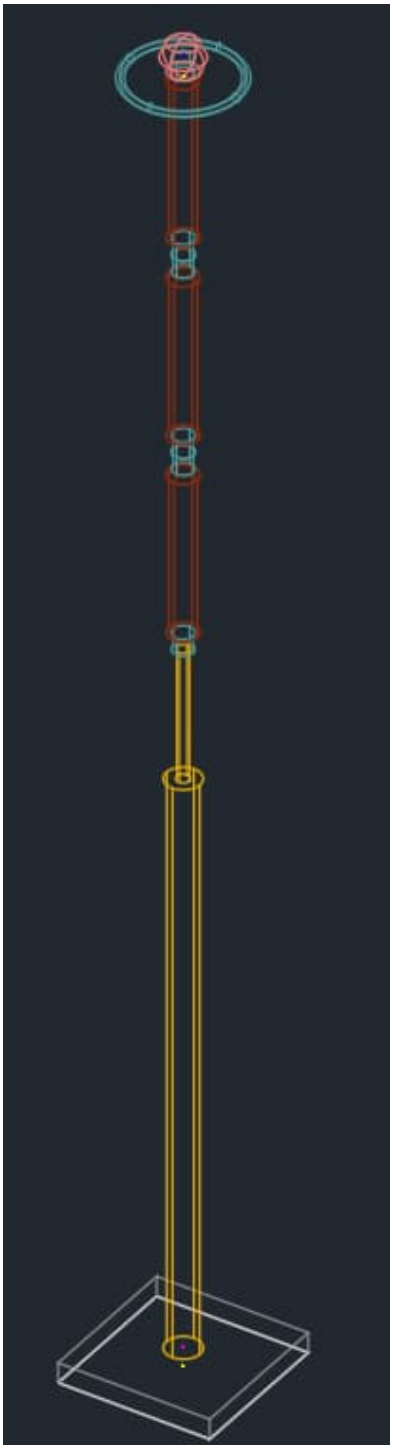


Abbildung 79: Zusammengesetzte Assemblie

Für die Leitungsportale und Sammelschienenportale wurde ein komplettes Assemblie erstellt. Dies macht Sinn, wenn die gesamte Anlage über ein einheitliches Portallayout verfügt und diese untereinander verbunden sind. In dieser Anlage ist dies der Fall, weshalb auf einzelne Symbole verzichtet wurde und direkt ein Assemblie erstellt wurde.

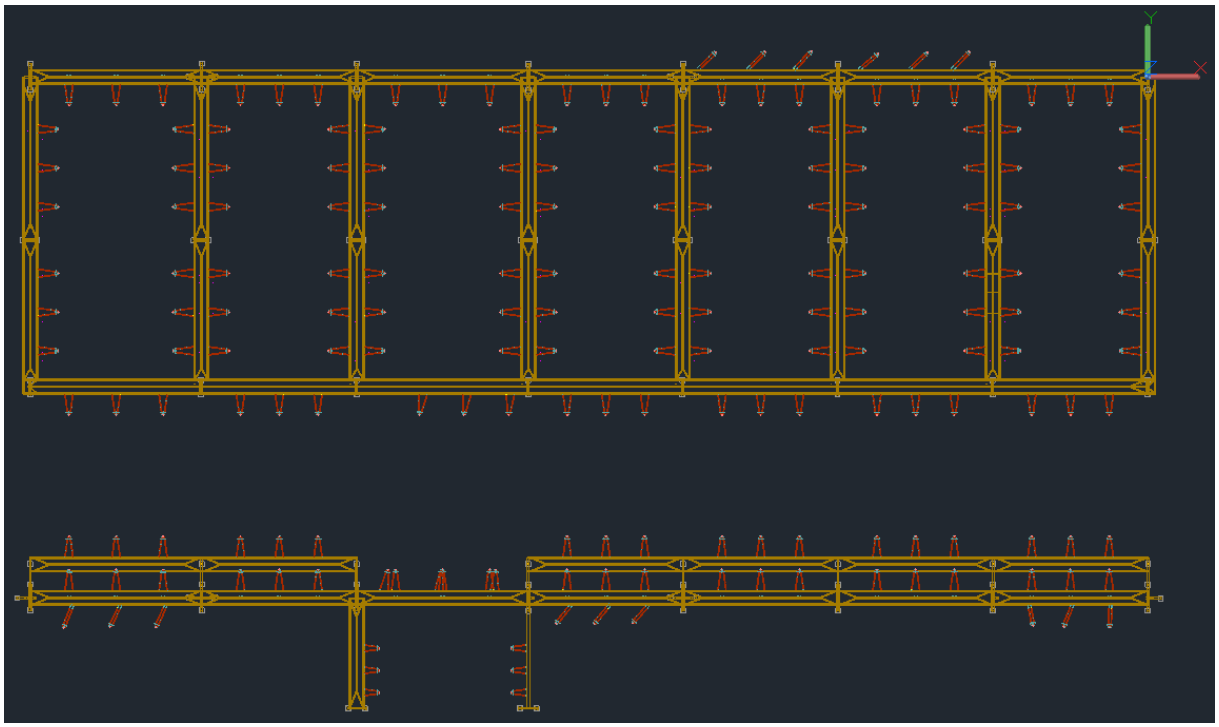


Abbildung 80: Assemblie für die Leitungs- und Sammelschienenportale

Wie auf den ersten Blick sichtbar wird, wurden ebenfalls die Ketten der Verseilung integriert. Dies macht auch hier Sinn, da dies als Konstrukt anschliessend fertig ist und nur noch verseilt werden kann.

Module erstellen

Module dienen für das Zusammensetzen der einzelnen Anlagenfelder. Hierbei werden die erstellten Assemblies in den vorbereiteten Anlagenfelder platziert.

Auch hier wird wieder über den Button «Öffnen» das Modul geöffnet und mit dem Button «Aus MV» die korrekten Assemblies referenziert. Um die korrekte Position der Assemblies zu eruieren, kann die Punktwolke als temporärer Hilfsverweis geladen werden.

Dies erfolgt gleich wie im Abschnitt «Fundamente modellieren», indem die Punktwolke beigezogen und für den benötigten Bereich zugeschnitten wird.

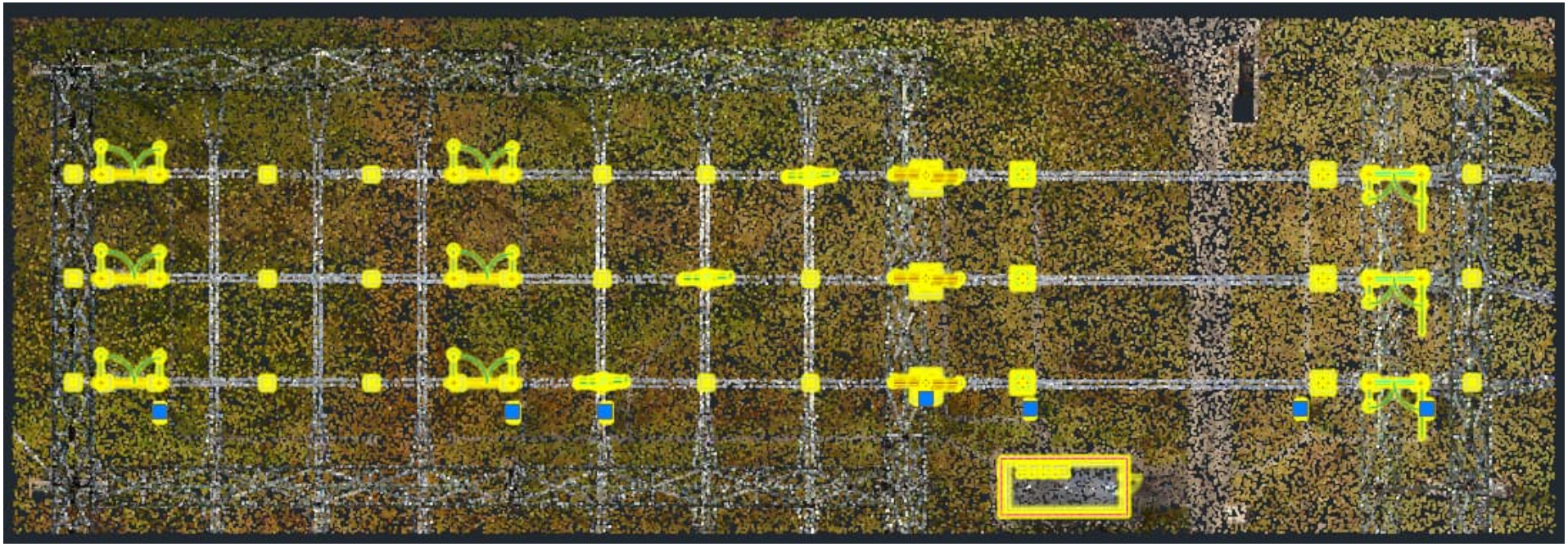


Abbildung 81: Setzen der Assemblies im Modul anhand der Punktwolke

Nun können sämtliche Anlagenfelder mit diesem Vorgehen erstellt werden. Wie im Ausschnitt sichtbar ist, wurden die Geräte, sowie das Relaishaus und die Steuerschränke direkt integriert. Dies können in den weiteren Anlagenfelder ebenfalls übernommen werden.

Teilanlage erstellen

Die Teilanlagen dienen zur Vervollständigung des kompletten 3D-Modells der Freiluftschaltanlagen. Je nach Anforderungen und Wünsche des Kunden können hier weitere Objekte dem Modell beigefügt und modelliert werden. Sie sind die letzte Stufe für das Zusammensetzen des 3D-Modells.

Für die Freiluftschaltanlage wurden mehrere Teilanlagen erstellt:

- Teilanlage für die Freiluftschaltanlage
- Teilanlage für die Beleuchtung
- Teilanlage für die Gebäude
- Teilanlage für die Kabelkanäle
- Teilanlage für die Strassen
- Teilanlage für den Zaun

In den einzelnen Teilanlagen wurde die Punktwolke beigezogen und zugeschnitten. Anschliessend konnten jeweils die Objekte zu den Teilanlagen modelliert werden.

Für die einzelnen Teilanlagenmodelle können Vorlagen aus der enTIS-Bibliothek genommen, mithilfe der Punktwolke modelliert und angepasst werden.

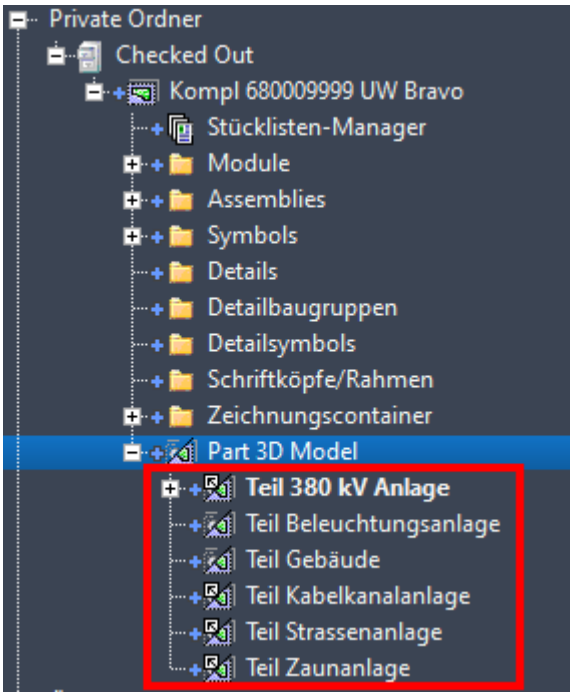


Abbildung 82: Zusammenstellen der Module

Verseilung erstellen

Die Verseilung wurde in verschiedenen Schritten erstellt.

Die Feldverseilung (Gerät zu Gerät) wurde in den einzelnen Felder unterhalb der Teilanlage «Teil 380 kV» erstellt.
Da in diesen nur die Komponenten modelliert wurden, wurde die Verseilung der Sammelschiene, Leitungsportale sowie die Anbindungen der Freileitungen in der Teilanlage «Teil 380 kV» zusammengefügt. In dieser Teilanlage wurde nun die komplette Verseilung der Anlage, kombiniert mit den Feldverseilungen, erstellt.

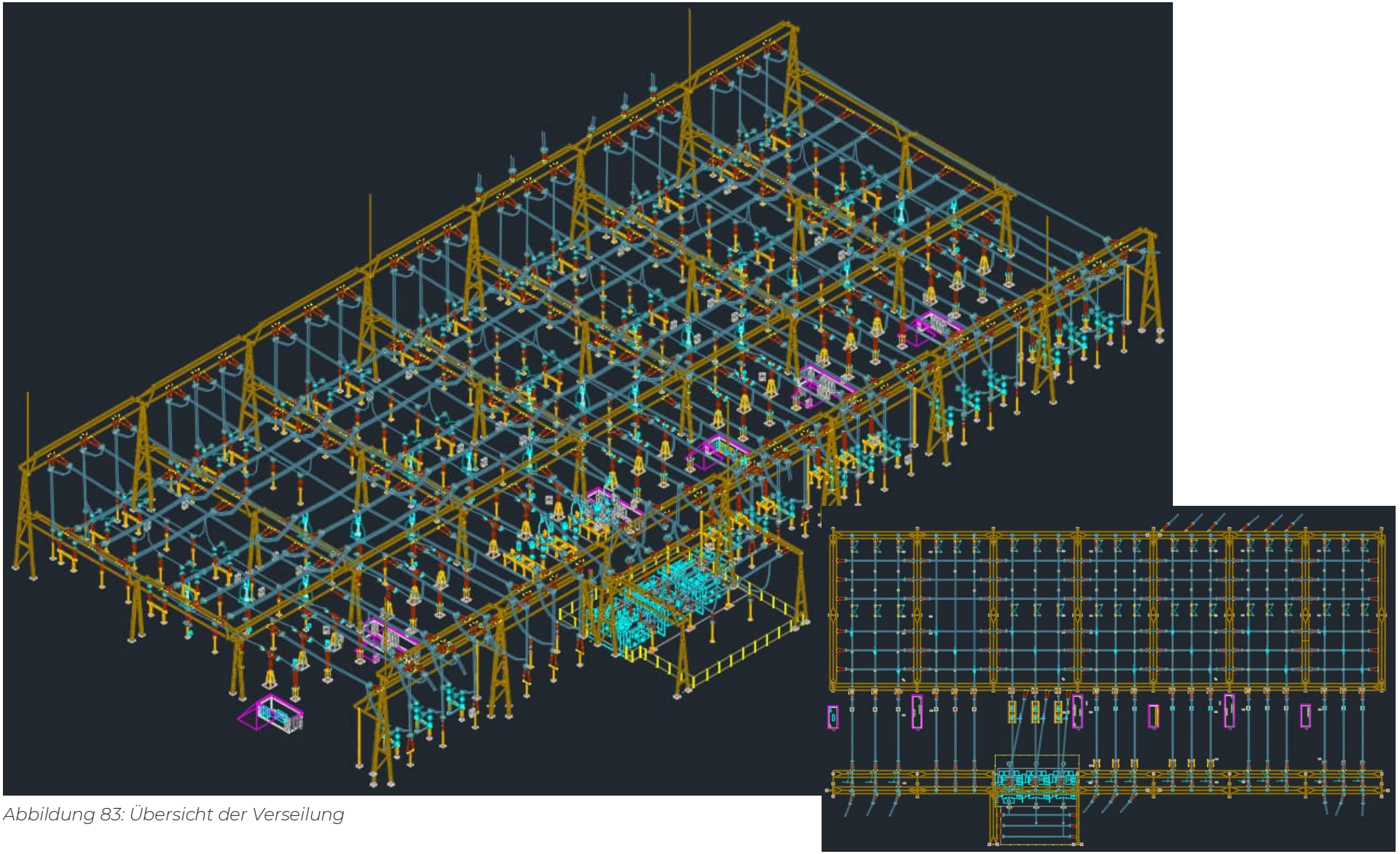


Abbildung 83: Übersicht der Verseilung

Modell zusammenführen

Nach der Fertigstellung der Verseilung und der Modellierung der Teilanlagen kann nun der letzte Schritt der Modellierung erfolgen. Im vorgegebenen «Part 3D Model» können nun alle Teilanlagen zu einem Gesamtmodell zusammengeführt werden. Hierbei kann die Punktwolke zugezogen und die einzelnen Teilanlagen platziert werden.

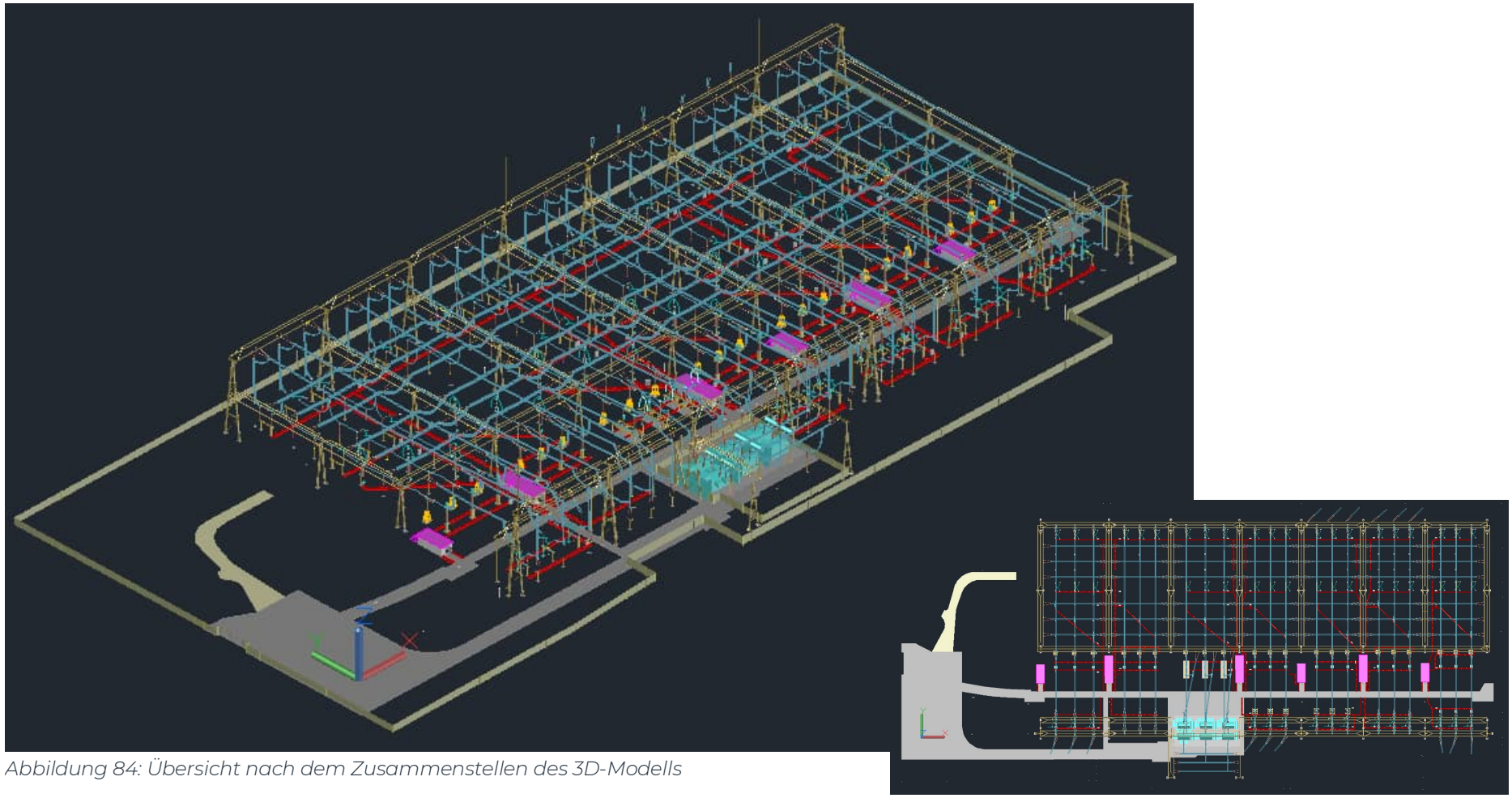


Abbildung 84: Übersicht nach dem Zusammenstellen des 3D-Modells

Zeichnungen erstellen

Für die Dokumentation des digitalen Zwillings können direkt aus dem 3D-Modell Zeichnungen erstellt werden. Hierzu kann ein neuer Zeichnungscontainer erstellt werden um anschliessend in diesem einen gewünschten Plan zu erstellen.

Über den Befehl «Einfügen» muss erstmals das 3D-Modell in den Zeichnungscontainer referenziert werden. Anschliessend kann über den Befehl «Zeichnung» ein neuer Plan erstellt werden. Hierzu öffnet sich ein Fenster, um die Art des gewünschten Plans abzufragen und die Parameter dazu einzugeben.

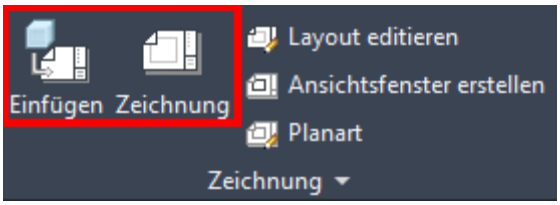


Abbildung 85: Zeichnungen erstellen

Für Detailpläne oder spezifische Abschnitte des 3D-Modells zu dokumentieren, können auch einzelne Assemblies oder Teilanlage in den Zeichnungscontainer referenziert werden, um anschliessend den gewünschten Plan zu erstellen.

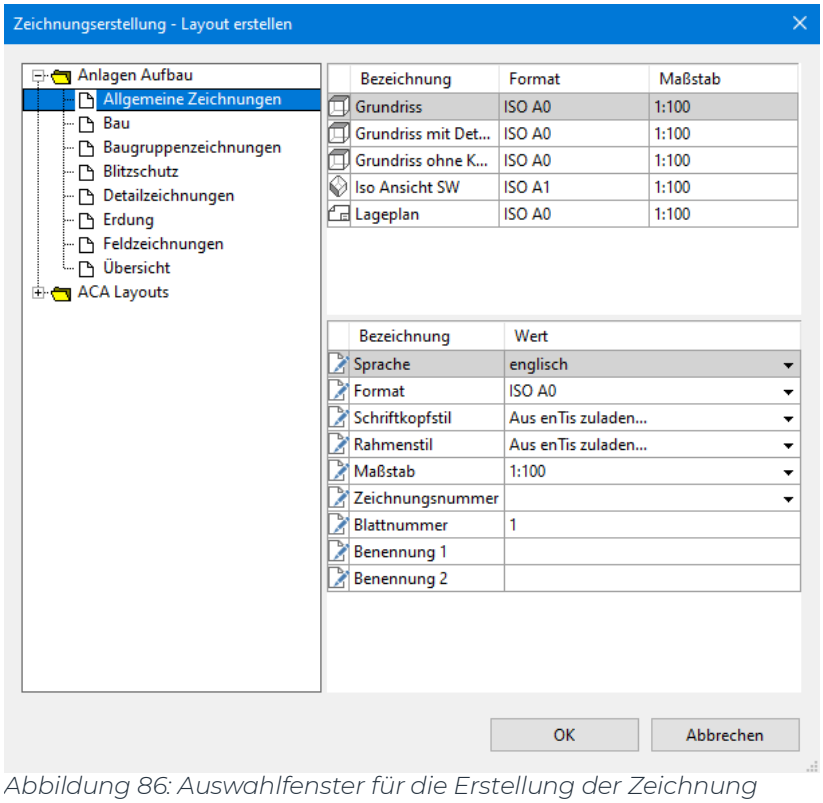


Abbildung 86: Auswahlfenster für die Erstellung der Zeichnung

Für die Dokumentation des 3D-Modells wurde ein Situations-, Grundriss-, Quer- und Längsschnitt, Kabelkanal- und Blitzschutzplan, sowie eine 3D-Ansicht erstellt.

Listen erstellen

Mithilfe von Primtech 3D können automatisch Mengenstücklisten sowie Positionsstücklisten generiert werden. Diese helfen für die Dokumentation der Anlage.

Dazu muss das Projekt in der Projektstruktur ausgewählt werden. Danach können die Funktion «Mengenstücklisten» oder «Positionsstücklisten» verwendet werden.

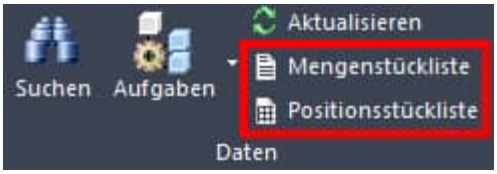
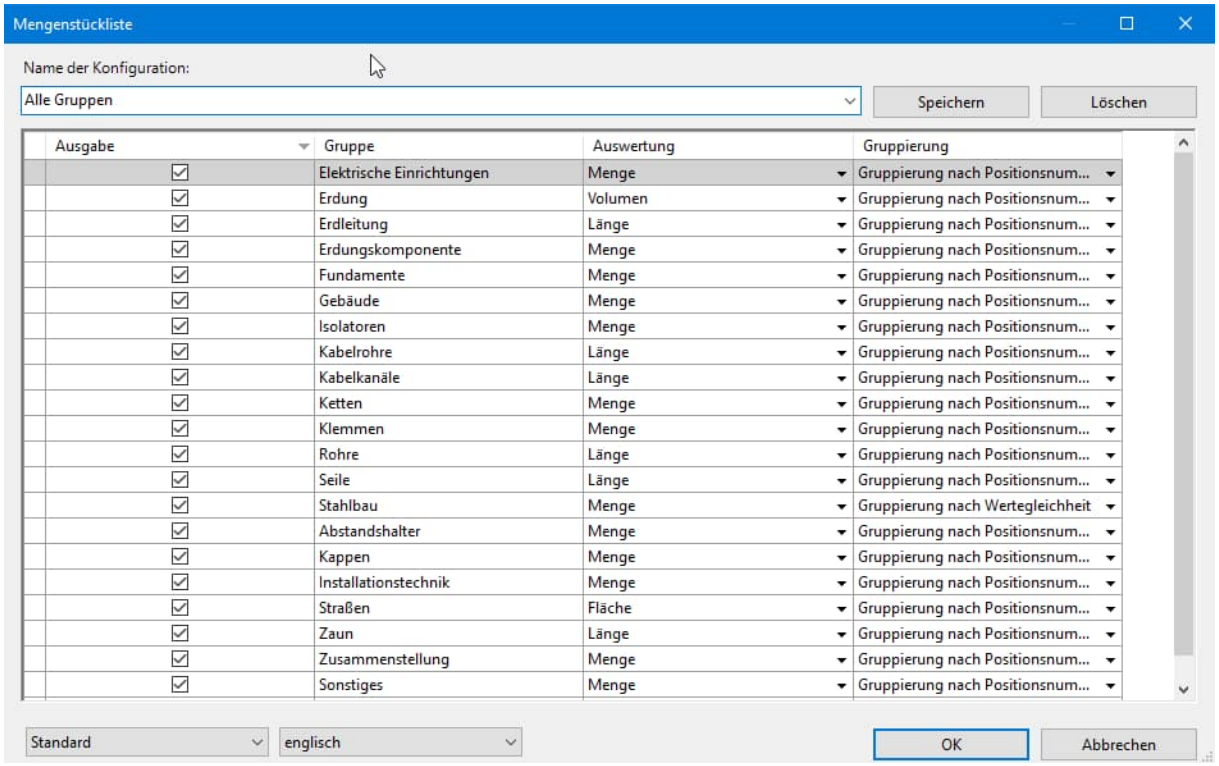


Abbildung 87: Erstellen von Stücklisten

Nach Abruf der Mengenstückliste kann ausgewählt werden, was alles in die Zusammenstellung aufgenommen werden soll. So kann kurzerhand eine Zusammenstellung sämtlicher Geräte erfolgen, ohne einen grossen Aufwand zu betreiben.



Ausgabe	Gruppe	Auswertung	Gruppierung
☑	Elektrische Einrichtungen	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Erdung	Volumen	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Erdleitung	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Erdungskomponente	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Fundamente	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Gebäude	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Isolatoren	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Kabelrohre	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Kabelkanäle	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Ketten	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Klemmen	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Rohre	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Seile	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Stahlbau	Menge	Gruppierung nach Wertegleichheit
☑	Abstandshalter	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Kappen	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Installationstechnik	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Straßen	Fläche	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Zaun	Länge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Zusammenstellung	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...
☑	Sonstiges	Menge	Gruppierung nach Positionsnum...

Abbildung 88: Bearbeitungsfenster der Stücklisten

Die Positionsstückliste dient zur Zuteilung von Positionen eines Details. Wenn beispielsweise ein Detailplan von einem Gerät erstellt wird, können auf dem Plan Positionen vergeben werden. Diese Positionen können Zuweisungen auf Klemmen, Materialien oder ähnliches sein. Dazu kann anschliessend eine Positionsstückliste erstellt werden, mit der Übersicht welches Material, wie viele Klemmen, etc. das Detail enthält.

In der Dokumentation wurde eine gesamte Mengenstückliste des kompletten Modells beigelegt, um auch bei der Modellierung des 3D-Modells zu unterstützen.

Das 3D-Modell ist im öffentlichen Ordner in Primtech 3D gesichert und kann darüber eingesehen werden.

Abschluss

Nach Fertigstellung des Projektes kann dieses anschliessend über den Button «Einchecken» in die Datenbank gespeichert werden. Dies hat der Vorteil, dass das Projekt in einem Server gespeichert wird und wenn ein anderer Anwender das Modell bearbeiten möchte, dies bei sich auschecken kann.

- Die Abweichung des digitalen Zwillings von der Punktwolke sollte nicht mehr als ±20 mm oder ±50 mm gemäss den definierten Objekten betragen.
- Die Vorbereitung für die Modellierung erfordert eine gründliche Untersuchung der Anlage, die Identifizierung von Funktionen, Komponenten, Kabeln und Gebäuden sowie die Klärung von Fragen zur Anlageneinteilung.
- Eine ausführliche Dokumentierung der Modellierung ist notwendig.

3.2.6 Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling

Mithilfe des Vergleichs soll die Qualität und die Vollständigkeit des digitalen Zwillings gewährleistet werden.

Abbildung 89: Prüfen-Symbol

Nach Fertigstellung der Modellierung des digitalen Zwillings sollen mithilfe der vorgegebenen Anforderungen die Übereinstimmung der Punktwolke mit dem digitalen Zwilling überprüft werden. Hier werden Stichproben basierend auf den wichtigsten Abmessungen als Vergleich genommen. Sollten Differenzen zu den Anforderungen auftreten, werden diese dokumentiert und anschliessend korrigiert.

Prüfungsablauf

Die Prüfung des Modelles darf nie durch den Ersteller erfolgen. Hier soll das vier-Augen-Prinzip angewendet werden. Zusätzlich werden Personen, welche sich tagelang mit dem Modellieren einer Anlage auseinandersetzen «Betriebsblind». Das heisst also, dass diejenigen, die eng mit der Anlage vertraut sind, möglicherweise nicht in der Lage sind, Fehler oder ineffiziente Aspekte im Modell zu bemerken, weil sie sich zu sehr auf ihre eigenen Annahmen und Erfahrungen stützen. Dies kann dazu führen, dass wichtige Aspekte übersehen oder falsch eingeschätzt werden.

Qualitätsprüfung

Die Qualitätsprüfung soll die vorgegebene Abweichung von der Punktwolke zum 3D-Modell gewährleisten. Hier wird auf die Genauigkeit der Nachmodellierung eingegangen. Sollten grössere Differenzen als die vorgegebene Toleranz auftreten, muss diese ausgebessert werden. Die Prüfung erfolgt durch Stichproben und sollen mittels Distanzmessungen protokolliert werden.

Vollständigkeitsprüfung

Die Vollständigkeitsprüfung eines 3D-Modells ist ein kritischer Schritt im Prozess der Modellprüfung. Sie dient dazu sicherzustellen, dass das erstellte 3D-Modell alle erforderlichen Informationen und Eigenschaften enthält, um seinen Verwendungszweck zu erfüllen. Eine gründliche Vollständigkeitsprüfung ist unerlässlich, um sicherzustellen, dass das Modell korrekt und funktionsfähig ist, und potenzielle Probleme oder Fehler zu identifizieren, bevor das Modell in den nächsten Phasen des Projekts verwendet wird oder an einen Kunden übergeben wird.

Toleranzen

Bei Prüfung der Toleranzen zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling, wurden nachstehende Ergebnisse geliefert:

Messdistanz	Länge / Höhe	Max. Toleranz	Abweichung Punktwolke zu 3D-Modell
01	Länge	±20mm	+9mm
02	Länge	±20mm	+7mm
03	Länge	±20mm	+6mm
04	Länge	±20mm	-13mm
05	Länge	±20mm	+9mm
06	Länge	±20mm	+10mm
07	Länge	±20mm	+13mm
08	Länge	±20mm	-16mm
09	Länge	±20mm	-8mm
10	Länge	±20mm	-12mm
11	Höhe	±20mm	-15mm
12	Höhe	±20mm	+13mm
13	Höhe	±20mm	-8mm
14	Höhe	±20mm	+7mm
15	Höhe	±20mm	-3mm
16	Höhe	±20mm	-8mm
17	Höhe	±20mm	+5mm
18	Höhe	±20mm	+12mm
19	Höhe	±20mm	+15mm

20	Höhe	±20mm	-13mm
21	Höhe	±20mm	+8mm
22	Höhe	±20mm	-7mm
23	Höhe	±20mm	+2mm
24	Länge	±20mm	+9mm
25	Höhe	±50mm	-23mm
26	Länge	±50mm	-16mm
27	Länge	±50mm	-18mm
28	Länge	±50mm	+28mm
29	Länge	±50mm	-10mm
30	Länge	±50mm	-25mm

Tabelle 28: Toleranzen zwischen dem 3D-Modell und der Punktwolke

Die Messungen zur Prüfung ist im Anhang ANH-011 beigelegt.

- Bei der Prüfung des Modells darf der Ersteller nicht selbst prüfen, um das vier-Augen-Prinzip einzuhalten und mögliche Fehler zu erkennen.
- Die Qualitätsprüfung erfolgt durch Stichproben und Distanzmessungen, um die Genauigkeit sicherzustellen.
- Die Vollständigkeitsprüfung ist entscheidend, um sicherzustellen, dass das Modell alle erforderlichen Informationen enthält.

3.2.7 Prüfung der Freiluftschaltanlage

Abbildung 90: Analyse-Symbol

Nachdem die Vollständigkeit sowie der Vergleich mit der Punktwolke erfolgreich nachgewiesen wurde, kann nun mit der Prüfung des 3D-Modells der Abschluss der Modellierung stattfinden. Hierzu stellt Primtech 3D einige Funktionen bei, um die Funktionalität der Anlage zu prüfen und zu dokumentieren. In den folgenden Abschnitten wird auf diese Prüfungen eingegangen und die Ergebnisse dokumentiert.

Sämtliche Ergebnisse der einzelnen Prüfungen sind im Anhang ANH-012 dokumentiert.

Phasenprüfung

Die Phasenprüfung in einer Freiluftschaltanlage ist ein Verfahren, um sicherzustellen, dass die Phasen in einem elektrischen System korrekt verdrahtet und in der richtigen Reihenfolge angeschlossen sind. Dies ist äusserst wichtig, um Planungen für den Umbau oder einer Erweiterung in der Anlage korrekt zu planen und umsetzen zu können.

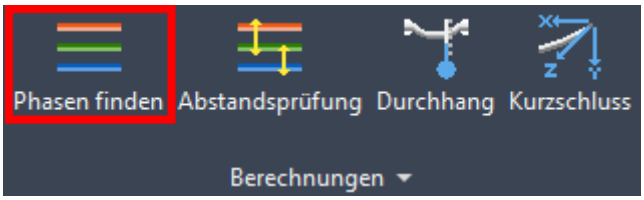


Abbildung 91: Durchführen der Phasenprüfung

Die Phasenprüfung erfolgt im Gesamtmodell und kann über den Befehl «Phasen finden» gestartet werden. Anschliessend erfolgt eine Aufforderung für die Wahl der Phase L1. Hierbei kann eine beliebige Verbindung ausgewählt werden, welche zur Phase L1 gehört. Anschliessend erfolgt die gleiche Aufforderung für die beiden Phasen L2 und L3. Nach Fertigstellung des Vorgangs werden die Phasen eingefärbt und man erhält eine Übersicht wie die Anlage verschaltet ist, sowie ein Simulationsfenster, um einzelne Phasen anzuzeigen oder auszublenden und Abstandsprüfungen durchführen zu können. Sollte diese nicht korrekt verschaltet sein, erfolgt eine Fehlermeldung mit möglichen Verschaltungsfehlern.

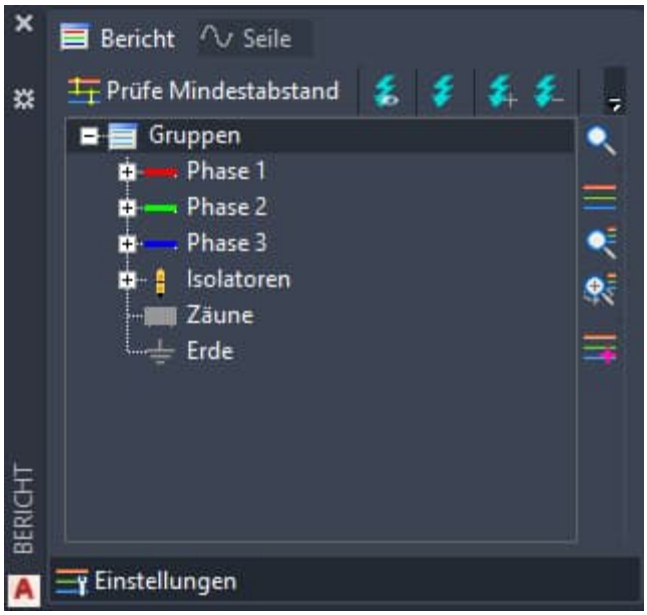


Abbildung 92: Ergebnis der Phasenprüfung

Die Prüfung hat ergeben, dass die gesamte Anlage korrekt verdrahtet und in der richtigen Reihenfolge der Phasen angeschlossen ist.

Abstandsprüfung

Die Abstandsprüfung dient dazu, die Mindestabstände in der Freiluftschaltanlage zu überprüfen. Diese Prüfung ist entscheidend, um sicherzustellen, dass ausreichender Abstand zwischen den leitenden Teilen besteht.

Die Norm DIN EN 61936-1 gibt nachstehende Mindestabstände für Freiluftschaltanlagen mit einer Nennspannung von 380 kV vor:

Spannungsbereich C ($U_m \geq 300$ kV) [1),2)]

U_n	U_m	U_{rB} [3)]	U_{rS}	Mindestabstand (N) Leiter/Erde		U_{rS}	Mindestabstand (N) Leiter/Leiter	
		1,2/50µs	Leiter/Erde 250/2500 µs	Leiter/Konstruktion	Stab/Konstruktion	Leiter/Leiter 250/2500 µs	Leiter/Leiter parallel	Stab/Leiter
kV	kV	kV	kV	mm	mm	kV	mm	mm
275	300	850/950	750	1 600 1 700 [4)]	1 900	1 125	2 300	2 600
		950/1 050	850	1 800 1 900 [4)]	2 400	1 275	2 600	3 100
380	420	1 050/1 175	850	1 900 2 200 [4)]	2 400	1 360	2 900	3 400
		1 175/1 300	950	2 200 2 400 [4)]	2 900	1 425	3 100	3 600
		1 300/1 425	1 050	2 600	3 400	1 575	3 600	4 200
480	550	1 175/1 300	950	2 200 2 400 [4)]	2 900	1 615	3 700	4 300
		1 300/1 425	1 050	2 600	3 400	1 680	3 900	4 600
		1 425/1 550	1 175	3 100	4 100	1 763	4 200	5 000
700	800	1 675/1 800	1 300	3 600	4 800	2 210	6 100	7 400
		1 800/1 950	1 425	4 200	5 600	2 423	7 200	9 000
		1 950/2 100	1 550	4 900	6 400	2 480	7 600	9 400

[1)] Die verwendeten Abkürzungen entsprechen den einleitenden Angaben in diesem Abschnitt
[2)] Weitere Spannungsreihen sind in DIN EN 61936-1 enthalten
[3)] U_{rB} ist anwendbar für Leiter/Leiter und für Leiter/Erde
[4)] Mindestabstand, der für den höheren Wert der Bemessungs-Steh-Blitzstoßspannung erforderlich ist

Abbildung 93: Mindestabstände gemäss der Norm DIN EN 61936-1

Wie bei der Phasenprüfung beschrieben, kann direkt danach über den Befehl «Prüfe Mindestabstand» die Abstandsprüfung erfolgen.

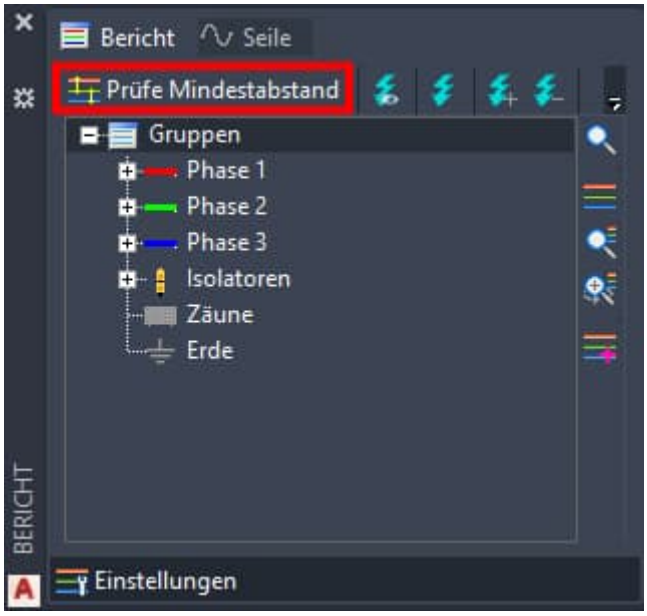


Abbildung 94: Durchführen der Mindestabstandsprüfung

Nun können die eingehaltenen Mindestabstände in den verschiedenen Bereichen eingetragen und ausgeführt werden.

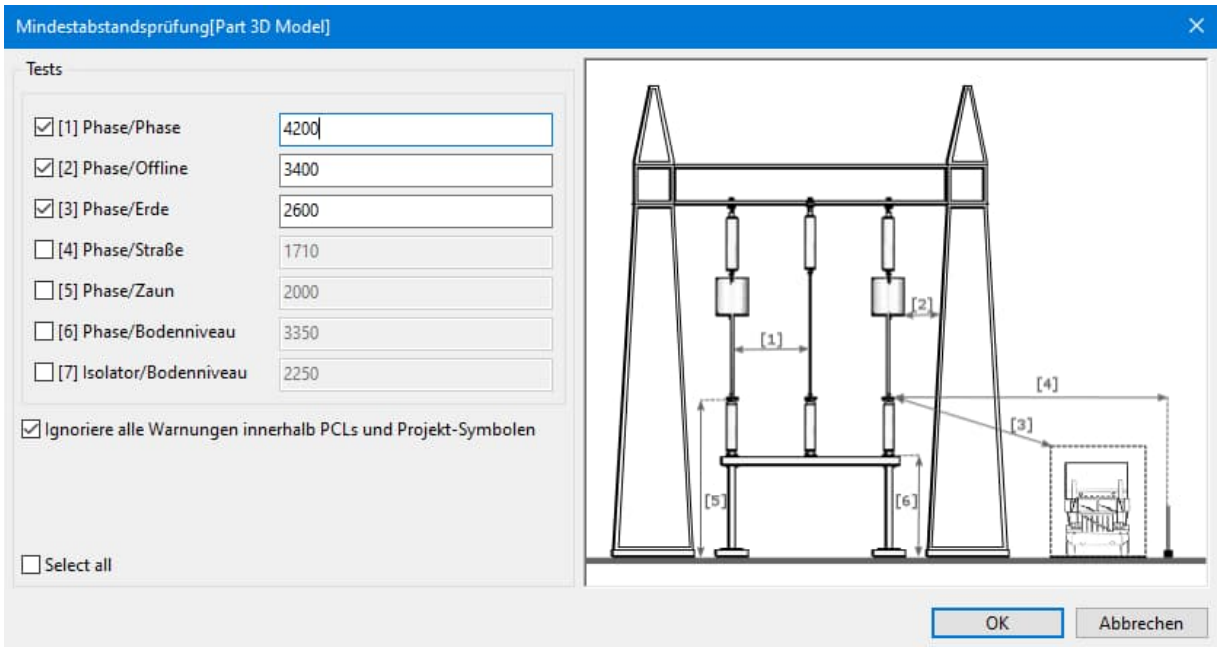


Abbildung 95: Bearbeitungsfenster für die Definierung der Mindestabstände

Sollten Abstände gemäss der Norm (SR 734.2) nicht eingehalten werden, erfolgt eine Auflistung sämtlicher Unterschreitungen der Mindestabstände. Diese werden im Modell angezeigt und mit dem aktuellen Abstand vermasst.

Die Prüfung hat ergeben, dass sämtliche Mindestabstände eingehalten wurden.

Die Blitzschutzprüfung in einer Freiluftschaltanlage ist ein Verfahren, das durchgeführt wird, um sicherzustellen, dass die Anlage und ihre Komponenten vor den Auswirkungen von Blitzeinschlägen geschützt sind. Blitzeinschläge können erhebliche Schäden an elektrischen Anlagen verursachen und zu Unterbrechungen des Stromflusses führen.

Beim Blitzschutz wird zwischen dem inneren und äusseren Blitzschutz unterschieden. Der äussere Blitzschutz zielt darauf ab, einen Blitz sicher von der Schaltanlage und ihren Komponenten abzulenken oder abzuleiten, bevor er Schäden verursachen kann. Der innere Blitzschutz konzentriert sich auf die Sicherstellung, dass ein Blitzschlag, der den äusseren Blitzschutz durchdringt oder nahe der Schaltanlage auftritt, keine Schäden an elektrischen Komponenten oder Personen verursacht und in den Boden abgeleitet wird.

Die Blitzschutzprüfung des 3D-Modells erfolgt über den Befehl «Blitzschutz» und überprüft den äusseren Blitzschutz. Nach Ausführung des Blitzschutzbefehls öffnet sich das Parameterfenster, um die Vorgaben an den Blitzschutz zu definieren. Nach Definierung des Blitzschutzes können anschliessend die Blitzschutzstangen und die Seile als Blitzschutz ausgewählt werden und mit dem Befehl «Erzeugen» den Blitzschutz visualisiert werden.

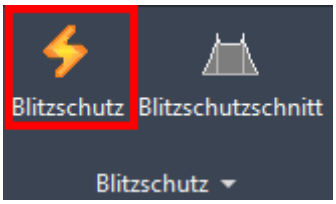


Abbildung 96: Durchführen der Blitzschutzprüfung

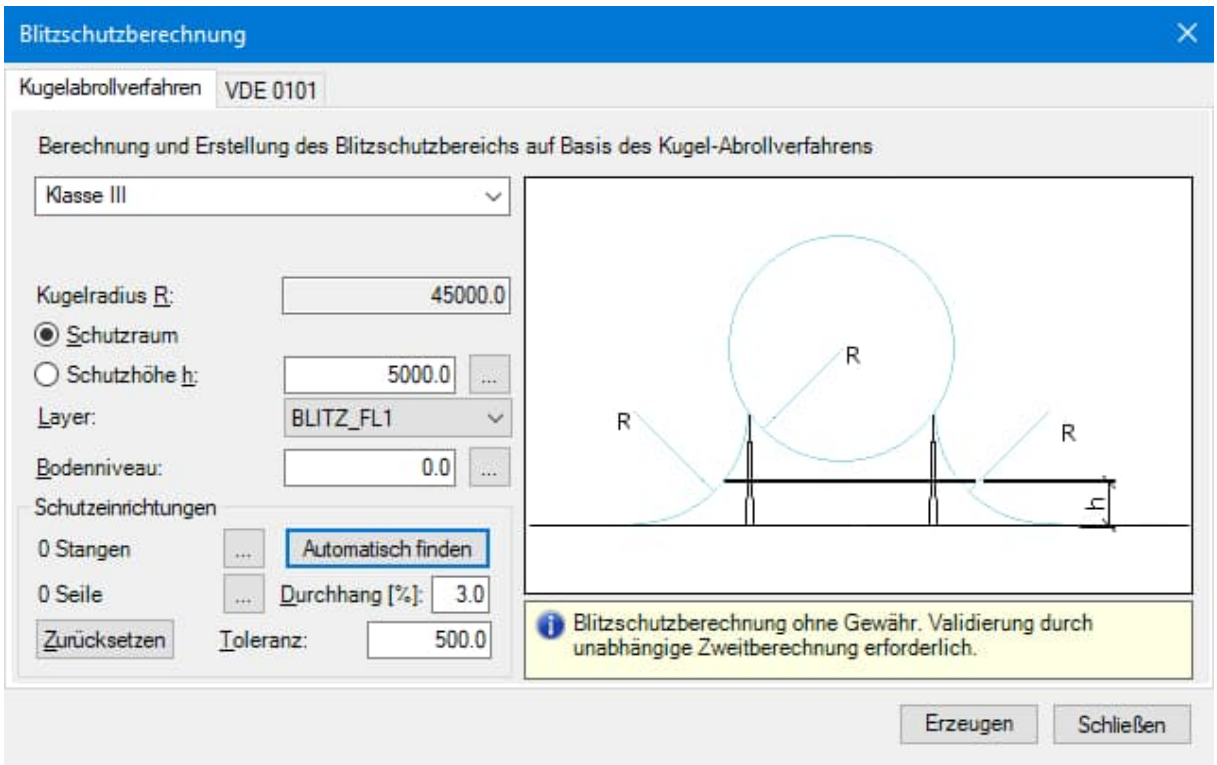


Abbildung 97: Bearbeitungsfenster für die Blitzschutzprüfung

Je nach Anforderungen und der gültigen Norm in der Spannungsebene sowie dem Standort der Anlage, muss die Klasse des Blitzschutzes ausgewählt werden. Diese kann

mithilfe der Norm DIN EN 62305-2 (IEC 62305-2) ausfindig gemacht werden. Gemäss der Norm wird der Blitzschutz in vier Klassen unterteilt:

Auffangkriterium			Blitzschutzklasse			
	Symbol	Einheit	I	II	III	IV
Kleinster Entladungsstrom	I	kA	3	5	10	16
Blitzkugelradius	h_B	m	20	30	45	60

Abbildung 98: Blitzschutzklassen gemäss der Norm DIN EN 62305-2

Die Abbildung zeigt, dass die Blitzschutzklasse 1 einen Abdeckungsradius von 20m hat und die Blitzschutzklasse 4 einen Radius von 60m hat. Das bedeutet, dass eine kleinere Klasse weniger Schutz bietet als eine hohe.

Es wurde die Blitzschutzklasse vier ausgewählt, da sich die Anlage in einem industriellen Gebiet befindet und umliegend einige hohe Masten und Gebäude vorhanden sind, welche grundsätzlich auch als Blitzschutz dienen.

Die Prüfung hat ergeben, dass der äussere Blitzschutz nicht genügend ist.

Mögliche Gründe dafür, sind in diesem Kapitel in der «Zusammenfassung» beschrieben.

Check Klemmen

Mithilfe des Befehls «Check Klemmen» kann herausgefunden werden, ob bei den Verbindungen und Anschlusspunkte an den Geräten, Ketten, Portale, etc. Klemmen vergessen wurden. Dies ist erforderlich, um die Vollständigkeit der Anlage zu prüfen. Möchte anschliessend eine Stückliste aus dem Modell erstellt werden, so kann die korrekte Anzahl von Klemmen eruiert werden.

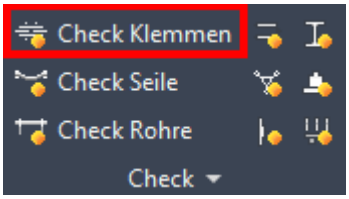


Abbildung 99: Durchführen des Klemmenchecks

Der Check kann im 3D-Modell erfolgen und wird automatisch durchgeführt. Sollten alle Klemmen vorhanden sein, ergibt die Auswertung keine Warnungen. Sollten Klemmen vergessen gegangen sein, so wird der mögliche Bereich der fehlenden Klemme im Modell angezeigt.

Die Prüfung hat ergeben, dass sämtliche Klemmen in der Anlage vorhanden sind.

Check Seile

Abbildung 100: Durchführen des Seilchecks

Mithilfe des Befehls «Check Seile» kann herausgefunden werden, ob Seilverbindungen nicht korrekt an den Komponenten angeschlossen sind. Es kann beim Modellieren möglich sein, dass ein falscher Anschlusspunkt für das Seil ausgewählt wurde und die Seilverbindung somit nicht korrekt erstellt wurde. Grundsätzlich sind falsche Seilverbindungen direkt bei der Phasenprüfung sichtbar, da die Verschaltung der Anlage in diesem Fall falsch eingefärbt wird. Trotzdem ist es hilfreich, diese Prüfung nochmals durchzuführen.

Der Check kann im 3D-Modell erfolgen und wird automatisch durchgeführt. Sollten alle Seilverbindungen vorhanden und korrekt sein, ergibt die Auswertung keine Warnungen. Sollten Seilverbindungen vergessen oder falsch angeschlossen sein, so wird der mögliche Bereich angezeigt.

Die Prüfung hat ergeben, dass sämtliche Seilverbindungen in der Anlage vorhanden und korrekt angeschlossen sind.

Zusammenfassung

Die Phasen- und Abstandsprüfung hatten positive Ergebnisse. Dies zeigt, dass die Anlage gemäss den gültigen Normen erstellt worden ist. Die Modellierung des 3D-Modells wurde ebenfalls korrekt gemacht, da sämtliche Prüfungen erfolgen konnten und keine Fehlermeldungen entstanden sind. Somit ist die funktionale Prüfung des 3D-Modells vollbracht und mit der nötigen Richtigkeit dokumentiert.

Die Blitzschutzprüfung konnte erfolgreich durchgeführt werden. Die Visualisierung zeigt jedoch, dass nicht die gesamte Anlage gegen äussere Blitzeinschläge geschützt ist. Dies kann daraus resultieren, dass umliegende Masten, weitere Blitzschutzvorrichtungen oder Gebäude den Schutz auch innerhalb der Anlage beeinflussen können. Diese Teile wurden jedoch nicht modelliert, Aus diesem Grund konnte der Blitzschutz nicht vollständig kontrolliert werden.

Der Check der Klemmen und Seile war erfolgreich.

- Die Phasenprüfung und Abstandsprüfung wurden erfolgreich durchgeführt und haben positive Ergebnisse erbracht.
- Die Blitzschutzprüfung zeigt, dass nicht die gesamte Anlage gegen äussere Blitzeinschläge geschützt ist, aber dies könnte durch umliegende Blitzschutzvorrichtungen oder Gebäude kompensiert werden.
- Der Check der Klemmen und Seile war erfolgreich, was auf korrekte Verbindungen hinweist.

3.2.8 Qualitätsprüfung 3D-Modell

Nach dem Erstellen eines 3D-Modells einer Freiluftanlage muss eine umfassende Qualitätsprüfung durchgeführt werden. Dies dient der Sicherstellung, dass das Modell den technischen und qualitativen Anforderungen entspricht. Diese Überprüfung erfolgt im Rahmen des vier-Augen-Prinzips.

Prüfungsablauf

Die Prüfung umfasste diverse Aspekte des Modells:

- Sicherstellen, dass die Projektkonfiguration korrekt angelegt wurde.
- Überprüfung der Symbolik, Assemblies und Module.
- Gewährleistung der korrekten Integration und Positionierung aller 3D-Objekte, mit besonderer Beachtung von Toleranzen, z.B. maximal ± 20mm für Fundamente und elektrische Einrichtungen.
- Visuelle Inspektionen von Strukturelementen, Gebäuden, Straßen und anderen relevanten Objekten.
- Prüfung der elektrischen und statischen Anschlusspunkte sowie ihrer Kennzeichnungen.
- Überprüfung der Modellvollständigkeit und der Möglichkeit, diverse technische Prüfungen wie Phasen-, Kurzschluss- und Blitzschutzprüfungen durchzuführen.
- Stichprobenartige Mengen- und Positionslisten-Erstellung.

Prüfung

Die Prüfung erfolgte anhand einer Checkliste. Die Checkliste enthält die wichtigsten Punkte für die vollständige Erstellung des digitalen Zwillings. Je nach Anforderungen an den digitalen Zwilling, kann diese jedoch variieren.

Ergebnis

Nach der umfassenden Prüfung wurde das 3D-Modell mit einer Qualität von 100% als "OK" bewertet. Der Prüfprozess fand am 11.10.2023 statt. Es wurden keine Korrekturmassnahmen benötigt. Das entsprechende Dokument ist zu finden als Beilage unter:

«ANH-012 Checkliste Kontrolle 3D-Modell auf Vollständigkeit».

3.2.9 Technische Richtlinie mit Hinweisen und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D

Die technische Richtlinie mit Hinweisen und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D wurde nach der Modellierung des 3D-Modells unseres «UW Bravo» erstellt. Die technische Richtlinie gibt vor, wie die Modellierung mit Primtech 3D für die Erstellung eines 3D-Modells einer Freiluftschaltanlage modelliert und aufgebaut werden soll. Zusätzlich gibt sie vor, was in einer Freiluftschaltanlage modelliert werden soll und was nicht.

Die technische Richtlinie ist in unserem Dokumentenverwaltungssystem Keytech abgelegt unter dem Namen: BENT-000279237_A.01_technische Richtlinie mit Hinweise und Empfehlungen zur Modellierung mit Primtech 3D.

Die technische Richtlinie wurde dem Fachexperten zur Prüfung vorgelegt und erfolgreich bewilligt.

Da die Richtlinie viel Know-How sowie spezifische Arbeitsvorgänge der BENT enthält, darf diese nicht veröffentlicht werden. Aus diesem Grund wurde eine Genehmigung für die Richtigkeit und Vollständigkeit des Dokumentes eingeholt und im Anhang ANH-013 abgelegt.

3.2.10 Kalkulationstool

Das Kalkulationstool sollte in der Lage sein, eine Aufwandabschätzung von ±10% der Kosten zu kalkulieren. Das Tool soll für die Offerterstellung im Bereich der Modellierung für Freiluftschaltanlagen eingesetzt werden.
Für eine möglichst transparente und erfahrungsnahe Kalkulation wurden die vier letzten Projekte der BENT im Bereich der Modellierung beigezogen. In allen vier Projekten wurde der gleiche Leitfaden angewendet wie in dieser Diplomarbeit im Teilprojekt «digitaler Zwilling».

Für die Erstellung des Kalkulationstools wurde die Arbeitsweise von Primtech 3D integriert. Die Kalkulation beginnt mit der Erstellung der Symbole bis hin zum Zusammenführen des kompletten 3D-Modells und kann somit nach einer ersten Sichtung der Freiluftschaltanlage bestmöglich kalkuliert werden.

Das Kalkulationstool ist in unserem Dokumentenverwaltungssystem Keytech abgelegt unter dem Namen: BENT-000279236 _A.01_Kalkulationstool 3D-Modellierung.

Resultat

Aus Gründen des geistigen Eigentums und der Wahrung kommerzieller Interessen kann dieses Dokument nicht innerhalb dieser Arbeit präsentiert oder offengelegt werden. Es wurde dem Fachexperten zur Bewertung und Durchsicht zur Verfügung gestellt. Das Bewertungsraster für die Kalkulation Laserscanning ist im Anhang ANH-014 zu finden.

4 Projektabschluss

4.1 Projektüberwachung

Während der Projektlaufzeit traten einige Herausforderungen und Veränderungen auf, die eine Anpassung der geplanten Abläufe erforderlich machten. Im Folgenden wird dargestellt, welche Termine nicht eingehalten werden konnten, die zugrunde liegenden Ursachen, sowie die daraus resultierenden Massnahmen und Erkenntnisse für zukünftige Projekte.

Position 29 - Meilenstein 3 "Genehmigung Budget":

Der geplante Termin für die Genehmigung des Budgets konnte nicht eingehalten werden. Die Verzögerung trat auf, da Herr Del Degan aufgrund von Verpflichtungen in anderen Projekten am ursprünglich geplanten Freitag nicht verfügbar war. Dies führte zu einer Verschiebung des Meilensteins auf den 18.09.23. Trotz der noch ausstehenden offiziellen Budgetgenehmigung wurde in Absprache mit Herrn Del Degan mündlich vereinbart, mit der Projektrealisierung fortzufahren. Dabei wurde das unternehmerische Risiko, dass das Projekt aufgrund von Budgetproblemen gestoppt oder umstrukturiert werden könnte, als gering eingeschätzt.

Erkenntnis: Bei zukünftigen Projekten sollte mehr zeitliche Flexibilität für die Genehmigungsprozesse eingeplant werden, insbesondere wenn Schlüsselpersonen involviert sind.

Position 32 - Scannen der Freiluftschaltanlage mit Trimble X7:

Die Arbeit musste nach 5 Stunden unterbrochen werden, da technische Probleme mit dem Laser auftraten, die eine Reparaturdauer von über einer Woche nach sich zogen. Eine Alternative in Form des Leica BLK 360 war zu diesem Zeitpunkt anderweitig in Gebrauch, wodurch ein Vorziehen des Punktes 36 nicht möglich war.

Erkenntnis: Ein Pool an Backup-Geräten oder alternative Technologien sollten stets verfügbar gehalten werden, um Ausfälle zu kompensieren.

Position 36 - Scannen der Freiluftschaltanlage mit Leica BLK 360:

Unerwartete Herausforderungen, wie schlechtes Wetter und der krankheitsbedingte Ausfall eines Mitarbeiters, führten zur Verkürzung dieser Aufgabe. Als Reaktion darauf wurde die Option 40 priorisiert, bei der am 25.09.23 die Freiluftschaltanlage mit einem mobilen Scanner innerhalb von 6 Stunden gescannt wurde.

Erkenntnis: Für künftige Projekte ist es von Vorteil, alternative Szenarien und Handlungsstrategien bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen, um bei unvorhersehbaren Ereignissen schnell reagieren zu können.

Position 62 – Modellierung 3D-Modell:

Die Modellierung einer Freiluftschaltanlage ist immer sehr schwierig abzuschätzen. Einerseits hängt dies von der Grösse der Anlage ab, sowie von den Details in einer Anlage. Wenn eine Anlage sehr komplex ist, kann es möglich sein, dass die Modellierung um einiges länger geht als die eingeplante Zeit. Auch für diese Anlage hatte ich nun einen Tag mehr Aufwand als geplant, aufgrund von einigen unterschiedlichen Geräten und Details.

Erkenntnis: Für künftige Aufwandschätzungen beim Modellieren ist eine detailliertere Betrachtung der Punktwolke von Vorteil. Ein Gerät ist vielleicht auf den ersten Blick in jedem Feld vorhanden, kann aber durch kleine Anpassungen jeweils wieder unterschiedlich sein.

Abschliessend zeigt diese Überwachung, dass trotz sorgfältiger Planung immer Unvorhergesehenes eintreten kann. Es ist essenziell, flexibel auf solche Situationen zu reagieren und geeignete Kontingenzpläne in der Hinterhand zu haben.

4.2 Evaluation der Zielerreichung

	Endergebnisse	Erfolgskriterien	Erreichungsgrad
1.	Die Laserscanner der verschiedenen Anbieter wurden verglichen hinsichtlich: a. Genauigkeit b. Geschwindigkeit c. Einsatzgebiet	• Es wurden mindestens zwei Laserscanner verglichen. o Es wurden mindestens 10 Distanzen pro Laserscanner gemessen und mittels Distanzmessgerät verglichen. o Es wurde pro Laserscanner festgehalten, wie lange es dauert zwei Scans zu erstellen. Dies auf einer hohen, mittleren und einer tiefen Auflösungsstufe. o Für mindestens drei Einsatzgebiete besteht eine eindeutige Empfehlung für den zu verwendeten Laserscanner.	100%
2.	Eine konsolidierte Punktwolke als ReCap-Datei auf deren Grundlage ein digitaler Zwilling erstellt werden kann, steht zur Verfügung.	• Die Punktwolke lässt sich in Primtech 3D (Modellierungssoftware) ohne Fehlermeldung öffnen. Alle zu modellierenden Anlageteile sind abgebildet. • Die im Projekt unter Punkt 4 noch zu erarbeiten minimalen Qualitätspunkte sollen erfüllt sein	100%
3.	Verbesserungsvorschläge für die Schulung der Scanoperatoren, welche in AIS Laserscanning durchführen.	• Es liegen mindestens fünf Verbesserungsvorschläge vor.	100%
4.	Eine technische Richtlinie, welche konkrete Anweisungen gibt, wie eine AIS am besten mittels Laserscanner zu erfassen ist.	• Die technische Richtlinie enthält mindestens fünf konkrete Anweisungen zum effizienten Scannen und mindestens fünf einzuhaltende Qualitätsmerkmale der Punktwolke.	100%

5.	Ein einfaches Kalkulationstool auf Excelbasis, mit welchem die Kosten für ein Scanprojekt abgeschätzt werden können.	• Das Kalkulationstool ermöglicht eine präzise Abschätzung von ±10% der Kosten und Aufwände für die Erstellung der Punktwolke.	100%
6.	Eine Anleitung mit Tipps und Tricks, sowie den wichtigsten Funktionen der verwendeten Modellierungssoftware Primtech 3D.	• Der Auftraggeber bestätigt, dass die Anleitung die wichtigsten Funktionen der Software abdeckt und das Feedback von mindestens 95% der Anwender von Primtech 3D positiv ausfällt.	100%
7.	Erstellung einer Checkliste zur Prüfung und Abnahme der erstellten Punktwolke.	• Die Punktwolke wird mit mindestens 90% als qualitativ hoch genug für die Erstellung des digitalen Zwillings bewertet. Die Bewertung (Checkliste) umfasst mindestens 20 Kriterien.	100%
8.	Dokumentation der Modellierung des digitalen Zwillings anhand der Punktwolke.	• Mithilfe der Dokumentation kann ein Nutzer von Primtech 3D die ausgewählte AIS vollständig nachkonstruieren (Grund-kenntnisse in Primtech 3D vorausgesetzt).	100%
9.	Ein Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling.	• Der Vergleich zwischen der Punktwolke und dem digitalen Zwilling soll ergeben, dass sich diese nicht mehr als ±20 mm voneinander unterscheiden.	100%
10.	Eine technische Richtlinie, welche konkrete Hinweise gibt, wie eine AIS am effizientesten modelliert werden kann.	• Die technische Richtlinie enthält mindestens 10 konkrete Hinweise und Empfehlungen zur effizienten Modellierung.	100%
11.	Ein einfaches Kalkulationstool auf Excelbasis, mit welchem die Kosten für die Erstellung des digitalen Zwillings anhand einer Punktwolke abgeschätzt werden können.	• Das Kalkulationstool ermöglicht eine präzise Abschätzung von ±10% der Kosten und Aufwände für die Erstellung des digitalen Zwillings.	100%

Tabelle 29: Auflistung für Auswertung der Zielerreichung

4.3 Abnahmeprotokoll durch BENT

Die Projektziele wurden alle erfüllt. Die noch ausstehende Präsentation wird gut vorbereitet und die Verständnisfragen werden kein Problem darstellen, da das Projekt allen Teammitgliedern gut bekannt ist.

Es ist wünschenswert, dass beim Kickoff-Meeting des Folgeprojektes mindestens ein Teammitglied dieses Projektes dabei ist, um offene Fragen zu klären.

Wir bitten den Auftraggeber das Projekt wie vorgelegt und präsentiert abzunehmen und das Projektteam definitiv aufzulösen. Ausserdem bitten wir um die Möglichkeit in entspannter Atmosphäre die Leistungen des Teams nochmals zu würdigen.

4.4 Erkenntnisse und Massnahmen

4.4.1 Laserscanner

Der Laserscanner NavVis VLX 2 hat gezeigt, dass er für unsere Tätigkeiten der ideale Scanner momentan am Markt ist. Er konnte durch seine Schnelligkeit, einfachen Handhabung sowie dem Ergebnis der Qualität überzeigen. Aufgrund unserer positiven Erfahrungen in diesem Projekt hat sich BENT dazu entschlossen, ein weiteres Projekt zur Anschaffung eines mobilen Scanners mit SLAM-Technologie zu starten. In diesem neuen Vorhaben wird BENT den aktuellen Markt für solche Geräte gründlich analysieren, Preise evaluieren und eine Kosten-Nutzenanalyse durchführen. Diese Schritte werden BENT dabei helfen, fundiert zu entscheiden, ob die Anschaffung eines solchen Geräts für das Unternehmen sinnvoll ist.

In die Schulung der Scanoperateure wurde die Information integriert, dass der Trimble X7 ein Gyroskop-Sensor integriert hat, welche den ungefähren Standort relativ zur Ausgangposition ermittelt, wenn er verschoben wird. Diese Funktion wird durch einen horizontalen Transport gestört, was schlussendlich zu einer Fehlfunktion führt. Diese lässt sich aktuell nur durch den Hersteller selbst beheben.

4.4.2 Primtech 3D

Wie bereits im Projekt erwähnt, sehen wir für das 3D-Modellieren von Freiluftschaltanlagen eine grosse Zukunft. Aus diesem Grund wurde diskutiert, noch mehr Mitarbeiter im Bereich des 3D-Modellierens auf Primtech 3D zu schulen und auszubilden, was wiederum bedeutet, weitere Investitionen in die Mitarbeiter sowie Lizenzen zu tätigen.

4.5 Fazit / Lessons learned

4.5.1 Fernando Xatruch

Im Verlauf dieser Diplomarbeit musste ich an diesen Leitsatz der Informatik denken: «Never change a running system»

Der Ausdruck wird so nur im deutschen Sprachraum angewandt und hat seinen Ursprung wohl im sportlichen Grundsatz "Never change a winning team". Jeder fähige Coach weiss jedoch, dass diese Regel nur für eine begrenzte Zeit gilt. Frei nach Gottfried Keller: Gutes bleibt nicht gut, wenn es nicht besser wird. Die Aufgabe eines Projektleiters ist es, sein Team kontinuierlich zu verbessern, um die Leistung zu steigern oder zumindest den aktuellen Status zu halten. Selbst in der Sportwelt: die Mannschaft des FC Bayern München wird regelmässig umstrukturiert, obwohl es kaum noch mehr zu gewinnen gab. Gerade bei einer Diplomarbeit reicht gut nicht. Man will das Beste von sich zeigen. Genau das wurde mir in diesem Projekt fast zum Verhängnis. Was genau war nun passiert:

Beim Scanner schultern wir normalerweise den Scanner samt Stativ, um die Scanposition zu ändern. Dadurch ragt ein Teil des Scanners über den Kopf des Scanoperators. Trotz ausreichender Sicherheitsreserven wollte ich diesen Zustand vermeiden. Es könnte andere Freiluftschaltanlagen geben, bei denen die zulässige Arbeitshöhe eingeschränkt ist. Für solche Situationen plante ich, diesen modifizierten Arbeitsprozess zu standardisieren, um eine intuitive Anwendung zu gewährleisten. Wir haben also den Laserscanner Trimble X7 horizontal, maximal auf Brusthöhe verschoben, unwissend, dass im Scanner ein Gyroskop arbeitet, um die Verschiebung des Scanners ungefähr zu berechnen. Durch diese falschen Informationen wollte der Scanner nach wenigen Scans nicht mehr arbeiten. Auch ein Neustart brachte keine Besserung. Erst durch den Service des Herstellers konnte der Trimble X7 wieder funktionstüchtig gemacht werden. Dies dauerte jedoch zwei Wochen. Eine grosse Herausforderung bei einem dicht getakteten Zeitplan wie dem einer Diplomarbeit.

Man sollte den Leitsatz «Never change a running system» nicht falsch interpretierten. Es geht nicht darum, einen Prozess nie zu aktualisieren, nur weil es im Grossen und Ganzen funktioniert. Es geht vielmehr darum, einen Prozess nicht in dem Moment zu verändern, in dem kritische Arbeiten anstehen oder ausgeführt werden. Und meine Diplomarbeit war definitiv ein solcher kritischer Prozess. Zumindest für mich. Mein Dank gilt hier speziell Dominik dessen grossartige Vorarbeit uns eine klares und vorrausschauendes Risikomanagement ermöglicht hat. Schnell fanden wir im Team eine passende Lösung für den weiteren Verlauf des Projektes. Wir verzichteten auf drei Komplettscans des Unterwerks Bravo und begnügten uns mit überlappenden Teilscans, so bestand weiterhin die Möglichkeit alle gesetzten Ziele zu erreichen. Dass sich der mobile Scanner dann so gut geschlagen hat war unerwartet. Wir haben bereits mehrere Offerten mit dieser Technologie erstellt und schon zwei Aufträge erhalten. Eine mich erfüllende Nachricht, dass unsere Firma die Resultate der Diplomarbeit direkt nutzt und daraus Gewinn generieren kann.

Was habe ich den nun gelernt?

- Prozessanpassungen / Systemwechsel sind so zu planen, dass keine kritischen Arbeiten tangiert werden.
- Die Wichtigkeit guter Risiko- Analyse und gutem Management erkannt.

4.5.2 Dominik Sieber

Mit der Motivation, die BENT in das Thema der digitalen Welt noch näher zu bringen, habe ich unsere Diplomarbeit gestartet. Für mich hat dieses Motto zwei verschiedene Aspekte: Einerseits die Motivation, für meine Firma einen realitätsnahen Ablauf zum Thema zu erstellen, sowie mir einen Namen in diesem Bereich zu machen. Anderseits bin ich überzeugt, dass dieses Thema eine grosse Zukunft hat, nicht nur im Bereich von Freiluftschaltanlagen.

Für mich war die grösste Herausforderung das Modellieren des 3D-Modells mit Primtech 3D. Das Problem dabei war nicht das Knowhow, sondern der Prozess der Modellierung. Durch die Schulungen vom Softwarehersteller wird jeder Anwender auf ein gleiches Niveau gebracht und die Basics des Modellierens vermittelt. Doch wie in allen Prozessen, arbeitet jeder Mensch individuell nach seinem besten Ermessen. Aus diesem Grund wollte ich eine Richtlinie sowie einige Tipps an meine Kollegen übermitteln, um einerseits standardisiert und effizient arbeiten zu können. Ich bin überzeugt, dass damit der Grundstein für ein standardisiertes Arbeiten gelegt wurde.

Eine weitere Herausforderung war der Ausfall des Laserscanner. Als wir anschliessend erfahren haben, dass dies ein grösseres Problem ist, haben wir erstmal grosse Augen gemacht, da uns bewusst war, dass dies nicht so schnell geklärt werden kann. Als wir uns darauffolgend unterhalten haben, haben wir im Sinne des Projekts entschieden, dass eine komplette Punktwolke am wichtigsten ist. Dieser Entscheid war in unserem Empfinden richtig, da das Projekt ohne eine komplette Punktwolke ins Schwanken gekommen wäre und wir unsere Ziele nicht erreichen könnten.

Ein Projekt zu realisieren wo zwei Personen als Projektleiter eingesetzt werden ist nie einfach. Jede Partei hat jeweils eine eigene Meinung und Ansicht. Da ich und Fernando bereits während dem Studium eine Projekt- und eine Semesterarbeit zusammen gemacht haben, hatte ich überhaupt keine Bedenken, dass dies nicht funktionieren würde. In kritischen Momenten konnte jeweils einer von uns einen klaren Kopf behalten und die andere Partei unterstützen. Aus diesem Grund geht meinen Dank auch an Fernando, der mich in stressigen Momenten unterstützt hat, wenn ich den Wald vor lauter Bäume nicht mehr gesehen habe.

Ich bin sehr zufrieden mit unserer Arbeit, da wir auch positives Feedback von den Anwendern erhalten haben. Zudem konnte unser Auftraggeber bereits Teile dieser Arbeit für Aufträge einsetzen, was mir die Bestätigung gibt, dass wir hier eine tolle Arbeit abgeliefert haben.

Was habe ich den nun gelernt?

- Projektablaufplan ist das A und O in einem Projekt.
- Zeitpuffer können bei der Planung enorm wichtig sein.
- Projekte zu zweit haben einige Herausforderungen, können wiederum aber sehr hilfreich sein. Die gegenseitige Unterstützung und offene Kommunikation ist der ausschlaggebende Faktor für ein erfolgreiches Projekt.

4.6 Ausblick

Die Digitalisierung und Visualisierung von Infrastrukturanlagen wie Hochspannungsschaltanlagen mittels 3D-Modellierung eröffnet neue Möglichkeiten für die Betriebsführung und Wartung. Ein prominentes Beispiel ist die jüngste Entwicklung eines ETH-Startups, das ein innovatives Trainings- und Inspektionstool auf Basis der Microsoft HoloLens anbietet. Diese Technologiekombination birgt ein erhebliches Potenzial zur Steigerung der Effizienz, Genauigkeit und Sicherheit unserer monatlichen Kontrollinspektionen.

Die bei diesen regelmässigen Inspektionen zu erledigenden Aufgaben sind umfangreich und erfordern eine genaue und systematische Überprüfung. Das Tool könnte eine interaktive Führung durch die Liste der zu kontrollierenden Punkte bieten, wobei jede überprüfte Aufgabe direkt im System bestätigt wird. Diese Automatisierung könnte eine erhebliche Zeitersparnis bedeuten und die Genauigkeit der Kontrollen erhöhen.

Zusätzlich zur systematischen Führung könnte die HoloLens-Brille uns physisch zu den spezifischen Orten innerhalb des Umspannwerks führen, an denen die Kontrollaufgaben durchgeführt werden müssen. Diese Art der Augmented Reality Navigation könnte die Fehlerrate reduzieren und die Sicherheit während der Inspektionen erhöhen in dem sie zu vermeidende Areale visuell kennzeichnet.

Im Falle eines Fehlers oder eines identifizierten Problems bietet die Technologie eine einfache und effektive Methode zur Dokumentation des Fehlers. Mit der HoloLens können Fotos, Sprachnotizen und Texteingaben aufgenommen und in einer zentralen Datenbank gespeichert werden. Dies erleichtert nicht nur die Fehlererkennung und -behebung, sondern auch die Nachverfolgung und Analyse über längere Zeiträume.

Die Aussicht auf eine mögliche Zusammenarbeit mit dem Start-up-Unternehmen könnte einen erheblichen Mehrwert darstellen, indem es die Integration modernster Augmented-Reality-Technologie in unsere bestehenden Inspektions- und Wartungsprozesse ermöglicht. Dies ist ein visionärer Ansatz, der die Art und Weise, wie wir an die Wartung und Inspektion unserer Umspannwerke herangehen, grundlegend verändern könnte.

Insgesamt soll diese Technologieinitiative den Weg zu einem effizienteren, präziseren und sichereren Betriebsmanagement ebnen, das mit der fortschreitenden digitalen Innovation im Bereich der Infrastrukturinstandhaltung im Einklang steht.

Auf der anderen Seite steht die Entwicklung der Laserscanner. Obschon der SLAM-Algorithmus seine Wurzeln in den 80er Jahren hat, erlebt er mit den Aufkommen von mobilen Laserscannern wie der Leica BLK2GO oder dem in diesem Projekt untersuchten NavVis VLX seinen Durchbruch im Laserscanning. Parallel ermöglicht er die simultane Erkennung der aktuellen Position und die Erstellung der Umgebungskarte. Mit der Veränderung der Position innerhalb des Raumes, ändern sich alle Umgebungsbezüge in Relation zum Gerät, wodurch der SLAM-Algorithmus seine Schätzung mit den frischen Positionsinformationen verfeinern kann. SLAM operiert als zyklischer Prozess – je häufiger das Gerät die Iterationen durchläuft, desto präziser kann es seine Lage im Raum festlegen. Gerade in diesem Bereich werden in den nächsten Jahren grosse Fortschritte erwartet, welche zu noch schnelleren und genaueren Erstellungen von Punktwolken führen werden, so dass sie beim Einsatz auf Flugdrohnen mit entsprechenden Geräten ein besseres Mass an Genauigkeit erreichen werden können.

5 Eigenständigkeitserklärung

Die Verfasser bestätigen mit ihrer Unterschrift, dass die vorliegende Arbeit selbstständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel erstellt wurde.

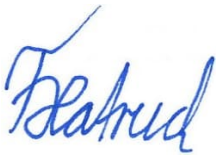
Die aus fremden Quellen (einschliesslich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Inhalte sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch nicht vorgelegt worden.

Unterschrift: Niedergösgen, 23.10.2023

Dominik Sieber

Unterschrift: Niedergösgen, 23.10.2023



Fernando Xatruch

6 Verzeichnisse

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Dienstleistungsportfolio BENT 10
Abbildung 2: wichtigste Kunden BENT 11
Abbildung 3: Auszug unserer Netzwerke und Partner 11
Abbildung 4: Projektorganisation 22
Abbildung 5: Zieldefinition mittels Zielscheibe -Orignalvorlage: TEKO 24
Abbildung 6: Projekstrukturplan Hauptübersicht 27
Abbildung 7: Projekstrukturplan Teil Laserscanning 28
Abbildung 8:Projekstrukturplan Teil digitaler Zwilling 28
Abbildung 9: Projektablaufplan Gesamtprojekt 31
Abbildung 10: Auswertung der Risikoanalyse 39
Abbildung 11: Ablaufprozess der Laserscanning-Technologie 48
Abbildung 12: Verweis auf den Anhang betreffend Kontrollmessungen 58
Abbildung 13: Vergleich der Laserscanner anhand der Abweichungen 62
Abbildung 14: Vergleich der Abweichungen zwischen Höhe und Länge der Laserscanner 62
Abbildung 15: Vergleich der Laserscanner anhand des Verhältnisses der Abweichung zur Distanz 63
Abbildung 16: Vergleich zwischen Realität und Digitalisierung 71
Abbildung 17: Hand-Laserdistanzmessgerät @iStock Credit: kalasek 72
Abbildung 18: 2D-Schnittplan eines Anlagenfeldes 73
Abbildung 19: Laserscanner Trimble X7 @ shutterstock.com 2004946592 74
Abbildung 20: Ablauf für die Erstellung eines digitalen Zwillings 75
Abbildung 21: Software-Symbol 77
Abbildung 22: Auswertung Verständlichkeit 79
Abbildung 23: Auswertung Nützlichkeit der Tipps und Tricks 80
Abbildung 24: Auswertung der wichtigsten Funktionen 80
Abbildung 25: Auswertung Gesamteindruck 81
Abbildung 26: Know-How-Symbol 83
Abbildung 27: Dokumentation-Symbol 83
Abbildung 28: Ergebnis und Freigabe anhand der Prüfung der Punktwolke 85
Abbildung 29: Modellierung-Symbol 86
Abbildung 30: Ablauf für die Übersichtsbeschaffung der Anlage 87

Abbildung 31: Anlagenübersicht-Symbol 89
Abbildung 32: Anlagenfunktion-Symbol 89
Abbildung 33: Grundriss Punktwolke - Analyse Freileitungen unten 90
Abbildung 34: Grundriss Punktwolke - Analyse Transformatoren 90
Abbildung 35: Grundriss Punktwolke - Analyse Freileitungen oben 91
Abbildung 36: Anlagenidentifizierung-Symbol 91
Abbildung 37: Definition Feldnamen 92
Abbildung 38: Komponentenidentifizierung-Symbol 93
Abbildung 39: Beispielausschnitt für die Komponentenidentifizierung 93
Abbildung 40: Einpolschema nach der Komponentenidentifizierung 97
Abbildung 41: Seil-/Rohridentifizierung-Symbol 98
Abbildung 42: Nebenanlagenidentifizierung-Symbol 100
Abbildung 43: Übersicht Relaishäuser 100
Abbildung 44: Übersicht Kabelkanäle 101
Abbildung 45: Übersicht Steuerschränke 101
Abbildung 46: Umgebungsidentifizierung-Symbol 102
Abbildung 47: Übersicht Zaunanlage 102
Abbildung 48: Übersicht Strasse 103
Abbildung 49: Übersicht Beleuchtung 103
Abbildung 50: Übersicht nicht zu modellierende Objekte 104
Abbildung 51: Ablauf Modellierung 105
Abbildung 52: Primtech 3D-Startsymbol 106
Abbildung 53: Erstellung neues Projekt 106
Abbildung 54: neu angelegtes Projekt 107
Abbildung 55: Projektdaten 107
Abbildung 56: Übersicht Module 108
Abbildung 57: Übersicht Assemblies 109
Abbildung 58: Übersicht Symbols 109
Abbildung 59: Übersicht Zusammenstellung 3D-Modell 111
Abbildung 60: Übersicht Erstellung neues Symbol 112
Abbildung 61: Übersicht erstellte Fundamentsymbole 113
Abbildung 62: Meldefenster - Öffnen des Symbols nicht möglich 113
Abbildung 63: Zuweisung der Symbole für die Stücklisten 114

Abbildung 64: Öffnen eines Symbols zum bearbeiten 114
Abbildung 65: Importieren der Punktwolke in Primtech 3D 114
Abbildung 66: Zuschneiden der Punktwolke 115
Abbildung 67: Ablauf für das Zuschneiden der Punktwolke 116
Abbildung 68: Auswahl des Standartfundamentes in der enTis-Bibliothek 117
Abbildung 69: Anpassung Fundament 118
Abbildung 70: Bearbeitungsfenster für das Skalieren von Objekten 118
Abbildung 71: Angepasste Fundament anhand der Punktwolke 119
Abbildung 72: Auswahl des Stahlbaus in der enTis-Bibliothek 120
Abbildung 73: Vergleich des ausgewählten Stahlbaus mit der Punktwolke 121
Abbildung 74: Auswahl des Gerätes in der enTis-Bibliothek 123
Abbildung 75: Vergleich zwischen dem Gerät und der Punktwolke 124
Abbildung 76: Erstellung eines Assemblies 125
Abbildung 77: Auswahl des Symbols 126
Abbildung 78: Laden von Symbole in das Assemblie 126
Abbildung 79: Zusammengesetzte Assemblie 126
Abbildung 80: Assemblie für die Leitungs- und Sammelschienenportale 127
Abbildung 81: Setzen der Assemblies im Modul anhand der Punktwolke 128
Abbildung 82: Zusammenstellen der Module 129
Abbildung 83: Übersicht der Verseilung 130
Abbildung 84: Übersicht nach dem Zusammenstellen des 3D-Modells 131
Abbildung 85: Zeichnungen erstellen 132
Abbildung 86: Auswahlfenster für die Erstellung der Zeichnung 132
Abbildung 87: Erstellen von Stücklisten 133
Abbildung 88: Bearbeitungsfenster der Stücklisten 133
Abbildung 89: Prüfen-Symbol 134
Abbildung 90: Analyse-Symbol 137
Abbildung 91: Durchführen der Phasenprüfung 137
Abbildung 92: Ergebnis der Phasenprüfung 138
Abbildung 93: Mindestabstände gemäss der Norm DIN EN 61936-1 138
Abbildung 94: Durchführen der Mindestabstandsprüfung 139
Abbildung 95: Bearbeitungsfenster für die Definierung der Mindestabstände 139
Abbildung 96: Durchführen der Blitzschutzprüfung 140

Abbildung 97: Bearbeitungsfenster für die Blitzschutzprüfung 140
Abbildung 98: Blitzschutzklassen gemäss der Norm DIN EN 62305-2 141
Abbildung 99: Durchführen des Klemmenchecks 141
Abbildung 100: Durchführen des Seilchecks 142

6.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abkürzungsverzeichnis 5
Tabelle 2: Standorte BENT 10
Tabelle 3: Qualifikationsprofil Fernando Xatruch 19
Tabelle 4: Qualifikationsprofil Dominik Sieber 21
Tabelle 5: Projekt-Stakeholderanalyse 26
Tabelle 6: Legende zu Projektablaufplan 31
Tabelle 7: Kommunikationsplan während des Projektes 33
Tabelle 8: SWOT-Analyse für das Projekt 35
Tabelle 9: Projekt-Risikoanalyse 38
Tabelle 10: Legende zur Risikoanalyse 39
Tabelle 11: Budgetzusammenstellung 40
Tabelle 12: Eigenschaft/Funktion der einzelnen Scanner 53
Tabelle 13: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben Trimble X7 59
Tabelle 14: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben Leica BLK360 59
Tabelle 15: Auswertung Genauigkeits- und Toleranzangaben NavVis VLX 2 59
Tabelle 16: Auswertung Abweichungen Trimble X7 60
Tabelle 17: Auswertung Abweichungen Leica BLK 360 60
Tabelle 18: Auswertung Abweichungen NavVis VLX 2 61
Tabelle 19: zulässige Toleranzen zwischen der Punktwolke und dem 3D-Modell 86
Tabelle 20: Bezeichnung Anlagenfelder 92
Tabelle 21: Feld 02 - Leitung 2 - entfallene Komponenten 94
Tabelle 22: Feld 03 - Leitung 3 -ergänzende Komponenten 95
Tabelle 23: Feld 07 - Leitung 5 - entfallene Komponenten 95
Tabelle 24: Feld 07 - Leitung 5 - entfallene und ergänzende Komponenten 96
Tabelle 25: Feld 07 - Leitung 5 - angepasste Komponenten 96
Tabelle 26: Legende Symbole zum Einpolschema 97
Tabelle 27: Übersicht Seil-/Rohridentifizierung 99
Tabelle 28: Toleranzen zwischen dem 3D-Modell und der Punktwolke 136

Tabelle 29: Auflistung für Auswertung der Zielerreichung.....148

6.3 Literatur- und Quellenverzeichnis

Bouygues E&S InTec Schweiz AG. (2023). *EnerTrans*. Von http://enertrans.ch abgerufen

Dressler, S. (14. 06 2021). *www.bachelorprint.ch*. Von Bachlor Print: https://www.bachelorprint.ch/richtig-gendern/gendergerechte-sprache/ abgerufen

entegra. (2023). *primtech 3d*. Von https://www.primtech.com/de/ abgerufen

ra. (06. 09 2023). (T. Olten, Hrsg.) Von https://tekoedu.sharepoint.com/sites/a_O-TEL-20-TSDA-Betreuung-Sieber_Xatruch/Freigegebene%20Dokumente/Sieber_Xatruch/Aufgabenstellung_Sieber_Xatruch.pdf abgerufen

Schenk, M. (2016). *Leitfaden Laserscanning im Anlagenbau Vorbereitung und Durchführung von Laserscanningprojekten für*. Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF, Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und -automatisierung IFF. Sandtorstraße 22 | 39106 Magdeburg: Fraunhofer IFF.

Wunderlich, T., Wasmeier, P., Ohlmann-Lauber, J., Schäfer, T., & Reidl, F. (2013). *Objektivierung von Spezifikationen Terrestrischer Laserscanner - Ein Beitrag des Geodätischen Prüflabors der Technischen Universität München*. Lehrstuhl für Geodäsie, TUM, Lehrstuhl für Geodäsie. Technische Universität München: Lehrstuhl für Geodäsie TUM.

6.4 Anhangsverzeichnis

ANH-001: Pflichtenheft

ANH-002: Budgetplanung visiert

ANH-003: Vergleichsmessungen in der Freiluftschaltanlage Bravo

ANH-004: Beurteilung technische Richtlinie

ANH-005: Beurteilung Kalkulation Laserscanning

ANH-006: Anleitung mit Tipps und Tricks sowie die wichtigsten Funktionen in Primtech 3D

ANH-007: Detailauswertung Mitarbeiter

ANH-008: Beurteilung Anleitung

ANH-009: Auflistung Hochspannungskomponenten

ANH-010: Planableitung aus Primtech 3D des 3D-Modells

ANH-011: Distanzmessungen in der Freiluftschaltanlage Bravo. Anhand der Punktwolke und dem 3D-Modell in Primtech 3D

ANH-012: Checkliste – Prüfung 3D-Modell

ANH-013: Beurteilung technische Richtlinie

ANH-014: Beurteilung Kalkulationstool 3D-Modellierung

ANH-015: Statusberichte 1 bis 5