



Integration getrackter Eisenbahnausrüstung in eine Fachmodellumgebung

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades

Master of Science (M.Sc.)

an der Ingenieurfacultät Bau Geo Umwelt der
Technischen Universität München.

Betreut von Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
Sebastian Esser M.Sc.
Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Eingereicht von Jonas Schlenger [REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]
[REDACTED]

Eingereicht am 23. Oktober 2020

Abstract

When working with Building Information Modeling (BIM), not only the three-dimensional representation of the planned building is of great importance, but also the truthful integration of already existing structures. This provides the framework for each project. Since a majority of existing structures was built with conventional planning methods, remodeling becomes necessary. To shorten this time-consuming process a lot of research is done to automate as many work steps as possible.

In the field of infrastructure planning for example there is a research project called RIM-comb, which works on automatic recognition of existing railway equipment technology. With the help of a video survey, railway equipment elements can be tracked with type and location. So far the produced data is only stored in form of simple tables, which neither enable integration into BIM authoring tools nor allow interoperability.

Therefore the objective of this thesis is to develop a conversion of the gathered railway equipment elements into an object-oriented data format. The primary goal is to enable BIM capability and ensure the possibility to merge the model with other domain models. Therefore, web-based interfaces are used to remodel the underlying alignment and place the equipment elements along the side. Furthermore, data from Open Street Map (OSM) is gathered as a basis for comparison to the data of the video survey. In case of discrepancies, these are taken into account while creating the new model.

An essential part of the thesis is the development of a .NET based application, which gathers the information from various sources, compares them to each other, and finally merges them into an object-oriented data schema.

Zusammenfassung

Bei der Anwendung von Building Information Modeling (BIM) ist, neben einer dreidimensionalen Abbildung eines neu zu entwerfenden Bauwerks, auch die wahrheitsgetreue Integration von Bestandsdaten von essenzieller Bedeutung. Diese gibt die Rahmenbedingungen für jedes Projekt vor. Da ein Großteil der Bestandsbauwerke mit konventionellen Planungsmethoden errichtet wurde, ist eine Nachmodellierung der existierenden Infrastruktur von Nöten. Um diesen zeitintensiven Prozess zu beschleunigen, gibt es vielfältige Bestrebungen möglichst viele Arbeitsschritte zu automatisieren.

Im Bereich der Infrastrukturplanung gibt es beispielsweise das Forschungsprojekt RIM-comb, das sich unter anderem die automatische Bestandserfassung von Eisenbahnausrüstungselementen zur Aufgabe gemacht hat. Mit Hilfe einer Videobefahrung können bereits unterschiedliche Ausrüstungskomponenten mit Art und Positionierung erfasst werden. Die bisherige Abspeicherung der gewonnenen Daten in einer einfachen Tabellenform ermöglicht allerdings noch keine Integration in BIM Autorenwerkzeuge und schafft somit auch keine Interoperabilität.

Deshalb beschäftigt sich die vorliegende Arbeit mit der Überführung der Informationen zu den erfassten Eisenbahnausrüstungselementen in ein objektorientiertes Datenformat. Vorrangiges Ziel ist es dabei, BIM Tauglichkeit zu gewährleisten und eine Vereinigung des Modells mit anderen Domänenmodellen zu ermöglichen. Hierfür wird mit Hilfe von Daten aus webbasierten Schnittstellen die Gleisachse nachmodelliert und entlang dieser die Ausrüstungselemente platziert. Darüber hinaus wird Open Street Map (OSM) als Vergleichsgrundlage zu den Videodaten herangezogen, wobei auftretende Diskrepanzen mit in den Prozess der Modellbildung einfließen.

Wesentlicher Bestandteil der Arbeit ist die Entwicklung einer .NET basierten Applikation, die die Daten unterschiedlicher Herkunft einliest, miteinander vergleicht und anschließend in einem objektorientierten Datenformat vereint.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Aufbau der Arbeit	1
1.1	Einführung in die Thematik	1
1.2	Zielsetzung	2
1.3	Methodische Vorgehensweise	3
2	Building Information Modeling	4
2.1	Grundlagen	4
2.1.1	Definition	4
2.1.2	Planungs- und Koordinationsprozess mit BIM	6
2.1.3	Definition der Modellanforderungen	8
2.1.4	Datenaustausch im Zusammenhang von Open und Closed BIM	10
2.1.5	Datenaustauschszzenarien	11
2.1.6	Einsatzbereiche	12
2.2	BIM im Infrastrukturbereich	13
2.2.1	Unterschiede von Hochbau und Tiefbau	13
2.2.2	Relevanz durch den Stufenplan Digitales Planen und Bauen	14
2.2.3	Planungsablauf bei Eisenbahntrassen und Ausrüstungstechnik	16
2.3	Fazit BIM	17
3	Die Datenstruktur der Industry Foundation Classes (IFC)	19
3.1	Grundlagen	19
3.1.1	Definition und Hintergrund	19
3.1.2	Express	21
3.1.3	Geometrie Modellierung	23
3.2	IFC im Infrastrukturbereich	25
3.2.1	Aktueller Stand und zukünftige Erweiterungen	25
3.2.2	IFC Alignment	28
3.2.3	Möglichkeiten der Implementierung nicht definierter Objekte und Attribute - IFC Proxy Elemente	29
3.3	Alternative Datenformate zu IFC	30
3.3.1	Proprietäre Datenformate von Autodesk	30
3.3.2	RailML	31
3.4	Fazit	33
4	Erstellung einer IFC Datei anhand vorliegender Trassierungs- und Bahnausrüstungsdaten	35
4.1	Datengrundlage	35
4.1.1	RIMcomb	35
4.1.2	Open Street Map	38
4.2	Datenvergleich	41

4.2.1	WPF Viewer zum ersten optischen Vergleich	41
4.2.2	Vergleich der Trassierung	42
4.2.3	Vergleich punktförmiger Ausrüstungsgegenstände	46
4.3	Lösungsansätze zum Umgang mit Inkonsistenzen	48
4.3.1	Ansätze außerhalb des IFC Formats	48
4.3.2	Lösungsmöglichkeiten innerhalb des IFC Schemas	50
4.3.3	Gewählter Ansatz	51
4.4	Erstellung des IFC Modells	52
4.4.1	IFC Engine	52
4.4.2	Gesamtstruktur	53
4.4.3	Gleiszuordnung	55
4.4.4	Abspeichern der Trassierung	59
4.4.5	Integration der Ausrüstungselemente	60
4.4.6	Geometrische Repräsentation	60
4.4.7	Platzierung mit Local und Linear Placement	61
4.4.8	Property Set zur Verknüpfung doppelter Elemente	65
5	Verwendung des erstellten IFC Modells	67
6	Zusammenfassung und Ausblick	68
6.1	Bewertung der Ergebnisse	68
6.2	Einsatzgrenzen	69
6.3	Fortführungsmöglichkeiten und Ausblick	70
A	Digitaler Anhang	71
	Literaturverzeichnis	72

Abkürzungen

AIA	Auftraggeber-Informationsanforderungen
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BCF	BIM Collaboration Format
BIM	Building Information Modeling
bSDD	buildingSMART Data Dictionary
CDE	Common Data Environment
CNN	Convolutional Neural Network
COBie	Construction Operations Building Information Exchange
CSG	Constructive Solid Geometry
DB	Deutsche Bahn AG
DGM	digitales Geländemodell
ER	Exchange Requirements
GAEB	Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
IAI	International Alliance for Interoperability
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IRS	International Railway Standard
ISO	Internationale Organisation für Normung
LOD	Level of Detail
LST	Leit- und Sicherungstechnik
MMC	Multimodellcontainer
MVD	Model View Definitions
NBIMS	National BIM Standard
OKSTRA	Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen
OSM	Open Street Map
railML	Rail Markup Language
RTM	RailTopModel
STEP	Standard for the exchange of product model data
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
TUM	Technische Universität München
UML	Unified Modeling Language
URI	Uniform Resource Identifier
WPF	Windows Presentation Foundation
XML	Extensible Markup Language

Kapitel 1

Problemstellung und Aufbau der Arbeit

1.1 Einführung in die Thematik

Wenn man einen Blick auf die Veränderung der Produktivität unterschiedlicher Wirtschaftszweige in Deutschland wirft, ist deutlich zu erkennen, dass die Baubranche mitunter am schlechtesten abschneidet. Innerhalb der letzten 25 Jahre konnte sie, bemessen an der Bruttowertschöpfung pro Arbeitsstunde, nur einen sehr geringen Zuwachs verzeichnen, wo andere Bereiche ihre Produktivität um 40% erhöhen konnten. Dies hat seinen Ursprung zum Teil in der Individualität eines jeden Bauprojekts und den Herausforderungen, maschinelle Arbeit in solch einen Prozess einzubinden. Daneben dürfen aber Planungsfehler und mangelhafter Informationsaustausch zwischen den Beteiligten, speziell bei Großprojekten nicht unerwähnt bleiben (KOCIJAN, 2018).

Um solche Effizienzverluste zu verringern, gibt es vielfältige Lösungsansätze, wobei Building Information Modeling (BIM), welches die Digitalisierung der Baubranche mit sich zieht, zu den vielversprechendsten Ansätzen zählt. Hierbei handelt es sich um eine relativ neue Planungsphilosophie, die die Planung mit Hilfe von digitalen 3D-Modellen beinhaltet und vor allem vom regelmäßigen Informationsaustausch zwischen allen Involvierten lebt. Dabei wird mehr Aufwand in die Planungsphase gesteckt, um Fehler vor der Bauausführung zu erkennen, und so in der gesamtheitlichen Betrachtung eines Projekts an Effizienz zu gewinnen. Die Einführung von BIM birgt aber auch einige Hürden. Dazu gehören das notwendige Knowhow, die Investitionskosten in BIM-Autorenwerkzeuge und die großen Änderungen im Ablauf vertrauter Bauprozesse. Diese und weitere Gründe führen dazu, dass BIM in Deutschland bisher nur vereinzelt zum Einsatz kommt (KOCIJAN, 2018). Gerade im Infrastrukturbereich ist der Einsatz noch wesentlich geringer, da viele Autorenwerkzeuge und Datenformate ursprünglich auf den Hochbau ausgelegt wurden. Zwar existieren einige etablierte Planungswerkzeuge für die Infrastrukturplanung, allerdings mangelt es an Schnittstellen zum hochqualitativen Datenaustausch.

Mit dem Stufenplan Digitales Planen und Bauen soll dies nun geändert werden. Darin wurde ein Konzept vorgelegt, mit dem BIM stufenweise in die Planung von Verkehrsinfrastrukturprojekten eingeführt werden soll. Teil dieses Planes ist die verpflichtende Anwendung von BIM ab Ende 2020 bei sämtlichen Infrastrukturprojekten, die von der öffentlichen Hand ausgeschrieben werden. Somit schlüpft der Staat in eine Vorreiterposition und hofft durch die vermehrte Erfahrung mit neuen Planungsmethoden auf einen zunehmenden Einsatz von BIM in sämtlichen Fachbereichen des Bauingenieurwesens (I. M. WEISE et al., 2018) (BRAMANN & MAY, 2015).

Damit also mit dem Einsatz neuer Software zielgerichtet geplant werden kann, bedarf es aber nicht nur der Modellierung des zu errichtenden Objekts und der Anreicherung mit damit verknüpften Informationen. Vor allem die digitale Repräsentation des Bestands im unmittelbaren Umfeld ist auch eine wesentliche Grundlage, die für die erfolgreiche Durchführung eines Bauprojekts unabdingbar ist (MAASER et al., 2017). Gerade bei Linienebauwerken, wie zum Beispiel Gleisen verbirgt sich dahinter ein enormer Zeitaufwand. Darüber hinaus entsprechen vorhandene analoge Planunterlagen häufig nicht mehr exakt den realen Gegebenheiten, da zwischenzeitlich Umbauten und Erweiterungen nicht adäquat dokumentiert wurden. Deshalb ist eine alleinige Digitalisierung dieser Pläne nicht zielführend. Daneben werden Vermessungsarbeiten erforderlich.

Im Bereich der Eisenbahntechnik hat sich das Forschungsprojekt RIMcomb dieser Herausforderung angenommen. In Zusammenarbeit zwischen der Signon Deutschland GmbH, der Technische Universität München (TUM) und der AEC3 Deutschland GmbH geht es um die Entwicklung computergestützter Methoden, die die Planung von Bahnanlagen auf gewerkeübergreifender Ebene erleichtern sollen. Teil hiervon ist auch die eben erwähnte automatisierte Bestandsaufnahme. Hierfür werden Bahnstrecken per Videobefahrung aufgezeichnet. Durch die Verwendung eines neuronalen Netzes können dann anhand der einzelnen Bilder Bahnausrüstungselemente nach Art und Lage erfasst werden (WINKELBAUER et al., 2019). Bisher werden diese in Form einer Tabelle abgespeichert, was die Verwendung in BIM-Autorenwerkzeugen noch nicht ermöglicht.

1.2 Zielsetzung

Ziel dieser Arbeit ist es, die durch die Videobefahrung gewonnenen Daten über Eisenbahnausrüstungsgegenstände in ein objektorientiertes Datenformat zu überführen. Hierfür werden unterschiedliche Datenformate, die sich für diese Aufgabe eignen, beleuchtet und anhand von Abwägung zwischen den Vor- und Nachteilen die Wahl für das optimale Format getroffen. Dabei liegt der Augenmerk vor allem auf der übergeordneten Zielsetzung des RIMcomb Projekts, welche in der gewerkeübergreifenden Planung liegt. Somit muss das am Ende erzeugte Modell für die Verwendung in BIM-Autorenwerkzeugen und die Zusammenführung mit anderen Domänenmodellen aus dem Infrastrukturbereich geeignet sein.

Um dies zu erreichen, gilt es zuerst die Gleisachse anhand von Daten aus webbasierten Schnittstellen nachzumodellieren und anschließend die Ausrüstungsgegenstände entlang dieser zu platzieren. Ein weiterer wichtiger Bestandteil der Arbeit besteht in der Zuhilfenahme von Daten von Open Street Map (OSM). Diese sollen mit den Daten der Videobefahrung abgeglichen werden. Die dazu zu beantwortenden Fragen sind, wie genau die unterschiedlichen Datensätze übereinstimmen und wie Inhomogenitäten und Unsicherheiten von Seiten der Datengrundlage sinnvoll in den Modellbildungsprozess mit eingebunden werden können. Darüber hinaus soll analysiert werden, inwiefern eine

exakte geometrische Repräsentation der Ausrüstungselemente von Nöten ist, oder ob eine vereinfachte Abbildung ähnlich gute Ergebnisse erzielen kann.

1.3 Methodische Vorgehensweise

Begonnen wird in Kapitel 2 mit einer grundlegenden Einleitung zur BIM Thematik. Dazu gehören die Definition gängiger Begriffe und die Erklärung wichtiger Konzepte, die für das Verständnis der folgenden Abschnitte von wesentlicher Bedeutung sind. Darüber hinaus werden auch die Unterschiede zwischen BIM im Hochbau und im Infrastrukturbereich beleuchtet. Im folgenden Kapitel 3 geht es dann um das Industry Foundation Classes (IFC) Datenformat, welches eine mögliche Speicherstruktur im BIM Kontext darstellt. In diesem Zusammenhang werden alternative Datenformate angesprochen und deren Vor- und Nachteile gegenüber den IFC erörtert. Außerdem wird, wie im vorherigen Kapitel, auf die Besonderheiten dieses Formats im Infrastrukturbereich eingegangen. Die bisher erläuterten Grundlagen werden bei der Erstellung einer IFC Datei aus den zu Grunde liegenden Datensätzen zur Anwendung gebracht, was in Kapitel 4 beschrieben ist. Dabei wird der Fokus auf den Vergleich unterschiedlicher Datensätze und die Berücksichtigung möglicher Unstimmigkeiten gelegt. Danach folgt die Überprüfung der Funktionstauglichkeit der erzeugten Datei in typischen praktischen Arbeitsprozessen in Kapitel 5. Das abschließende Kapitel 6 bewertet die erzielten Gesamtergebnisse kritisch und legt mögliche Verbesserungsvorschläge und Möglichkeiten zur Fortführung vor.

Kapitel 2

Building Information Modeling

Der grundsätzliche Gedanke dieser Arbeit ist die Erweiterung des Anwendungsbereichs von BIM auf praktische Aufgabenstellungen im Bereich der Leit- und Sicherungstechnik (LST) als Spezialdomäne des schienengebundenen Verkehrs. Ganz konkret geht es um die Vereinfachung der Implementierung von BIM bei Bauprojekten im Bahnbereich, speziell bei der Planung von Sanierungsarbeiten im Teilbereich der Leit- und Sicherungstechnik. Deshalb wird direkt an erster Stelle erläutert, worum genau es sich beim BIM handelt. Neben den gebräuchlichen Begrifflichkeiten, den Änderungen im Verlauf des Planungsprozesses und den möglichen Anwendungsfällen gilt es aber auch die besonderen Herausforderungen von Linienbauwerken in diesem Zusammenhang zu verstehen. Auf all dies wird im Folgenden eingegangen.

2.1 Grundlagen

2.1.1 Definition

Beim BIM handelt es sich im weitesten Sinn um eine Art der Lean Produktion, beziehungsweise viel mehr um Lean Management. Die Lean Produktion kommt ursprünglicher Weise aus der Automobilindustrie, wohingegen das BIM voll und ganz auf die Bauindustrie zugeschnitten ist. Beide fokussieren sich darauf, mögliche Fehlerquellen frühzeitig zu erkennen und zu beseitigen, unnötige Tätigkeiten zu vermeiden und prozessorientiert vorzugehen. Daraus soll nicht nur Kosten- sondern auch Terminsicherheit gewährleistet werden (WERNIK, 2016). Anhand der Definition von BIM durch den National BIM Standard (NBIMS), die wohlgermerkt nur eine von vielen Definitionen ist, wird deutlich wie diese Ziele erreicht werden sollen:

„Building Information Modeling (BIM) is a digital representation of physical and functional characteristics of a facility. A BIM is a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life-cycle; defined as existing from earliest conception to demolition“ NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES, 2019

Zum einen handelt es sich also um eine digitale Planungsmethodik, die nicht nur das geometrische Erscheinungsbild eines Bauwerks abbildet, sondern auch einzelne Teilobjekte, wie zum Beispiel Wände oder Fenster, mit funktionellen Zusatzinformationen versieht. Die Geometrie wird für gewöhnlich in Form einer 3D Modellierung ausgeführt, was speziell im Hochbau ein wichtiger Bestandteil des Modells ist. Die nicht-geometriebezogenen Informationen geben dem Gebäudemodell Informationstiefe und ermöglichen es, das Modell

ohne großen Zusatzaufwand für spätere Simulationen und Berechnungen verwenden zu können. Des Weiteren liegt der Mehrwert in der Verwendung der Gebäudedaten über den gesamten Lebenszyklus des Gebäudes hinweg. Dies geht von der Entwurfsplanung zur Ausführung bis hin zum Betrieb, Umbau und Rückbau. Wichtig dafür ist es, die Gebäudeinformationen fortwährend einzupflegen und Datenverluste zwischen den einzelnen Phasen, wie es bisher oft der Fall ist, zu vermeiden. Ein weiterer Schlüsselbegriff ist das "shared knowledge". Das BIM lebt von einem gut funktionierenden Datenaustausch zwischen sämtlichen Beteiligten, was bedeutet, dass alle Projektteilnehmer zumindest in gewissen Maßen auf aktuelle Informationen der anderen Gewerke Zugriff haben. Damit kann auch eine gute Gesamtkoordination stattfinden, um gewerkeübergreifende Probleme zu beseitigen (BORRMANN et al., 2015).

Es lohnt sich aber auch einen Blick darauf zu werfen, was BIM nicht ist. Keinesfalls handelt es sich um ein allumfassendes Modell, das binnen Sekunden sämtliche gewünschten Informationen wiedergeben kann. Ganz zu Beginn müssen Ziele definiert werden, die man mit dem Einsatz von BIM erreichen möchte. Danach richtet sich auch die Informationseingabe, womit Fragestellungen, die über die Zieldefinitionen hinaus gehen, auch nicht ohne erheblichen Aufwand beantwortet werden können. Die Einpflegung der Daten stellt auch eine große Herausforderung dar, denn die Eingabe aller vorhandener Daten in das digitale Modell ist keinesfalls optimal. Man muss stets darauf achten nur die Daten, die für die Erfüllung der definierten Ziele notwendig sind, einzugeben und dies in einem angemessenen Detaillierungsgrad (auch Level of Detail (LOD) genannt). Anderenfalls entsteht ein erheblicher Mehraufwand ohne Nutzen. Zum anderen ist BIM auch keine einzelne Software, sondern eine Arbeitsmethodik, bei der eine Vielzahl verschiedener Softwareoptionen verwendet werden kann (EGGER et al., 2013).

Mit diesem Wissen lässt sich nun erkennen, dass mit der Verwendung von BIM ein erhöhter Planungsaufwand in den frühen Entwurfsphasen einhergeht, was in Abbildung 2.1 ersichtlich wird.

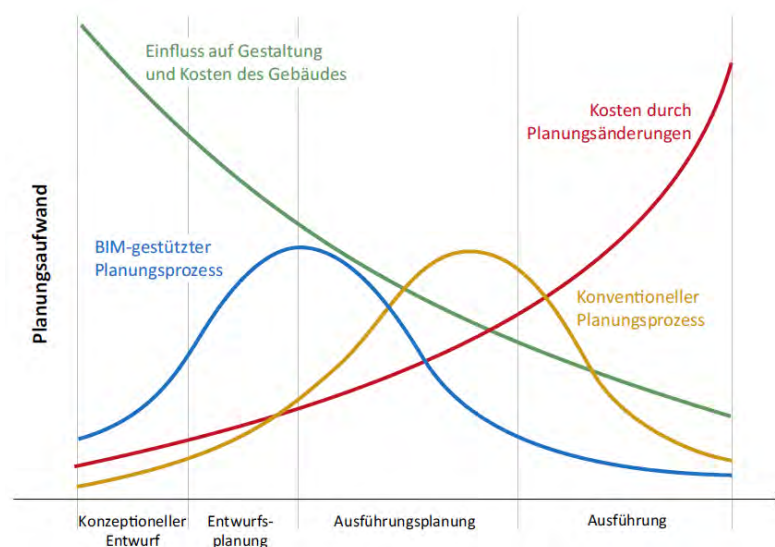


Abbildung 2.1: Planungsaufwand bei der Verwendung von BIM im Vergleich zu konventioneller Planung in den verschiedenen Phasen eines Bauwerks (BORRMANN et al., 2015).

Man kann deutlich sehen, dass bei der BIM-gestützten Planung während der Bauausführung kaum noch Planung vorgenommen wird, wohingegen der Aufwand des konventionellen Planungsprozesses erst kurz vor der Ausführung sein Maximum erreicht. Dies bedeutet für Letzteren, dass erst wesentlich später eine ausreichende Datengrundlage geschaffen wird, um beispielsweise Simulationen und Berechnungen durchführen zu können. Deren Ergebnisse können allerdings noch erhebliche Änderungen im Entwurf notwendig machen. Zudem wird verdeutlicht, dass in den frühen Entwurfsstadien Planungsänderungen mit wesentlich geringeren Kosten verbunden sind als in den späteren Phasen (BORRMANN et al., 2015). Mit der deraus resultierenden Kosten- und Terminalsicherheit kann man wieder den Bogen zum anfangs erwähnten Lean Management spannen.

2.1.2 Planungs- und Koordinationsprozess mit BIM

Wie bereits erwähnt, erfährt der Planungsprozess im Bau durch den Einsatz von BIM grundlegende Änderungen. Aber wie genau hat man sich dies vorzustellen?

Bei einer Projektdurchführung, bei der BIM zur Anwendung kommt, sind vor allem zwei Dokumente von essenzieller Bedeutung: Die Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) und der BIM-Abwicklungsplan (BAP). Beide sind eine Art vertragliche Erweiterung, spezifisch für die Planungsleistungen im Zusammenhang mit BIM. Wie der Name bereits sagt, sind die AIA die gestellten Anforderungen von Seiten des Auftraggebers. Diese sind Teil der Projektausschreibung und beinhalten die Definition der BIM-Ziele und Anwendungsfälle, aber auch die Angaben, welche Modellstände mit welchen Informationen gefordert werden. Dabei wird noch nicht konkretisiert, auf welchem Weg die definierten Ziele zu erreichen sind. Das ist dann Bestandteil des BAP. Dieser kann zwar auch schon Teil der Ausschreibungsunterlagen des Auftraggebers sein, wird aber zumeist erst sehr grob formuliert und in Absprache mit dem Auftragnehmer und auf Basis dessen interner Workflows ausgearbeitet. Neben Informationen, die auch in den Auftraggeber-Informationsanforderungen (AIA) enthalten sind, werden sämtliche beteiligte Personen mit Rollen und Verantwortlichkeiten aufgelistet, die Modellierungsvorschriften definiert und die Qualitätssicherungsstrategien festgelegt. Zudem wird der Gesamtworkflow festgehalten, was bedeutet, welche Person welche Daten zu welchem Zeitpunkt und in welcher Form zu liefern hat. Hierbei findet die Planung größtenteils in fachspezifischen Teilmodellen statt (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019a).

Auch wenn diverse Bestrebungen vorherrschen, die Arbeit an einem einzelnen Gesamtmodell zu ermöglichen, so beschreibt der BIM Leitfaden für Deutschland die aktuelle Situation mit:

„Das große gemeinsame Gesamtmodell ist derzeit noch Utopie!“ EGGER et al., 2013

Bei dieser Aussage ist ein Gesamtmodell als einzelnes Modell, das in einer Cloud gespeichert ist, zu verstehen. Dabei sollen sämtliche Planer gleichzeitig auf das Modell zugreifen und in Echtzeit Änderungen vornehmen können, sodass auch alle Anderen unmittelbar

von diesen erfahren. In Realität überwiegt, zumindest mit Ausnahme von Projekten, bei denen nur Planer eines Teams und auch nur einer Domäne beteiligt sind, die Arbeit in Teilmodellen und die Gesamtkoordination in einem Koordinationsmodell. Für jede Disziplin gibt es ein eigenes Teilmodell, auch Fachmodell genannt. Beispielsweise gibt es bei fast allen mit BIM durchgeführten Bauvorhaben ein Architekturmodell, ein Tragwerksmodell und ein TGA-Modell, in der die Haustechnik modelliert wird. Aber auch Modelle der vor dem Bau vorherrschenden Bedingungen sind von Bedeutung. So werden die Anfangsbedingungen unter anderem im Bestandsmodell, dem digitalen Geländemodell und einem Baugrundmodell als Planungsgrundlage abgebildet (EGGER et al., 2013).

In im BAP festgelegten zeitlichen Abständen werden die Fachmodelle aller Gewerke dann zusammengetragen und zu einem Koordinationsmodell vereint. Diese Aufgabe liegt zumeist in der Verantwortung des BIM-Gesamtkoordinators bzw. BIM-Managers, der für die interdisziplinäre Zusammenarbeit bei BIM Prozessen zuständig ist. In diesem Schritt werden die Teilmodelle zuerst auf Qualität überprüft und anschließend überlagert. Dies hat den Zweck, einen Überblick über das Gesamtprojekt zu bekommen und interdisziplinäre Fehler zu beheben, denn zumeist sind die einzelnen Fachmodelle in sich stimmig, weisen aber Fehler im Zusammenspiel mit anderen Teilmodellen auf. So gehört die Kollisionsprüfung zu den klassischen Werkzeugen, um das Koordinationsmodell auf Konsistenz zu überprüfen. Die dafür verwendete Software zeigt an, ob es modellierte Bauteile gibt, die sich mit anderen Bauteilen überschneiden. Darüber hinaus können am Gesamtmodell auch Regelüberprüfungen durchgeführt werden, die kontrollieren ob das geplante Gebäude regelkonform modelliert wurde. Als klassisches Beispiel ist an dieser Stelle die Einhaltung von Fluchtwegen und Brandschutzverordnungen anzubringen (BORRMANN et al., 2015). Der eben beschriebene Ablauf der Modellkoordination ist zusätzlich im Flussdiagramm 2.2 grafisch verdeutlicht.

Um die bei der Modellüberprüfung auftretenden Fehler effizient kommunizieren zu können wurde ein Datenformat entwickelt, das BIM Collaboration Format (BCF). Damit kann der BIM-Manager dem zuständigen Planer einen Fehler mitteilen, und zwar mit einer abgespeicherten Kameraposition im Modell und den betroffenen Bauteilen. Darüber hinaus können Kommentare, Dringlichkeit und Ähnliches angefügt werden. Die Datei leitet den Empfänger dann unmittelbar an die jeweilige Stelle im Modell. Somit können Probleme Stück für Stück abgearbeitet werden und gleichzeitig wird auch der Modellverlauf dokumentiert (BORRMANN et al., 2015).

In Bezug auf den gesamten Planungsprozess kristallisiert sich die Erstellung des Koordinationsmodells als Schlüsselaufgabe heraus, denn an diesem Schritt müssen sich alle vorhergehenden Prozesse orientieren. Die Herausforderung ist es, dass jeder Beteiligte die Modellierungsvorschriften genau befolgt, sodass die erzeugten Daten nicht nur den Ansprüchen des einzelnen Planers genügen, sondern auch den Gesamtanforderungen des Projekts. Ohne diese Prämisse kann die Zusammenführung zum Koordinationsmodell nicht mit vertretbarem Aufwand durchgeführt werden. Zudem wird die Verwendung eines Common Data Environment (CDE) von Nöten. Dieses ist als zentrale Datenplattform zu sehen, die sämtliche Daten speichert, verwaltet und den Dateizugriff regelt. Durch diese

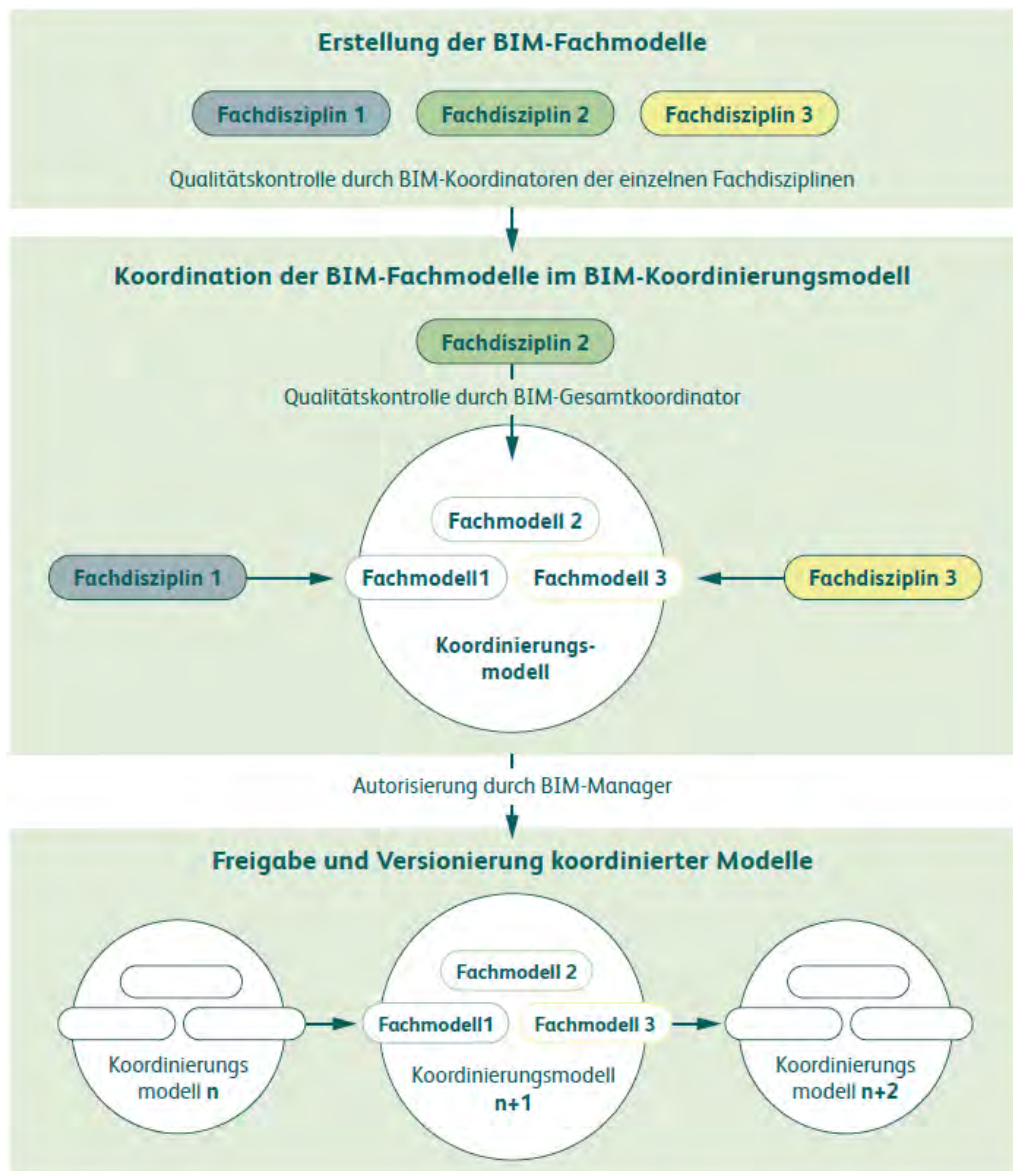


Abbildung 2.2: Gesamtkoordinationsprozess zwischen Fachmodellen und Koordinationsmodell (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019c).

zentrale Struktur kann man Datenredundanz vermeiden und zudem jedem Projektbeteiligten zu jeder Zeit Zugriff auf aktuelle Daten ermöglichen (PREIDEL et al., 2015).

2.1.3 Definition der Modellanforderungen

Damit die Kollaboration möglichst reibungslos funktioniert, ist es essenziell, dass genau definiert wird welcher Beteiligte, welche Informationen, in welcher Form abzuliefern hat. Dadurch soll sichergestellt werden, dass der Empfänger der Daten mit diesen auch sinnvoll weiterarbeiten kann. Zudem ist eine teilweise automatische Überprüfung der Daten auf die Einhaltung der Vorgaben von großer Hilfe. Hierfür gibt es das sogenannte Information Delivery Manual (IDM) (deutsch: Informationsablieferungshandbuch). Dieses beschreibt den Datenfluss über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks hinweg. Dabei ist der Prozessplan Hauptbestandteil des IDM. Darin werden alle Prozesse be-

schrieben, zusammen mit der Information wer dabei involviert ist, welche Informationen als Ausgangssituation notwendig sind und welche Informationen Ergebnis des Prozesses sind. Ein sehr vereinfachter Prozessplan ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Um wiederum den Datenaustausch jedes einzelnen Prozesses zu spezifizieren, gibt es die Exchange Requirements (ER) (deutsch: Austauschforderungen), die in klarer, nicht technischer Sprache aufzählen, welche Informationen zu liefern sind. Meistens geschieht dies in Form einer Datei in Tabellenformat (GÜRTLER et al., 2015).

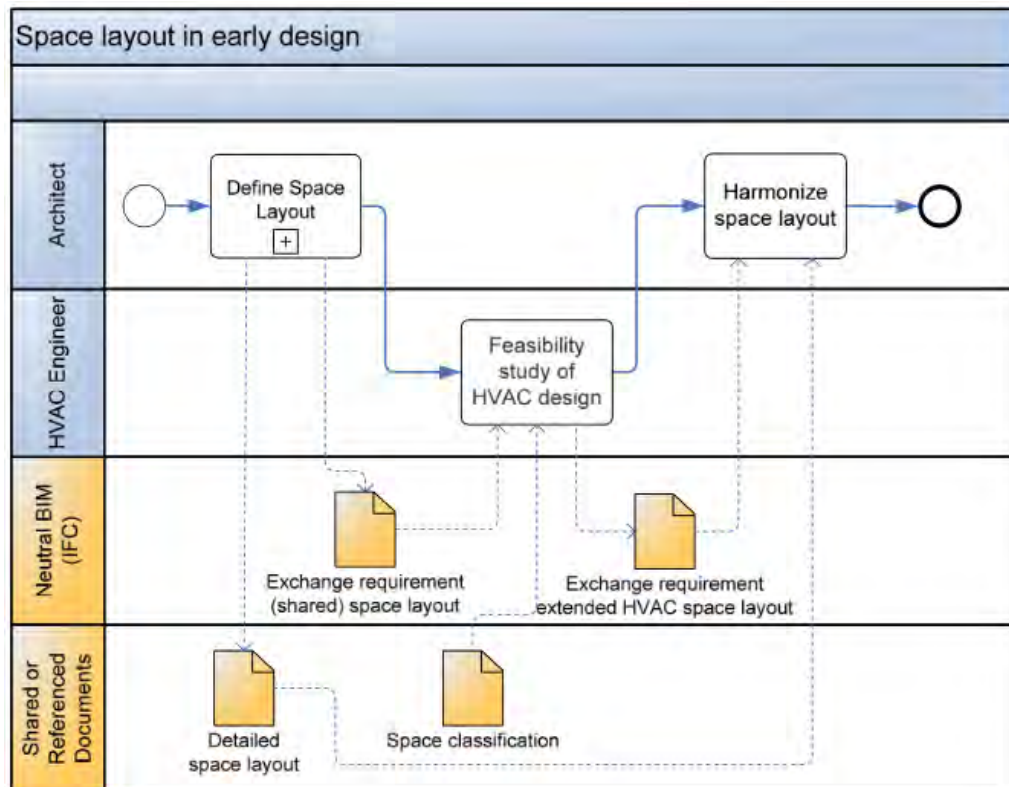


Abbildung 2.3: Exemplarischer Prozessplan mit mehreren Prozessen, deren Exchange Requirements und den beteiligten Akteuren (M. WEISE et al., 2009).

Die ER werden anschließend in technische Beschreibungen umgewandelt, den sogenannten Model View Definitions (MVD). Hierbei handelt es sich um eine Teilmenge des IFC Schemas für einen bestimmten Anwendungsfall. Dies soll gewährleisten, dass bei einem Datenaustausch nicht einfach sämtliche Informationen übermittelt werden, sondern nur die, die auch benötigt werden, und zwar in dem notwendigen Detaillierungsgrad. Beispielsweise würde ein Architekt sein Modell, das im Anschluss für energetische Berechnungen verwendet werden soll, nicht komplett weiterleiten, sondern nur Elemente, die in der Energy Analysis MVD enthalten sind. In diesem Beispiel wären das die Gebäudehülle, die Räume und die U-Werte der Außenwände. Alle anderen Informationen werden bei der Dateierstellung für den Datenaustausch nicht berücksichtigt, da sie für den Verwendungszweck nicht von Bedeutung sind. Das Konzept der Model View Definitions sorgt dafür, dass auch bei einer großen Anzahl an Austauschprozessen die übermittelten Daten immer in einer vorhersehbaren Form erwartet werden können. Die verwendbaren MVDs sind Teil der IFC Schema Dokumentation und wurden von der non-profit Organisation buildingSMART definiert, die auch an der Entwicklung des IFC Standards arbeitet. Zu der

aktuellen Version gehören beispielsweise die Coordination View, die Basic FM Handover View oder auch die Structural Analysis View (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020e).

2.1.4 Datenaustausch im Zusammenhang von Open und Closed BIM

Mit der Verwendung des zuvor erwähnten CDE sind allerdings noch nicht alle Grundbausteine für eine funktionierende interdisziplinäre Kollaboration gelegt. Denn so vielfältig die Planungsaufgaben der verschiedenen Disziplinen sind, so vielfältig ist auch das Softwareangebot, um derartige Aufgaben zu erledigen. Daraus resultieren auch die zahlreichen Datenformate, in denen die projektrelevanten Informationen abgespeichert werden. So kann man diese zwar ohne Weiteres in einem CDE ablegen und verwalten, aber nicht für kooperative Fragenstellungen, die Informationen aus Dateien unterschiedlicher Datenformate benötigen, verwenden. Um dieses Problem zu lösen gibt es zwei mögliche Ansätze.

Der erste der beiden ist der Closed BIM Ansatz. Hier werden proprietäre Datenformate ausschließlich eines Herstellers verwendet, was bedeutet, dass alle Beteiligten Softwareprodukte einer einzigen Firma verwenden. Dies hat Vor- und Nachteile. Ein großer Vorteil ist, dass die Programme sehr gut aufeinander abgestimmt sind und auch der Datentransfer meist einfach und unbedenklich durchgeführt werden kann. Andererseits beschränkt man sich stark bei der Auswahl des Auftragnehmers und dessen Subunternehmen, da dieser Erfahrungen in der geforderten Software aufweisen muss. Zudem ist zu erwähnen, dass es bisher keinen Softwarehersteller gibt, dessen Produktpalette sämtlichen signifikanten Aufgabenbereichen des Bauingenieurwesens Genüge leisten kann. Darüber hinaus ergeben sich Probleme im Bereich der Langzeitverwendung von Daten. Proprietäre Datenformate werden oft regelmäßigen Updates und Umstrukturierungen unterzogen. Da zugrunde liegende Strukturen im Normalfall nicht veröffentlicht werden, ist nicht gewährleistet, dass auf die Informationen in veralteten Datenformaten langfristig zugegriffen werden kann (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

Auf der anderen Seite gibt es den Open BIM Ansatz, bei dem unterschiedliche Softwareprogramme mit unterschiedlichen Datenformaten zum Einsatz kommen. Dabei dienen ein oder mehrere offene Dateiformate als Austauschgrundlage. Auch hier gibt es wieder Vor- und Nachteile. Zuerst fällt auf, dass alle Projektteilnehmer freie Auswahl bei der Softwareverwendung haben. So kann jeder die Software wählen, mit der er am besten vertraut ist und die für die projektspezifischen Gegebenheiten am besten geeignet ist. Allerdings sind damit auch immer Import- bzw. Export- Schnittstellen notwendig, die die herstellerneutralen Datenformate mit einbeziehen. Diese sind jedoch nicht immer vorhanden oder auch teilweise fehlerhaft implementiert, sodass bei der Umwandlung Datenverluste oder -verfälschungen entstehen können. So kann es auch durchaus vorkommen, dass speziell für ein Projekt neue Schnittstellen programmiert werden müssen. In jedem Fall ist es von großer Bedeutung, die Datenkonvertierung vor Beginn des Projekts auf Funktionalität zu überprüfen. Ein Vorteil gegenüber Closed BIM liegt hingegen in der Langzeitverwendung von Daten. Die hinter den offenen Formaten stehenden Normierungsinstitute garantieren

die Funktionstüchtigkeit von Dateiversionen über viele Jahre hinweg. Zusätzlich liegt eine transparente Dokumentation vor, mit Hilfe derer Dateien eigenständig in neuere Dateiversionen überführt werden können (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

Das wohl am weitesten verbreitete herstellernerneutrale Format sind die IFC. Dieses Format beschreibt Objekte aus fast allen Disziplinen der Baubranche und wird konstant weiterentwickelt, um dem Anspruch auf Vollständigkeit näher zu kommen. Es richtet sich neben dem Bezug auf nationale Standards vor allem auf die internationale Anwendbarkeit. Auf die Facetten des IFC Formats wird später in Kapitel 3 wesentlich genauer eingegangen. Anderer offene Datenformate, die sich mehr auf einzelne Bereiche fokussieren sind beispielsweise Construction Operations Building Information Exchange (COBie) im Facilitymanagement, der Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) im Straßenbau und Gemeinsamer Ausschuss Elektronik im Bauwesen (GAEB) im Elektrotechnik Bereich (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

2.1.5 Datenaustauschszzenarien

Im Wesentlichen gibt es drei typische Datenaustauschszzenarien. Zur Koordination von Fachmodellen zu einem Koordinationsmodell findet der Modellaustausch in eine Richtung statt, und zwar von der fachspezifischen Software zum Koordinationswerkzeug. Änderungen werden hier am Fachmodell vorgenommen und in iterativen Vorgängen mit anderen Domanenmodellen vereint. Das zweite Szenario besteht aus der Lieferung eines Fachmodells beispielsweise am Ende einer Projektphase. Dies beinhaltet die Übergabe kompletter Modelle an den Auftraggeber. Zu guter Letzt gibt es auch die Weiterverwendung von Modellen über Projektphasen hinaus. Damit wird der Auftragnehmer einer bestimmten Phase mit Informationen über die Ausgangssituation ausgestattet. Hier müssen die Daten, im Falle eines Open BIM Ansatzes, erst vom einen Autorenwerkzeug in ein offenes Format und von dort aus in das Datenformat des nächsten Autorenwerkzeuges umgewandelt werden. Darüber hinaus ist auch ein Datenaustausch innerhalb einer Planungsgemeinschaft denkbar. An dieser Stelle kann die Verwendung eines proprietären Datenformates sinnvoll sein (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

Da die Erfahrungen mit BIM bisher gering sind, wird BIM oft schrittweise in den Planungsprozess integriert. Angefangen beim Little BIM, bei dem BIM als Insellösung eingesetzt wird. Dies bedeutet, dass beispielsweise ein Fachplaner BIM für seine internen Aufgaben verwendet, aber keine weitere Nutzung darüber hinaus stattfindet. Der Datenaustausch basiert hier weiterhin auf dem Austausch von 2D Plänen. Hingegen beim Big BIM findet eine Nutzung von BIM über die Dauer des ganzen Lebenszyklus des Bauwerks hinweg statt, wodurch das Gesamtpotential von BIM ausgeschöpft werden kann (BORRMANN et al., 2015). Langfristig gesehen, wäre die Entwicklung hin zum Big Open BIM wünschenswert, um Softwarevielfalt und Innovation zu fördern und BIM mit all seinen Vorteilen nutzen zu können (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

2.1.6 Einsatzbereiche

Bei der Anwendung von BIM ist es immer von essenzieller Bedeutung das Ziel vor Augen zu haben. So ist es notwendig gleich zu Beginn, wie kurz in Kapitel 2.1.2 angerissen, die gewünschten projektspezifischen Ziele zu definieren und daraus konkrete Anwendungsfälle abzuleiten. Dabei verfolgt BIM einige übergeordnete Ziele. Dazu zählen eine verbesserte Kommunikation und Koordination von Schnittstellen, die Planungssicherheit bezüglich Kosten und Termin, mehr Transparenz, eine Minimierung von Risiken und zu guter Letzt ein Gewinn an Effizienz. Allerdings können nicht alle definierten BIM-Ziele ohne Weiteres umgesetzt werden. Zuvor muss der resultierende Nutzen gegenüber dem Aufwand abgewogen werden, und zwar ganzheitlich betrachtet über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerks, sowohl von Seiten des Auftraggebers als auch von Seiten des Auftragnehmers. Nur wenn der Nutzen gegenüber dem Aufwand überwiegt, ist das Anstreben dieses Ziels auch sinnvoll (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019b).

Um die typischen Einsatzbereiche von BIM zu beleuchten wird eine Liste von Anwendungsfällen vorgestellt, die von BIM4INFRA durch eine Expertenbefragung zusammengestellt wurde (siehe Tabelle 2.1). Diese Liste hat keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern erwähnt lediglich die heutzutage gebräuchlichsten Anwendungsfälle. Mit mehr Erfahrung im Planungsbereich mit BIM werden in den nächsten Jahren auch sicherlich neue Einsatzbereiche hinzukommen. Da sich die grundsätzlich zu erbringenden Leistungen nicht ändern, sondern nur die methodische Vorgehensweise, wie diese erbracht werden, zeigt die folgende Tabelle in welchen Phasen nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) die jeweiligen Anwendungsfälle anzusiedeln sind mit einer grünen Markierung (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2018).

Tabelle 2.1: Liste typischer Anwendungsfälle von Building Information Modeling (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2018).

BIM Anwendungsfälle										
Anwendungsfälle	Leistungsphasen nach HOAI									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	B
Bestandserfassung	■	■								
Planungsvariantenuntersuchung		■								
Visualisierung		■	■	■	■			■		
Bemessung und Nachweisführung			■	■	■					
Koordination der Fachgewerke		■	■		■					
Fortschrittskontrolle der Planung					■					
Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen		■	■	■						
Arbeits- und Gesundheitsschutz			■		■			■		
Planungsfreigabe		■	■	■	■					
Kostenschätzung und Kostenberechnung		■	■							

Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe										
Terminplanung der Ausführung										
Logistikplanung										
Erstellung von Ausführungsplänen										
Baufortschrittskontrolle										
Änderungsmanagement										
Abrechnung von Bauleistungen										
Mängelmanagement										
Bauwerksdokumentation										
Nutzung für Betrieb und Erhaltung										

2.2 BIM im Infrastrukturbereich

Auch wenn das BIM ein vergleichsweise neues Arbeitskonzept ist, so hat es in den letzten Jahren dennoch seinen Weg in diverse Projekte gefunden. Vor allem im internationalen Ausland, wie zum Beispiel den USA oder skandinavischen Ländern wie Norwegen und Finnland ist die Anwendung von BIM schon weiter verbreitet. Allerdings kommt es in manchen Teilbereichen des Bauingenieurwesens wesentlich mehr zum Einsatz als in anderen. Ursprünglicherweise wurde BIM für den Hochbau entwickelt, wo es heute auch deutlich am häufigsten eingesetzt wird. Dies ist nicht nur an den Funktionalitäten von BIM-Autorwerkzeugen erkennbar, sondern beispielweise auch an neutralen Austauschformaten wie den IFC, die zu Beginn lediglich eine standardisierte Beschreibung von Hochbauelementen darstellten. Doch wurden auch in anderen Baubranchen, wie dem Tiefbau, die Vorzüge von BIM erkannt und notwendige Maßnahmen zur Durchführung in die Wege geleitet. Hierfür ist es sehr hilfreich zu verstehen wo die grundsätzlichen Unterschiede zwischen Hoch- und Tiefbau bestehen und wie diese in die digitale Planung mit einfließen (AMANN & BORRMANN, 2015).

2.2.1 Unterschiede von Hochbau und Tiefbau

Ein großer Unterschied zwischen dem Hochbau und dem Tiefbau liegt bereits im Übergang von der Planungsphase zur Ausführungsphase. Im Hochbau halten sich die vorhandenen Unsicherheiten, zum Beispiel in Bezug auf die Bodenbeschaffenheit auf Grund von geringer geographischer Ausdehnung, sehr in Grenzen. Somit kann, mit Ausnahme von auftretenden Planungsfehlern, 1:1 so gebaut werden, wie auch geplant wurde. Im Tiefbau hingegen müssen viel mehr Annahmen getroffen werden, welche die Bodeneigenschaften betreffen, da zwischen punktuellen Bodenproben großflächig interpoliert werden muss. So können während der Ausführung von Linienbauwerken Probleme wie archäologische Funde, unerwartete Bodeneigenschaften, alte nicht dokumentierte Leitungen und Ähnli-

ches auftreten, was kurzfristige Änderungen in der Linienführung zu Folge haben kann (KOCHER, 2020).

Dazu kommen noch Unterschiede, die vor allem bei der Verwendung von BIM-Autorenwerkzeugen zum Tragen kommen. Hier ist die große räumliche Ausdehnung ebenfalls problematisch, da gewöhnliche Programme nur begrenzte Bereiche von wenigen hundert Metern zulassen, wohingegen sich manche Infrastrukturbauwerke über mehrere Kilometer erstrecken. Dies hat auch zur Folge, dass geographische Bezugssysteme von Relevanz werden, denn bei Bauwerken solcher Größenordnung werden geodätische Distanzkorrekturen notwendig, die im Hochbau vernachlässigt werden können. Zudem besteht jedes Linienbauwerk elementar aus einer Trassierung, welche es als allererstes zu modellieren gilt. Entlang dieser Achse werden dann kleinere Objekte wie Signale, Oberleitungsmasten oder auch Brücken und Übergänge platziert, was weitere Anforderungen an eine Modellierungssoftware stellt, die im Hochbau nicht gebräuchlich sind. Damit wird bereits klar, dass BIM Software aus dem Hochbau nur in sehr begrenztem Rahmen auch für den Tiefbau eingesetzt werden kann (KADEN et al., 2019).

Bisher findet die Planung von Infrastrukturprojekten mit Hilfe von Trassierungsentwurfssoftware statt, welche eine Art 2,5D Modellierung verwenden. Das bedeutet, dass im 2D geplant wird, aber zusätzlich jeder Punkt über eine Höhe verfügt, die aber nicht visuell abgebildet ist, sondern lediglich ein weiteres Attribut darstellt. Diese Programme bilden eine Grundlage zur digitalen Planung, benötigen aber noch Weiterentwicklung, um BIM Funktionalität zu unterstützen. Für die Durchführung von Kollisionsprüfungen und Mengenermittlungen sind beispielsweise 3D Volumenkörper an Stelle von Flächen im 3D Raum notwendig. Manche Softwarehersteller arbeiten bereits an der 3D Funktionalität ihrer Trassierungstools. Darüber hinaus gibt es auch Übergangslösungen, bei denen geometrische Informationen aus gewöhnlichen Trassierungsprogrammen mit Hilfe herstellerneutraler Datenformate exportiert werden und dann in 3D Modellierungsprogrammen in Form von Volumenkörpern generiert werden (KADEN et al., 2019).

Auch wenn es scheint, dass der Tiefbau im Bereich BIM dem Hochbau weit hinterher hinkt, gibt es im Tiefbau Konzepte, die dem grundsätzlichen BIM Gedanken entsprechen und bereits länger als im Hochbau zur Anwendung kommen. Dazu gehört zum Beispiel die Durchführung von größeren Aushubarbeiten. Diese werden zum Teil am Computer modelliert und anschließend mit Hilfe GPS gestützter Maschinensteuerung voll- oder teilautomatisch durchgeführt. Auf Grund von auftretenden Abweichungen wird der tatsächliche Aushub während den Arbeiten erfasst und ein sogenanntes As-built Modell erstellt. Hierfür existieren auch herstellerneutrale Datenformate, die die spätere Weiterverwendung der Daten ermöglichen (KOCHER, 2016).

2.2.2 Relevanz durch den Stufenplan Digitales Planen und Bauen

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur hat das ungenutzte Potential, das BIM im Bereich von Infrastrukturbau darstellt, erkannt und auf Grund dessen 2015 den "Stufenplan Digitales Planen und Bauen" entwickelt. Als größter Bauherr, möchte

der Staat hier bei der Verwendung von BIM bei Infrastrukturbaumaßnahmen als Vorreiter voran gehen und so die restliche Baubranche mitziehen. Dabei wurde BIM in drei Phasen eingeführt: der Vorbereitungsphase, der erweiterten Pilotphase und dem BIM Leistungsniveau 1. Ab Ende des Jahre 2020 wird die Verwendung von BIM bei sämtlichen neuen Infrastrukturprojekten der öffentlichen Hand verpflichtend sein. Durch die stufenweise Einführung sollte den Auftragnehmern genug Zeit gegeben werden, um sich mit BIM vertraut zu machen und praktische Erfahrungen zu sammeln, damit ab 2020 die geforderten Leistungen auch erbracht werden können. Mit der Verwendung von BIM bei Projekten der öffentlichen Hand erhofft sich das Verkehrsministerium einen enormen Erfahrungsgewinn bei Auftragnehmerunternehmen, sodass sich die Anwendung von BIM immer mehr verbreitet.

2015 wurde mit der Vorbereitungsphase begonnen. Diese diente vor allem zur Fort- und Weiterbildung, zur Klärung von rechtlichen Unklarheiten, aber auch schon um erste Pilotprojekte mit BIM durchzuführen. Dabei wurde häufig in Parallelplanung gearbeitet, sprich das Projekt wurde sowohl konventionell als auch mit BIM geplant, um bei Problemen mit BIM eine Absicherung zu haben. In der darauffolgenden Phase, die ab 2017 begann, wurde dann ein breites Feld an Pilotprojekten in Angriff genommen, mit dem Ziel für alle im Infrastrukturbereich gängigen Bauwerke ein Beispiel als Referenz für zukünftige Projekte zu erhalten. Die Pilotprojekte wurden dabei auf Basis von Leistungsniveau 1 durchgeführt, welches der Standard für alle Projekte der öffentlichen Hand ab Ende 2020 sein soll (BRAMANN & MAY, 2015).

Folgende Vorgaben sind im Leistungsniveau 1 enthalten: Zentraler Aspekt ist die vertragliche Vorgabe einer verpflichtenden Verwendung von BIM. Dazu erstellt der Auftraggeber die AIA als Teil der Ausschreibungsunterlagen. Je nach Projekt wird der BAP vom Auftraggeber formuliert oder ist alternativ vom Auftragnehmer auszuarbeiten. Damit soll zudem eine kleine Veränderung des Vergabeprozesses einhergehen. Bisher wurden Projekte an die günstigsten Bieter vergeben, welche jedoch auf Grund von Nachzahlungen nicht immer die billigste Variante darstellen und auch nicht unbedingt Qualitätsarbeit gewährleisten. Deshalb sollen Angebote nun auf Qualität überprüft werden, vor allem in Hinblick darauf, ob der Auftragnehmer die in der AIA geforderten Bedingungen erfüllt. So soll mehr Transparenz in den Vergabeprozess gelangen, um das beste Angebot auswählen zu können. Bei der konkreten Planung des Bauwerks soll mit einzelnen Fachmodellen gearbeitet werden, die in geregelten Zeitabständen zum Koordinationsmodell zusammengetragen werden. Dabei ist jeder Planer rechtlich für sein Teilmodell verantwortlich. Die Leistungen dürfen auch nicht mehr anhand von 2D Plänen erbracht werden, sondern nur noch durch Daten von erstellten Fachmodellen, welche durch daraus abgeleiteten Informationen ergänzt werden können (BRAMANN & MAY, 2015). Alle Daten sind in Form von herstellernerneutralen Datenformaten abzuliefern, was unter anderem folgenden Grund hat: Der deutsche Staat sieht sich in der Verpflichtung einen gesunden wirtschaftlichen Wettbewerb zu fördern, anstatt mit der Forderung eines proprietären Datenformats eine Monopolstellung eines einzelnen Softwareherstellers zu begünstigen. Hiermit wird Spielraum für technische Innovation gelassen und jedem Marktteilnehmer die Möglichkeit gegeben BIM im Rahmen

seiner finanziellen Möglichkeiten einzuführen. Um also die Informationen unterschiedlicher Programme zu vereinen, ist ein neutrales Datenformat unabdingbar (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

Damit alle Vorgaben des Leistungsniveaus 1 auch erfüllt werden können, gab es einige Probleme zu beheben, an denen teilweise immer noch gearbeitet wird. Zum Beispiel die Klärung von rechtlichen Fragestellungen. Zwar ist eine Änderung der HOAI nicht zwingend notwendig, diese könnte die Verwendung von BIM jedoch wesentlich erleichtern. Zudem wurden internationale Standards, Richtlinien und Handreichungen entwickelt, um als Handlungsgrundlage und -ratgeber zu dienen. Aktuell werden die IFC für den Infrastrukturbau noch weiter entwickelt. Diese wurde vom Staat bezuschusst, beispielsweise bei aktuellen Projekten wie IFC Rail, Bridge, Road und Tunnel (BRAMANN & MAY, 2015).

Neben Straßen und Verkehrswasserstraßen, wird auch beim Gleisbau die Einführung von BIM voran getrieben. Hier spielt die DB eine wichtige Rolle. Die DB hat bereits von sich aus eine breitflächige Anwendung von BIM angekündigt und beispielsweise bei allen neuen Haltestellen ab 2017 die Planung mit BIM bekannt gegeben. Darüber hinaus hat der Deutsche Staat die DB diesbezüglich finanziell unterstützt und so eine Vielzahl an Pilotprojekten mit BIM Planung ermöglicht (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2018).

2.2.3 Planungsablauf bei Eisenbahntrassen und Ausrüstungstechnik

In diesem Kapitel wird abschließend ein Blick auf die Planung im Eisenbahnbau, mit Fokus auf der Eisenbahnausrüstungstechnik geworfen, um den aktuellen Prozess vorzustellen und Möglichkeiten aufzuzeigen, wie der BIM Gedanke in diesem Planungsbereich aufgegriffen werden kann. Wie auch in den meisten anderen Bereichen des Bauwesens, sind auch beim Bahnbau eine Vielzahl unterschiedlicher Gewerke bei Neubau und Modernisierung involviert, die oft voneinander abhängig sind. Zum Beispiel gehören zum Bahnbau die Trassierungsplanung, Bodenanalyse, Umweltaspekte, eisenbahntechnische Ausrüstung und einige Gewerke mehr. Dabei wird im Folgenden die eisenbahntechnische Ausrüstung thematisiert, da diese im Kontext der vorliegenden Arbeit die größte Bedeutung hat.

Auch die Eisenbahnausrüstungstechnik selbst besitzt wiederum weitere Untergewerke, die verschiedene Teilbereiche abdecken. Dazu gehören (BUDER, 2017):

- Leit- und Sicherungstechnik (z.B. Stellwerkslogik, Signale und Zugbeeinflussungsanlagen)
- Telekommunikationsanlagen (z.B. Gefahrenmeldeanlagen und Rangierfunkanlagen)
- Oberleitungsanlagen (z.B. Fahrleitungsmasten und Kettenwerke)
- Bahnenergieversorgungsanlagen (z.B. Kraftwerke der Bahnenergieversorgung und Leitungen zur Energieübertragung)

- Elektrische Energieanlagen (z.B. Weichenheizungen, Bahnsteig- und Gleisfeldbeleuchtung)
- Kabeltiefbau (z.B. Kabeltrassen und -kanäle)

Beispielweise bei der Planung der Leit- und Sicherungstechnik (LST) hat der Planungsprozess bis zum heutigen Stand einige Veränderungen erfahren. Die zu Beginn händisch erstellten technischen Zeichnungen wurden später mit Hilfe von CAD-Programmen entworfen und bearbeitet. Diese waren anfangs nur mit geometrischen Informationen gefüllt und wurden mit der Zeit mehr und mehr mit Hintergrundinformationen zum Gezeichneten angereichert. Hierbei stellen diese IT-Anwendungen, die dem heutigen Planungsstand entsprechen, nur individuelle Insellösungen dar. Es profitiert nur der einzelne Planer von Softwareprogrammen, da der Datenaustausch weiterhin auf Basis von Papierplänen und PDFs stattfindet. Die weitergegebenen Informationen müssen anschließend wieder händisch in die nächste Software übernommen werden. Dies ist sehr fehleranfällig und zieht Datenverluste mit sich, weil nur ein Teil der vorhandenen Information übernommen wird (DB NETZ AG, 2017). Um die LST Planung an die BIM Anforderungen anzupassen schlägt BUDER, 2017 die Verwendung einer gewerkeübergreifenden Datenbank vor. In ihr sollen sämtliche Daten abgespeichert werden, damit alle Planer darauf Zugriff haben. Voraussetzung dafür ist jedoch ein standardisiertes Datenformat, um generierte Informationen softwareübergreifend verwenden zu können.

In Deutschland wird zur Planung der LST hauptsächlich das Programm ProSig verwendet, welches unter anderem auch bei der DB zur Anwendung kommt. Dabei arbeitet das hinter dem Programm stehende Unternehmen WSP Infrastructure Engineering an Verbesserungen, um zur Ermöglichung von Big BIM beizutragen. Neben den bisher erzeugten zweidimensionalen Zeichnungen sollen 3D Informationen zur Ausrüstungstechnik in die Software integriert werden, um Darstellungen in Koordinationsprogrammen zu ermöglichen, sobald die Probleme der Programmschnittstellen überwunden sind (BECK et al., 2019).

2.3 Fazit BIM

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass BIM eine neue Planungsmethodik ist, die Effizienzsteigerung, Kosten- und Terminalsicherheit in der Baubranche verspricht. Auch wenn BIM schon in einigen Länder zum Einsatz kommt wird bisher nur ein kleiner Teil des Gesamtpotentials ausgeschöpft. Um das zu ändern, gibt es noch viel Erfahrung zu sammeln und einige Hürden zu überwinden. Speziell im Tiefbau findet BIM noch kaum Anwendung. Dabei ist das größte Hindernis die Absenz von geeigneten Softwareprogrammen und standardisierten Datenformaten, die auch gewerkübergreifend sind. Doch mit dem Stufenplan Digitales Planen und Bauen erhofft man sich den langwierigen Standardisierungsprozess zu beschleunigen und den Einsatz von BIM in Deutschland voranzubringen. Zwar gibt es einige offene Datenformate im Infrastrukturbau wie zum Beispiel OKSTRA

und PlanPro, die deutschlandweit zum Einsatz kommen. Allerdings decken diese nur einen sehr spezifischen Teil des Tiefbaus ab, was die Probleme bei der gewerkeübergreifenden Gesamtkoordination aufrecht erhält. Zudem handelt es sich um Standards, die auf nationalen Richtlinien basieren, was Herausforderungen für internationale Projekte und Zusammenarbeit birgt.

Kapitel 3

Die Datenstruktur der Industry Foundation Classes (IFC)

3.1 Grundlagen

3.1.1 Definition und Hintergrund

Bei den IFC handelt es sich um ein hersteller- und softwareneutrales Datenschema, das die Speicherung von digitalen Gebäudemodellen und damit verknüpften Informationen ermöglicht. Dabei soll der Datenaustausch und die Interoperabilität zwischen unterschiedlichen Softwareprogrammen im Sinne von Big Open BIM ermöglicht werden. Da nicht alle Bereiche der Baubranche allumfänglich von Beginn an abgedeckt werden können, wird konstant an der Weiterentwicklung des Formats gearbeitet. Es werden hierbei nicht nur Bauelemente standardisiert beschrieben, sondern auch Prozesse, Terminplanung und weitere Elemente der Planung, Bauausführung und Bewirtschaftung von Bauwerken. Somit werden auch die verschiedenen Gewerke wie Architektur, Tragwerksplanung, Technische Gebäudeausrüstung (TGA), Facility Management und andere abgedeckt (BORRMANN et al., 2015).

Entwickelt wird das IFC Format von der non-profit Organisation buildingSMART, die zu Beginn noch unter dem Namen International Alliance for Interoperability (IAI) tätig war und bei der Entwicklung des Datenformats die folgenden Grundsätze verfolgt: zum einen sind die IFC ein kostenloses und herstellernerutrales Format, das für jeden offen zugänglich ist. Des Weiteren erfüllt es auch die Ansprüche an einen internationalen Standard. Denn die Ausarbeitung des Schemas erfolgt in internationaler Zusammenarbeit unterschiedlicher Experten, die zwar ihre nationalen Erfahrungen in die Entwicklung mit einfließen lassen, aber nur mit der Prämisse aus nationalen Richtlinien eine übergeordnete internationale Basis zur standardisierten Datenbeschreibung abzuleiten. Damit soll der nahtlose Austausch von Daten zwischen Computerprogrammen erleichtert werden. Dies bringt nicht nur Vorteile für den Anwender, der Informationen nicht mehr redundant eingeben muss, sondern auch für Softwareentwickler, die statt vielen Schnittstellen zu anderen Programmen sich optimalerweise nur noch um die Implementierung einer einzelnen IFC Schnittstelle kümmern müssen, die dann Kompatibilität zu diversen anderen Programmen eröffnet. Dieser Unterschied zwischen Schnittstellenkonfiguration mit und ohne herstellernerutralem Datenformat wird schematisch in Abbildung 3.1 verdeutlicht (LAAKSO et al., 2012).

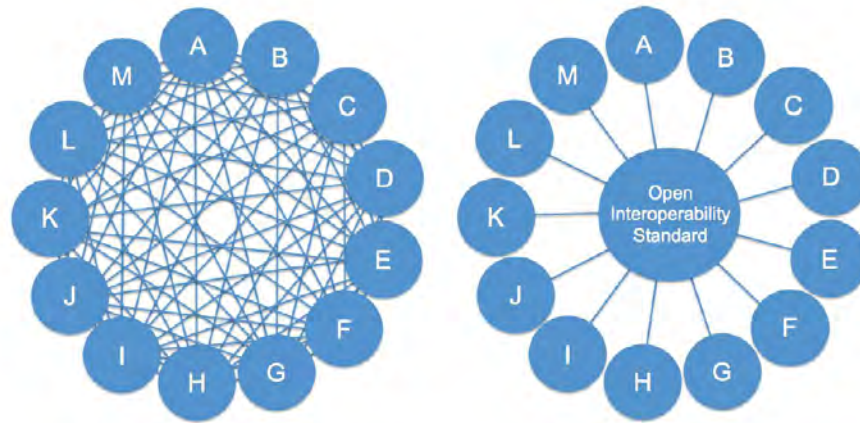


Abbildung 3.1: Interoperabilität zwischen Softwareprogrammen mit und ohne offenem Standard im Vergleich (LAAKSO et al., 2012).

Begonnen wurde 1997 mit der Veröffentlichung der ersten IFC 1 Version, wohingegen gegenwärtig an der IFC 5 Version gearbeitet wird. Anfangs wurde der IFC Standard nur sehr zögerlich angenommen. Zwar wurde er von einigen BIM-Autorenwerkzeugen implementiert, allerdings hielten sich die praktischen Anwendungen des Formats in Grenzen. Dies mag nicht nur am Datenformat selbst gelegen haben, sondern auch allgemein an den Barrieren der Verwendung von BIM. Mit der Aufnahme der IFC als Standard der Internationale Organisation für Normung (ISO) hat auch die Akzeptanz und der Anreiz der Verwendung des Formats stark zugenommen, im Speziellen für Belange der öffentlichen Hand. So sind die IFC in Ländern wie Finnland, den Niederlanden und Singapur verbindliches Format für öffentliche Bauvorhaben und weitere Länder haben ähnliche Maßnahmen angekündigt. Zum Beispiel auch Deutschland in Form des Stufenplans Digitales Planen und Bauen. Um der steigenden Komplexität der korrekten Konvertierung von proprietären Datenformaten ins IFC Format gerecht zu werden, gibt es mittlerweile einen Zertifizierungsprozess, der Softwareprogramme auf funktionstüchtigen IFC Import und Export überprüft, um Softwarenutzern als Vertrauensbasis zu dienen und Datenverluste frühzeitig zu erkennen (LAAKSO et al., 2012).

Das IFC Schema ist inhaltlich folgendermaßen aufgebaut: besonders ist, dass Geometrie und Semantik komplett voneinander getrennt sind. Alle Informationen werden in objektorientierter Weise beschrieben. Dafür wird die aus dem Standard for the exchange of product model data (STEP) abgeleitete Modellierungssprache EXPRESS verwendet. Zur besseren Anschaulichkeit wird der Aufbau einer IFC Datei beispielhaft erläutert (BORRMANN et al., 2015).

Die Datei ist grundlegend in zwei Teile aufgeteilt, einem Kopf mit allgemeinen Informationen, dem sogenannten Header und einem Data Teil mit den eigentlichen Informationen. Im Header wird zuerst erwähnt, welchem Standard die Datei entspricht. Dann wird aufgezeigt auf welche Model View Definitions die Datei abgestimmt ist und anschließend wer die Datei, zu welchem Zeitpunkt und mit welcher Software erstellt hat. Zuletzt wird die verwendete IFC Version spezifiziert (siehe Abb. 3.1).

Algorithmus 3.1: Beispielhafter Header einer IFC Datei (BORRMANN et al., 2015).

```
ISO-10303-21;
HEADER;
FILE_DESCRIPTION (('ViewDefiniton [CoordinationView ,
    QuantityTakeOffAddOnView]'), '2;1');
FILE_NAME ('HelloWall.ifc', '2020-10-20T10:00:00', ('Architect'), ('
    Building Designer Office'), 'My IFC tool', 'My IFC tool', 'Max
    Maier');
FILE_SCHEMA (('IFC2X3'));
ENDSEC;
```

Unmittelbar drauf folgt der Data Teil, in dem das Projekt mit seinen Bauelementen, Prozessen oder Ähnlichem beschrieben wird. Jede Zeile verfügt über eine Zeilennummer mit Hilfe derer Verweise erstellt werden können. So kann bei der Erstellung eines Objekts mit # und der Zeilennummer auf in dem Objekt enthaltene Unterelemente verwiesen werden. Dollar Symbole \$ stehen hingegen für ein leer gelassenes Attribut. In dem Dateiausschnitt, der in Abbildung 3.2 zu sehen ist, werden einige grundlegende Elemente definiert, die bei fast allen Dateien notwendig sind. So wird zum Beispiel in Zeile eins ein neues Projekt mit eindeutiger ID und Beschreibung erstellt und anschließend der damit zusammenhängende Verantwortliche und die Organisation bzw. die Firma, der er angehört, erwähnt. Ab Zeile sieben werden dann die im Projekt verwendeten Grundeinheiten aufgelistet. Im Anschluss könnten beispielsweise die Spezifizierung der Baustelle mit ihrem lokalen Koordinatensystem und dann ein Gebäude mit mehreren Stockwerken und einzelnen darin enthaltenen Bauelementen folgen.

Algorithmus 3.2: Beispielhafter Data Teil einer IFC Datei (BORRMANN et al., 2015).

```
DATA;
#1 = IFCPROJECT ('0CsteGPAr5kaneFEo81E0j', #2, 'Default Project',
    'Description of Default Project', $, $, $, (#20), 7#);
#2 = IFCOWNERHISTORY (#3, #6, $, .ADDED., $, $, $, 1218000420);
#3 = IFCPERSONANDORGANISATION (#4, #5, $);
#4 = IFCPERSON ('ID0815', 'Maier', 'Max', $, $, $, $, $);
#5 = IFCORGANIZATION ($, 'MF', 'Musterfirma', $, $);
#6 = IFCAPPLICATION (#5, '1.5', 'My IFC tool', 'TA 1001');
#7 = IFCUNITASSIGNMENT ((#8, #9, #10, #11, #15, #16, #17, #18, #19));
...
#11 = IFCCONVERSIONBASEUNIT (#12, .PLANEANGLEUNIT., 'DEGREE', #13);
#12 = IFCDIMENSIONALEXONENTS (0, 0, 0, 0, 0, 0);
#13 = IFCMEASUREWITHUNIT (IFCPLANEANGLEMEASURE(1.745E-2), #14);
```

3.1.2 Express

Wie bereits kurz erwähnt, wird das IFC Datenschema mit der EXPRESS Modellierungssprache definiert, die ihren Ursprung im STEP Standard hat. Es handelt sich hierbei um eine Programmiersprache, die sowohl von Mensch als auch von Maschine lesbar ist. Sie

hat einige Eigenschaften, die sie für die Verwendung für das IFC Schema besonders geeignet machen. EXPRESS ist eine deklarative und objektorientierte Programmiersprache, bei der Klassen mit Attributen und Beziehungen zu anderen Klassen abgebildet werden, wobei die Klassen als Entitäten bezeichnet werden. Ein wichtiges Konzept der Sprache ist die Vererbung, bei der eine Entität Eigenschaften an eine von ihr abhängige Unterklasse weitergibt. Besonders hilfreich ist auch die Art auf welche Beziehungen definiert werden können. Sie werden explizit definiert, was bedeutet, dass ein Beziehungsobjekt erstellt wird, das über gemeinsame Attribute mit zwei oder mehr Objekten verknüpft wird. So kann man beispielsweise eine Wand ihrem Raum und Stockwerk zuordnen, was für sehr flexible Anwendungsmöglichkeiten sorgt (BORRMANN et al., 2015).

Insgesamt kann die Definition einer Entität mit EXPRESS folgendermaßen aussehen (siehe Abbildung 3.2). Begonnen wird mit dem Namen der Entität woraufhin alle von der Klasse anhängenden Unterklassen aufgelistet werden. In der Zeile SUBTYPE OF werden dann alle Überklassen angegeben. Daraufhin folgen Attribute und inverse Attribute. Abschluss bildet der Abschnitt, der mit WHERE eingeleitet wird. Hier werden alle Regeln aufgestellt, die für ein gültiges Objekt der definierten Klasse zutreffen müssen (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d).

```

ENTITY IfcProduct
ABSTRACT SUPERTYPE OF (ONEOF(IfcAnnotation, IfcElement, IfcPort, IfcProxy,... ))
SUBTYPE OF (IfcObject);
  ObjectPlacement : OPTIONAL IfcObjectPlacement;
  Representation : OPTIONAL IfcProductRepresentation;
INVERSE
  ReferencedBy : SET [0:?] OF IfcRelAssignsToProduct FOR RelatingProduct;
  PositionedRelativeTo : SET [0:1] OF IfcRelPositions FOR RelatedProducts;
WHERE
  PlacementForShapeRepresentation : (EXISTS(Representation) AND
  EXISTS(ObjectPlacement))
  ...
END_ENTITY;

```

Abbildung 3.2: Definition der IfcProduct Entität mit EXPRESS (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d).

Anders als in vielen anderen Programmiersprachen kann mit EXPRESS nur das Datenschema selbst beschrieben werden, mit Information beladene Instanzen können hingegen nicht aufgestellt werden. Dafür wird die Verwendung von der Extensible Markup Language (XML) oder STEP Physical Files notwendig. Darüber hinaus verfügt EXPRESS auch über eine visuelle Sprache, EXPRESS-G, mit der Klassenstrukturen mit ihren Beziehungen in Diagrammform verbildlicht werden können. Aufgrund der Popularität des XML Formats wurde auch eine Übersetzung der EXPRESS Schemata in ifcXML entwickelt (BORRMANN et al., 2015).

3.1.3 Geometrie Modellierung

Beim IFC Format werden Geometrie und Semantik komplett getrennt voneinander behandelt. Hierbei ist die Semantik als logische Bedeutung der Objekte zu verstehen. Somit wird ein Objekt zu Beginn als semantisches Element definiert. Anschließend werden dem vorliegenden Objekt eine bzw. mehrere geometrische Repräsentationen zugeordnet. Da unterschiedliche Arten der Geometriedarstellung unterstützt werden, ist es von Bedeutung, sich im Vorherein Gedanken zu den Anwendungsfällen zu machen, um die optimale Lösung auswählen zu können. Zudem ist ein grundlegendes Verständnis verschiedener geometrischer Repräsentationen im Zusammenhang mit IFC Import, Export und den dabei entstehenden Fehlern essenziell (BORRMANN et al., 2015; TRZECIAK & BORRMANN, 2018). Deshalb wird an dieser Stelle auf die im IFC Format vorhandenen Möglichkeiten eingegangen.

Prinzipiell gibt es zwei verschiedene Ansätze, die räumliche Ausdehnung eines dreidimensionalen Körpers zu beschreiben. Als erste der beiden ist die explizite Modellierung zu nennen. Hier wird der Körper über die Beschreibung seiner Oberfläche definiert. Dazu gehören die Begrenzungsflächen, deren Kanten und wiederum deren begrenzende Knoten, die alle mit ihrer Zusammengehörigkeit in einem vef-Diagramm (Vertex, Edge, Face) abgebildet werden können. Die Flächen und Kanten können zudem auch gekrümmt sein, was größere Flexibilität ermöglicht. Für gewöhnlich wird aber mit einer vereinfachten Art der Oberflächenbeschreibung gearbeitet, der Triangulation. Diese ist dadurch ausgezeichnet, dass alle Flächen aus ebenen Dreiecken bestehen. Es gibt sowohl Vor- als auch Nachteile, die für bzw. gegen diese Art der Repräsentation sprechen. Zum einen ist es eine sehr einfache Art der Geometriebeschreibung, die auch einfach in Autorenwerkzeuge implementiert werden kann. Zum andern müssen gekrümmte Flächen allerdings angenähert werden, was je nach Geometrie und gewünschter Genauigkeit der Näherung zu sehr vielen kleinen Dreiecken führen kann, was möglicherweise viel Speicherplatz bedarf. Außerdem kann ein Körper nur sehr umständlich auf Korrektheit, zum Beispiel der Abwesenheit von Lücken zwischen Dreiecken, überprüft werden (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019e).

Die zweite Möglichkeit ist die implizite Beschreibung der Geometrie. Sie besteht aus der Beschreibung der Abfolge von Konstruktionsschritten, die zur Erzeugung der gewünschten Geometrie notwendig ist. Somit handelt es sich um eine prozedurale Methode. Es gibt mehrere Varianten, die von den IFC unterstützt werden. Eine davon ist das Constructive Solid Geometry (CSG). Dafür werden geometrische Primitive, wie zum Beispiel Würfel, Zylinder, Pyramiden und andere, zu Hilfe genommen. Diese werden dann mit einer Abfolge der boolschen Operationen Schnittmenge, Differenz und Vereinigung miteinander kombiniert bis die endgültige Geometrie erreicht ist. Eine weitere Möglichkeit liegt in der Beschreibung durch Extrusion, Sweep, Lofting oder Rotation. Dabei wird ein ebenes Profil erzeugt, das dann extrudiert oder um eine Achse rotiert wird. In Bild 3.3 sind einige mögliche Formen dargestellt. Die Herausforderung bei der prozeduralen Methode ist beispielweise beim IFC Import alle einzelnen Konstruktionsschritte in die Software zu

implementieren. Daher werden diese oft der Einfachheit halber vor dem Im- oder Export in explizite Geometrien umgewandelt (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019e).

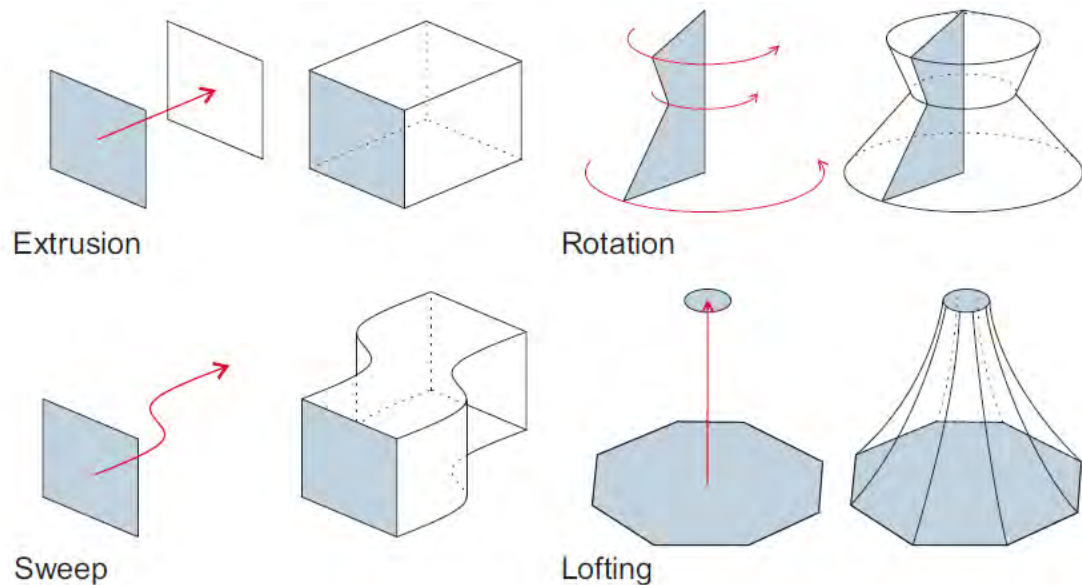


Abbildung 3.3: Beispiele für mit Rotation, Sweep, Extrusion und Lofting erzeugte geometrische Körper (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019e).

Es ist generell wichtig zu berücksichtigen, für welche Datenaustauschszzenarien und welchen Anwendungsfall die Geometrie benötigt wird. Ausgehend davon sollte dann die passende Geometrirepräsentation gewählt werden. Es ist zum Beispiel relevant zu wissen, ob das IFC Modell noch weiterbearbeitet werden soll oder nicht. Eine explizite Geometriebeschreibung ist für Änderungen weniger geeignet, wohingegen sich die implizite Beschreibung sehr gut für diesen Zweck eignet (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019e). Je nach Anwendungsfall ist dann abzuwägen, wie detailliert Geometrie und Semantik zu beschreiben sind. Für eine Kollisionsprüfung ist zum Beispiel eine genaue geometrische Repräsentation erforderlich, während die Semantik in diesem Fall nur eine untergeordnete Rolle spielt. Im Falle einer Regelüberprüfung von Normen, die nicht auf geometrischen Eigenschaften basieren, ist die Semantik hingegen der wichtigere Bestandteil des Modells. So kann es auch Szenarien geben in denen die Geometrie nur eine Art Platzhalterfunktion einnimmt, um dem Anwender zu signalisieren, dass sich an einer gewissen Stelle ein Objekt einer bestimmten Art befindet. Die genauen Ausmaße des Objekts wären in diesem Fall nicht weiter von Bedeutung.

3.2 IFC im Infrastrukturbereich

3.2.1 Aktueller Stand und zukünftige Erweiterungen

Ursprünglich war der IFC Standard ausschließlich für den Hochbau ausgelegt. Mit der Zeit wurde jedoch deutlich, dass das IFC Konzept im Infrastrukturbereich genauso von Vorteil ist und auch die Nachfrage nach einer Erweiterung dies bezüglich immer mehr anwächst. Deshalb wurde das Gremium Infrastructure Room ins Leben gerufen, das die Aufnahme des Tiefbaus in das IFC Format koordiniert und momentan die größte Arbeitsgruppe von buildingSMART darstellt. 2014 wurde erstmals mit der Veröffentlichung der IFC Version 4 der Grundstein für die Integration des Infrastrukturbaus in das Format gelegt. Hier wurde das ifcAlignment eingeführt, das als standardisierte Beschreibung einer Trassierungsachse zu verstehen ist. Diese kann für die Beschreibung des Verlaufs von Straßen, Schienen, Wasserwegen und anderen linienförmigen Bauwerken dienen.

Seitdem wird mit Hochdruck an der weiteren Ausarbeitung der Infrastrukturerweiterung gearbeitet. Dazu wurden zuerst internationale Anwendungsfälle analysiert und anhand derer die Hauptziele und Anwendungsfälle definiert, die unterstützt werden sollen. Als wichtigste Bereiche wurden Brückenbauwerke, Straßen und Schienen festgelegt, auf die später Tunnel, Kanäle und Dämme folgen werden. Darüber hinaus wurden mehrere notwendige Funktionalitäten herausgearbeitet, die für all diese Bereiche benötigt werden. Zu diesen gehören die Möglichkeit der Verknüpfung mit GIS Datenbanken, die Beschreibung der Geländemodellierung mit Bodenschichten und Erdarbeiten und die Integration geodätischer Koordinatensysteme und dazu gehörige Längenkorrekturen (KÖNIG et al., 2016).

Es gibt fünf aktuelle Projekte, die in den nächsten IFC Versionen mit in das Datenschema aufgenommen werden sollen, bzw. schon als sogenannter "Candidate Standard" veröffentlicht wurden. Dabei werden neue Definitionen auf Funktionstüchtigkeit überprüft und gegebenenfalls Änderungen vorgenommen. Diese Projekte sind IFC Road, IFC Bridge, IFC Rail, IFC Tunnel und IFC Maritime. Basis aller Projekte ist das ifcAlignment und zusätzlich die ifc Overall Architecture, die die Grundsätze der fünf aufbauenden Projekte festlegt. Von Belang ist vor allem, dass die Definition neuer Entitäten so weit als möglich vermieden wird und nur dort eingesetzt wird, wo es wirklich notwendig ist. Das hat den Hintergrund, dass Softwareprogramme, die bereits vorherige IFC Versionen unterstützen, möglichst wenig zusätzlichen Aufwand bei der Implementation der zukünftigen IFC Versionen haben sollen (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020b; KADEN et al., 2019).

Im Folgenden wird genauer auf einige der einzelnen Projekte eingegangen, die im Zusammenhang von Bahnbau und LST Planung von Relevanz sind, und erläutert was diese inhaltlich abdecken.

IFC Rail

Dieses Projekt wurde auf der Basis der internationalen Zusammenarbeit von Eisenbahnkonzernen verschiedener Länder gegründet. Dazu gehören die bundeseigenen Konzerne der Schweiz, Österreichs, Deutschlands, Schwedens, Finnlands, Frankreichs, Italiens und Chinas. Auslöser dafür war das Fehlen eines Standards, der alle Bereiche des Bahnwesens umfasste, um Informationen von Infrastrukturelementen über den ganzen Lebenszyklus geordnet in digitaler Form festzuhalten. So wurde 2018 zusammen mit buildingSMART international mit der Umsetzung begonnen. Hierfür wurde das Projekt in die fünf Themenbereiche Gleise, Signale, Telekommunikation, Energie und Themengebieten, die auch bei anderen Projekten von Relevanz sind und gemeinsam koordiniert werden müssen, unterteilt. Innerhalb von 2 Jahren konnte eine Erweiterung des IFC Schemas erarbeitet werden, die dieses Jahr, 2020, in der IFC Version 4x3 RC1 veröffentlicht wurde. Hierbei handelt es sich erst um einen "Candidate Standard", der in der aktuellen zweiten Phase des Projekts in Zusammenarbeit mit Softwareherstellern getestet wird. Erst im Anschluss daran wird die IFC Version dem ISO Zertifizierungsprozess unterzogen, um dann den finalen "Production Standard" Status zu erlangen (BUILDINGSMART RAILWAY ROOM, 2020).

Nun soll auf die wichtigen Neuerungen im IFC Schema eingegangen werden. Zum einen wurde das `IfcAlignment2DCant` eingeführt, das neben der Beschreibung der horizontalen und vertikalen Trassierung auch die Definition des Verlaufes der Querneigung der Gleise ermöglicht. Damit zusammenhängend ist auch die Definition einer neuen Art von Sweep, der die Rotation des Querschnitts gemäß der Kippung der Gleise mit beinhaltet. Darüber hinaus wurden neue Entitäten für diverse physikalische Elemente eingeführt. Hierzu zählen Klassen zur Beschreibung des Gleisquerschnitts, unterschiedliche Arten von Signalen, der Telekommunikation und der Stromversorgung. Allein die Signaltechnik wurde durch 80 Entitäten ergänzt. Zu guter Letzt ist noch die Ergänzung durch Erdarbeiten und Ähnliches zu erwähnen, die genauso im Straßenbau und Hochbau angewendet werden kann (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020c).

IFC Bridge

Bei IFC Bridge geht es um die Erweiterung des Standards um Brückenbauwerke. Diese sind thematisch noch am ehesten mit dem Hochbau verwandt, bestehen allerdings aus vielen brückenspezifischen Einzelteilen. Zudem gibt es viele verschiedene Arten von Brückenbauwerken, die sehr unterschiedlich aufgebaut sind. Das Projekt ist schon sehr weit fortgeschritten, da französische Experten bereits Vorarbeit geleistet haben, weshalb bereits 2019 in der IFC Version 4.2 die Ergebnisse von IFC Bridge eingebettet werden konnten (KÖNIG et al., 2016). Dennoch wird weiterhin an den Ergebnissen des Projekt getestet, unter anderem, um die neuen Definitionen im Zusammenspiel mit den anderen Projekten zu untersuchen. Da das Projekt nur eine Laufzeit von 2 Jahren hatte und mit beschränkten finanziellen Mittel ausgestattet war, wurde der Fokus nur auf die wichtigsten Brückenarten und die Anwendungsfälle mit dem größten Mehrwert gelegt. Zu den

Brückentypen, die abgedeckt wurden, gehören Stahlbetonbrücken, Spannbetonbrücken, Stahlbrücken und Stahlträgerbrücken. Damit wurde auch die Beschreibung von zugehörigen Bauteilen und außerdem von vorgespanntem oder bewehrtem Beton eingeführt. Darüber hinaus wurde festgelegt, dass die geometrische Abbildung von Brücken mittels Triangulation aufgrund vieler kleiner Bauteile nicht zulässig ist, sondern vorrangig Sweeps von Brückenquerschnitten angewendet werden sollen. Das Datenaustauschenszenario Design-to-Design wird aber noch nicht unterstützt. In Zukunft ist durchaus ein Folgeprojekt denkbar, das weitere Brückentypen und Anwendungsfälle aufgreifen wird (BORRMANN et al., 2019; BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020b).

IFC Tunnel

IFC Tunnel wird vor allem von Experten aus Japan und Deutschland bearbeitet und ist das einzige Projekt, das den Status des "Candidate Standard" noch nicht erreicht hat, und erst in der nächsten IFC Version in das Schema integriert wird. Mit diesem Projekt wird neben den Tunnelbauteilen auch die Implementierung des Level of Detail (LOD)-Konzepts notwendig. Aufgrund der Beschaffenheit von Tunnelbauwerken sind je nachdem manchmal Fragestellungen in der Größenordnung von Kilometern wichtig, wohingegen auch Problemstellungen im Zentimeterbereich auftreten. Deshalb wird bereits bei konventioneller Planung von LOD ähnlichen Konzepten Gebrauch gemacht. Für gewöhnlich wird mit 5 verschiedenen Levels gearbeitet, die in Abbildung 3.4 gezeigt sind. Hierbei ist das erste Level, das nur aus einer Kurve als Tunnelachse besteht, nicht abgebildet (VILGERTSHOFER et al., 2016).

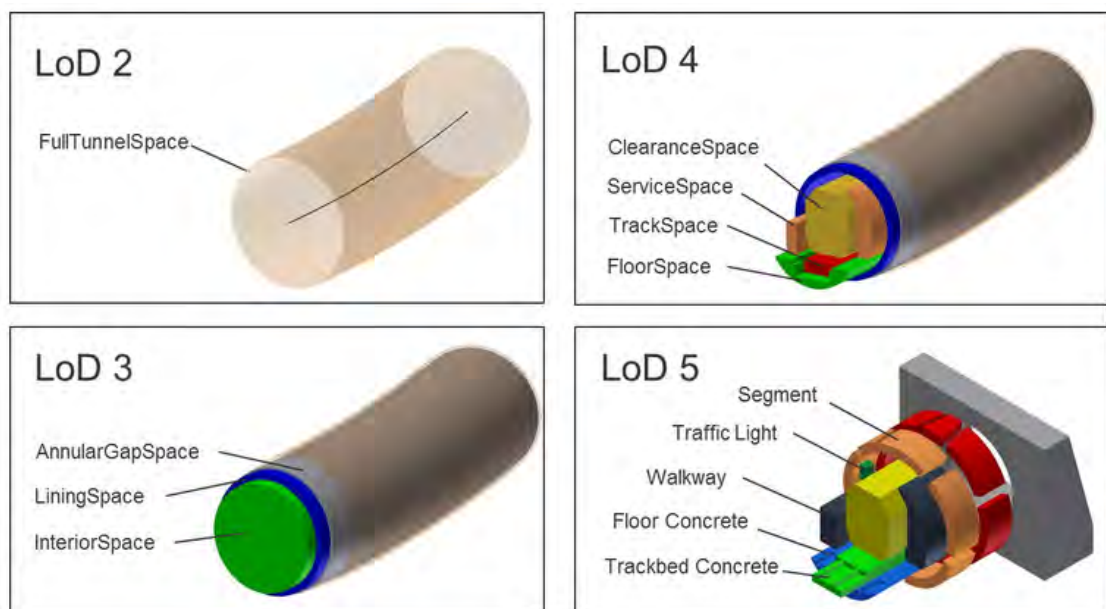


Abbildung 3.4: 5 Levels of Detail der Beschreibung von Tunnelbauwerken (VILGERTSHOFER et al., 2017).

3.2.2 IFC Alignment

Nun wird etwas genauer auf die Klasse `IfcAlignment` zur Beschreibung von Trassierungen eingegangen, da im Rahmen dieser Arbeit eine IFC Datei erzeugt wird, die auf der Erstellung eines `IfcAlignments` basiert, und anschließend entlang der Trasse Elemente platziert.

Mit der IFC Version 4 wurde das `IfcAlignment` erstmals eingeführt, welches den Konzepten des konventionellen Trassenentwurfs mit zwei Ansichten, der Draufsicht und dem Längsschnitt folgt. Die Trassierungsdaten können hierbei für den Austausch und die Archivierung von Informationen zu Straßen, Schienen, Wasserstraßen als auch anderen Linienbauwerken verwendet werden (KÖNIG et al., 2016). Zusammen mit dem `IfcAlignment` wurden auch die Entitäten für die unterschiedlichen Kurvensegmente eingeführt, die für die Trassierungsbeschreibung relevant sind. Außerdem können Objekte linear entlang einer Achse platziert werden, was auch als lineare Referenzierung bezeichnet wird. Um den Querschnittsverlauf einer Trassierung zu beschreiben, ist das Sweeping von Querprofilen entlang der Achse vorgesehen (KADEN et al., 2019).

Es gibt drei Unterklassen von Trassierungen, mit denen einzeln oder in Kombination die Gesamttrassierung beschrieben werden kann. Diese sind die horizontale und vertikale Trassierung und die Trassierung in Form einer einzelnen 3D Kurve. Dabei kann eine vertikale Linienführung nie allein für sich stehen, sondern sie muss immer einer horizontalen Linienführung zugeordnet werden. Die horizontale Linienführung kann hingegen zum Beispiel für sehr frühe Entwurfszwecke auch ohne ein vertikales Gegenstück definiert werden. Eine 3D Trassierung beinhaltet implizit beides und kann daher auch alleine verwendet werden.

Zur geometrischen Repräsentation einer der drei Trassierungsklassen gibt es wiederum mehrere Möglichkeiten. Diese sind:

- 2D Linienzug (2D Polylinie)
- 3D Linienzug (3D Polylinie)
- 2D Beschreibung aus einer Folge von Trassierungselementen
- 3D Beschreibung aus jeweils einer Folge von horizontalen und vertikalen Trassierungselementen
- Offsetcurve (Kopie einer Trassierungskurve, die um eine bestimmte Distanz verschoben ist)

Zu den horizontalen Trassierungselementen gehören die Gerade, der Kreisbogen und der Übergangsbogen. Diese werden über die Attribute Startposition, Startrichtung, Segmentlänge und je nach Art des Elementes mit weiteren Parametern, wie dem Radius definiert. Die vertikalen Trassierungselemente sind hingegen die Längsneigung, die kreisförmige und die parabolische Ausrundung. Hier werden die Starthöhe, die Neigung am Start,

die horizontale Länge und die Anfangslänge bezogen auf die zugehörige horizontale Trassierungskurve zur eindeutigen Beschreibung angegeben. Bei beiden Trassierungsteilen ist es wichtig, dass der Endpunkt eines Segments mit dem Anfangspunkt des folgenden Segments übereinstimmt. Andernfalls wird die definierte Linienführung als ungültig gewertet. Ein tangentialer Anschluss angrenzender Segmente ist hingegen optional (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d).

3.2.3 Möglichkeiten der Implementierung nicht definierter Objekte und Attribute - IFC Proxy Elemente

Aus den vorherigen Kapiteln wird ersichtlich, dass noch längst nicht alle notwendigen Elemente des Bauwesens in das IFC Schema aufgenommen wurden. Auch wenn fortlaufend an Erweiterungen gearbeitet wird, wird es immer Sonderelemente geben, die noch nicht explizit definiert sind. Vor allem gibt es auch nationale Standards, die auf internationaler Ebene nicht relevant sind, aber dennoch mit Hilfe des IFC Formates abgebildet werden sollten.

Für solche Fälle wurde eine elegante Lösung eingebaut. Neben den grundlegenden Merkmalen von Objekten, die statisch im Schema definiert sind, können Eigenschaften (engl. Properties) auch dynamisch angelegt werden. Hierfür gibt es die Klasse `ifcProperty`. Jedes Objekt kann dabei eine unbegrenzte Anzahl an individuell angelegten `ifcProperties` besitzen. Für gewöhnlich wird eine neue Eigenschaft nach dem Schema Name, Wert, Datentyp und Einheit angelegt. Falls eine ganze Gruppe von neuen Eigenschaften angelegt werden soll, können diese in einem Property Set zusammengefasst werden. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass mit der Verwendung von `ifcProperties` auch Nachteile verbunden sind. Jedem Anwender ist frei überlassen, wie er seine Attribute benennt und definiert. Daher existiert oft eine Vielzahl ähnlicher, aber dennoch unterschiedlicher Definitionen. So kann ein Softwareentwickler zwar allgemeine Funktionalitäten für die Klasse `ifcProperty` in ein BIM-Autorenprogramm implementieren, aber aufgrund unzähliger individueller Definitionen nicht gesondert auf spezielle Eigenschaften eingehen. Um dem ein Stück weit entgegen zu wirken, wurde von buildingSMART und auch von nationalen Institutionen eine Bibliothek von Property Sets herausgegeben, die zwar nicht Teil des offiziellen IFC Datenschemas sind, aber zum Beispiel eine nationale Erweiterung darstellen könnten, um eine weitere Vereinheitlichung der Dateien zu ermöglichen. Bei dieser Bibliothek, die auch buildingSMART Data Dictionary (bSDD) genannt wird, handelt es sich um eine Datenbank, die Klassifikationen von Objekten und deren Eigenschaften zur Verfügung stellt. Daneben werden Übersetzungen von Eigenschaften in mehrere Sprache angegeben, um die projektintere Zusammenarbeit in mehrererlei Hinsicht zu vereinfachen (BORRMANN et al., 2015).

Neben den `ifcProperties`, die neue Attribute definieren, gibt es analog dazu auch die Möglichkeit eine nicht definierte Klasse zu erstellen. Dafür gibt es die Entität `ifcProxy`, mit der Objekte und Prozesse definiert werden können, die Teil eines Projekts sind, aber bisher noch nicht Teil des IFC Modellierungsschemas sind. Wie ein gewöhnliches Objekt

kann ifcProxy genauso Attribute und Beziehungen zu anderen Objekten erhalten. Im Falle, dass ein neues Bauteil erstellt werden soll, kann auch direkt die Klasse ifcBuildingElementProxy verwendet werden. Elemente dieser Klasse verfügen über alle Grundeigenschaften von Bauteilen der Art ifcBuildingElement, können aber zusätzlich mit der elementspezifischen Semantik erweitert werden (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d). Somit können also momentan vorherrschende Lücken des IFC Schemas im Infrastrukturbau umgangen werden bis eine passende Erweiterung vorliegt. Es ist jedoch zu beachten, dass ifcProxys als Ergänzung auf semantischer Ebene zu verstehen sind. Möchte man hingegen nicht standardisierte Geometrien beschreiben, wie beispielsweise den Querschnitt des Eisenbahnoberbaus, ist man auf die vom IFC Schema gegebenen Möglichkeiten beschränkt.

3.3 Alternative Datenformate zu IFC

Für die Weiterverarbeitung in BIM Autorenwerkzeugen, also zum Beispiel zur Modellkoordination, sollen die Daten der Videobefahrung zusammen mit den ergänzenden Daten von OSM verwendet werden. Deshalb müssen die bisher in Tabellenform festgehaltenen Informationen in ein anderes Datenformat überführt werden, damit geometrische und semantische Eigenschaften von der jeweiligen Software importiert werden können. Dafür werden drei mögliche Formate betrachtet und ihre Vor- und Nachteile verglichen, um die Entscheidung für eines der Formate treffen zu können. Neben dem bereits vorgestellten IFC Format wird die Rail Markup Language (railML) vorgestellt und die proprietären Datenformate, die in Softwareprodukten von Autodesk Verwendung finden.

3.3.1 Proprietäre Datenformate von Autodesk

Autodesk ist ein Softwarehersteller, mit einer Vielzahl von Produkten für die Planung von Bauwerken unterschiedlicher Art (AUTODESK, 2020a). Aus diesem Grund wird deren Format als Stellvertreter für proprietäre Datenformate in Betracht gezogen.

Auch wenn die Produktpalette von Autodesk viele Bereiche des Bauingenieurwesens und auch von anderen Ingenieursdisziplinen abdeckt, so war diese anfangs mehr auf den Hochbau ausgerichtet. Mittlerweile gibt es auch Anwendungen, die extra für den Tiefbau entwickelt wurden, bzw. auch Hochbauanwendungen, die für diesen Bereich erweitert wurden. Dazu gehört das Programm Civil 3D, mit dem unter anderem ein digitales Geländemodell (DGM) eingeladen werden kann, welches als Basis für den Entwurf einer Achse für eine Straße oder eine Eisenbahnlinie dient. Zusätzlich kann die Trassierung in Lageplan und Höhenplan bearbeitet werden und der Querschnitt individuell angepasst werden. Mittels Infraworks können Straßen und Schienen in frühen Entwurfsphasen mit ihrer Umgebung visualisiert werden, vor allem um verschiedene Varianten vergleichen zu können. Zuletzt gilt es noch, die Software Revit zu erwähnen. Sie ist vorrangig für den Hochbau ausgelegt und unterstützt die Erstellung vieler Bauteile aus diesem Bereich in 3D. Mit benutzerdefinierten Revit Bauteilfamilien ist es möglich Elemente aus dem

Infrastrukturbau gut darzustellen. So können auch Tunnels, Brückenbauwerke, Bahnhöfe und auch Bahnstrecken mit Signaltechnik modelliert werden. Über den Infrastrukturbau hinaus verfügt Autodesk auch über Anwendungen zur Modellkoordination mit Kollisionsprüfung oder für das Facility Management in der Betriebsphase, der Schwerpunkt liegt aber deutlich auf der Entwurfsplanung (AUTODESK, 2020a).

Die Softwareprodukte von Autodesk haben eine große Bandbreite an unterstützten Datenformaten, wie beispielsweise .dwg und .dxf für Zeichnungen oder .rvt für Revit Dateien (AUTODESK, 2020b, 2020c). Da es sich um proprietäre Formate handelt, ist eine Dokumentation der Speicherstruktur nicht öffentlich zugänglich. Dies macht den direkten Vergleich mit den IFC recht schwierig. Wie bei eigentlich allen herstellerabhängigen Datenformaten gibt es mit jeder neuen Softwareversion auch eine neue Version des jeweiligen Dateiformats. So sind Dateien, die mit alten Versionen erstellt wurden, zwar noch über einige Zeit von neueren Softwareversionen lesbar, allerdings ist nicht garantiert, dass dies auf unbegrenzte Zeit möglich ist (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR, 2019d).

Für die vorliegende Aufgabenstellung wäre es denkbar, beispielsweise ein Plugin für Revit zu programmieren, dass die Eingangsdaten in Form von Exceltabellen einliest und auf Basis derer Elemente generiert und richtig platziert. Dafür müssten die vorkommenden Ausrüstungselemente zuerst mit Bauteilfamilien selbst erstellt werden. Damit kann zwar der geometrische Teil der Bauelemente gut abgebildet werden, die Semantik kann jedoch nur beschränkt wiedergegeben werden. Als sich ergebende weitere Herausforderung kann Revit nicht mit großen Bereichen von Globalkoordinatensystemen umgehen, sodass alle Koordinaten zuerst auf ein lokales Koordinatensystem umgerechnet werden müssen. Zum anderen wurde Revit nicht für den Entwurf von linienförmigen Bauwerken ausgelegt, sodass gängige Konzepte bei der Eisenbahnplanung, wie die lineare Platzierung von Elementen entlang der Achse nur umständlich realisiert werden können (ESSER & BORRMANN, 2018).

3.3.2 RailML

Eine weitere Alternative zum IFC Austauschformat stellt die Rail Markup Language (railML) dar. Dieses Datenformat ist spezialisiert auf den Datenaustausch zwischen Softwareprogrammen im Eisenbahnbereich, mit Fokus auf Betrieb und Simulation. RailML ist genauso wie das IFC Format herstellernerneutral und open source (RAILML.ORG, 2020).

Im Jahr 2001 hat die Entwicklung dieses Datenaustauschformats begonnen und mittlerweile wurde die Version 3.1 veröffentlicht. Dabei findet die Weiterentwicklung über Gruppen statt, die auf Basis von Vorschlägen, Kritik und Diskussionen, hauptsächlich über das Internet, neue Erweiterungen und Anpassungen erarbeiten. Diese werden anschließend von technischen Koordinatoren überprüft und dann veröffentlicht. Jede interessierte Person kann sich an dem Entwicklungsprozess beteiligen und ihr persönliches Wissen und Interesse mit einbringen. Dadurch gibt es also keinen konkreten Geschäftsplan. Stattdessen wird das Modell an den Stellen weiterentwickelt, die von der Community

als notwendig empfunden werden. Es gibt zwar eine internationale Beteiligung am Entwurf von Formaterweiterungen, wobei aber Deutschland, Schweiz und Frankreich zu den Hauptbeteiligten gehören, und außereuropäische Teilnahme nur sehr gering vorhanden ist. Dadurch können manche Themenbereiche stark von nationalen Interessen geprägt werden, da Internationalität kein vorrangiges Ziel ist, sondern sich lediglich als Zufallsprodukt aus den interessierten Personen ergibt (KOMORGEN, 2013).

Das Dateiformat railML verwendet die Metasprache XML als Programmierumgebung, um andere Auszeichnungssprachen (engl. markup language) zu definieren. Anders als bei IFC kann mit XML nicht nur das Datenschema beschrieben werden, sondern auch die Daten selbst, die im definierten Datenschema angeordnet sind. Ein großer Vorteil von XML ist, dass die Sprache sehr gebräuchlich ist, und deshalb viele Softwareentwickler mit ihr vertraut sind. Das railML Austauschformat ist über Elemente mit Attributen und Beziehungen zu anderen Elementen strukturiert. Dabei werden Elemente nach Struktur eines Graphenmodells durch Knoten und ihre Beziehungen in Form von Kanten dargestellt. Die Elemente werden den folgenden Hauptbereichen zugeordnet:

- Timetable (Informationen im Zusammenhang mit Zeitplänen von Zügen)
- Infrastructure (Schienen, Signal- und Sicherungstechnik, ...)
- Rolling Stock (alle Arten von Fahrzeugen, die im Eisenbahnbereich zum Einsatz kommen)
- Interlocking (Stellwerksinformationen)
- Station Facilities (Haltestelleneinrichtungen)

Die Objekte dieser Teilbereiche sind hauptsächlich auf die Belange der Betreiber ausgelegt und weisen weniger konstruktive Eigenschaften auf. Elemente die in einer Datei definiert werden, übernehmen nach dem Vererbungskonzept Eigenschaften von ihren Superklassen. Neben dem direkten Datenaustausch über Dateien können mit railML auch Informationen durch Interprozesskommunikation zwischen zwei Programmen ausgetauscht werden. Dies geschieht mit Hilfe von Webdiensten, wofür keine Austauschdateien erzeugt werden müssen (NASH et al., 2004).

Seit 2016 ist railML auch Teil eines offiziellen Standards, dem International Railway Standard (IRS), der eine Erweiterung des ISO Standards darstellt. Allerdings wurde nicht railML selbst in den Standard aufgenommen, sondern das RailTopModel (RTM), das railML mit beinhaltet. Das RTM ist eine allgemeine Beschreibung von Topologie basierter Infrastruktur im Eisenbahnbereich. Dabei ist dieses Modell nur ein Informationsmodell, das visuell mit der Unified Modeling Language (UML) beschrieben werden kann. Es handelt sich also nicht um ein Datenmodell, weshalb railML als Datenaustauschformat darin aufgenommen wurde. Ebenso wie railML ist RTM auch vorrangig für Betreiber und Manager von unterschiedlichen Arten von Eisenbahnanlagen und Ähnlichem ausgelegt (AUGELE, 2017).

Auch wenn RTM bzw. railML und IFC beides offene Formate sind, kann man im direkten Vergleich einige grundlegende Unterschiede feststellen. Während railML XML und UML verwendet, greift IFC auf EXPRESS und EXPRESS-G zurück. Zudem gibt es Unterschiede in der Modellarchitektur. So verwendet RTM zum Beispiel mehrere Layer in denen Informationen von unterschiedlichem Detaillierungsgrad festgehalten werden, was dem LOD Konzept sehr ähnelt. IFC hat bisher allerdings noch keine vergleichbare Funktion. Der größte Unterschied zwischen den beiden Formaten sind aber die Informationen, die beschrieben werden. Das railML Format legt großen Wert auf Informationen zur Entwicklung von Fahrplänen, effizientem Betrieb und die Abbildung gesamter Schienennetzwerke, wohingegen IFC an erster Stelle konstruktive Eigenschaften für den Bau beinhaltet, mit entsprechenden Erweiterungen für die Betriebsphase. Konstruktive Informationen sind in railML so gut wie gar nicht enthalten. So kann eine IFC Datei beispielweise geometrische Informationen über den genauen Verlauf einer Eisenbahntrasse enthalten, wohingegen in einer railML Datei lediglich topologische Informationen vermerkt sind, wie zum Beispiel zwischen welchen Infrastrukturknotenpunkten Verbindungen bestehen. Zu erwähnen ist auch, dass railML allein durch freiwillige Mitarbeit weiterentwickelt wird, während IFC durch gesponserte Projekte erweitert wird (AUGELE, 2017; BOLLIG, 2020).

In gewisser Weise sind die beiden Formate sehr unterschiedlich und würden sich in manchen Bereichen sogar sehr gut ergänzen. Es liegen aber auch Überschneidungen vor, wie zum Beispiel bei der Topologiebeschreibung. So gibt es auch schon Pläne einer Kollaboration zwischen dem RailTopModel, railML.org und buildingSMART, um sich aus Gründen von Effizienz und Konsistenz zu besprechen und womöglich ein gemeinsames Datenlexikon zu erarbeiten (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020a).

3.4 Fazit

Durch die große Zahl an computergestützten Programmen, die jeden Tag zunimmt, und fast der gleichen Anzahl an Datenformaten ist ein offener Standard für den Datenaustausch unabdingbar, um der Vielzahl an Schnittstellen Herr zu werden. Hierbei ist IFC wohl das vielversprechendste Datenformat, da es weite Bereiche des Bauwesens auf internationalem Niveau abdeckt, fortlaufend erweitert wird und mittlerweile hohe Akzeptanz bei Softwareherstellern und Anwendern genießt. Damit kann es zum Beispiel Planungsprozesse wie die Koordination von mehreren Teilmodellen im Koordinationsmodell gut bewerkstelligen oder auch den Datenaustausch stark vereinfachen. Dies ist die Grundlage für einen erfolgreichen BIM Einsatz bei sämtlichen Anwendungsfällen. Momentan gibt es allerdings noch einige Teilbereiche, wie den Infrastrukturbau, für die das IFC Datenschema noch nicht genügend Objekte definiert hat, um eine praktische Anwendung problemfrei zu gewährleisten. Gerade für diesen Bereich wird es jedoch in naher Zukunft einige Erweiterungen geben, die die wichtigsten Anwendungsfälle aus den Bereichen Bahnbau, Brückenbauwerken und Tunnels abdecken. Da aber hierbei nicht nur auf die Veröffentlichung der neuen IFC Versionen, sondern auch deren Integration in verschiedenste Softwareanwendungen notwendig ist, ist eine Übergangslösung von Nöten. Hierfür

erscheint die Verwendung von IfcProxy Elementen und Property Set eine gute Möglichkeit. Zwar ist die starke Benutzerabhängigkeit nicht optimal für eine gute Weiterverarbeitung, aber sie ermöglicht es, alle fehlenden Objekte und Prozesse als vorübergehende Lösung in IFC Dateien aufzunehmen und geordnet abzuspeichern.

Eine Alternative zur Verwendung der IFC ist das herstellernerneutrale Format railML. Für den Fall der LST Planung stellt es eine funktionierende Option dar, da bei Eisenbahnausrüstungselementen die konstruktiven Eigenschaften, die von railML nur in geringem Umfang beschrieben werden, von untergeordneter Bedeutung sind. Nichtsdestotrotz ergeben sich bei der Zusammenarbeit mit nicht eisenbahnspezifischen Gewerken Probleme, da das railML Format nur den Bahnbau beschreibt und beispielsweise bei der Verwendung in Gesamtkoordinationsmodellen an seine Grenzen stößt. Darüber hinaus ist das IFC Format weiter verbreitet und es erreicht eine größere Bandbreite an Computeranwendungen. Die zweite Alternative liegt in der Verwendung proprietärer Formate, für die eigentlich nur die Produktpalette von Autodesk und deren Datenformate in Frage kommen würde, da kein anderer Hersteller annähernd viele Planungsbereiche im Bauwesen abdecken kann. Hier können die wichtigsten Bereiche des Infrastrukturbaus mit den Programmen Civil 3D, Revit oder Infracore modelliert werden. Für kleine Teilbereiche, wie die LST Planung, wird hingegen die Verwendung von selbstprogrammierten Plugin Lösungen erforderlich. Nach wie vor existieren die Nachteile, dass sämtliche Beteiligte mit den Softwareprodukten von Autodesk vertraut sein müssen und zudem die Langzeitverwendung von Dateien nicht gewährleistet ist.

Aus diesen Gründen wurde das IFC Format gewählt, um die Eingangsdaten zur Eisenbahntrassierung und zu Ausrüstungskomponenten in objektorientierter Form abzuspeichern und flexible Verwendungsmöglichkeiten zu begünstigen.

Kapitel 4

Erstellung einer IFC Datei anhand vorliegender Trassierungs- und Bahnausrüstungsdaten

Nach den zuvor erläuterten fachlichen Grundlagen folgt nun die Beschreibung des eigentlichen Projekts. Hierfür werden die zu Grunde liegenden Datensätze der RIMcomb Videobefahrung und von Open Street Map (OSM) beschrieben. Danach werden die beim direkten Vergleich der Daten beobachtbaren Inhomogenitäten dargelegt und mögliche Gründe dafür aufgezeigt. Um die widersprüchlichen Informationen dennoch in einer Modellumgebung vereinen zu können, werden verschiedene Herangehensweisen aufgezeigt und die Entscheidung für eine dieser Varianten erörtert. Abschließend wird auf den Prozess der Erstellung einer IFC Datei als Kombination der vorliegenden Daten eingegangen und die dabei aufgetretenen Probleme und Herausforderungen besprochen, die den Vorgang wesentlich beeinflusst haben.

4.1 Datengrundlage

4.1.1 RIMcomb

Eine der beiden Datenquellen, die zur Modellerstellung verwendet wurde, sind Videobefahrungsdaten des RIMcomb Projekts. Dieses Projekt wurde 2017 gestartet und trägt den ausgeschriebenen Namen "Rail Information Modelling für die Ausrüstungstechnik von Bahninfrastruktur". Die beteiligten Partner sind die Signon Deutschland GmbH, die AEC3 Deutschland GmbH und die Technische Universität München. Thematisch befasst sich das Forschungsvorhaben mit der Verbesserung gewerkeübergreifender Planungsprozesse von Bahnanlagen durch die Unterstützung mit computerbasierten Methoden. Dazu gehört zum Beispiel die teilautomatisierte Prüfung der Ausrüstungsplanung auf Normkonformität. Man erhofft sich davon neben einem Effizienzgewinn bei der Planung auch eine höhere Planungsqualität, vor allem bei Instandhaltungs- und Erneuerungsmaßnahmen. Der Fokus des Projekts liegt deutlich auf der Ausrüstungstechnik zu der Leit- und Sicherungstechnik, Oberleitungs- und Fahrleitsystem, elektrische Energieversorgungs- und Anlagensystem und IT- und Telekommunikationssysteme zählen. Auf Grund der Interdisziplinarität dieses Bereichs erwartet man sich zudem große Vorteile durch die Verminderung von Datenaustauschverlusten (WINKELBAUER et al., 2019).

Um den Planungsprozess zu erleichtern und zu verbessern, wurden verschiedene Herangehensweisen gewählt, die letzten Endes in Kombination zur Anwendung kommen sollen. Zum einen gehört dazu die Entwicklung einer webbasierten Datenbank, die speziell auf Ausrüstungselemente ausgelegt ist. Diese ist bereits größtenteils fertiggestellt. Sie ist sehr nah an das IFC Schema angelehnt und ermöglicht es, abgespeicherte Elemente in vorformatierte AIAs zu überführen oder auch an das Programm Autodesk Revit weiterzugeben und dort graphisch darzustellen (WINKELBAUER et al., 2019). Zum anderen setzt sich das Projekt mit der Generierung und Verifikation der Datengrundlage auseinander, da über 90% der Bauvorhaben auf dem Bestand aufbauen und hier einige Schwierigkeiten auftreten. Im Bahnbau liegen Bestandsdaten häufig nur in Form von eingescannten Papierplänen vor, die zum Teil nicht der Realität entsprechen. Der Grund dafür ist, dass Änderungen während der Bauausführung nicht immer in die Baupläne übertragen wurden. Deshalb vergleicht RIMcomb Bestandspläne mit der Realität und zwar auf folgende Art und Weise (SIGNON, 2018).

Einerseits arbeitet das Projekt an der Digitalisierung von Planungsunterlagen, wobei hier nicht das digitale Abspeichern von eingescannten Plänen gemeint ist, sondern die menschenlesbaren Informationen auf den Plänen auch für den Computer zugänglich zu machen. Dafür wird eine Anwendung zur automatischen Erkennung von Plansymbolen nach Art und Position entwickelt, da dies per Hand ein fehleranfälliger und zeitintensiver Prozess ist. Für diese Aufgabe wurden bereits einige Ansätze ausgearbeitet. Allerdings ist die Überschneidung der Symbole mit anderen Linien stets eine große Hürde, die es zu überwinden gilt. RIMcomb kombiniert und erweitert mehrere dieser Ansätze und verwendet nun ein Convolutional Neural Network (CNN) (deutsch: Gefaltetes Neuronales Netzwerk) zur Bewältigung der Aufgabe. Dabei werden die Pläne in mehrere kleine Rechtecke unterteilt, die von einem ersten CNN nur auf Existenz und Anzahl des gesuchten Symbols überprüft werden. Anschließend werden weitere CNNs verwendet, die für Planteile mit mindestens einem erkannten Symbol die exakte Position ausfindig machen. Um die neuronalen Netzwerke zu trainieren und zu testen werden echte Pläne der DB verwendet, aber auch zufällig erstellte Zeichnungen, auf denen Plansymbole platziert werden. Die bisher erzielten Ergebnisse sind schon sehr vielversprechend, werden aber noch weiter verbessert (STOITCHKOV et al., 2019).

Andererseits beschäftigt sich RIMcomb mit der Aufnahme von Realdaten, die im Rahmen dieser Arbeit verwendet werden. Normalerweise ist die Bestandsaufnahme sehr aufwändig, da Streckenabschnitte Stück für Stück vermessen werden müssen, was zum Teil auch Begehungen und damit verbundene Streckensperrungen erfordert. Dieser Prozess soll mit einer automatischen Erkennung von Infrastrukturelementen in der Realumgebung vereinfacht werden. Dazu werden Strecken mit einem Zug befahren, an dessen Front sich eine Kamera befindet, die die befahrene Strecke per Video aufzeichnet. Das hat den Vorteil, dass diese Art der Bestandsaufnahme unter halbwegs normalem Betrieb durchgeführt werden kann. Das erzeugte Video wird anschließend Bild für Bild ausgewertet, wobei auch hier ein CNN zum Einsatz kommt. Hierbei sollen auf den Bildern Oberleitungsmasten, Balisen, Lichtsignale, Weichen, Bahnsteigkanten und die Gleise selbst erfasst werden.

Für eine akzeptierbare Funktionalität wurden mehrere Kriterien aufgestellt, die vom CNN erfüllt werden müssen. Zum einen muss die Trefferquote über 99% liegen, sprich weniger als 1% der existierenden Objekte werden gar nicht erkannt. Und zum anderen muss die Genauigkeit über 95% liegen, was konkret bedeutet, dass Falscherkennungen weniger als 5% ausmachen. Betrachtet man die Performance des Neuronalen Netzwerks isoliert bei einem einzelnen Bild, so sind diese Bedingungen nicht erfüllt. Beispielsweise liegt die Trefferquote von Oberleitungsmasten bei 87% und bei Balisen bei 94%. Nun kann man sich jedoch zum Vorteil machen, dass jedes Ausrüstungselement auf mehreren Bildern des Videos (25 Bilder pro Sekunde) erfasst wird und so mehrfach die Möglichkeit besteht, dass Elemente richtig erfasst werden. Mit dieser und anderen Postprocessing Methoden konnten die Akzeptanzkriterien letztendlich erreicht werden. So liegt die Trefferquote bei Weichen und Balisen bei 100% und bei den restlichen Objekten über 99% (WINKELBAUER et al., 2019). In Abbildung 4.1 ist ein Foto eines Befahrungsvideos dargestellt, zusammen mit den Bereichen in denen das CNN einen der gesuchten Ausrüstungsgegenstände erkannt hat.

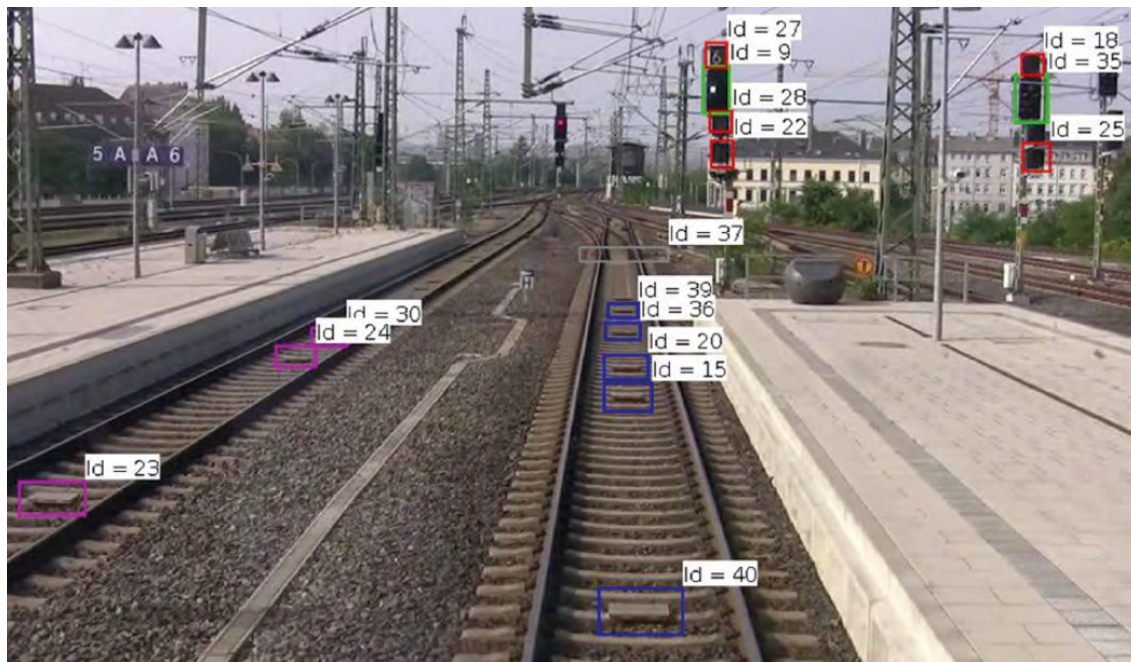


Abbildung 4.1: Befahrungsbild mit vom neuronalen Netzwerk erkannten Elementen (STOITCHKOV et al., 2019).

Die so erkannten Ausrüstungselemente können mit Hilfe photogrammetrischer Verfahren mit den Koordinaten des Standorts der Kamera einer genauen Position zugeordnet werden. All diese Informationen wurden erfasst und berechnet und anschließend in tabellarischer Form festgehalten. Für den Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Datensätze zur Verfügung gestellt, die je einen Streckenabschnitt von Karlsruhe und Hockenheim zusammen mit deren Ausrüstungselementen widerspiegeln. Auch wenn ausschließlich diese Beispieldaten zur folgenden Modellerstellung verwendet wurden, funktioniert die erstellte Anwendung auch mit Befahrungsdaten anderer Streckenabschnitte. Beide Datensätze beinhalten je zwei Excel Dateien. Eine davon beschreibt den Gleisverlauf mit vielen einzelnen Messpunkten auf der Gleismitte. Im Falle von Karlsruhe besteht dieser aus 15 000 Punkten und

bei Hockenheim aus knapp 10 000 Punkten. Die zweite Excel Datei enthält Informationen über die Ausrüstungsobjekte, die vom CNN erkannt wurden.

Die Tabelle 4.1 zählt die wichtigsten Parameter auf, die in den Ausgangsdaten dokumentiert wurden und erläutert diese. Da die Dateien von Gleis- und Ausrüstungsdaten identisch aufgebaut sind, treten die Attribute immer in beiden Tabellen auf und können gemeinsam erklärt werden.

Tabelle 4.1: Relevante Attribute, der zu Grunde liegenden Befahrungsdaten mit stichpunktartiger Erklärung.

Attribut	Erläuterung
LineName	Nummernbezeichnung des Streckenabschnitts
ElementTypeName	Art des Ausrüstungselements, bzw. Wegpunkt im Falle der Gleispunkte
ElementTypeKey	Abkürzungen für ElementTypeName
RelPosition	Position relativ zum Anfangspunkt der Videobefahrung
AbsPosition	Position relativ zum Beginn des gesamten Streckenabschnitts
Latitude, Longitude	Koordinaten im geodätischen Referenzsystem WGS84
UTM X, UTM Y	Koordinaten im UTM Koordinatensystem
Altitude	Höhe der Schienenoberkante
GUID	Eindeutige ID zur Referenzierung

Es ist sehr wichtig zu berücksichtigen, dass die in der Tabelle für Ausrüstungselemente gegebenen Latitude und Longitude Koordinaten nicht den eigentlichen Standort des Objekts angeben, sondern den senkrechten Lotpunkt vom Mast auf die Gleismitte darstellen. Dies entspricht dem Punkt auf der Gleismitte, der dem Objekt am nächsten ist.

4.1.2 Open Street Map

Die zweite Datenquelle, die als Vergleichsgrundlage herangezogen wurde, ist Open Street Map (OSM). Hierbei handelt es sich um eine sehr große kostenlose Geodatenbank. Diese Datenbank wurde 2004 ins Leben gerufen, mit dem Ziel eine kostenfreie weltweite Straßenkarte zu erstellen. Mittlerweile sind hingegen nicht nur Straßeninformationen abgespeichert, sondern auch Informationen zu Infrastruktur aller Art und auch anderweitigen Kartendaten. Im Gegensatz zu anderen Kartendiensten, wie zum Beispiel Google, die oft nur die Karte für persönliche Zwecke zur Verfügung stellen, kann man bei OSM auch auf die zu Grunde liegenden Rohdaten zugreifen. Außerdem können diese Informationen auch kostenfrei für Websites, Lehrzwecke und viele andere Anwendungen verwendet werden. Dabei basiert die Akquisition von Kartendaten auf der Mithilfe der Nutzer. Diese

sammeln mit Hilfe von GPS-Geräten Informationen und pflegen diese in die Datenbank ein. Daneben gibt es auch Unternehmen und Organisationen, die durch Datenspenden zur Vervollständigung der OSM Weltkarte beitragen. Momentan gibt es über zwei Millionen aktive Nutzer, die Daten aufnehmen und die Datenbank befüllen (OPENSTREETMAP, 2020).

Über das sogenannte Overpass API können per Programmiercode Kartendaten von OSM abgefragt werden. Ein API (Application Programming Interface) ist eine Programmierschnittstelle, die es erlaubt mit einer webbasierten Datenbank zu kommunizieren und unter anderem gespeicherte Daten abzufragen. Die angeforderten Informationen werden dann in Form von Quelltext als Antwort auf die Anfrage zurückgegeben. Innerhalb dieser Arbeit wird diese Möglichkeit genutzt, um Vergleichsdaten zur Videobefahrung zu erlangen. Zuerst wurde dafür ein Kartenbereich definiert, der Karlsruhe und Hockenheim einschließt, um dort alle vorhandenen Gleise abrufen zu lassen. Das Ergebnis dieser Anfrage kann man sich mit Overpass Turbo anzeigen lassen. Dies ist in Abbildung 4.2 dargestellt, wobei der Bildausschnitt seitlich etwas größer ist als der gewählte Kartenbereich.

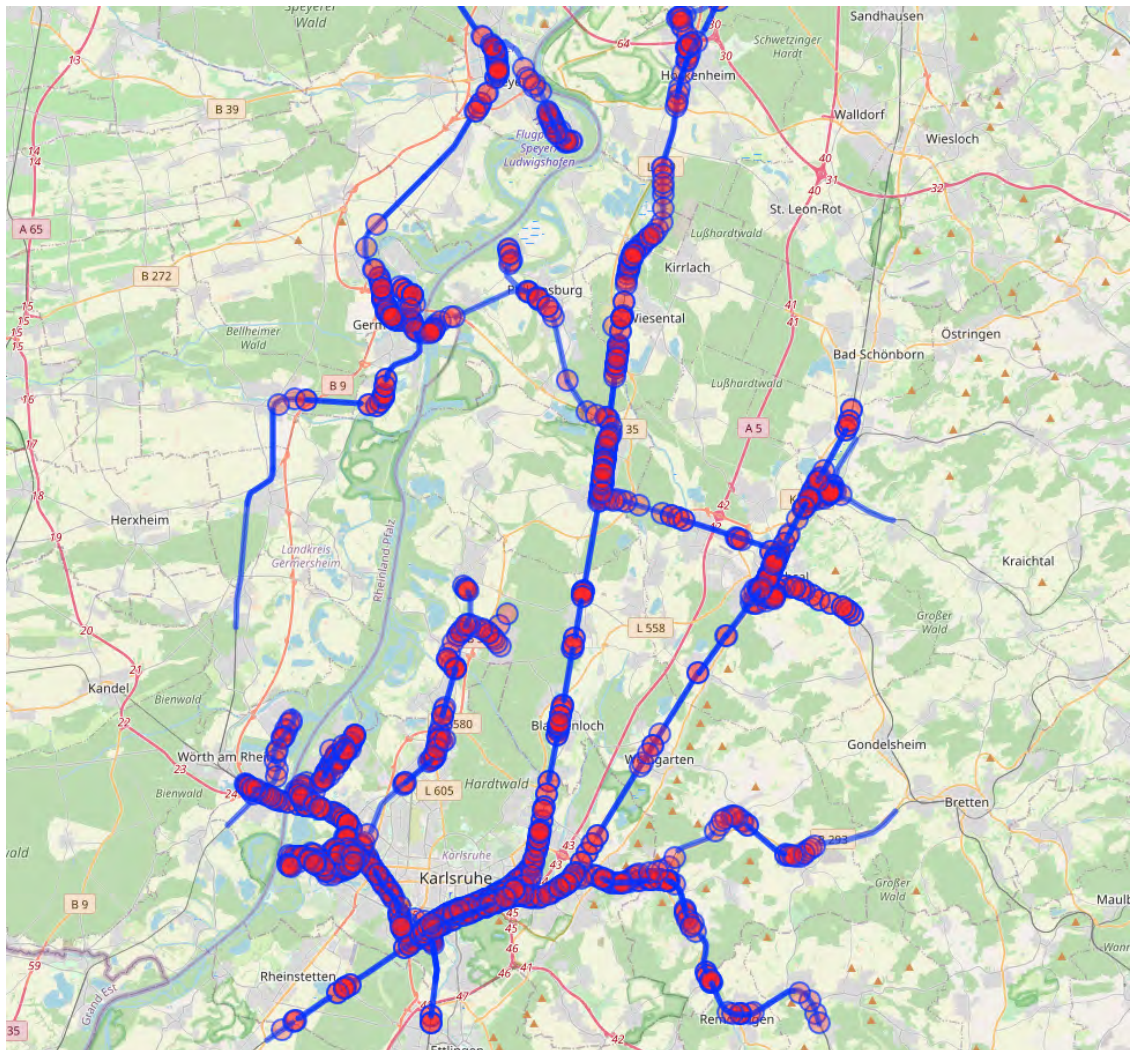


Abbildung 4.2: Abfrage aller Gleise in Standard-Spurbreite im Bereich von Karlsruhe bis nach Hockenheim.

Die erhaltenen Daten bestehen dabei grundsätzlich aus einer Sammlung von Objekten des Typs Node (Knoten), Way (Weg), Area (Fläche) oder Relation (Beziehung), welche neben den Koordinaten auch weitere Eigenschaften, die das Objekt genauer beschreiben, erhalten können. Im Falle der abgefragten Gleise wird eine Vielzahl an Wegen zurückgegeben, die jeweils durch einen Linienzug mit einzelnen Punkten definiert werden. Darüber hinaus sind jedem Gleisstück Attribute zur Beschreibung von Elektrifizierung, Maximalgeschwindigkeit und Ähnlichem zugeordnet (OPENSTREETMAP, 2020). Der Detaillierungsgrad der angegebenen Informationen ist jedoch von Gleisstück zu Gleisstück sehr unterschiedlich, da diese von vielen verschiedenen Nutzern in die OSM Datenbank eingegeben wurden. Um auch vergleichbare Informationen zu Ausrüstungsgegenständen zu finden, wurden die in der Videobefahrungstabelle erfassten Elemente betrachtet und äquivalente Elementgruppen bei OSM gesucht. Letztendlich wurden alle Objekte der folgenden fünf Gruppen abgerufen:

- railway:signal (Sämtliche Arten von elektrischen und mechanischen Eisenbahnsignalen)
- railway:switch (Eisenbahnweichen)
- power:catenary_mast (Fahrleitungsmasten für Verkehrsmittel mit Oberleitungen)
- man_made:street_cabinet (Schaltschränke neben Straßen und Gleisen, die eine Art von Technik beinhalten)
- railway:vacancy_detection (Gleisfreimeldesysteme)

Jedoch ist nicht jede Art von Ausrüstungselementen in der OSM Datenbank erfasst, beispielsweise sind Kabelkanäle und -schächte nicht aufgeführt, die bei den Befahrungsdaten vielfach aufgelistet sind. Im Fall von PZB-Magneten ist nur mit ja oder nein angegeben, ob solche vorhanden sind, wohingegen diese in der Videobefahrung mit genauer Position erfasst wurden. PZB-Magneten werden dazu verwendet, die Geschwindigkeit von Zügen zu erfassen und zu überprüfen, ob Haltsignale und Geschwindigkeitsbeschränkungen eingehalten werden. Andere Elemente, die bei der Videobefahrung nur in sehr geringer Anzahl erfasst wurden, wurden aus Zeitgründen und der Übersichtlichkeit wegen bei der Anfrage an die OSM API weggelassen. Dazu gehören zum Beispiel Kilometersteine. Bei mehreren Tausend Ausrüstungselementen, die von der Videobefahrung erfasst wurden, sind nur zwei Kilometersteine aufgeführt. Beim Betrachten der abgefragten Ausrüstungselemente wurde vereinzelt festgestellt, dass sich die Person, die die Daten aufgenommen hat, über die Art eines Elements oder deren Eigenschaften unschlüssig war. Dies wurde beispielsweise in der Beschreibung verschiedener Elemente vermerkt. Es ist davon auszugehen, dass auch bei Objekten ohne explizitem Kommentar Fehler auftreten, da sich nicht jeder Nutzer über alle Objektklassen und der Bedeutung derer Eigenschaften bewusst ist. Dabei sind Ausrüstungsgegenstände, die in viele verschiedene Kategorien unterteilt sind, wesentlich fehleranfälliger als andere alltagsgeläufige Kartenelemente.

Alle ausgegebenen Daten wurden in Excel-Tabellen abgespeichert, da die Anzahl an Abfragen pro Tag beschränkt ist, und diese je nach Serverauslastung mehrere Minuten dauern können. Auf diese Weise werden die Daten einmal abgefragt und sind dann jederzeit für die weitere Verarbeitung sofort zugänglich. Stehen Befahrungsdaten eines anderen Ortes zur Verfügung, muss lediglich der Kartenausschnitt angepasst und die neuen Daten einmal abgefragt werden.

4.2 Datenvergleich

Bevor die beiden vorliegenden Datensätze in einem objektorientierten Modell vereint werden können, gilt es zuerst herauszufinden, wie gut die beiden Datenquellen zusammen passen, um auf dieser Basis eine geeignete Herangehensweise zur Dateierstellung auszuwählen. Deshalb versucht dieses Kapitel, Antworten auf die folgenden Fragen zu finden: Sind die Datensätze im Bezug auf die Position der Gleise und Ausrüstungselemente fast identisch, sodass eine Vereinigung gar nicht notwendig ist? Treten Inhomogenitäten auf, und wenn ja von welcher Größenordnung? Wie können diese Abweichungen begründet werden? Diese Fragen werden für die Trassierung und die Ausrüstungselemente größtenteils getrennt voneinander betrachtet. Neben der Beantwortung dieser Fragen wird auch darauf eingegangen, auf welche Art und Weise die Daten verglichen wurden und welche Hilfsmittel dafür verwendet wurden.

4.2.1 WPF Viewer zum ersten optischen Vergleich

Um ein erstes Gefühl für den Grad der Übereinstimmung der Videobefahrungs- und OSM-Daten zu bekommen, und mögliche Regelmäßigkeiten und Unregelmäßigkeiten zu erkennen, wurde eine Windows Presentation Foundation (WPF) Applikation entwickelt, die als Viewer und Debugging Werkzeug dienen soll. Mit WPF können einfache Windowsanwendungen erstellt werden, deren Benutzeroberfläche mit Knöpfen und ähnlichen Bedienelementen per XML definiert wird, wohingegen der Code-behind in C# zu schreiben ist. Sinn und Zweck ist es, mit der WPF Anwendung die gesammelten Excel-Daten einzulesen und visuell darzustellen, um einen ersten Gesamteindruck der Datengrundlage zu erhalten. Der unter dieser Voraussetzung entwickelte Viewer hat nun folgende Funktionalitäten: Mittels eines Dropdown Menüs können die Daten zu Trassierung und Ausrüstungselementen von Videobefahrung und OSM einzeln in den Viewer geladen und beliebig kombiniert werden. Die ausgewählten Daten können dann einerseits in Rohform in einer Listenansicht betrachtet werden, oder aber auch mit Hilfe des Helix Toolkits visualisiert werden. Dabei werden alle Signale und punktförmigen Objekt durch farbige Punkte repräsentiert und die Trassierung durch Linienzüge dargestellt. Zudem wurden einige Knöpfe programmiert, um Vergleichsberechnungen zu initiieren oder auch den IFC Export zu starten. Diese Funktionen werden später noch genauer erklärt. Im Bild 4.3 ist eine Visualisierung des erstellten Viewers zu sehen, die die Trassierung von Hockenheim bis nach Karlsruhe zusammen mit vorhandenen Ausrüstungsgegenständen abbildet.

In gewisser Weise kann der Viewer aber auch als Debugging Werkzeug verwendet werden. Mit ihm können sehr einfach Teilmengen der Datensätze angezeigt werden, um zu überprüfen ob alle Berechnungen erwartungsgemäß funktioniert haben, was für spätere Berechnungen und Vergleiche sehr hilfreich ist. Zudem können in der Listenansicht Punkte ausgewählt werden, die dann im Viewer rot markiert werden. Damit können bei auftretenden Fehlermeldungen die Probleme lokalisiert und mögliche Gründe einfacher erkannt werden. Da der Viewer in erster Linie zum Debugging verwendet werden soll, wurde mehr Wert auf die Funktionalität gelegt als auf eine benutzerfreundliche Oberfläche.



Abbildung 4.3: Visualisierung von Strecken - und Ausrüstungsdaten auf Basis der Daten von OSM und der RIMcomb Videobefahrung.

4.2.2 Vergleich der Trassierung

Zuallererst wurden daraufhin die Trassierungsdaten gegenübergestellt. Dazu wurden die Datensätze von OSM und der Videobefahrung in den Viewer geladen und visuell verglichen. Dabei wurde sehr schnell deutlich, dass Gleise, die in beiden Datensätzen erfasst wurden zwar recht parallel zueinander verlaufen, allerdings aber nicht an der selben Stelle, sondern leicht versetzt zueinander (siehe Grafik 4.4). Hier repräsentiert jede grüne Linie die Gleismitte von auf OSM erfassten Gleisen, wohingegen alle blauen Linien die gemessenen Gleismitten der Videobefahrung darstellen. Sehr auffällig ist, dass die auftretende Abweichung über den gesamten Gleisabschnitt nahezu konstant ist, so als wären die beiden Datensätze fast identisch und lediglich um einen bestimmten Betrag

zueinander verschoben. Um nicht nur eine qualitative, sondern auch eine quantitative Aussage zum Grad der Übereinstimmung machen zu können, wurden die erfassten Gleise im nächsten Schritt rechnerisch miteinander verglichen.

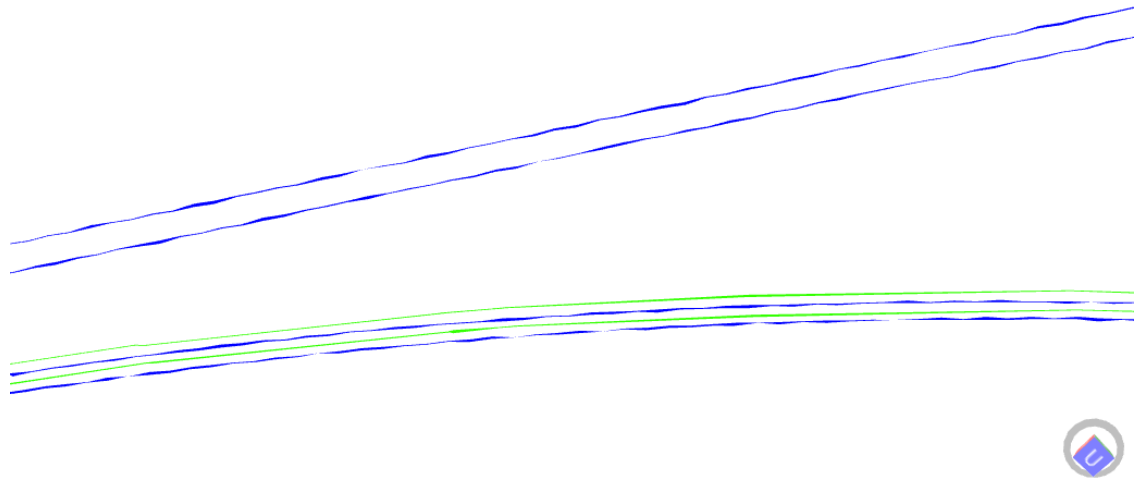


Abbildung 4.4: Gleise von OSM (grün) und Videobefahrung (blau) im Vergleich.

Aufgrund der Tatsache, dass beide Trassierungen aus Linienzügen bestehen, deren Punkte mehr oder weniger zufällig entlang der Gleisachse gewählt wurden, können die einzelnen Punkte nicht direkt miteinander verglichen werden. Deshalb wurde wie folgt vorgegangen. Da auf OSM weniger Gleise erfasst sind als von der Videobefahrung aufgenommen wurden, beinhalten die OSM Daten sämtliche Gleise, die verglichen werden können. So werden sämtliche Wegpunkte aus der OSM Datei einzeln herausgesucht und der kürzeste Abstand zum gleichen Gleis in der Videobefahrungsdatei berechnet. Dazu wird zuerst für jeden OSM Wegpunkt der Videobefahrungspunkt mit dem kürzesten Abstand herausgesucht. Um zu verhindern, dass Punkte von einem falschen Gleis zugeordnet werden, wurde ein Maximalabstand von 5 m gewählt. Alle Punkte, deren nächster Punkt weiter als dieser Wert entfernt sind, werden nicht berücksichtigt, da die Wahrscheinlichkeit sehr hoch ist, dass eine falsche Gleiszuordnung stattgefunden hat. Der Maximalabstand wurde mit verschiedenen Werten erprobt, die sich nach dem Mindestabstand zweier Gleise richten. Je nach Alter und Standort liegt der Mindestabstand zwischen 3,5 und 4,5 m (BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, 2019). Für den gewählten Maximalabstand konnten zwischen 3 und 5 m keinen Änderungen am Endergebnis festgestellt werden. Anschließend wird für alle übrig gebliebenen Punkte der tatsächliche Minimalabstand zum Videoalignment berechnet, welcher der Abweichung zwischen den Datensätzen entspricht. Hierfür werden die beiden Nachbarpunkte des Videobefahrungspunkts für weitere Berechnungen ausgewählt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Gleispunkt von OSM Punkt P genannt und dessen nächster Punkt aus den Videobefahrungsdaten Punkt V. Wiederum dessen vorhergehender Gleispunkt Nachbar N1 und der Nachfolgepunkt Nachbar N2 (siehe Skizze 4.5). Da von vornherein nicht klar ist, ob der Punkt P näher zur Geraden N1-V oder N2-V liegt, muss der Abstand zu beiden berechnet werden. Für Berechnungszwecke werden die Geradengleichungen

der Geraden N1-V und V-N2 aufgestellt und zusätzlich auch für die beiden zugehörigen Normalen, die jeweils durch die Endpunkte verlaufen (siehe gestrichelte Linien Abbildung 4.5). Befindet sich P zwischen den beiden Senkrechten einer der beiden Geraden kann über den Lotfußpunkt der minimale Abstand ohne weiteres berechnet werden. Nun gibt es 3 verschiedene Fälle wo sich P in Betracht auf die Geraden N1-V und V-N2 befinden kann.

1. Punkt P ist keiner der Geraden zugeordnet (siehe Skizze P1)
2. Punkt P ist einer der beiden Geraden zugeordnet (siehe Skizze P2)
3. Punkt P kann beiden Geraden zugeordnet werden (siehe Skizze P3)

Bei Fall 1 wird der Abstand zwischen P und V als kürzester Abstand verwendet, bei Fall 2 der Abstand zum Lotfußpunkt auf der zugehörigen Geraden und in Fall 3 der kürzere der beiden Abstände zum Lotfußpunkt.

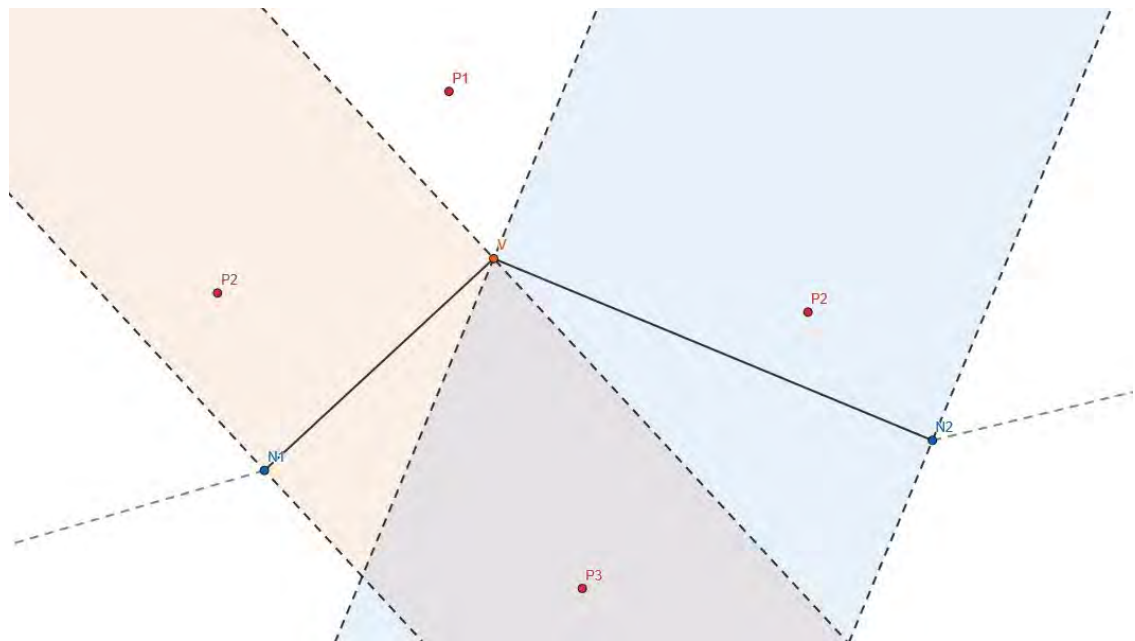


Abbildung 4.5: Skizze zur Veranschaulichung der Berechnungen des minimalen Abstands.

Wurde dies für sämtliche OSM Punkte durchgeführt und der minimale Abstand zur Video-trassierung über alle Punkte gemittelt, kann ein mittlerer Fehler angegeben werden. Bei den Daten von Hockenheim liegt dieser bei ca. 2,6 m wohingegen bei Karlsruhe nur ein Fehler von 2 m festgestellt wurde. Nimmt man beide Orte zusammen, liegt die mittlere Abweichung bei 2,1 m. Hier sieht es zwar so aus als würden die Gleisdaten von Karlsruhe ein bisschen besser übereinstimmen, allerdings liegt der kleinere Fehler vermutlich daran, dass aufgrund des Bahnhofs in Karlsruhe und der großen Anzahl an Gleisen einige Punkte zum falschen Gleis zugeordnet wurden. Ungünstigerweise liegen die Gleise der OSM Daten oft ziemlich in der Mitte zweier Videobefahrungsgleise, sodass die richtige Zuordnung erschwert wird. Leider macht keiner der beiden Datensätze eine Aussage darüber, zu welchem Gleis die einzelnen Linienzüge gehören, was die Zuordnung sehr

erleichtern würde. Da anfangs festgestellt wurde, dass die Gleise der beiden Datenquellen grundsätzlich parallel zueinander verlaufen, wurde zu Zwecken der Fehlerermittlung der gesamte OSM Datensatz um 2 m in Latitude Richtung und 2,4 m in Longitude Richtung verschoben. Nach dieser Verschiebung nimmt der mittlere Fehler ein Minimum an, das man durch diese Art der Verschiebung erreichen kann. Zudem ist sichergestellt, dass alle Punkte dem jeweils richtigen Gleis zugeordnet werden. Die neuen Werte für die Abweichung nach der Verschiebung lassen sich der Tabelle 4.2 entnehmen. Hier lässt sich erkennen, dass die Daten von Hockenheim mittlerweile bessere Ergebnisse liefern, welche die geäußerten Zweifel am ersten Ergebnis bestätigen.

Tabelle 4.2: Mittlere Abweichung zwischen Gleismittelpunkten von OSM Daten und Videobefahrungsdaten.

Datensatz	Abweichung ohne Verschiebung	Abweichung mit Verschiebung
Hockenheim	2,6 m	0,6 m
Karlsruhe	2,0 m	1,05 m
Gesamt	2,1 m	1,1 m

Es gibt verschiedene Möglichkeiten wodurch die beschriebenen Abweichungen zu Stande kommen können. Zuallererst ist hier zu erwähnen, dass die Messgenauigkeit von OSM stark variiert. Dies hängt davon ab, welches GPS-Gerät verwendet wurde, ob Korrekturen zum Einsatz gekommen sind, die Daten von Satellitenbilder stammen oder gar von einer ganz anderen Quelle sind. Es lässt sich jedoch vermuten, dass die Daten vom abgerufenen Kartenausschnitt eine Genauigkeit in ähnlicher Größenordnung wie die Daten der Videobefahrung haben, da andernfalls größere Abweichungen zu erwarten wären (OPENSTREETMAP, 2020). Bei der Videobefahrung konnte durch das verwendete Gerät zusammen mit Korrekturen eine geschätzte Genauigkeit von 0,3 - 0,5 m erreicht werden. Durch weitere Korrekturen können sogar Genauigkeiten von bis zu 2 cm erlangt werden. Diese wurden für die vorliegenden Daten allerdings noch nicht angewendet. Dies ist aber auch stark abhängig von der Stärke des empfangenen Satellitensignals, das von Ort zu Ort variiert (GÜTTEL, 2020). Nun stellt sich immer noch die Frage, was die Ursache für die restlichen 2 - 3 m Abweichung ist, die durch die Verschiebung überbrückt wurden und quasi für den gesamten Datensatz den gleichen Wert und zudem die gleiche Richtung besitzt. Eine Ursache könnte in dem verwendeten geodätischen Bezugssystem und der verwendeten Kartenprojektion liegen. Zwar verwenden beide Datensätze das WGS84 Koordinatensystem, wobei aber nur für die Befahrungsdaten die verwendete Projektion bekannt ist. Falls OSM eine andere Projektion benutzt, hätte dies bei dem beobachteten Fehler sehr ähnliche Abweichungen zur Folge. Eine andere mögliche Ursache liegt auf Seiten von OSM. Zur Datenerfassung werden teilweise Karten von Hand abgezeichnet, was ebenso Fehler zur Folge haben kann, die über bestimmte Bereiche konstant sind (LANDESVERMESSUNG SACHSEN, 2020; OPENSTREETMAP, 2020).

Durch Rücksprache mit Signon konnte in Erfahrung gebracht werden, dass die Befahrungsdaten mit Hilfe von Geoinformationsprogrammen bereits mit Kartendaten von Google und Bing verglichen wurden und überall Abweichungen beobachtet werden konnten, die den bei dieser Arbeit erlangten Ergebnissen sehr ähnlich sind (siehe Abbildung 4.6) (GÜTTEL, 2020). Dies würde die beiden Vermutungen zur Fehlerursache nahezu ausschließen.

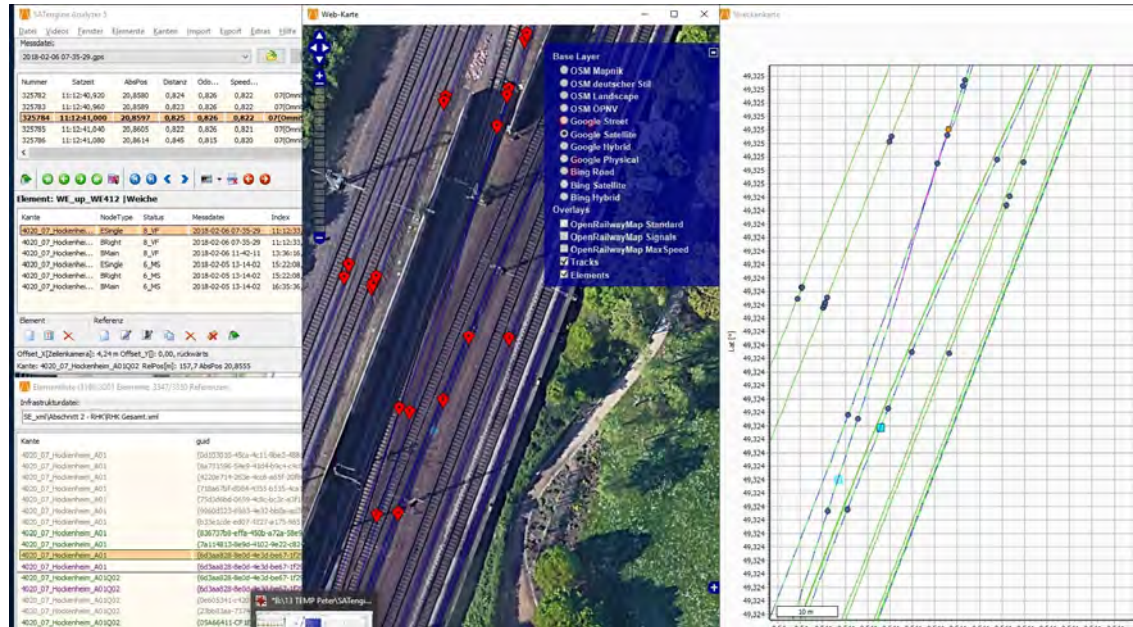


Abbildung 4.6: Von Signon durchgeführter Vergleich der Befahrungsdaten mit Google Satelite (GÜTTEL, 2020).

4.2.3 Vergleich punktförmiger Ausrüstungsgegenstände

Als nächstes wurden die Daten der Ausrüstungselemente miteinander verglichen. Hier ist es sehr wichtig zu berücksichtigen, dass bei den Videodaten nicht die tatsächliche Lage des Objekts angegeben ist, sondern der Punkt auf der Gleismitte, der dem Objekt am nächsten ist. Bei Weichen und Elementen des Gleisfreimeldesystems stimmen die beiden Punkte nahezu überein, wohingegen bei Signalen, Oberleitungsmasten und Schaltschranken bereits Ungenauigkeiten auftreten, auch wenn diese nicht sehr weit vom jeweiligen Gleis entfernt sind.

Wie beim Vergleich der Gleise, lässt sich auch bei den Ausrüstungselementen feststellen, dass ein Großteil der vorhandenen Abweichung bei allen Punkten etwa die gleiche Größe und gleiche Richtung besitzt (siehe Bild 4.7). Deshalb ist es nicht verwunderlich, dass die Richtung dieser Abweichung mit der des Gleisvergleichs übereinstimmt.

Für den quantitativen Vergleich wurde wie folgt vorgegangen. Für jedes Element wurde der zugehörige Partner im anderen Datensatz gesucht, wobei immer nur Elemente der gleichen Art zugeordnet wurden. Dazu werden die Daten in die Gruppen Signale, Weichen, Oberleitungsmasten, Schaltschranken und Gleisfreimeldesystem unterteilt. So wird für jedes Objekt aus den Videobefahrungsdaten das nächste Element aus den OSM Daten der gleichen Elementgruppe gesucht. Im Anschluss wird von allen Elementen,



Abbildung 4.7: Ausrüstungselemente von OSM- und Videobefahrungsdaten im Vergleich.

die mehrfach als nächstes Objekt ausgewählt wurden das Punktepaar mit der größeren Distanz aussortiert. Auch hier können die ermittelten Abweichungen in einen konstanten und einen variablen Teil zerlegt werden. Mit Hilfe der gleichen Verschiebung wie im vorhergehenden Kapitel kann der variable Fehler gesondert analysiert werden. Bei den in Tabelle 4.3 gesammelten Ergebnissen zeigt sich, dass der Fehler insgesamt etwas größer ist, als beim Vergleich der Trassierung. Die Ergebnisse von Karlsruhe weisen jedoch auch nach der Verschiebung Fehler von fast 2 m auf, was vermutlich unter anderem der großen Dichte an Ausrüstungselementen im Bahnhofsbereich und der damit verbundenen Falschzuordnung zuzuschreiben ist.

Tabelle 4.3: Mittlere Abweichung zwischen Ausrüstungselementen von OSM Daten und Videobefahrungsdaten von Hockenheim.

Objektart	Abweichung ohne Verschiebung	Abweichung mit Verschiebung
Signale	3,0 m	1,0 m
Weichen	2,9 m	0,9 m
Freimeldesystem	2,7 m	1,3 m

Neben den möglichen Fehlerursachen, die in Kapitel 4.2.2 erwähnt wurden, gibt es hier noch weitere Fehlerquellen. Zum einen wurden, wie bereits erwähnt, im Videodatensatz lediglich die nächsten Punkte auf dem Gleis erfasst und nicht der Standort des Signals selbst. Darüber hinaus wird bei der Videobefahrung bei Weichen nicht der Anfang der Weiche notiert, sondern die Weichenzungenspitze, die je nach Bauart 40 - 80 cm vom Anfang entfernt sein kann (GÜTTEL, 2020). Ein weiterer Teil ist dem Prozess des Matchings geschuldet.

Auch wenn genauer auf die Zusatzinformationen der Ausrüstungselemente eingegangen werden kann, um den richtigen Partner im anderen Datensatz zu finden, ist dies mit einem enormen Aufwand verbunden, der nicht im Verhältnis zur Verbesserung des Ergebnisses steht. Erschwert wird dies vor allem durch die große Variabilität der Beschreibung und Benennung von beispielsweise Signalen auf OSM.

4.3 Lösungsansätze zum Umgang mit Inkonsistenzen

Da jetzt ein grobes Bild der beiden Datensätze und der Abweichung voneinander vorliegt, müssen sie nun in einen gemeinsamen Datenkontext gebracht werden. Hierbei gilt es die aufgetretenen Widersprüche zu berücksichtigen und sinnvoll in einer Datenstruktur wiederzugeben. Dabei werden verschiedene Möglichkeiten mit inhomogenen Daten umzugehen, mit Vor- und Nachteilen angesprochen und daraus eine auf den vorliegenden Randbedingungen angepasste Lösung abgeleitet. Betrachtet werden sowohl Lösungsansätze, die sich aus den Funktionalitäten des IFC Datenmodells ergeben, als auch Lösungsansätze außerhalb von IFC.

4.3.1 Ansätze außerhalb des IFC Formats

Bevorzugung eines bestimmten Datensatzes

Eine vergleichsweise einfache Lösungsmöglichkeit, liegt in der Bevorzugung einer der beiden Datensätze. Dafür würde man anhand von unterschiedlichen Entscheidungskriterien festlegen, welcher Datensatz am ehesten der Realität entspricht. Denkbare Beurteilungskriterien sind zum Beispiel der Zeitpunkt, zu dem die Daten aufgenommen wurden, die bekannten und geschätzten Genauigkeiten des verwendeten Messverfahrens und weitere Unsicherheiten. Diese können einzeln oder in Kombination verwendet werden, um die Wahl für die zuverlässigere Datenquelle zu treffen. Bei der Dateierstellung würde man sich dann an der bevorzugten Datenquelle orientieren und die zweite Datenquelle entweder ganz verwerfen oder als nebensächliche Zusatzinformationen mit einfließen lassen.

Dieser Ansatz wäre denkbar, wenn die Wahl des besseren Datensatzes eindeutig ist und die Vermutung besteht, dass der zweite Datensatz keine hilfreichen Zusatzinformationen leistet oder gar das Ergebnis verfälscht.

4D Ansatz

Ein sehr ähnlicher Ansatz ist der 4D Ansatz. Hier werden die Daten abhängig vom Erstellungsdatum sortiert und jeweils der neuste Wert verwendet oder die zeitliche Veränderung visuell dargestellt. Da die Ausgangsdaten allerdings nicht durch zeitliche Veränderungen beeinflusst werden, sondern lediglich durch die verwendeten Messmethoden, ist der Einsatz hier sehr fraglich.

Mittelwertbildung

Andererseits wäre es möglich, sich statistischer Auswertemethoden zu bedienen. Da mehrere Elemente der vorliegenden Daten zwei verschiedene Positionen besitzen, kann man daraus einen Mittelwert bilden und das Objekt dort platzieren. Zudem kann über einen das Objekt umgebenden Kreis ein Bereich mit hoher Aufenthaltswahrscheinlichkeit angegeben werden. Abhängig von der auftretenden Varianz fällt der Kreis größer oder kleiner aus. Ein derartiges Konzept profitiert durch die Ergänzung mit weiteren Datensätzen, beispielsweise von anderen Kartendiensten. Um den Ansatz noch weiter zu verbessern kann man die einzelnen Messwerte mit unterschiedlichen Gewichtungen in den Mittelwert einfließen lassen. Damit können Daten durch Kriterien wie Genauigkeit, Aktualität und Ähnliches größeren Einfluss auf das Endergebnis bekommen.

Vor allem bei Szenarien, bei denen mehr als nur eine Alternativoption vorliegt ist dies sehr hilfreich, um die durch die Darstellung aller Messwerte entstehende Unübersichtlichkeit zu verhindern.

Multimodell Container

Ein weiterer denkbarer Ansatz liegt in dem von der Technischen Universität Dresden erforschten Konzept des Multimodellcontainers (MMC) vor. Hier geht es zwar weniger um den Umgang mit Inkonsistenzen mehrerer Datensätze, sondern mehr um interdisziplinäre Kollaboration mit verschiedenen gleichgestellten Teilmodellen in unterschiedlichen Datenformaten. Dennoch lässt sich hieraus ein möglicher Lösungsansatz ableiten. Dafür wird die Funktionsweise des Multimodells (MM) kurz erklärt.

Das Modell beschäftigt sich mit dem Problem, dass bei den meisten Bauprojekten viele Disziplinen involviert sind und deshalb der Datenaustausch aufgrund der verschiedenen Datenformate erschwert ist. Bei der Lösung des Problems wird versucht sich von einem BIM und IFC zentrierten Ansatz, wie er in Kapitel 2.1.2 beschrieben ist, zu lösen und stattdessen alle Teilmodelle gleichwertig zu behandeln. Grundsätzlich ist der entwickelte Multimodellcontainer aus folgenden Komponenten zusammengesetzt: Die Grundlage bilden die Modelle der einzelnen Disziplinen, die "Elementary Models" genannt werden. Diese können beliebige Dateiformate haben und bestehen keinesfalls nur aus 3D Modellen, sondern können auch Terminpläne, Kostenberechnungen und anderes sein. Um diese inhaltlich miteinander zu verknüpfen gibt es ein oder mehrere "Link Models". Diese verbinden die einzelnen Elemente aus den verschiedenen Elementarmodellen miteinander, beispielsweise um anzugeben, welche Wand aus dem Tragwerksmodell welcher Wand in der Kostenberechnung entspricht. Dabei bleiben die Teilmodelle unberührt, denn die Zugehörigkeiten werden in einer eigenen Datei im XML Format abgespeichert. Der Verweis auf die jeweiligen Elemente entsteht über die eindeutige ID jedes Elements. Die Erstellung des Link Modells kann sowohl händisch als auch automatisch über die Zuhilfenahme von Filtern, die datenformatunabhängig Informationen suchen können, erfolgen. Der dritte und letzte Bestandteil des Multimodellcontainers sind die Metadaten, die die Elementar-

und Linkmodelle beschreiben. Hier werden Informationen wie das Format des Modells, die verwendete Sprache, die Projektphase, das Level of Detail und weitere angegeben. Alle beschriebenen Komponenten sind zur Anschaulichkeit in Grafik 4.8 dargestellt. Da der Multimodellcontainer während des Verlaufs eines Projekts vielfach ausgetauscht wird und wegen der vielen Einzelmodelle ein großes Datenvolumen hat, wird auf diese nur mit einem Uniform Resource Identifier (URI) verwiesen, statt diese dem Container direkt beizufügen (FUCHS et al., 2010; HILBERT et al., 2012).

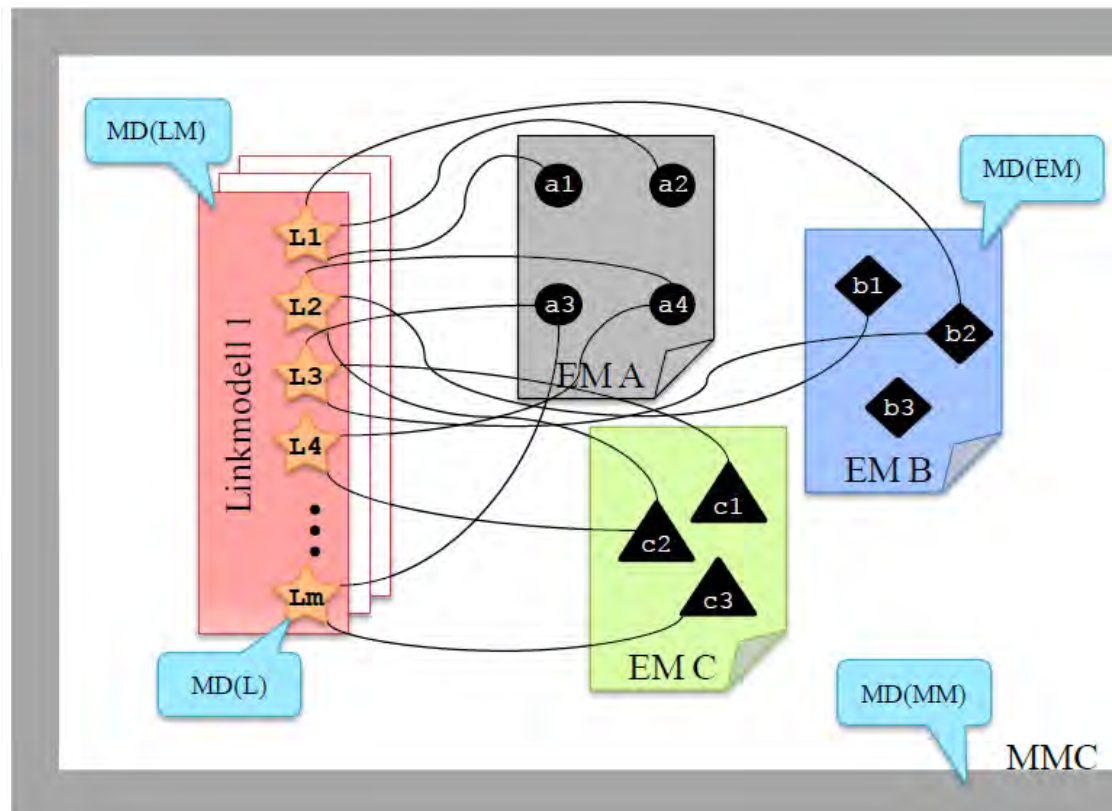


Abbildung 4.8: Der Multimodellcontainer (MMC) und seine Bestandteile: Mehrere Elementarmodelle (EM), Linkmodelle (LM) und die zugehörigen Metadaten (MD). Dabei findet der Austausch über ein neutrales Format statt (FUCHS & NITYANTORO, 2013).

Für die Problemstellung der vorliegenden Arbeit ist vom Multimodellcontainer-Ansatz vor allem das Linkmodell von Interesse. Dies würde sich dazu eignen Ausrüstungselemente, die wegen den widersprüchlichen Informationen zweimal mit unterschiedlichen Positionen vorkommen, einander zuzuordnen.

4.3.2 Lösungsmöglichkeiten innerhalb des IFC Schemas

Von Seiten des IFC Schemas gibt es wiederum ein paar Möglichkeiten mit den mehrfach auftretenden Elementen mit unterschiedlichen Positionen umzugehen. Zum Einen kann man jedem IfcBuildingElement mehrere geometrische Repräsentationen zuordnen, so dass man ein Element erstellt und ihm für jede Position eine Repräsentation zuordnet. Des Weiteren kann man doppelte Objekte auch doppelt erstellen, aber mit den unterschiedlichen Koordinaten und dann über Beziehungen einander zuordnen, damit der Benutzer

weiß, dass es sich um dasselbe Ausrüstungselement handelt. Hierfür gibt es vor allem zwei Arten von IfcRelationships, die für diese Zuordnung in Frage kommen. Einerseits die Beziehung IfcRelAssigns, die zwei IfcProducts locker miteinander verbindet und den Nutzer vom einen zum anderen führt. Oder andererseits IfcRelConnect, das zwei Objekte ohne Restriktionen verbindet und eine physikalische oder logische Zusammengehörigkeit definiert. Hier kann zudem über das Attribut ConnectionGeometry eine verbindende Geometrie angehängt werden. Auch wenn dies normalerweise für Schnitt- und Berührungsflächen verwendet wird, wäre es denkbar dieses zur Definition eines Raums zu verwenden, der beide Repräsentationen eines Ausrüstungselements einschließt. Zuletzt kann auch die Definition von benutzerdefinierten Property Sets für eine Art von Verknüpfung verwendet werden (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d). Zum Beispiel indem man doppelte Elemente nur einfach darstellt, aber die Informationen der zweiten Datenquelle über die Eigenschaften des Objekts anhängt. Oder auch indem in den Eigenschaften auf das zugehörige Element über seine einzigartige ID verwiesen wird.

4.3.3 Gewählter Ansatz

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass die vorliegenden Daten nicht gut genug zusammenpassen, sodass man einen der Datensätze weglassen könnte ohne hilfreiche Informationen zu verlieren. Womöglich kann man den Videobefahrungsdaten etwas mehr Vertrauen schenken, da diese mit professioneller Ausrüstung und professionellem Personal erfasst wurden und außerdem sehr aktuell sind. Im Vergleich dazu werden die OSM Daten teilweise von Laien erfasst und haben sehr inhomogene Aktualität. Andererseits sind dort Signale und Oberleitungsmasten mit exakter Position angegeben, was eine wichtige Ergänzung zu den Videobefahrungsdaten darstellt. So besitzen folglich beide Datensätze relevante Informationen, auf die nicht verzichtet werden sollte. Zudem möchte man die Interpretation der Widersprüche dem verantwortlichen Planer überlassen, weswegen beide Datensätze im Objektmodell repräsentiert werden sollen. Damit fällt die Bevorzugung eines Datensatzes als Lösungsansatz weg. Auch die Bildung eines Mittelwerts und der 4D Ansatz erscheinen eher ungünstig, da bei Signalen und Oberleitungsmasten unterschiedliche Orte gemessen werden und auch keine direkte zeitliche Abhängigkeit besteht.

Für die letztendliche Umsetzung wurde ein kombinierter Ansatz gewählt. Die Grundidee dessen ist das Linkmodell des Multimodellcontainers. Dies erscheint sehr sinnvoll für die Verknüpfung doppelt vorkommender Elemente. Allerdings stellt die Definition der Abhängigkeiten in einer separaten XML Datei nicht die optimale Lösung für die Gegebenheiten dar, da diese nicht ohne Komplikationen zusammen mit der IFC Datei visualisiert werden kann. Deshalb soll eine Art der Verknüpfung direkt in das IFC Modell integriert werden. Dazu werden sämtliche Ausrüstungselemente der Videobefahrungsdaten als auch der OSM Daten in die IFC Datei geschrieben, wobei man in Kauf nimmt, dass einige Elemente doppelt abgebildet werden. Diese erhalten ein benutzerdefiniertes Property Set, das die ID des zugehörigen Elements im anderen Datensatz enthält. Somit gehen keine Daten verloren und dem Nutzer bleibt selbst überlassen, mit seiner eigenen Expertise die

Situation zu beurteilen. Die genaue Umsetzung des hier kurz beschriebenen Ansatzes bei der Dateierstellung ist in Kapitel 4.4.2 und 4.4.8 zu finden.

4.4 Erstellung des IFC Modells

4.4.1 IFC Engine

Um mit der entwickelten Anwendung, die die Eingangsdaten einliest und weiterverarbeitet, automatisch eine IFC Datei erstellen zu lassen, wurde IfcEngine verwendet. Dies ist eine STEP Toolbox, die IFC Dateien und andere Dateiformate im STEP Format lesen, erstellen und verändern kann. Es handelt sich hierbei um Late Binding, was bedeutet, dass Objektverweise erst zur Laufzeit überprüft werden und somit Fehler erst dann erkannt werden können. Auch wenn die IfcEngine die wesentlichen Funktionalitäten der aktuellen IFC Version 4x3 RC1 unterstützt, wurden die Gleis- und Ausrüstungsinformationen in einer Datei der Version 4x3 geschrieben. Das liegt daran, dass zur Visualisierung und Überprüfung der erzeugten Datei auf Korrektheit der FKZ Viewer des Karlsruher Instituts für Technologie verwendet wurde, dessen neuste implementierte Version IFC 4x3 konform ist (KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE, 2020). Es treten jedoch auch hier einzelne Teilbereiche des Schemas auf, die noch nicht eingelesen und korrekt visualisiert werden können.

Die Dateierstellung mit der IfcEngine ist sehr entwicklerfreundlich und folgt zumeist dem gleichen Schema. Eins ums andere muss man IFC Objekte definieren und anschließend deren Attribute befüllen. Je nachdem ob das Attribut eine Zahl, eine Beschreibung, einen Verweis auf ein anderes Objekt oder etwas anderes verlangt, steht eine Handvoll Funktionen zur Auswahl, von denen nur noch die Richtige ausgewählt werden muss. Beispielsweise sieht die Erstellung eines IfcAlignments so aus:

Algorithmus 4.1: Definition eines IfcAlignments mit IfcEngine (C#)

```
// Erstellen des Alignments
Int64 ifcAlignmentInstance = sdaiCreateInstanceBN(model, System.Text.
    Encoding.UTF8.GetBytes("IfcAlignment"));

// Anhängen der Attribute
sdaiPutAttrBN(ifcAlignmentInstance, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes(
    "GlobalID"), (Int64)10, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes("
    a6cGxZT68lJo1Ywa3uz5"))
sdaiPutAttrBN(ifcAlignmentInstance, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes(
    "Name"), (Int64)10, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes("Alignment
    Gleis 1"))
sdaiPutAttrBN(ifcAlignmentInstance, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes(
    "Description"), (Int64)10, System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes("
    Gleis Nr 1 von Karlsruhe nach Hockenheim"))
// Hier folgen weitere Attribute
```

Hierbei bildet "model" den Rahmen für alle Informationen, die in eine IFC Datei geschrieben werden sollen und wird ganz zu Beginn initiiert. Bei der Definition der Attribute signalisiert (Int64)10, dass eine Zeichenkette übergeben wird. Jede Art von Datentyp besitzt hier eine eigene Nummer. Wird eine Zeichenkette übergeben, muss diese mit System.Text.Encoding.UTF8.GetBytes() eingeleitet werden, damit diese im richtigen Format übermittelt wird (RDF LTD., 2020).

Allerdings gibt es auch einige Hindernisse bei der Erzeugung einer IFC Datei mit Hilfe von Code. Da viele IFC Objekte in ihren Attributen auf andere Objekte verweisen, ist es wichtig, die Objekte in der richtigen Reihenfolge zu definieren. Werden beispielsweise Elemente aufgrund der Anzahl in einer for-Schleife definiert, kann auch nur innerhalb der gleichen Schleife auf dieses Element verwiesen werden. So kann man zum Beispiel nicht erst alle IfcAlignments definieren und später die Signale den Alignments zuordnen. Stattdessen müssen direkt nach jedem Alignment alle zugehörigen Elemente mitdefiniert werden. Dies kann in manchen Situationen eine Einschränkung in der strukturellen Anordnung der Elemente darstellen.

4.4.2 Gesamtstruktur

Da für die Erstellung der Datei zwei Datensätze miteinander kombiniert werden, ist es wichtig, sich zu überlegen, wie diese strukturiert in der Datei angeordnet werden sollen. Ziel ist es, Teilmengen von zusammengehörigen Elementen zu gruppieren, sodass diese später auch gemeinsam ausgewählt und angezeigt werden können. Zudem sind die Einschränkungen, die durch die automatisierte Dateierstellung entstehen, mit zu berücksichtigen.

Für die Gruppierung physikalischer Elemente hat das IFC Schema das Konzept des Spatial Containers vorgesehen. Ein solcher Container fasst Objekte zusammen, die physikalisch oder funktionell miteinander in Verbindung stehen, beispielsweise alle Elemente eines Stockwerkes von einem Haus. Dabei gibt es verschiedene Objektklassen, die als Spatial Container fungieren können. Dazu gehört der IfcSpace, der hierarchische Anordnungen ermöglicht, zum Beispiel der Unterteilung eines Gebäudes in Stockwerke, die wiederum in einzelne Räume zerlegt werden. Je nach Art des IfcSpaces existieren Vorgaben, dass sich die einzelnen Räume nicht überschneiden dürfen. Außerdem gibt es die IfcFacility, die ein Gebäude, eine Brücke, eine Eisenbahnstrecke, ein Tunnel oder eine Straße sein kann. Mit IfcFacilityParts kann diese in einzelne Bereiche separiert werden. Darüber hinaus kann man auch IfcSpatialZone verwenden, die eine nicht hierarchische Anordnung nach funktionellen Gesichtspunkten schafft und auch überlappende Bereiche haben darf (BUILDINGSMART INTERNATIONAL, 2020d).

Für den vorliegenden Fall sollen Informationen von den einzelnen Gleisen zusammengefasst werden und dort wiederum in Gleise, Ausrüstungselemente und Art der Datenquelle unterteilt werden. Da Gleise und deren Ausrüstung zwar eine Zusammengehörigkeit besitzen aber keine hierarchische Abhängigkeit und zudem die einzelnen Gleise mit deren Elementen, nicht als klar abgegrenzter Raum zu verstehen sind, scheint die Verwendung

von IfcSpatialZones die geeignetste Möglichkeit. Die Angabe der räumlichen Ausdehnung kann hier ohne Weiteres freigelassen werden.

Damit wurde für die Datei die folgende Projektstruktur angelegt. An erster Stelle steht das IfcProject, das den Gesamtrahmen bildet. Darauf folgt die IfcSite, die die örtliche Lage des Projektes beschreibt und über die Beziehung IfcRelAggregates mit dem IfcProject verknüpft ist. Dies verdeutlicht die "Teil eines Ganzen" Beziehung, denn ohne das Projekt kann es auch keine dafür vorgesehenen Lokalitäten geben. Als nächstes kommt bereits die erste IfcSpatialZone, die alle Gleise und deren Ausrüstungselemente umfassen soll. Verbunden ist sie mit der IfcSite über IfcContainedInSpatialStructure als räumliche Zuordnung auf das Projektgelände. Anschließend reihen sich weitere IfcSpatialZones an, eine für jedes Gleis, wobei jede mit der übergeordneten Zone mit IfcRelAggregates als ein Teil des Ganzen verbunden ist. Jedes Gleis beinhaltet vier weitere IfcSpatialZones, jeweils eine für die Gleisdaten der Videobefahrung und OSM und jeweils eine für die zugehörigen Ausrüstungselemente. In dieses werden dann die jeweiligen IfcAlignments und deren Ausrüstung mit der örtlichen Zuordnung IfcRelContainedInSpatialStructure eingeordnet. Die eben beschriebene Gesamtstruktur ist in Grafik 4.9 verbildlicht.



Abbildung 4.9: Gesamtstruktur der IFC Datei.

In manchen Fällen gibt es Gleise, für die Videodaten existieren, aber keine Daten von OSM. Nichtsdestotrotz werden für diese Gleise vier `IfcSpatialZones` angelegt, wobei nicht alle Inhalt bekommen. Über diese Gesamtstruktur kann man bei der Betrachtung im FKZ Viewer einzelne Raumzonen auswählen und deren Inhalt gesondert betrachten.

4.4.3 Gleiszuordnung

Eine der größten Herausforderungen, die aus der Datenbeschaffenheit resultiert, ist die Zuordnung der einzelnen Gleissegmente zum zugehörigen Gleis, die für die sinnvolle Strukturierung und den Datenvergleich notwendig ist. Ausgangslage sind die Gleispunkte der Videobefahrung und von OSM, die zu Segmenten gruppiert sind. Allerdings liegt keine Information vor, welches Segment zu welchem Gleis gehört oder welche Segmente aufeinander folgen, weder bei den OSM Daten noch bei den Videobefahrungsdaten.

Die Videobefahrungsdaten sind sehr systematisch aufgebaut. Die Befahrung der einzelnen Gleise startet an unterschiedlichen Stellen und endet entweder am Ende der Strecke, die von Interesse ist, oder kurz vor oder nach einer Weiche. So ergeben sich die einzelnen Segmente, die im Bereich von Weichen immer ein kleines Stück mit dem anschließenden Segment überlappen. Dies macht es sehr einfach, aufeinander folgende Gleisstücke über den Abstand vom Endpunkt des einen Segments zum Anfangspunkt des anderen Segments ausfindig zu machen. Bei den Daten von OSM ist dies jedoch schwieriger. Die einzige vorhandene Information ist, wie viele Gleise an der untersuchten Stelle vorliegen, aber nicht zu welchem Gleis das betrachtete Segment zuzuordnen ist. Zudem sind die von den vielen verschiedenen Nutzern eingegebenen Gleissegmente recht willkürlich eingeteilt. So kommt es immer wieder vor, dass größere Lücken zwischen zwei in der Realität anschließenden Segmenten vorliegen. Außerdem sind einige Gleisstücke leicht parallel zueinander versetzt. Dies macht es äußerst schwierig mit angemessenem Aufwand zu allen Gleisstücken den richtigen Nachfolger zu finden. Durch die Lücken zwischen den einzelnen Stücken, sowohl in Richtung der Achse, als auch quer dazu ist selbst unter Zuhilfenahme des Winkels zwischen Endpunkt des einen Stücks und Anfangspunkt eines anderen Stücks keine Verbesserung des Ergebnisses zu erwarten. Auch bei komplexeren Ansatzmöglichkeiten steht der Aufwand nicht im Verhältnis zum erreichbaren Ergebnis. Deshalb wird in Kauf genommen, dass die OSM Daten letztendlich etwas mehr fragmentiert bleiben als die Daten der RIMcomb Befahrung. Damit ist der gewählte Ansatz die Segmente der Videobefahrung trotz vorliegender Weichen sinnvoll in einzelne Gleise einzuteilen und aneinander zu hängen, sodass jedes Gleis durch ein einziges `IfcAlignment` dargestellt werden kann. Die Gleissegmente von OSM werden dann über ihre Lage den Gleisen der Videobefahrung zugeordnet und anschließend so gut wie möglich miteinander verbunden. Hier ist jedoch zu erwarten, dass für die meisten Gleise aufgrund der Lücken mehrere `IfcAlignments` notwendig werden. Wie genau vorgegangen wird, wird im Folgenden erläutert.

Bevor mit der Erklärung der Gleiszuordnung begonnen wird, ist noch zu erwähnen, dass offizielle Methoden, wie die einzelnen Gleise einer Bahnstrecke unterteilt und benannt

werden, existieren. Diese Logik auf die vorliegenden Gleissegmente anzuwenden, wäre zu aufwändig und würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Zudem wäre es notwendig für die Anfangsgleise händisch Namen anzugeben. Deshalb wurden diese Methoden nur als Orientierung verwendet und wo nötig für den vorliegenden Zweck angepasst.

Begonnen wird der Zuordnungsprozess mit den Daten der Videobefahrung. Zuerst werden aus der Liste der Gleispunkte die einzelnen Segmente ausgesucht. Dies ist recht einfach, da mit jedem neuen Befahrungsabschnitt der Wert `relPosition` in der Excel Tabelle zurück auf null gesetzt wird. So werden alle Punkte eines Segments gemeinsam in einer Liste abgespeichert. Um den späteren Workflow zu beschleunigen, werden Gleisstücke bereits jetzt darauf untersucht, wo sich Weichen befinden. Dazu werden sämtliche Anfangs- und Endpunkte der Teilstücke miteinander verglichen und überprüft, ob sie sich innerhalb eines Abstands von 1,5 m zueinander befinden. Hier wird für jedes Segment in einer Matrix festgehalten, wie viele andere Gleisstücke an das Segment anschließen. Dabei wird für beide beteiligten Elemente notiert, ob der Anschluss am Anfangs- oder Endpunkt stattgefunden hat. Damit kann später für jedes Elemente schnell nachgeschaut werden, ob es Teil einer Weiche ist, und wenn ja, um welche Art von Weiche es sich handelt.

Anschließend beginnt der eigentliche Teil der Zuordnung. Begonnen bei einem Anfangssegment werden Stück für Stück die Folgesegmente herausgesucht und angehängt, wobei bei Weichen immer zu entscheiden ist, wie fortgefahren werden soll. Deshalb werden die möglichen Arten von Weichen, die unterschiedlich behandelt werden müssen, kurz aufgezeigt (siehe Abbildung 4.10).

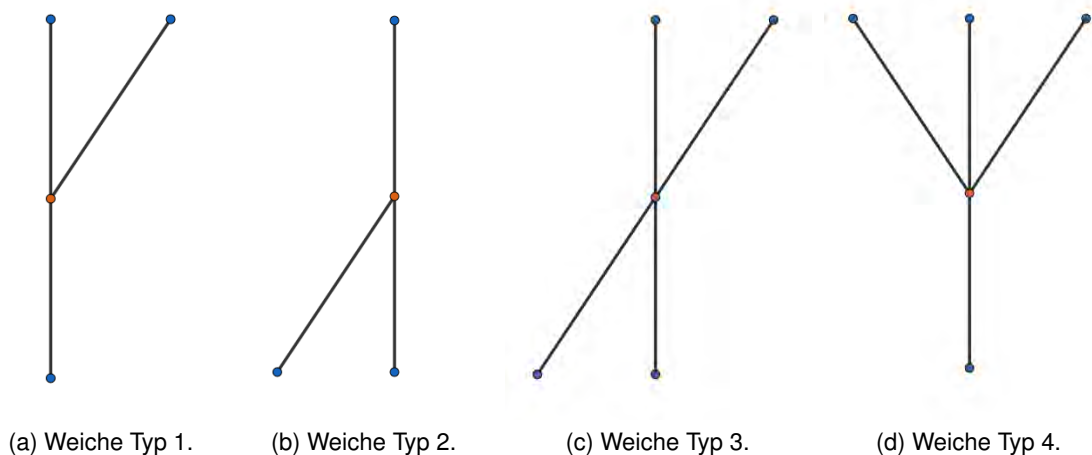


Abbildung 4.10: Unterschiedliche Arten von Weichen.

Vorgegangen wird folgendermaßen: anhand der zuvor erwähnten Matrix werden sämtliche Gleisstücke herausgesucht, die kein vorhergehendes Segment haben, und werden einer Liste mit Startsegmenten hinzugefügt. Die Elemente in dieser Liste werden eins nach dem anderen abgearbeitet. Dazu beginnt man mit dem ersten Segment und analysiert die Gegebenheiten an dessen Ende. Hier gibt es sechs verschiedene Fälle, die eintreten können, wenn man die Elemente betrachtet, die unmittelbar nachfolgen oder einen identischen Endpunkt haben.

1. Keine Nachfolgesegmente und keine Segmente mit übereinstimmendem Endpunkt → Gleiszuordnungsprozess für dieses Segment abgeschlossen
2. Ein Nachfolgesegment, aber keine Segmente mit gleichem Endpunkt → Nachfolgesegment wird angehängt und mit dessen Endpunkt fortgefahren
3. Ein Nachfolgesegment und ein Segment mit gleichem Endpunkt (Weiche Typ 2) → Entscheidung welches der beiden Segmente mit gleichem Endpunkt fortgeführt wird und welches an dieser Stelle endet

Entscheidungsprozess: Anhand des Winkels zwischen den drei Gleisstücken wird entschieden, welches der beiden Stücke hier endet und welches weiterführt. Zumeist bildet eines der beiden Segmente mit dem Nachfolgesegment einen 180 Grad Winkel. Dies ist auch das Segment, das fortgeführt wird. Liegt bei keinem der beiden Segmente ein 180 Grad Winkel vor endet das Segment, das den Winkel bildet der weiter von 180 Grad entfernt ist. Für den seltenen Fall, dass beide Segmente mit dem Nachfolger einen gleich großen Winkel bilden, wird willkürlich das erste Segment fortgeführt.

4. Zwei Nachfolger, aber kein Segment mit gleichem Endpunkt (Weiche Typ 1) → Entscheidung welcher der Nachfolger an das aktuelle Segment angehängt wird und welcher als neues Startsegment der Startsegmentliste hinzugefügt wird

Entscheidungsprozess: Auch hier ist der Winkel zwischen dem aktuellen Segment und den beiden Nachfolgesegmenten ausschlaggebend. Der Nachfolger, der zusammen mit dem aktuellen Segment den Winkel bildet, der näher an 180 Grad liegt, wird angehängt. Der andere Nachfolger bildet den Start für ein neues Gleis.

5. Drei Nachfolger, aber kein Segment mit gleichem Endpunkt (Weiche Typ 4) → Zwei Segmente werden Anfangspunkt eines neuen Gleises und ein Segment führt das aktuelle Gleis fort

Entscheidungsprozess: Der Prozess ist analog zu Fall 4, mit dem Unterschied, dass zwei Nachfolgesegmente der Startsegmentliste hinzugefügt werden.

6. Zwei Nachfolgesegmente und ein Segment mit übereinstimmendem Endpunkt (Weiche Typ 3) → Auswahl des passenden Nachfolgers

Entscheidungsprozess: Von den vier Segmenten werden jeweils zwei Segmente Teil eines Gleises. Dabei wird die Kombination gewählt, bei der beide Segmente mit ihrem zugeordneten Nachfolger einen Winkel möglichst nah an 180 Grad bilden.

Das Ganze wird jedes Mal wiederholt, wenn dem aktuellen Gleis ein neues Segment angefügt wird, solange bis das Ende des Gleises erreicht ist. Dann wird mit dem nächsten Anfangssegment aus der Liste auf gleiche Weise fortgefahren. Wurden alle Anfangssegmente abgearbeitet, ist der Gleiszuordnungsprozess beendet. Zum besseren Verständnis ist der Prozess, der kompletten Gleiszuordnung im Flussdiagramm [4.11](#) verdeutlicht.

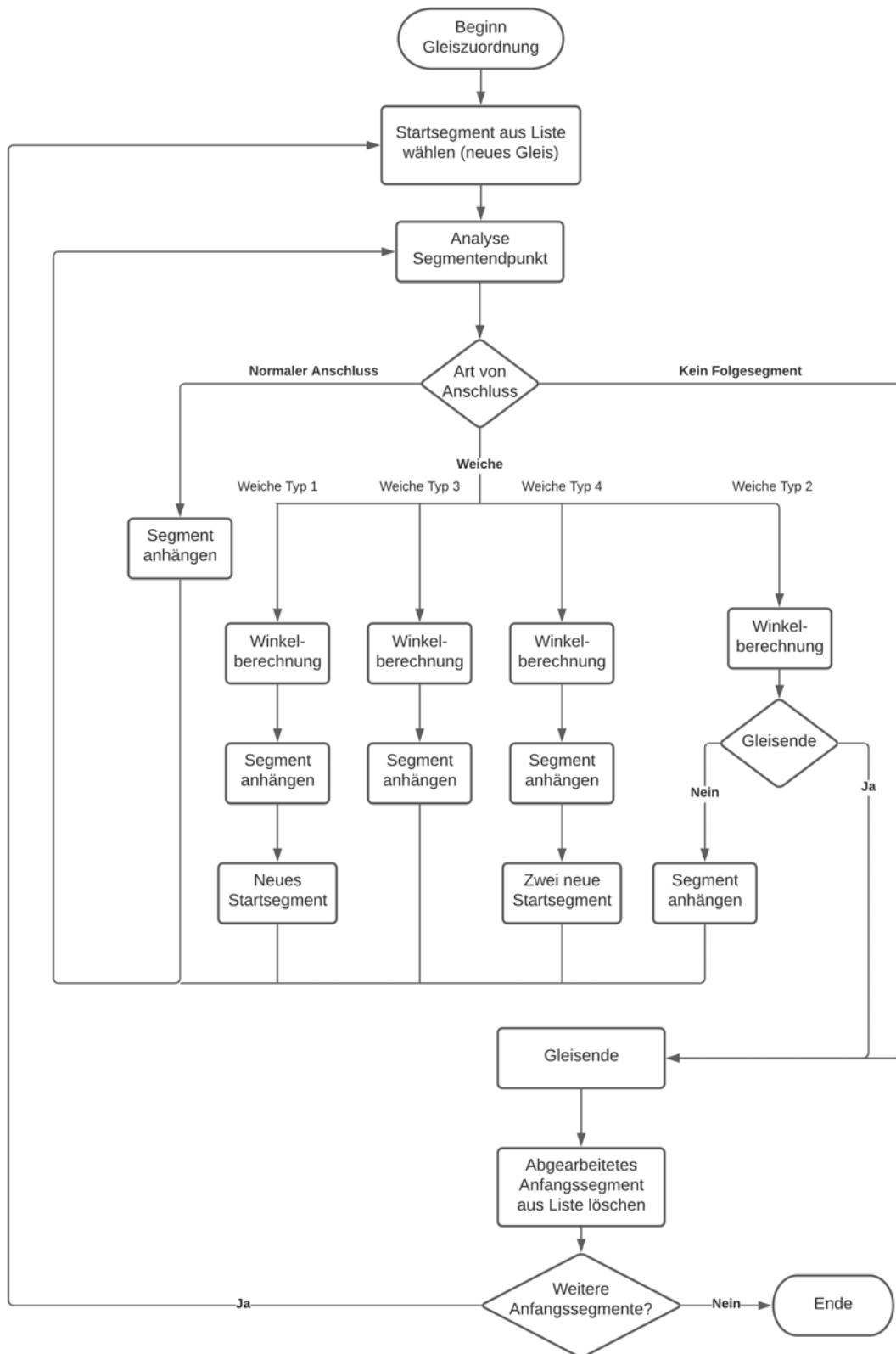


Abbildung 4.11: Flussdiagramm des Gleiszuordnungsprozesses.

Derselbe Prozess wurde auch an den Daten von OSM getestet, allerdings haben die Lücken zwischen einigen Segmenten wie erwartet dazu geführt, dass die Gleiszuordnung ein komplett anderes Ergebnis hat und so nicht als direkter Vergleich zu den Gleisen der Videobefahrung dienen kann. Deshalb wurde hier eine andere Herangehensweise gewählt. Zuerst werden alle von OSM abgefragten Gleissegmente darauf überprüft, ob sie sich in der Nähe der Gleise der Videobefahrung befinden. Segmente, die sich zu weit weg befinden, werden zur Beschleunigung des Prozesses bereits an dieser Stelle aussortiert. Anschließend versucht man jedes OSM Segment einem der Gleise der Videobefahrung, die aus dem Gleiszuordnungsprozess resultieren, zuzuordnen. Dafür wird jeder Punkt eines Segments einzeln betrachtet und ermittelt, zu welchem Videobefahrungsgleis er sich am nächsten befindet. Wurde dies für alle Punkte des Gleisstücks durchgeführt, wird das Segment dem Gleis zugeordnet, dem die meisten Punkte zugeteilt wurden. Meistens ist dies auch sehr eindeutig, da die große Mehrheit dem gleichen Gleis zugeordnet wird. Wenn alle Segmente zugeteilt wurden, wird versucht die Segmente eines Gleises so gut wie möglich aneinander zu hängen.

4.4.4 Abspeichern der Trassierung

Damit wurden alle Vorkehrungen getroffen, um die Gleise in Form von IfcAlignments in die IFC Datei zu schreiben. Für jedes Gleis der Videobefahrung wird genau ein IfcAlignment erstellt, das in die passende IfcSpatialZone platziert wird. Die äquivalenten OSM Gleise werden genauso in IfcAlignments umgewandelt, wobei ein Gleis zumeist in ein bis fünf IfcAlignments überführt wird. Die Achse wird bei beiden Fällen durch eine IfcPolyline angegeben. Öffnet man die erstellte Datei mit dem FKZ Viewer sieht dies folgendermaßen aus (Abb. 4.12)

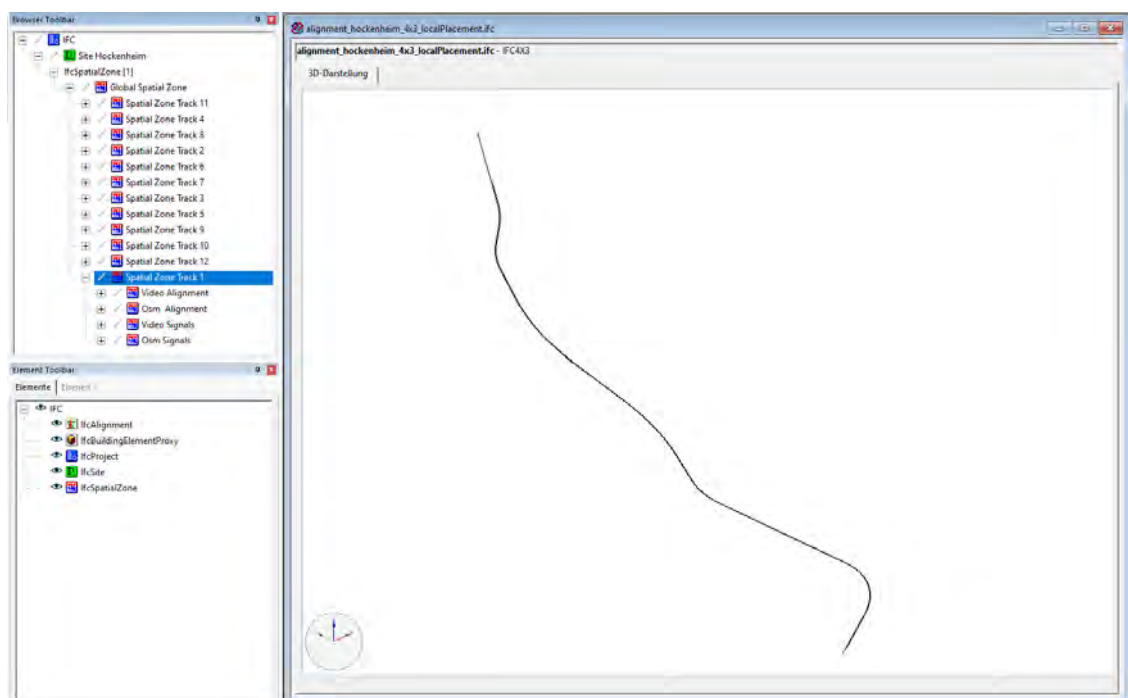


Abbildung 4.12: Ein Gleis des Streckenabschnittes Hockenheim im FKZ Viewer.

Mit den bisherigen Ergebnissen kann man erstmalig beurteilen, wie gut die Gleiszuordnung funktioniert hat. Für die Daten der Videobefahrung funktioniert die Zuordnung sehr gut. Sämtliche Gleise wurden sinnvoll eingeteilt, bestehen aus einem einzelnen Stück und können auch nicht per Hand weiter mit anderen Gleisstücken vereint werden. Vereinzelt gibt es sehr kurze Verbindungsstücke zwischen zwei Gleisen, die nur in etwa 50 m lang sind. Diese formen momentan ihr eigenes Gleis mit einem eigenem IfcAlignment. Es wäre zu überlegen, solche kurzen Gleisstücke einem der benachbarten Gleise zuzuordnen. Für die spätere Platzierung von Ausrüstungselementen ist es jedoch von Vorteil, wenn jedes Gleis nur aus einem IfcAlignment besteht. Dies wäre dann nicht mehr gegeben. Aus diesem Grund wird die Gleiszuordnung in der jetzigen Form beibehalten. Die Zuordnung der OSM Segmente zu den erstellten Videobefahrungsgleisen funktioniert bei den Daten von Hockenheim fehlerfrei. Bei den Daten von Karlsruhe treten im Bahnhofsbereich hingegen Fehler auf. Da nicht alle Gleise in beiden Datensätzen aufgeführt sind, kommt es gelegentlich vor, dass einem Gleis der Videobefahrung zwei oder mehr Gleise der OSM Daten zugeordnet werden. Zudem können die einzelnen Gleisstücke nur selten zu einem einzelnen Gesamtgleis zusammengefasst werden. Dies ist wegen der Datenbeschaffenheit kaum zu vermeiden. Insgesamt liegen die genannten Fehler aber im vertretbaren Bereich, da das Ergebnis vom Benutzer trotzdem korrekt interpretiert werden kann.

4.4.5 Integration der Ausrüstungselemente

Im nächsten Schritt werden die Ausrüstungselemente in der IFC Datei ergänzt. In der neusten IFC Version kann hierfür die IfcSignal Klasse verwendet werden, da der FKZ Viewer diese Version, wie bereits erwähnt, noch nicht unterstützt, kann von dieser Klasse allerdings noch nicht Gebrauch gemacht werden. Es wäre zwar möglich die Datei in der aktuellen IFC 4x3 RC1 Version zu erstellen, jedoch sind die Möglichkeiten, die Datei auf Funktionalität zu überprüfen, sehr beschränkt. Deshalb wird die Version 4x3, die visuelle Rückmeldung ermöglicht, bevorzugt.

Um die Ausrüstungselemente abspeichern zu können, wird die Klasse IfcBuildingElementProxy verwendet, die es ermöglicht, nicht definierte Objekte in die Datei zu schreiben. Für die Daten der Videobefahrung wird einfach der Name aus der Exceltabelle für das benutzerdefinierte Element übernommen. Bei den OSM Daten wird lediglich die Art des Objekts als Name verwendet, aber dann nicht weiter unterschieden. So heißen beispielsweise alle Signale "Signal", egal um welche Art von Signal es sich handelt. Die genaue Signalbezeichnung ist auch nur für wenige Elemente in OSM angegeben.

4.4.6 Geometrische Repräsentation

Um die Ausrüstungselemente geometrisch darzustellen, wäre es denkbar, offizielle Regelzeichnungen der Deutschen Bahn zu verwenden, und damit recht genaue Abbildungen zu erstellen. Dafür könnte man für jede Art von Ausrüstungselement eine geometrische Vorlage gemäß der zugehörigen Regelzeichnung modellieren und diese Geometrie bei

jedem Auftreten dieser Elementart mit Ort und Ausrichtung platzieren. Allerdings gibt es mehrere Gründe, die gegen diese Vorgehensweise sprechen. Zum Einen ist dieser Prozess der Modellierung recht aufwändig, da für jede Art von Ausrüstungselement die passende Geometrie erstellt werden muss. Darüber hinaus gibt es einige Parameter in Bezug auf die Abmessungen, die von Objekt zu Objekt variieren können. Im Bahnhofsbereich ist es zudem möglich, dass einige Elemente, die normalerweise auf einem extra Pfosten montiert sind, stattdessen an einer Überdachung angebracht sind. Zu diesen Eigenschaften wird in keinem der beiden Datensätze eine Aussage gemacht. Dies ist nur ein Teil der Unsicherheiten, die die Sinnhaftigkeit einer exakten Nachmodellierung der Ausrüstungselemente in Frage stellt.

Zum Anderen kommen die Unsicherheiten dazu, die aus den Abweichungen zwischen den beiden vorliegenden Datensätzen resultieren. Dadurch entsteht ein kreisförmiger Bereich mit einem Radius von circa 2 m in dem sich ein erfasstes Element befinden kann. Wenn man die erstellte Datei also beispielweise für eine Kollisionsprüfung verwenden würde, bei der die exakten geometrischen Abmessungen von Interesse sind, werden die zentimetergenauen Abmessungen des Signals von der Unsicherheit des Standorts bei Weitem zunichte gemacht. Für andere Anwendungsfälle, wie der Normüberprüfung beispielsweise, ob gewisse Signale an allen notwendigen Stellen vorhanden sind, sind die exakten Abmessungen des Objekts ohnehin nicht von Relevanz.

Aus diesen Gründen wurde die Entscheidung getroffen, die Ausrüstungselemente nur in Form von Quadern darzustellen, die die genauen Abmessungen komplett einschließen. Zudem bekommen die Elemente je nach Datensatz eine unterschiedliche Farbe, damit sie gut auseinandergehalten werden können. Aus unbekanntem Gründen zeigt der FKZ Viewer die korrekte Farbe der Objekte allerdings nicht an. Darüber hinaus wäre es denkbar die Form der Quader abhängig von der Art des Ausrüstungselements leicht anzupassen, dass die Quader für Weichen beispielsweise weniger hoch wären als die von Oberleitungsmasten, um zumindest eine grobe visuelle Unterscheidung der Elemente möglich zu machen.

4.4.7 Platzierung mit Local und Linear Placement

Für die Beschreibung der Positionierung eines Ausrüstungselements gibt es im IFC Schema zwei gängige Möglichkeiten. Die eine davon ist das Local Placement, die andere das Linear Placement.

Beim Local Placement wird das zu positionierende Objekt über X, Y und Z Koordinaten im lokalen oder globalen Koordinatensystem platziert. Im Vergleich dazu geht das Linear Placement etwas anders vor, ist aber im Bahnbau die gebräuchlichere Variante. Anstatt das Element über die Koordinaten zu definieren, wird es über die Lage im Verhältnis zur zugehörigen Gleisachse beschrieben. Im IFC Schema gibt es hier mehrere Attribute, um dies genau zu beschreiben. Die DistanceAlong beschreibt die Entfernung vom Anfangspunkt der Gleisachse bis hin zum Punkt auf der Gleismitte, wo das Element positioniert werden soll. Für alle Elemente, die sich nicht unmittelbar auf dem Gleis befinden gibt es im

Anschluss eine Reihe von Parametern, die die Abweichung von der Gleismitte angeben. Das LateralOffset beschreibt den senkrechten Abstand vom Objekt zum Gleismittelpunkt. Je nach Vorzeichen ist dieses Objekt links oder rechts vom Gleis gelegen. Analog dazu ist das VerticalOffset der gleiche Abstand in vertikaler Richtung, sprich über oder unter dem Gleis. Für den Sonderfall, dass die Achse nicht kontinuierlich ist, wie beispielsweise bei einem Linienzug, kommt zusätzlich das LongitudinalOffset zum Einsatz. Dies ermöglicht die weitere Verschiebung eines Elements parallel zum aktuellen Achsensegment, um alle Bereiche, die sonst nicht abgedeckt werden können, zu erreichen (siehe grauer Bereich in Abbildung 4.13). Zusätzlich kann ein Objekt auch mit den X, Y, Z Koordinaten, wie sie beim Local Placement gebraucht werden, versehen werden. Diese dienen als Rückfallwert für Softwareprogramme, die das Linear Placement nicht implementiert haben.

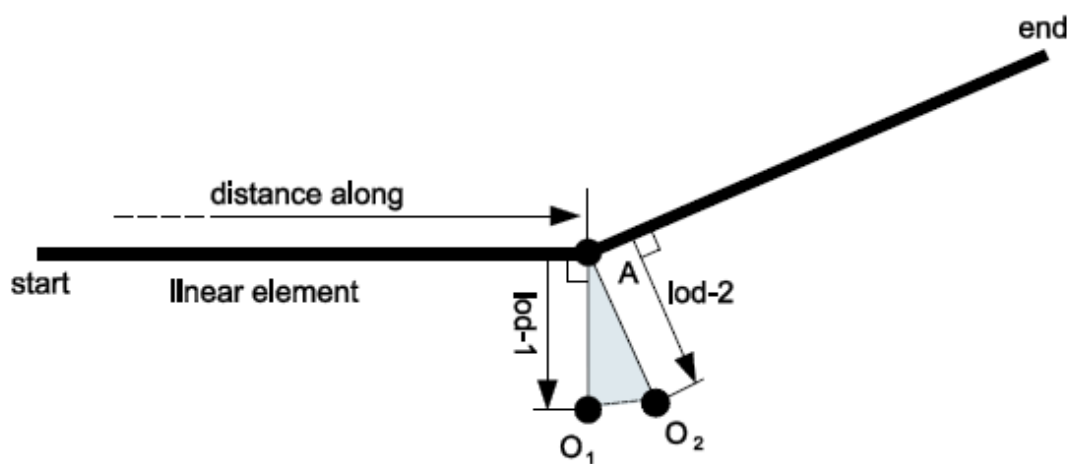


Abbildung 4.13: Linear Placement bei nichtkontinuierlichen Achsen. Die graue dreiecksförmige Fläche beschreibt den Bereich, der nur über das LongitudinalOffset erreicht werden kann (NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN, 2012)

Begonnen wurde die Platzierung der Ausrüstungselemente mit Hilfe des Linear Place-ments, da dies die übliche Methode ist. Dazu mussten aus den Koordinaten zuerst die Parameter für das Linear Placement berechnet werden. Das VerticalOffset kann außer Acht gelassen werden, da für die Videobefahrungsdaten immer nur der Punkt direkt auf der Gleismitte angegeben ist und dieser keinen Höhenunterschied zum Gleis aufweist. Die Daten von OSM hingegen machen keine Aussage über die vorliegende Höhenlage. Für das LateralOffset wurde genauso vorgegangen wie in Kapitel 4.2.2 bei der Fehlerbe-rechnung zwischen den Trassierungsdaten. Es wird der Gleispunkt herausgesucht, der dem Ausrüstungselement am nächsten ist und anschließend die beiden Gleissegmente betrachtet, die diesen Punkt beinhalten. Je nach Gegebenheit wird dann das Lot vom Objekt auf das erste bzw. zweite Gleissegment gefällt und der Schnittpunkt der beiden be-rechnet. Über den Abstand zwischen diesem Schnittpunkt und dem Objekt selbst hat man das LateralOffset berechnet. Mit Hilfe des eben ermittelten Schnittpunkts lässt sich die DistanceAlong sehr schnell berechnen. Dafür werden alle Teile der Polylinie, die die Achse des Gleises darstellt, vom Anfang bis hin zum Schnittpunkt mit deren Länge zusammenge-zählt. Für manche Ausrüstungselemente wird auch das LongitudinalOffset notwendig, da

keine kontinuierliche Gleisachse vorliegt. Hierzu bestimmt man die Geradengleichung der Geraden, die parallel zum momentanen Gleissegment liegt und durch das gewünschte Ausrüstungselement A verläuft. Der Punkt B auf dieser Geraden, der dem Objekt am nächsten ist und gerade noch so alleine durch das LateralOffset beschrieben werden kann, wird verwendet um die ersten Parameter zu berechnen. Das LongitudinalOffset kann dann durch den Abstand des eben genannten Punktes zum Objekt bestimmt werden (siehe Grafik 4.14). Damit sind sämtliche hier notwendigen Parameter berechnet, um die IfcProxy Elemente mit der Linear Placement Methode zu platzieren.

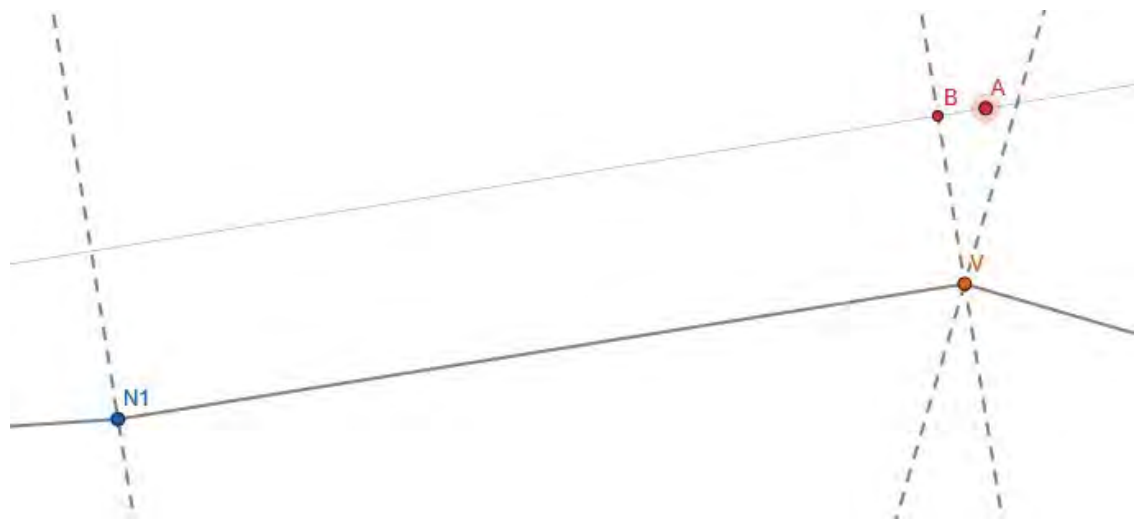


Abbildung 4.14: Skizze zur Berechnung des Parameters LongitudinalOffset.

Da die Datei per Programmiercode erzeugt wird und bereits in Kapitel 4.4.1 erklärt wurde, dass deswegen sämtliche Ausrüstungselemente direkt zusammen mit dem IfcAlignment definiert werden müssen, muss hier eine kleine Änderung an der Dateistruktur (Kapitel 4.4.2) vorgenommen werden. Dies liegt daran, dass die von OSM definierten Gleise aus mehreren IfcAlignments bestehen, auf die die Ausrüstungselemente mit ihrem Linear Placement verweisen. Aus diesem Grund wird für jedes Gleis eine IfcSpatialZone erstellt, die alle OSM Informationen umfasst. Darin befindet sich eine Zone für jedes Gleisstück, in der sich das IfcAlignment und die Ausrüstungselemente der OSM Daten befinden (siehe Grafik 4.15).

Nachdem alles wie beschrieben durchgeführt und in die IFC Datei geschrieben wurde, musste festgestellt werden, dass der FKZ Viewer die Datei nicht lesen kann, da die Verwendung einer IfcPolyline beim Linear Placement nicht implementiert ist. Somit werden sämtliche Ausrüstungselemente nicht mit ihrer richtigen Position dargestellt, sondern erscheinen im Ursprung des Koordinatensystems. Dieses Problem kann leider auch nicht umgangen werden, da die IfcPolyline die einzige Art von Achse ist, die mit den gegebenen Informationen definiert werden kann. Das Ganze bedeutet zwar nicht, dass die Datei nicht richtig erstellt wurde. Allerdings ist es auch nicht auszuschließen, dass bei der Berechnung der Parameter für das Linear Placement kleinere Fehler unterlaufen sind. Diese sollte man allerdings durch eine visuelle Anzeige schnell identifizieren und beheben können.

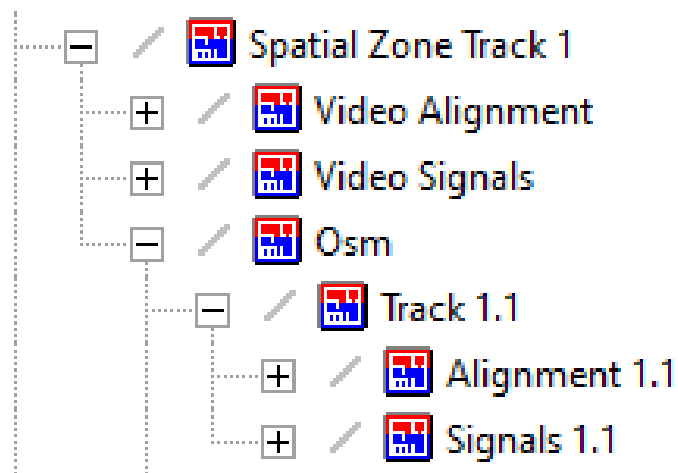


Abbildung 4.15: Geänderte Dateistruktur, angezeigt im FKZ Viewer.

Damit dennoch ein visualisierbares Endergebnis vorliegt, wurde die ganze Positionierung ein zweites Mal mit dem Local Placement durchgeführt. Diese gestaltet sich wesentlich einfacher, da keine Parameter berechnet werden müssen, sondern die bereits gegebenen Koordinaten verwendet werden können. Darüber hinaus besteht das Referenzierungsproblem nicht, da auf kein IfcAlignment verwiesen werden muss. So kann auch die anfangs geplante Dateistruktur beibehalten werden. Diese Variante konnte auch ohne Problem vom FKZ Viewer eingelesen und dargestellt werden, wie es beispielsweise in [Abbildung 4.16](#) gezeigt ist.

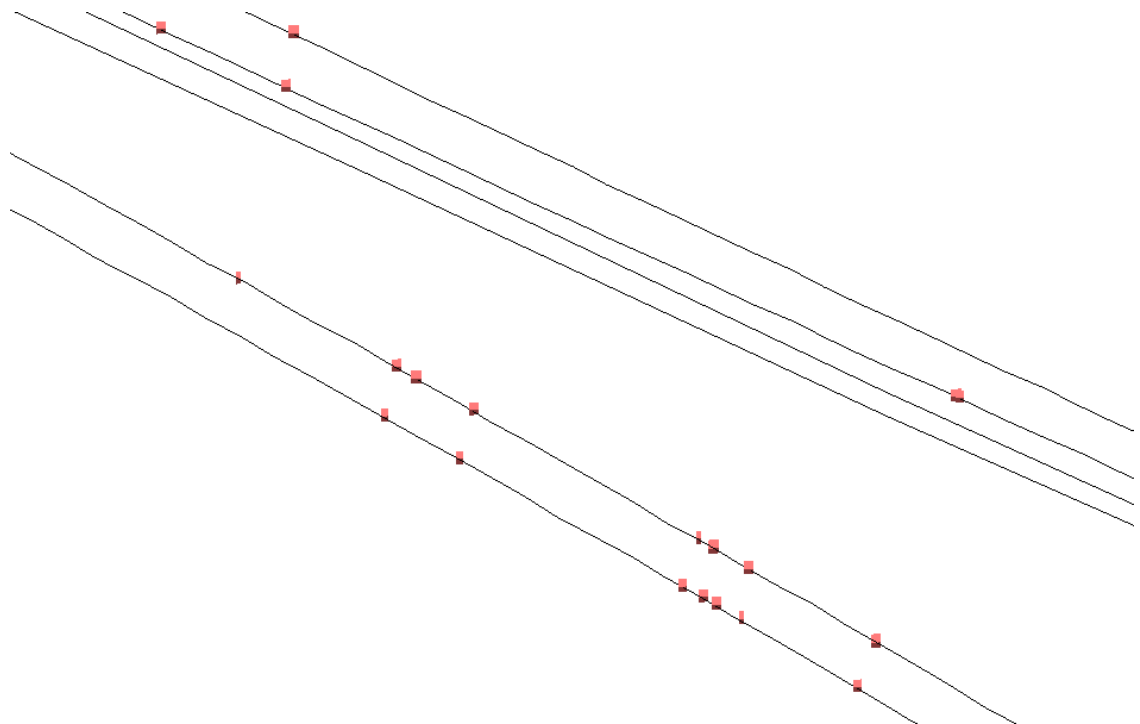


Abbildung 4.16: Gleisabschnitt mit Ausrüstungselementen im FKZ Viewer

4.4.8 Property Set zur Verknüpfung doppelter Elemente

Alle Ausrüstungselemente, die sowohl in den Daten von OSM als auch in der Datei der Videobefahrung aufgeführt sind, müssen extra behandelt werden. Diese Elemente bekommen ein benutzerdefiniertes Property Set, das auf das zugehörige Partnerelement verweist. Dabei wurde die Zuweisung der Partnerelemente genau wie in Kapitel 4.2.3 bei der Berechnung der Abweichungen durchgeführt. Kurz zusammengefasst wird zu allen Elementen der Videobefahrung das Element in den OSM Daten mit dem kürzesten Abstand gesucht, sofern es sich auch um die gleiche Art von Objekt handelt. Anschließend werden einige Paare aussortiert, bei denen ein OSM Objekt von mehreren Videobefahrungselementen als nächstes Objekt bestimmt wurde. Beibehalten wird nur das Elementepaar mit dem kürzesten Abstand zueinander.

Für den Zweck der Erstellung der IFC Datei werden dann zwei Listen erstellt, die mit zufällig erstellen IDs gefüllt werden. Die Anzahl der IDs stimmt dabei mit der Anzahl an gefundenen Elementepaaren überein. Jedes Mal, wenn ein neues Ausrüstungselement in die Datei geschrieben wird, wird zuerst überprüft, ob das Element ein zweites Mal im anderen Datensatz existiert. Ist dies nicht der Fall, bekommt das Element eine neu erstellte ID und wird ohne weitere Zusatzmaßnahmen in der Datei gespeichert. Liegt ein doppeltes Element im anderen Datensatz vor, wird folgendermaßen vorgegangen: statt einer neuen ID bekommt das Objekt eine ID aus der zu Beginn erstellten Liste. Zusätzlich bekommt es über ein benutzerdefiniertes Property Set eine weitere Eigenschaft, die die ID des zugehörigen zweiten Elements beinhaltet. Diese ist der zweiten ID-Liste an derselben Stelle zu entnehmen. Wenn das Partnerelement in die Datei geschrieben wird, erhält es seine ID über die zweite ID-Liste und bekommt die ID aus der ersten Liste als benutzerdefiniertes Attribut angehängt. Die Definition eines `IfcBuildingElementProxys` mit `IfcPropertySet` kann beispielsweise wie in Dateiauszug 4.2 aussehen.

Algorithmus 4.2: Definition eines `IfcBuildingElementProxy` Elements mit benutzerdefiniertem Property Set

```
...
#113 = IFCCARTESIANPOINT((8.55372947, 49.3397978, 0.));
#114 = IFCAXIS2PLACEMENT3D(#113, #18, #2);
#115 = IFCLOCALPLACEMENT(#24, #114);
#116 = IFCBUILDINGELEMENTPROXY('cHT9SY1Ax020sHicv02xyA', #12,
    'Hauptsignal (Form, Ks, HV, HI)', '', '', #115, #37, $, $);
#117 = IFCPROPERTYSINGLEVALUE('Corresponding Osm ID', $,
    IFCLABEL('WTImxVOZZU2PKZzgb18m4Q'), $);
#118 = IFCPROPERTYSET('d5lcH8IDFECLpdi5Doz5YQ', #12,
    'PSet_RailwayEquipmentMatching', $, (#117));
#119 = IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('9eYeOPHrS0O6lx5wAJ8mug', #12, $, $,
    (#116), #118);
#120 = IFCRELCONTAINEDINSPATIALSTRUCTURE('A3dKJTtqHUuxUKVq4FHXag', #12,
    $, $, (#116), #106);
...

```

Hierbei wird in den ersten drei Zeilen die Positionierung des Elements beschrieben. Anschließend folgt die Definition des IfcBuildingElementProxys mit ID, Namen und Verweisen auf das Local Placement und die weiter vorne spezifizierte Produktgeometrie. Daraufhin wird das benutzerdefinierte Attribut mit Namen und Wert angegeben, welches dann einem PropertySet zugeordnet wird. Abschließend werden die Beziehungen aufgestellt. Dazu gehört das Anhängen des PropertySets an das Proxy Element und die Zuordnung des Elements zur passenden IfcSpatialZone.

Kapitel 5

Verwendung des erstellten IFC Modells

Mittlerweile wurden sämtliche Ausgangsinformationen in die IFC Datei eingearbeitet und auch die Inhomogenitäten berücksichtigt. Damit kann jetzt erläutert werden, wie ein Anwendungsbeispiel der erstellten Datei aussehen kann.

Eine Anwendungsmöglichkeit liegt bei Projekten zur Streckenerneuerung, basierend auf der bestehenden Infrastruktur. Hier kann mit Hilfe einer Videobefahrung von RIMcomb eine Bestandsaufnahme durchgeführt werden. Zusätzlich können andere Quellen, wie Kartendienste oder Bestandspläne zu Rate gezogen werden. Damit besteht eine sehr ähnliche Ausgangslage, wie bei der vorliegenden Arbeit. Die erhobenen Daten werden dann mit der entwickelten Anwendung ins IFC Format überführt. Hiermit hat der zuständige Planer die Möglichkeit, die Informationen in das Autorwerkzeug seiner Wahl zu laden und mit dem Planungsprozess zu beginnen.

Über den Aufbau der IFC Datei wird dem Planer viel Spielraum gelassen, wie er die widersprüchlichen Informationen der unterschiedlichen Quellen in seinen Entscheidungsprozess einfließen lässt. Ist beispielweise die genaue Position der Ausrüstungselemente von Relevanz, kann er doppelt erfasste Elemente zur Hand nehmen und sich über die möglichen Abweichungen im Klaren werden. Liegen die Genauigkeiten nicht in dem Bereich, in dem sich eine sinnvolle Entscheidung treffen lässt, könnte er genauere Vermessungen einzelner Ausrüstungselemente veranlassen. In Anwendungsfällen, bei denen die Existenz von Elementen mit grober Position genügt, besteht der Vorteil unter anderem darin, dass mehr Bestandselemente erfasst wurden, da manche Objekte nur in einem der beiden Datensätze auftauchen. Zudem kann der Planer seine Expertise zum Themengebiet und zu örtlichen Gegebenheiten mit einfließen lassen. Hält er eine der Quellen für vertrauenswürdiger oder genügen ihm die Informationen aus einer Quelle, ermöglicht die angelegte Datenstruktur mit `IfcSpatialZones` den zweiten Datensatz unkompliziert auszublenden oder in seinem Modell zu löschen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass davon Abstand genommen wurde das Zusammenspiel der Daten bereits für die Dateierstellung zu interpretieren. Stattdessen verbleibt die Interpretation der Unsicherheiten beim Experten, der für die Planung zuständig ist. Dieser kann durch seine Erfahrung und dem Wissen zu den örtlichen Gegebenheiten und dem beabsichtigten Verwendungszweck eine wesentlich bessere Entscheidung treffen, als dies im Rahmen der Dateierstellung allgemeingültig möglich wäre.

Kapitel 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Bewertung der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass im Zuge der Digitalisierung von Prozessen in der Baubranche ein gut funktionierender Datenaustausch von großer Bedeutung ist. Dazu gehört vor allem die Entwicklung geeigneter Schnittstellen und Datenformate, die nicht nur die Gesamtkoordination ermöglichen, sondern über die ganze Projektzeit hinweg Datenverlust und redundante Informationseingabe auf ein Minimum reduzieren.

Ein entscheidender Baustein für eine erfolgreiche Projektdurchführung ist zudem häufig ein detailliertes Bestandsmodell. Hier gibt es mittlerweile eine Vielzahl an neuen Möglichkeiten, die versuchen die Bestandsaufnahme möglichst effizient zu gestalten, wie z.B. die Videobefahrung des RIMcomb Projekts. Ähnlich vielfältig wie die eingesetzten Methoden können allerdings auch die erzielten Ergebnisse sein. Diese Inkonsistenzen gilt es zu analysieren und entsprechend den projektspezifischen Anforderungen zu interpretieren.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde dies für Gleis- und Eisenbahnausrüstungsdaten durchgeführt. Dabei wurden Daten der RIMcomb Videobefahrung und zusätzlich Daten von OSM zur Hand genommen. Um die Informationen in einem für gewerkeübergreifender Zusammenarbeit geeigneten Format abzuspeichern, wurden verschiedene Alternativen verglichen. Hierbei hat sich das IFC Format als die am besten geeignete Option herauskristallisiert. Mit den momentan in Entwicklung befindlichen Erweiterungen für Infrastrukturbauwerke kann es einen großen Teil des Bauwesens auch auf internationalem Niveau abdecken. Um die aufgetretenen Abweichungen von wenigen Metern der beiden Datensätze zueinander mit in die Dateierstellung einfließen zu lassen, wurden zuerst die Möglichkeiten erforscht, wie diese in einer IFC Datei berücksichtigt werden können. Auch wenn schon diverse Varianten beleuchtet wurden, ermöglicht die Flexibilität des IFC Schemas sicherlich noch weitaus mehr Optionen. Letztendlich wurden Objekte mit widersprüchlicher Positionierung doppelt abgebildet und über ein benutzerdefiniertes Attribut miteinander verknüpft. Darüber hinaus wurde durch eine verschachtelte Dateistruktur mit `IfcSpatialZones` und der visuellen Darstellung der Ausrüstungselemente versucht, die Unterscheidung der beiden Datenquellen sehr deutlich zu machen. Aufgrund der verhältnismäßig großen Unsicherheiten in Bezug auf die Positionierung der einzelnen Elemente, musste auf eine genau geometrische Abbildung verzichtet werden. Dies verhindert jedoch nicht, dass die erstellte Datei für verschiedene Verwendungszwecke eingesetzt werden kann und die in der Einleitung [1.2](#) definierten Ziele erfüllt.

6.2 Einsatzgrenzen

Durch die Beschaffenheit der zugrunde liegenden Datensätze stößt die entwickelte Anwendung aber auch an seine Grenzen. Dies gilt speziell in Betracht auf die fehlende Information, welches Gleisstück zu welchem Gleis zuzuordnen ist. Bei den Daten der Videobefahrung konnte dieses Problem gelöst werden. Allerdings mussten bei den OSM Daten einige Fehlzuordnungen in Kauf genommen werden. Auch wenn keiner der beiden Datensätze perfekte Ergebnisse liefern konnte, so scheinen die Daten der Videobefahrung in sich schlüssiger, wohingegen OSM beispielsweise einige Lücken und Sprünge in der Gleisachse aufweist. Zudem orientiert sich die Genauigkeit der geometrischen Repräsentation der Ausrüstungselemente immer an den Abweichungen zwischen den Datensätzen. Widersprechen sich die Datenquellen um 2-3 Meter in der Position eines Elements, wie im untersuchten Fall, ergibt es wenig Sinn ein zentimetergenaues Modell des Objekts zu verwenden. Für viele Anwendungsfälle mag dies kein Problem darstellen. Eine Kollisionsprüfung ist zum Beispiel bei solchen Unsicherheiten allerdings kaum zielführend.

Mit der weiteren Verbesserung der Genauigkeit der Videobefahrung, der Verwendung anderer Datenquellen statt OSM oder anderen örtlichen Gegebenheiten ist es aber denkbar, dass eine bessere Übereinstimmung erreicht werden kann. Können gute Angaben zu den Unsicherheiten einer einzelnen Datenquelle gemacht werden, bzw. liegen keine Vergleichsdaten vor, ist auch die Verwendung einer einzigen Datenquelle möglich. Dies macht die erstellte Anwendung nicht weniger sinnvoll, da nach wie vor eine IFC Datei der Bestandsdaten erstellt werden kann, die für darauf aufbauende Planungen verwendet werden kann.

Eine zweite Grenze stellt das IFC Format dar. Dieses wird zwar laufend weiterentwickelt, dennoch wird es immer einige noch nicht definierte Bereiche geben. Außerdem müssen die aktuellen IFC Versionen zuerst in die verwendeten Softwareprogramme übernommen werden. So musste festgestellt werden, dass weder `IfcSignal` zur Abbildung von Signalen noch `IfcLinearPlacement` zur Platzierung eines Objekts entlang einer Achse verwendet werden konnten. An anderer Stelle musste zudem festgestellt werden, dass im Anforderungsbericht des IFC Rail Projekts Lücken erkannt wurden, diese allerdings nicht sinngerecht ins Schema übersetzt wurden. Beispielsweise wurde erkannt, dass es bei einem `IfcAlignment` notwendig ist, eine Unterscheidung machen zu können, ob es sich um die Achse einer Gesamtstrecke oder nur eines einzelnen Gleises handelt. Dies wurde in die IFC 4x3 RC1 Version aber nicht übernommen, was für die durchgeführte Dateierstellung sehr hilfreich gewesen wäre (BUILDINGSMART RAILWAY ROOM, 2019a, 2019b). Eine weitere Verbesserung wäre es, für Weichen möglich zu machen, auf beide angrenzenden Gleise zu verweisen, was bisher noch nicht möglich ist.

Auch wenn das IFC Schema einige Bereiche noch nicht abdecken kann, gibt es gute Möglichkeiten auf benutzerdefinierte Objekte und Attribute auszuweichen. Diese können

zwar mit der Semantik offiziell definierter Klassen nicht mithalten, stellen aber trotzdem eine gute Übergangslösung dar.

6.3 Fortführungsmöglichkeiten und Ausblick

Mit der zukünftigen Weiterentwicklung des IFC Formats steigen auch die Möglichkeiten weitere geometrische und semantische Informationen in die erstellte Datei zu integrieren. Dazu können nicht nur die genau definierten Signale und Weichen gehören, sondern auch eine genaue Abbildung des gesamten Gleiskörpers oder von Tunnel- und Brückenbauwerken, die sich auf der Strecke befinden. Vor allem der semantische Teil des Modells wird hierbei stark profitieren und weitere Normüberprüfung und Automatisierungsprozesse ermöglichen. Auf Seiten der zweiten Datenquelle gibt es z.B. die Erweiterungsmöglichkeit, dass der passende Kartenausschnitt auf OSM, passend zum Ort, von dem die Daten der Videobefahrung stammen, automatisch ausgewählt werden kann. Genauso können anderen Datenquelle zur Hilfe genommen werden, wobei die Ergebnisse der automatischen Plansymbolerkennung von RIMcomb wohl am aussagekräftigsten sind.

Generell wird der Einsatz von BIM immer weiter fortschreiten und mit zunehmender Erfahrung auch die Anwendungsmöglichkeiten erweitern. So werden der Infrastrukturbau und andere Bereiche in naher Zukunft gewiss in ähnlichen Maßen von den BIM Vorteilen profitieren können, wie das momentan im Hochbau der Fall ist. Wie in der erstellten Anwendung allerdings auch deutlich wurde, sollte man sich immer vor Augen halten, dass die fortschreitende Digitalisierung die Expertise eines Ingenieurs niemals ersetzen kann, sondern diesem lediglich als Hilfestellung dient.

Anhang A

Digitaler Anhang

Bei der Abgabe werden dieser Arbeit in digitaler Form beigefügt:

- Die von der Videobefahrung erzeugten Excel Dateien
- Der Quellcode der entwickelten Anwendungen
- Beispiele der erzeugten IFC Dateien
- Die vorliegende schriftliche Ausarbeitung im PDF-Format

Literaturverzeichnis

- AMANN, J. & BORRMANN, A. (2015). Open BIM for Infrastructure - mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustauschs.
- AUGELE, V. (2017). Comparative Analysis of Building Information Modelling (BIM) and RailTopoModel/railML in View of their Application to Operationally Relevant Railway Infrastructure.
- AUTODESK. (2020a). Autodesk Website [Stand: 2020-09-06].
- AUTODESK. (2020b). Unterstützte Dateiformate und Anwendungen für Autodesk Navisworks [Stand: 2020-10-19].
- AUTODESK. (2020c). Von Revit unterstützte Standards und Dateiformate [Stand: 2020-10-19].
- BECK, S., TÜRKER, T. & UMINSKI, V. (2019). Building Information Modeling in der Planung der Leit- und Sicherungstechnik. *Signal + Draht*, 111(09/2019), 6–11.
- BOLLIG, Y.-C. (2020). Geometrical and Topological Linking of Railway Systems.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2015). *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Springer-Verlag.
- BORRMANN, A., MUHIČ, S., HYVÄRINEN, J., CHIPMAN, T., JAUD, S., CASTAING, C., DU-MOULIN, C., LIEBICH, T. & MOL, L. (2019). The IFC-Bridge project—Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models. In *Proceedings of the 2019 European Conference for Computing in Construction. Chania, Greece*.
- BRAMANN, H. & MAY, I. (2015). Stufenplan Digitales Planen und Bauen. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*.
- BUDER, J. (2017). *Neues Planungsverfahren für Anlagen der Leit- und Sicherungstechnik auf Basis durchgängiger elektronischer Datenhaltung* (Diss.). TU Dresden.
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2020a). Collaboration between RailTopoModel, railML.org and IFC [Stand: 2020-08-20].
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2020b). IFC Infrastructure Deployments [Stand: 2020-10-19].
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2020c). IFC Rail Project [Stand: 2020-09-07].
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2020d). Industry Foundation Classes, Version 4.2 bSI Draft Standard [Stand: 2020-08-13].
- BUILDINGSMART INTERNATIONAL. (2020e). Model View Definitions (MVD) [Stand: 2020-10-05].
- BUILDINGSMART RAILWAY ROOM. (2019a). IFC Rail Project, WP2 - Requirement Analysis Report.
- BUILDINGSMART RAILWAY ROOM. (2019b). IFC Rail Project, WP3 - Conceptual Model Report.
- BUILDINGSMART RAILWAY ROOM. (2020). IFC Rail Project, Phase 1 Final Report.

- BUNDESMINISTERIUM DER JUSTIZ UND FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ. (2019). Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2018). Umsetzung des Stufenplans "Digitales Planen und Bauen".
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2019a). Handreichungen Teil 1: Grundlagen und BIM-Gesamtprozess.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2019b). Handreichungen Teil 6: Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2019c). Handreichungen Teil 7: Handreichung BIM-Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2019d). Handreichungen Teil 8: Neutraler Datenaustausch im Überblick.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR UND DIGITALE INFRASTRUKTUR. (2019e). Handreichungen Teil 9: Datenaustausch mit Industry Foundation Classes (IFC).
- DB NETZ AG. (2017). Handbuch für den Anwender - LST-Anlagen digital planen.
- EGGER, M., HAUSKNECHT, K., LIEBICH, T. & PRZYBYLO, J. (2013). BIM-Leitfaden für Deutschland. *Forschungsinitiative ZukunftBAU, BMVBS*.
- ESSER, S. & BORRMANN, A. (2018). Integrating Railway Subdomain-Specific Data Standards into a Common IFC-based Data Model. In *EG-ICE*.
- FUCHS, S., KATRANUSCHKOV, P. & SCHERER, R. (2010). A framework for multi-model collaboration and visualisation. *Proc. ECPPM 2010*, 115–120.
- FUCHS, S. & NITYANTORO, E. (2013). BIM-Management von Multimodellen. In *Proceedings of 4. Fachkonferenz Bauinformatik*.
- GÜRTLER, M., BAUMGÄRTEL, K. & SCHERER, R. J. (2015). Towards a workflow-driven multi-model bim collaboration platform. In *Working Conference on Virtual Enterprises*. Springer.
- GÜTTEL, H. (2020). EMailkontakt.
- HILBERT, F., SCHERER, R. J. & ARAUJO, L. (2012). Multi-model-based access control in construction projects. *arXiv preprint arXiv:1204.6089*.
- KADEN, R., CLEMEN, C., SEUSS, R., BLANKENBACH, J., BECKER, R., EICHHORN, A., DONAUBAUER, A., KOLBE, T. H. & GRUBER, U. (2019). *Leitfaden Geodäsie und BIM*. DVW – Gesellschaft für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement e. V.; Runder Tisch GIS e.V.
- KARLSRUHER INSTITUT FÜR TECHNOLOGIE. (2020). FKZ Viewer [Stand: 2020-10-07].
- KOCHER, F. (2016). BIM im Straßen- und Tiefbau. *This Magazin*.
- KOCHER, F. (2020). Unterschiede BIM Hoch-/ Tiefbau [Stand: 2020-07-24].
- KOCIJAN, M. (2018). Digitalisierung im Bausektor. *ifo Schnelldienst*, 71(01), 42–45.
- KOMORGEN, V. P. (2013). railML: The standard interface for electronic data exchange in today's railway business. In *10th World Congress on Railway Research. Sydney, Australia*.
- KÖNIG, M., AMANN, J., BORRMANN, A., BRAUN, M., ELIXMANN, R., ESCHENBRUCH, K., GOETZ, A., HAUSKNECHT, K., HOCHMUTH, M., LIEBICH, T., NEJATBAKSH, SCHEFFER, M. & SINGER, D. (2016). *Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte*

zur Anwendung von Building Information Modeling im Infrastrukturbau - Materialsammlung (Techn. Ber.). Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI).

- LAAKSO, M., KIVINIEMI & KIVINIEMI, A. (2012). The IFC standard: A review of history, development, and standardization, information technology. *ITcon*, 17(9), 134–161.
- LANDESVERMESSUNG SACHSEN. (2020). Geobasisinformation und Vermessung - Grundlagen und Begriffe [Stand: 2020-10-19].
- MAASER, K., MANTHE, C., RAHM, T. & NAGEL, F. (2017). Hannover Hauptbahnhof: Bauen im Bestand-digitale Bestandserfassung,-koordination und -kontrolle. Von einem der ersten BIM-Pilotprojekte der DB AG und den Vorteilen, die sich durch BIM auch für Bestandsprojekte ergeben. *Ernst & Sohn Special: BIM-Building Information Modeling*, (2017).
- NASH, A., HUERLIMANN, D., SCHÜTTE, J. & KRAUSS, V. P. (2004). RailML- a standard data interface for railroad applications. *WIT Transactions on The Built Environment*, 74.
- NATIONAL INSTITUTE OF BUILDING SCIENCES. (2019). Frequently asked Questions about the National BIM Standard-United States [Stand: 2020-07-14].
- NORMENAUSSCHUSS BAUWESEN (NABAU) IM DIN. (2012). *DIN EN ISO 19148, Geoinformation - Lineares Bezugssystem (ISO 19148:2012; Englische Fassung EN ISO 19148:2012)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- OPENSTREETMAP. (2020). OpenStreetMap Wiki [Stand: 2020-09-28].
- PREIDEL, C., BORRMANN, A., OBERENDER, C. & TRETHERWAY, M. (2015). Seamless integration of common data environment access into BIM authoring applications: The BIM integration framework.
- RAILML.ORG. (2020). Introduction to railML [Stand: 2020-08-20].
- RDF LTD. (2020). IFCEngine Documentation [Stand: 2020-10-07].
- SIGNON. (2018). Zwischenbericht Nr. 1, RIMcomb.
- STOITCHKOV, D., BREIER, P., SLEPICKA, M., GENÇ, C., HARMSSEN, F., KÖHLER, T., VILGERTSHOFER, S. & BORRMANN, A. (2019). Automatic detection of plan symbols in railway equipment engineering using a machine learning approach. In *Proc. of the 2019 European Conference on Computing in Construction*.
- TRZECIAK, M. & BORRMANN, A. (2018). Design-to-design exchange of bridge models using IFC: A case study with Revit and Allplan. In *12th European Conference on Product and Process Modelling*.
- VILGERTSHOFER, S., JUBIERRE, J. & BORRMANN, A. (2016). IfcTunnel-A proposal for a multi-scale extension of the IFC data model for shield tunnels under consideration of downward compatibility aspects.
- VILGERTSHOFER, S., AMANN, J., WILLENBORG, B., BORRMANN, A. & KOLBE, T. H. (2017). Linking BIM and GIS models in infrastructure by example of IFC and CityGML. In *Computing in Civil Engineering 2017* (S. 133–140).
- WEISE, I. M., SCHMIDT, I. & HETTWER, I. J. (2018). OKSTRA®, IFC und BIM: Neue Wege im Umgang mit Straßeninfrastrukturdaten. In *7. OKSTRA-Symposium Forschungsgesellschaft für Strassen- und Verkehrswesen (FGSV)(DEU)-German Road and Transportation Research Association*.

- WEISE, M., LIEBICH, T. & WIX, J. (2009). Integrating use case definitions for IFC developments. *eWork and eBusiness in Architecture and Construction*. London: Taylor & Francis Group, 637–645.
- WERNIK, S. (2016). BIM - Ein problematischer Trendbegriff. *Deutsche BauZeitschrift*, (04/2016).
- WINKELBAUER, T., HIEBENTHAL, T., ESSER, S., BARUTCU, B., VILGERTSHOFER, S. & BORRMANN, A. (2019). Projekt RIMcomb: Entwicklung neuer digitaler Methoden im Bereich BIM für die Ausrüstungstechnik. *Signal + Draht*, 111(09/2019), 12–18.