

Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

Untersuchung und Implementierung von bahnspezifischen Regelsätzen zur Modellüberprüfung

Bachelorthesis

für den Bachelor of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor:	Edina Selimovic
Matrikelnummer:	██████████
1. Betreuer:	Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
2. Betreuer:	Sebastian Esser, M.Sc.
Ausgabedatum:	16. Mai 2019
Abgabedatum:	28. August 2019

Abstract

The rapidly increasing development of technology over the past years has brought many benefits to the building industry. BIM - Building Information Modeling is planned to be the future standard for planning and construction. Using BIM, the 2D building plans can be extended to digital 3D-Models. This allows construction teams to cooperate with one another in a simpler and faster way and thus optimizes the whole building process.

Methods for automated model checking represent an important tool in the planning process. The investigation of plan data based on drawings and schedules has so far been a highly error-prone manual task. In the course of BIM, applications and methods were developed with the ability to check and analyse models automatically against specific rules. However, these programmes were primarily developed for buildings, so they are only conditionally applicable for infrastructure models.

This bachelor thesis aims to show and explain the opportunities and limitations of model checking of infrastructural data. To achieve this objective, rules based on railway equipment are implemented.

Zusammenfassung

Die exponentiell steigende Entwicklung der Technologie in den letzten Jahrzehnten konnte auch die Bauindustrie zu ihrem Vorteil nutzen. So wird BIM – Building Information Modeling - als Planungs- und Ausführungsstandard der Zukunft angestrebt. Hierbei werden zweidimensionale-Planunterlagen durch digital erzeugte 3D-Modelle erweitert, die eine simplere und schnellere Kooperation der diversen Gewerke ermöglichen und viele weitere Optimierungen des gesamten Bauprozesses mit sich bringen.

Ein wichtiges Werkzeug in einem Planungsprozess ist die Modellüberprüfung. Die Prüfung von skizzen- und tabellenbasierten Planungsdaten war bisher immer mit aufwändiger und fehleranfälliger Handarbeit verbunden. Im Zuge von BIM wurden Applikationen und Methoden entwickelt, welche Modelle anhand von automatischen Regeln überprüfen und auswerten können. Jedoch wurden diese Programme in erster Linie für den Hochbau konzipiert, wodurch sie für Modelle von Infrastrukturanlagen bisher nur bedingt eingesetzt werden konnten.

Mit dieser Arbeit sollen die Möglichkeiten und Grenzen der Modellüberprüfung von Infrastrukturdaten untersucht und erklärt werden. Hierfür werden Regeln der Ausrüstungstechnik der Eisenbahninfrastruktur implementiert und analysiert.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VI	
Tabellenverzeichnis	IX	
Abkürzungsverzeichnis	X	
1	Einführung und Motivation	1
1.1	Einführung	1
1.2	Ziel der Arbeit	2
1.3	Aufbau der Arbeit	3
2	Grundlagen	5
2.1	Datenmodelle	5
2.1.1	Industry Foundation Classes	5
2.1.2	Geometrischer Modellinhalt	9
2.1.3	Semantischer Modellinhalt	15
2.1.4	Geometrie einer Eisenbahntrasse	15
2.2	BIM-Planungs-Programme für die Eisenbahninfrastruktur	23
2.2.1	Autodesk Revit	24
2.2.2	Autodesk Civil 3D	25
2.2.3	Autodesk Dynamo	26
2.2.4	ProVI – OBERMEYER Planen + Beraten GmbH	27
3	Die Modellüberprüfung	29
3.1	Regelsätze	29
3.2	Modellinhalt	32
3.2.1	Anwendung der Parameterübersicht	33
3.3	Prüfungsapplikationen: Solibri, Navisworks und DESITE	36
3.3.1	Anwendung der Beispielregeln	37
3.3.2	Zusammenführen der Modelle	42
4	Implementierung von Regelsätzen der Bahnausrüstungstechnik	49
4.1.1	Lautsprecher-Test	49

4.1.2	Einbauten-Test.....	54
4.1.3	Oberleitungs-Test	63
4.1.4	Gleisfeldbeleuchtungs-Test	67
4.1.5	Validierung der Regeln	71
5	Zusammenfassung und Fazit	75
	Literaturverzeichnis	76
	Anhang A	80
	Anhang B	81

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Vererbungshierarchie des IFC-Datenformat (Borrmann et al., 2015) .	7
Abbildung 2-2: Darstellung einer ausgefüllten BoundaryRepresentation-Datenstruktur (Borrmann & Berkahn, 2015)	11
Abbildung 2-3: Der Konstruktionsbaum des CSG-Verfahrens, basierend auf den booleschen Operationen (Borrmann & Berkahn, 2015).....	11
Abbildung 2-4: Extrusion- und Rotationsverfahren (Borrmann & Berkahn, 2015)...	12
Abbildung 2-5: Extrusionendarstellung mit IFC-Daten (BuildingSMART, 2019b)	14
Abbildung 2-6: Abbildung der Achse im Lage- und Höhenplan (Freudenstein, 2017a)	16
Abbildung 2-7: Darstellung einer Trasse aus Kreisbogen und Übergangsbogen (Freudenstein, 2017b)	16
Abbildung 2-8: Darstellung einer Ausrundung im Höhenplan (Freudenstein, 2017b)	17
Abbildung 2-9: Gleisquerschnitt zweigleisig im Bogen (Freudenstein, 2017b)	18
Abbildung 2-10: IFC-Weitergabe eines Gleisoberbau (Esser 2018)	22
Abbildung 2-11: Haltepunkt Neuhof in Revit (Holzinger, 2018).....	24
Abbildung 3-1: Übersicht der benötigten Parameter zur Modellüberprüfung (Signon Group, 2019)	33
Abbildung 3-2: Lautsprecher-Test	34
Abbildung 3-3: Parameterübersicht für die Beispielregel: Lautsprecher sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden	35
Abbildung 3-4: Parameterübersicht für die Beispielregel: Lautsprecher sollen befestigt sein.....	35
Abbildung 3-5: Auszug der verwendeten Parameter im SMC zur Regelüberprüfung der Höhe der Lautsprecher.....	38
Abbildung 3-6: Überprüfung der Höhe der Lautsprecher im SMC	39
Abbildung 3-7: Überprüfung der Montagehöhe der Lautsprecher in DESITE MD Pro	40
Abbildung 3-8:Auszug der verwendeten Parameter im SMC zur Regelüberprüfung der Befestigung der Lautsprecher	41

Abbildung 3-9: Prüfung der Kontakte zwischen Objekten in DESITE MD Pro zur Regelprüfung der Befestigung der Lautsprecher.....	42
Abbildung 3-10: Zusammenführen der Modelle Eisenbahnhaltepunkt und Eisenbahntrasse im SMC.....	43
Abbildung 3-11: IFC 4x1 Modell in DESITE MD Pro.....	44
Abbildung 3-12: Projektstruktur der IFC 4x1 Trasse mit Augenmerk auf die Alignment Klasse	45
Abbildung 3-13: IFC 4x1 Trasse im FZKViewer.....	46
Abbildung 3-14: IFC 4x1 Trasse im FZKViewer mit Augenmerk auf den Achsverlauf	47
Abbildung 4-1:Lautsprecher-Test	50
Abbildung 4-2: Parameterübersicht für den Lautsprecher-Test: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein	50
Abbildung 4-3: Horizontale, vertikale und diagonale Abstände der Lautsprecher in der SMC Überprüfung	51
Abbildung 4-4: Parameterübersicht für den Lautsprecher-Test: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein; mit Gleisflächendefinition	52
Abbildung 4-5: Parameter zur Regelüberprüfung im SMC: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein	53
Abbildung 4-6: Nicht relevante Fehleranzeigen bei der SMC Modellüberprüfung	53
Abbildung 4-7: Einbauten-Test	56
Abbildung 4-8: Parameterübersicht für den Einbauten-Test.....	57
Abbildung 4-9: Überprüfung der Einbaulängen in DESITE MD Pro.....	59
Abbildung 4-10: Bedingte Regel im SMC für kleine Hindernisse, die einen Abstand größer 2,40 m untereinander aufweisen sollen	61
Abbildung 4-11: Einbauten-Test: Abstandsprüfung der Bahnsteigkante zum großen Hindernis	62
Abbildung 4-12: Oberleitungs-Test	64
Abbildung 4-13: Parameterübersicht für den Oberleitungs-Test.....	65
Abbildung 4-14: Kollision des Oberleitungsmast-Sicherheitsraums mit einem Laubbaum	66
Abbildung 4-15: Gleisfeldbeleuchtungs-Test	68

Abbildung 4-16:Parameterübersicht für den Gleisfeldbeleuchtungs-Test.....	68
Abbildung 4-17: Gegenüberstellung des Lautsprechers und der Leuchte am Beleuchtungsmast.....	70
Abbildung 4-18: Validierung des Lautsprecher-Tests im SMC	72
Abbildung 4-19: Validierung des Einbauten-Tests im SMC	73
Abbildung 4-20: Validierung des Oberleitungs-Tests in DESITE	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Fahrbahnabmessungen nach Ril800.0130 (Freudenstein, 2017b, S. IV/18)	18
Tabelle 2: Geometrische Darstellung und IFC-Klassen der Trassenparameter einer Eisenbahn	19
Tabelle 3: Class 1 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015).....	30
Tabelle 4: Class 2 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015).....	31
Tabelle 5: Class 3 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015).....	31
Tabelle 6: Funktionen und Gegenüberstellung der Modellüberprüfungssoftwares (Hjelseth, 2015, Table 4)	36
Tabelle 8: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: Lautsprecher-Test	54
Tabelle 9: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: Einbauten-Test	62
Tabelle 10: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: Oberleitungs-Test	67
Tabelle 11: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: Gleisfeldbeleuchtungs- Test	70

Abkürzungsverzeichnis

AIA	Auftraggeber-Informationen-Anforderungen
API	Application Programming Interface
BAP	BIM-Abwicklungsplan
BERA	Building Environment Rule and Analysis Language
BIM	Building Information Modeling
BMC	BIM Model Checking
CAD	Computer Aided Design
CPI	Construction Process Integration
CSG	Construction Solid Geometry
GIS	Geoinformationssysteme
IFC	Industry Foundation Classes
MVD	Model View Definition
OKSTRA	Objektkatalog der Straßen- und Verkehrsordnung
PMQL	Partial Model Query Language
RIMcomb	Railway Information Modelling für die Ausrüstungstechnik der Infrastruktur (Forschungsprojekt)
SMC	Solibri Model Checker
VCCL	Visual Code Checking Language
XML	Extensible Markup Language

1 Einführung und Motivation

1.1 Einführung

Building Information Modeling, kurz BIM, ist der Startpunkt des digitalen Wandels der Bauindustrie. In Zukunft soll das gesamte Bauprojektmanagement, vom Planen bis zum Betreiben, von zweidimensionalen Computer Aided Design (CAD)-Darstellungen auf fünfdimensionale Bauwerkmodelle umgelegt werden. Die vierte Dimension eint hier die 3D-Visualisierung mit dem Terminplan und ermöglicht somit eine zeitlich exakte Bauablaufsimulation, während die fünfte die Hinterlegung der Kosten berücksichtigt (Tulke, 2015). Vor allem bei komplexen Großprojekten soll das erhebliche Vorteile in Planung und Ausführung nach sich ziehen, so wie ausartende Projektlaufzeiten und Kosten verhindern, die bisher bei diesen Projekten üblich waren. Da Infrastrukturprojekte meist eine entwicklungsfordernde und nationale Bedeutung haben und für große Bauprojekte stehen, sieht das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) im Stufenplan für digitales Planen und Bauen vor, dass die öffentlichen Auftraggeber ab 2020 ein Leistungsniveau 1 erbringen. Dieses beschreibt Mindestanforderungen im Bereich der Auftraggeber-Informationen-Anforderungen (AIA), der Erstellung eines BIM-Abwicklungsplans (BAP) sowie notwendige BIM-Kompetenzen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015).

Einen wichtigen Interessenspunkt stellt die Bahninfrastruktur dar. Das grundlegende Ziel des BMVI ist es, die verlorenen Erträge durch Planungsfehler und daraus steigenden Projektkosten und Baubehinderungen mit Hilfe von BIM in Zukunft zu erwirtschaften (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015). Eine funktionierende Bahnverbindung ist unabdingbar für die fortlaufende wirtschaftliche Entwicklung eines Landes. Dies spiegelt sich insofern wider, dass die Mobilität in der Gesellschaft einen höheren Stellenwert einnimmt, aber auch der Gütertransport eine zentrale Rolle in der Wirtschaft spielt. Aber gerade Bahnbauprojekte sind mit einer hohen finanziellen Aufwendung verbunden, da diese meist eine weite Komplexität aufweisen. Denn eine Neuplanung oder Modifikation bestehender Bahnanlagen erfordert die Zusammenarbeit mehrerer Gewerke, wie dem Gleisbau, Tiefbau aber auch im Bereich der Ausrüstungstechnik, welche sich unter anderem aus der Leit- und Sicherungstechnik, Tele-

kommunikationsanlagen, elektrischen Anlagen 50-Hz und der Oberleitung zusammensetzt. Die Erneuerung bestehender Bahnanlagen bildet eine Kernaufgabe der Bahnbauprojekte. Da die Bestandsunterlagen der Ausrüstungstechnik nahezu in allen Fällen unzureichend sind, müssen fehlende Informationen manuell eingetragen werden. Daraufhin müssen diese Informationen an alle Gewerke weitergegeben und vom jeweiligen Gewerk ebenso händisch eingearbeitet werden. Dieser Prozess ist sehr arbeitsintensiv und fehleranfällig. Um die Kommunikation untereinander zu verbessern und bauliche Überschneidungen, durch das Durchführen von Kollisionskontrollen zu vermeiden, wäre die Nutzung einer 3D-Modellierung von Vorteil. In der Berufswelt wird die Ausrüstungstechnik, aufgrund der Abhängigkeit von 2D-Planungssoftwares, jedoch noch immer mehrfach in einer zweidimensionalen Ausarbeitung geplant, was hier klar ein Nachteil ist. So wurde das Forschungsprojekt RIMcomb- Railway Information Modeling - für die Ausrüstungstechnik der Bahninfrastruktur in die Wege geleitet mit dem Ziel die Planungseffizienz und -qualität der Ausrüstungstechnik zu modifizieren. Um dies zu erreichen, spielt die automatisierte Synchronisation der Fachmodelle der unterschiedlichen Gewerke zu einem gemeinsamen Modell, eine wesentliche Rolle. Demnach könnte das gesamte Projekt anhand eines Modells jeglichen Überprüfungen unterzogen werden (TÜV SÜD, 2017).

Der Modellüberprüfung wird eine enorme Bedeutung zugeschrieben. Aus Sicherheitsgründen wird insbesondere die Ausrüstungstechnik von vielen Regeln und Richtlinien bestimmt, welche beispielsweise einzuhaltende Sicherheitsabstände und -räume bestimmen. Durch eine teilautomatisierte Überprüfung dieser Regeln wird eine deutlich effizientere und genauere Planung angestrebt, welche schlussendlich Auswirkungen auf die Einhaltung der Projektzeit und Kosten hat (TÜV SÜD, 2017).

1.2 Ziel der Arbeit

In dieser Arbeit wird untersucht, welcher Dateninhalt zur Modellüberprüfung von Infrastrukturanlagen der Eisenbahn benötigt wird. Hierfür werden Modelle des Eisenbahnhaltepunktes und der Eisenbahntrasse untersucht. Daraus soll hervorgehen, inwieweit vorhandene Softwareprodukte zur Prüfung von Bahninfrastrukturdaten geeignet sind. Außerdem wird der aktuelle Stand der Modellierungsmöglichkeiten von Infrastrukturanlagen analysiert.

Schließlich wird ein Implementierungsprozess der Überprüfungsregeln erarbeitet. Dieser richtet sich nach den Regeln und Richtlinien der Ausrüstungstechnik. Demzufolge soll deutlich werden, ob und welche Daten den Modellen fehlen und wie diese entworfen werden können, um die erforderlichen Regeln zu erstellen und anzuwenden.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Kapitel 2 soll zunächst der geometrische und semantische Inhalt eines erzeugten Modells näher betrachtet werden, sowie deren Weitergabe über das IFC-Datenformat. Dabei werden grundlegende Kenntnisse über die Industry Foundation Classes vermittelt, sowie der aktuelle Stand der Infrastrukturerweiterung. Dies wird anhand von Parametern zur Eisenbahntrassierung exemplarisch vorgeführt. Anschließend wird die Eignung der verschiedenen Softwareprodukte zur Modellierung in der Infrastrukturplanung, wie Autodesk- Revit, Civil3D, Dynamo und ProVI analysiert und beurteilt. Dies geschieht anhand der zwei Modelle Eisenbahnhaltepunkt und Eisenbahntrasse. Dadurch sollen die unterschiedlichen Begrenzungen der Authoring-Tools vermittelt werden. Da Revit generell für den Hochbau bestimmt ist, lassen sich mit dieser Applikation Bahnsteige und Bahnhöfe recht gut modellieren, während Gelände- und Trassenentwürfe vorrangig in tiefbauspezifischen Programmen wie Autodesk Civil3D, ProVI oder CARD1 geplant werden.

Anschließend wird in Kapitel 3 die Modellüberprüfung behandelt. Vorerst wird auf die richtige Interpretation und Klassifizierung von Regeln eingegangen. Daraufhin wird mittels einer Parameter-Übersicht bestimmt, wie die erforderlichen Parameter für den jeweiligen Regelsatz definiert werden können und somit der benötigte Modellinhalt hervorgehoben. Dieser Prozess soll an zwei Regeln veranschaulicht werden. Folglich wird eine Gegenüberstellung der geläufigsten Überprüfungsapplikationen hinsichtlich ihrer Funktionen erstellt und die verwendeten Beispielregeln ausgeführt. Schließlich werden die Modelle des Haltepunktes und der Trasse gleichzeitig in die jeweiligen Programmumgebungen geladen und das Resultat analysiert. Das Augenmerk liegt hier vor allem auf der Anwendung des neuen Datenaustauschformats IFC 4x1 für die Infrastruktur.

In Kapitel 4 folgt die eigenständige Implementierung von Prüfungsregeln für die Ausrüstungstechnik der Bahninfrastruktur. Dazu werden einige Regeln bestimmt und systematisch, nach folgendem Schema eingebettet:

-
1. Erstellen einer Parameterübersicht
 2. Untersuchung des technischen Levels
 3. Erzeugen der notwendigen Modellierungsparameter
 4. Modellüberprüfung
 5. Zusammenfassung der benötigten Daten

Daraus soll hervorgehen werden inwieweit die Modellüberprüfung von Infrastrukturdaten ermöglicht wird und in welchem Kontrast die praktische Umsetzung zum technischen Fortschritt steht. Außerdem sollen Anforderungen an einzelne Modelle, die zukünftig in der Erstellung berücksichtigt werden sollen, resultieren.

2 Grundlagen

In den folgenden Abschnitten soll ein grundlegendes Verständnis über den Dateninhalt der BIM-Modelle geschaffen werden. Den Informationen und Daten eines Modells wird eine bedeutende Rolle zuteil. Erst aufgrund dieser kann ein BIM-Modell, welches einem Datenmodell entspricht, in seiner vollen Funktionalität bestehen.

Daran anknüpfend sollen notwendige Entwurfparameter einer Eisenbahntrasse und deren Darstellung in einem Datenmodell definiert werden.

Daraufhin werden die unterschiedlichen Programme, die für eine BIM-Planung von Eisenbahninfrastruktur Verwendung finden, vorgestellt.

Anhand dieser sollen die Mittel zu Darstellung eines BIM-Eisenbahnhaltepunktes und einer BIM-Eisenbahntrasse analysiert und ausgewertet werden.

2.1 Datenmodelle

Um mit der BIM-Methode erfolgreich planen, bauen und betreiben zu können, müssen relevante Daten hinterlegt und weitergegeben werden. Dies wird mit dem standardisierten Datenaustauschformat der Industry Foundation Classes (IFC) ermöglicht, auf welches im nächsten Abschnitt genauer eingegangen wird. Die IFC-Daten werden aus dem geometrischen und semantischen Inhalt des modellierten Bauwerks bezogen. Wie dieser Prozess durchgeführt wird und was genau unter geometrischen und semantischen Daten verstanden wird, soll in den darauffolgenden Abschnitten erläutert werden.

2.1.1 Industry Foundation Classes

Für ein Bauprojekt werden unter anderem Teilbereiche aus der Architektur, der Tragwerksplanung und der Technischen Ausrüstung zusammengeführt. Meist verwendet jeder Teilbereich eigene, spezifische Applikationen zur Planung und weiteren Anwendung. Die daraus resultierenden Entwürfe müssen jedoch untereinander ausgetauscht werden. Dabei ergeben sich Schwierigkeiten, welche die Kollaboration erheblich be-

hindern. Interoperabilität, die Möglichkeit Daten verlustfrei zwischen den unterschiedlichen Applikationen auszutauschen und damit den Arbeitsablauf zu vereinfachen, wie Sacks, Eastman, Lee, & Teicholz (2018) definieren, ist das angestrebte Ziel des Open-BIM Standard. Damit dies erreicht wird, müssen die unterschiedlichen BIM-Werkzeuge mit dem offenen Datenaustauschformat der Industry Foundation Classes (IFC) kompatibel sein.

IFC stellt ein standardisiertes Datenaustauschformat dar, welches einen herstellereutralen und hochwertigen Austausch von BIM-Modellen ermöglicht (Borrmann, Beetz, Koch, & Liebich, 2015).

Entwickelt wurde IFC von der „buildingSMART“- Organisation, welche sich aus mehr als 800 Organisationen und Firmen zusammenstellt, mit der Intention einen Standard für eine effizientere Interoperabilität zu schaffen (Borrmann et al., 2015).

Hinter IFC steht eine komplexe Datenstruktur. Ausschlaggebend ist, dass neben der Geometrie gleichzeitig die semantischen Informationen eines Objekts erfasst werden. Das entstandene Datenmodell weist eine beachtliche Informationstiefe auf, die durch eine objektorientierte und erweiterbare Struktur verstärkt wird. Denn auch die jeweiligen Beziehungen der Objekte untereinander und die Vererbungshierarchie werden dargestellt (Borrmann et al., 2015).

Verwendet wird die deklarative Datenmodellierungssprache EXPRESS. Damit ist eine objektorientierte Beschreibung der Datenmodelle möglich. So werden Objekte in verschiedene Klassen unterteilt, denen Attribute zugeordnet werden können, die dadurch in Beziehung zu anderen Klassen stehen. Strukturiert werden die Klassen nach einer Vererbungshierarchie. Diese wird im IFC-Datenmodell nach ihrer Bedeutung, der Semantik, erstellt (siehe Abbildung 2-1) (Borrmann et al., 2015). Es soll knapp veranschaulicht werden:

In der obersten Klasse *IfcRoot* werden Informationen zur Verwaltung des Objekts abgelegt: Objektersteller, Erstellzeitpunkt.

Mit *IfcObjectDefinition* wird das Objekt positioniert und seine Komponenten identifiziert.

IfcObject verknüpft das Objekt mit seinen Eigenschaften und *IfcProduct* definiert die räumliche Zuordnung.

In *IfcElement* werden die unterschiedlichen Beziehungen der Elemente untereinander gespeichert. Beispielsweise wird festgehalten, dass in *IfcWall* verschiedene *IfcOpenings* vorhanden sind, die mit *IfcWindows* gefüllt sind.

Mit Beziehungen können noch mehr Informationen über die Bauteile gesichert werden, die sich vorteilhaft auf die weiteren BIM-Anwendungen, beispielsweise die Mengenermittlung, auswirken. Diese Beziehungsklassen sind unabhängig von der Hierarchie und werden mit *IfcRel* gekennzeichnet. Ein *IfcElement* kann mit der Beziehung *IfcRelVoidsElement* verknüpft sein. *IfcRelVoidsElement* stellt eine Beziehung zwischen einem Element und einer Öffnung dar, welches einen leeren Raum im Element erstellt (Sacks et al., 2018).

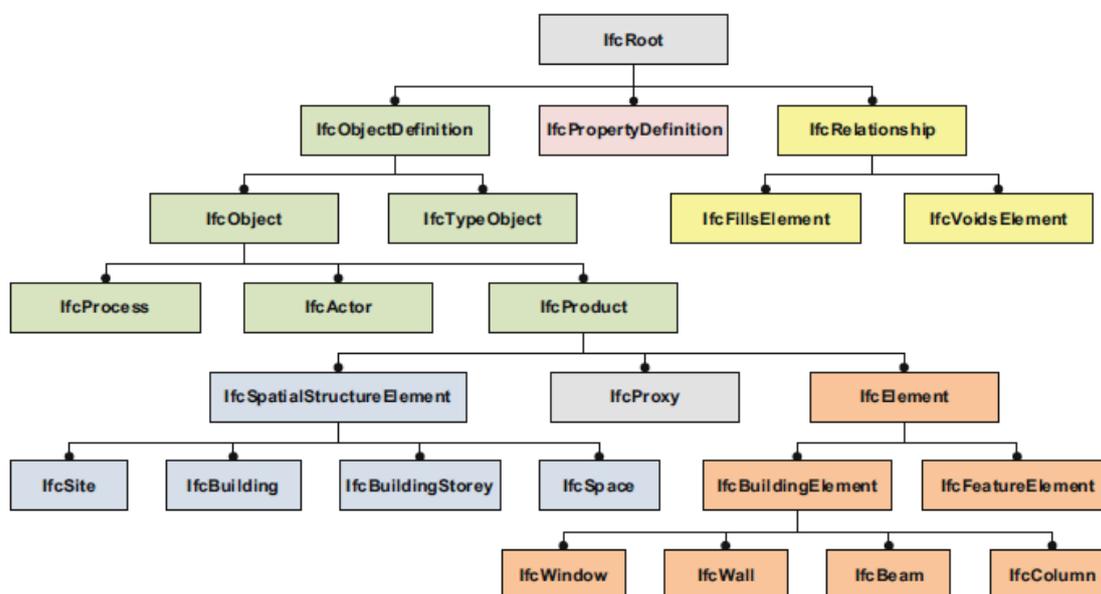


Abbildung 2-1: Vererbungshierarchie des IFC-Datenformat (Borrmann et al., 2015)

In den letzten Jahren hat sich das IFC-Format als effizient erwiesen. Mit IFC ist es möglich, aufgrund der semantischen Beschreibung, intelligente Bauteile zu exportieren. Damit stellt es eine wichtige Erweiterung zu den herkömmlichen CAD-Austauschformaten wie DXF, DWG und DGN dar, mit welchen ausschließlich 2- und 3D-Geometrien übertragbar sind. Neben dem IFC-Datenformat findet auch das CPIXML-Datenformat noch Anwendung. Hier handelt es sich um eine Schnittstelle, die hauptsächlich für den Gebrauch von Applikationen des Softwareunternehmens RIB Software SE genutzt wird. Diese bieten umfangreiche Softwarelösungen im Bereich der Baubetriebsplanung und unterstützen so weltweit die technisch-kaufmännische Steuerung von Bauprojekten (RIB, 2019a). Durch die iTWO 5D-Plattform wird die Bauprojektlei-

tung unter anderem in der Planung und Vergabe, Mengenermittlung oder auch Kostenkontrolle gefördert (RIB, 2019b). Für eine Mengenermittlung und Terminplanung im Infrastrukturbereich ist das CPIXML (Construction Process Integration) Format momentan besser ausgestattet als das IFC-Format, da sich das IFC-Format noch in der Entwicklung befindet. Im Gegensatz zu anderen Schnittstellen bildet IFC als offenes Datenaustauschformat die ideale Vorlage für ein international standardisiertes Datenmodell. Hiermit wird ein nahtloser Datenaustausch gewährleistet und möglichen Wettbewerbsverzerrungen durch einzelne Softwarehersteller vorgebeugt. So wurde in einigen Ländern, wie Finnland, den Niederlanden und auch in Singapur, das IFC-Datenformat für öffentliche Bauvorhaben als verbindlich eingeführt (Borrmann et al., 2015). Weitere Formate die im Infrastrukturbau häufig Verwendung finden, sind zum Beispiel LandXML oder OKSTRA. Bei LandXML handelt es sich um ein Datenformat, welches den Austausch von georeferenzierten Objekten in der Vermessung oder im Tiefbau unterstützt. Der Objektkatalog für das Straßen- und Verkehrswesen (OKSTRA) ist ein, in Deutschland etabliertes, Datenformat für den Verkehrsbau. Aber auch hier wurden schon erste Ansätze geschaffen, um dem standardisierten Datenaustauschformat im Infrastrukturbau entgegenzukommen. Mit der TUM Open Infra Platform wurde eine Plattform entwickelt, welche den Ansatz verfolgt Trassierungsdaten der Formate LandXML und OKSTRA in IFC-Formate zu transferieren (Amann & Borrmann, 2015). Speziell im Eisenbahnbau wird gerne von Formaten wie PlanPro oder RailML Gebrauch gemacht, welche auf der Extensible Markup Language (XML) basieren. RailML bietet Mittel zur Betriebsplanung des Schienenverkehrs, während PlanPro entwickelt wurde, um den Austausch der Planung der Bahnausrüstungstechnik zu erleichtern. In PlanPro ist es weiterhin möglich weitreichende semantische Informationen zu speichern. Nachteilig ist wiederum, dass die Geometrie nur sehr mangelhaft abgebildet wird, welche für weitere BIM-Anwendungen notwendig ist. IFC hingegen erlaubt das Speichern von detaillierter Geometrie und semantischen Informationen. Nebenbei wird es bereits von diversen Applikationen, wie ProVI, Autodesk-Programmen, DESITE MD und weiteren, unterstützt und stellt somit das geeignetste Format dar. Um die Vorteile des IFC-Formats auch im Bahnbau zu nutzen, haben Esser & Borrmann (2019) erste Verfahren zur Konvertierung dieser Formate in das IFC-Format entwickelt (Esser & Borrmann, 2019).

Anzumerken ist, dass die zuletzt ISO-zertifizierte IFC Version 4 den Schwerpunkt auf Gebäudemodelle legt. Mit IFC 5 wird die Erweiterung auf Infrastrukturobjekte, wie Straßen, Tunnel und Brücken angestrebt. Erste Grundlagen dazu wurden 2015 mit dem IFC-Alignment-Projekt geschaffen, welches der Beschreibung einer Straßen- bzw. Bahntrassierung dient (Amann & Borrmann, 2015). Die Zwischenversionen IFC 4x1 für Alignment (Juni 2016) und IFC 4x2 für Brücken (April 2019), welche nicht zertifiziert werden, sollen trotzdem für eine zügige Einführung neuer Klassen sorgen (Borrmann et al., 2017).

Im Rahmen des IFC-Ausbaus für den Infrastrukturbau wird ein bestimmter Ansatz verfolgt. Mit dem *IfcAlignment* soll das Fundament für die Entwicklung der anstehenden Erweiterungen um *IfcBridge*, *IfcRoad* oder *IfcRail* geschaffen werden (Borrmann et al., 2017). Durch die Entwicklung weiterer, allgemein gültiger Klassen für den Infrastrukturbau, hier durch *IfcBridge* (IFC 4x2), soll die Gelegenheit einer zügigen Implementierung fehlender Erweiterungen genutzt werden. Es wird versucht die Erweiterung der Klassen so zu gestalten, dass die Komplexität des Datenmodells möglichst niedrig gehalten wird. Denn mit einer Komplexitätssteigerung der Modelle wächst auch die Schwierigkeit der Implementierung und Anwendbarkeit dieser für die Entwickler und Softwarehersteller, wie Amann (2018) in seiner Dissertation erklärt. In den Guidelines für das IFC Infra Overall Architecture Project von buildingSMART (2017) wird, um genau diese Komplexität zu umgehen, darauf hingewiesen die Einführung neuer Klassen möglichst gering zu halten. Dies soll erreicht werden, durch einen minimalen Eingriff in die vorhandene Datenstruktur und das Verwenden bereits bestehender Klassen. Beispielsweise erkennt man in *IfcBridge*, dass brückenspezifische Objekte, wie ein Brückenpfeiler, als Typenerweiterung der Klasse *IfcColumn* hinzugefügt werden (BuildingSMART, 2019a).

2.1.2 Geometrischer Modellinhalt

Den geometrischen Daten wird eine der wichtigsten Aufgaben zugewiesen. In erster Linie sind diese dafür zuständig, dass ein 3D-Modell visualisiert werden kann. Aber nicht nur für die Visualisierung ist die Geometrie essentiell, sie ermöglicht ebenso Kollisionsanalysen, exakte Mengenermittlungen und physikalische Simulationen (Borrmann & Berkahn, 2015). Bei Hochbau- und einem Infrastrukturprojekt unterscheidet sich die benötigte Geometrie in bestimmten Aspekten. Im Hochbau erscheint

eine volumenorientierte Modellierung als sinnvoll. Bei Infrastrukturbauten ist aufgrund der horizontalen Ausdehnung eine räumliche Beschreibung hilfreicher. Diese kann mit Geoinformationssystemen (GIS) veranschaulicht werden. Bei der Beschreibung von Geoobjekten handelt es sich um flächenorientierte Beschreibungen, dabei geben Punkte, Linien und Flächen die Bestandsformen an (König et al., 2016). Dementsprechend stellt sich die Frage, wie notwendig eine volumenorientierte 3D-Modellierung von Infrastrukturbauten ist.

In diesem Abschnitt sollen vorerst die verschiedenen Varianten für eine geometrische BIM-Modellierung veranschaulicht werden. Danach sollen die benötigten Parameter für eine erfolgreiche Infrastrukturplanung bestimmt und der oben genannten Fragestellung nochmal nachgegangen werden.

Für das *Solid Modelling* werden zwei unterschiedliche Ansätze verwendet, welche beide von den BIM-Applikationen unterstützt werden. Einmal das explizite Verfahren, welches das Modell über seine Oberfläche repräsentiert und das implizite, welches die verwendeten Konstruktionsschritte beschreibt, die zur Erzeugung des Modells geführt haben (Borrmann & Berkhahn, 2015). Die Ansätze werden hier nur oberflächlich aufgegriffen.

Das explizite Verfahren, die *Boundary Representation* Methode, ist die verbreitetste Methode. Dabei werden die Körper über ihre Flächen beschrieben. Die Flächen werden wiederum über ihre Kanten beschrieben und diese über die Knoten. Damit wird die Topologie des Objekts dargestellt (siehe Abbildung 2-2). Um dieses nun in Größe genau zu definieren, werden, für ebene Objekte, den Knoten Koordinaten zugewiesen, oder für gekrümmte Flächen oder Kanten, der geometrische Verlauf. Aufgrund einer Erweiterung dieser Datenstruktur, auf die hier nicht genauer eingegangen wird, werden selbst komplexe Objekte mit Hohlkörpern korrekt dargestellt (Borrmann & Berkhahn, 2015).

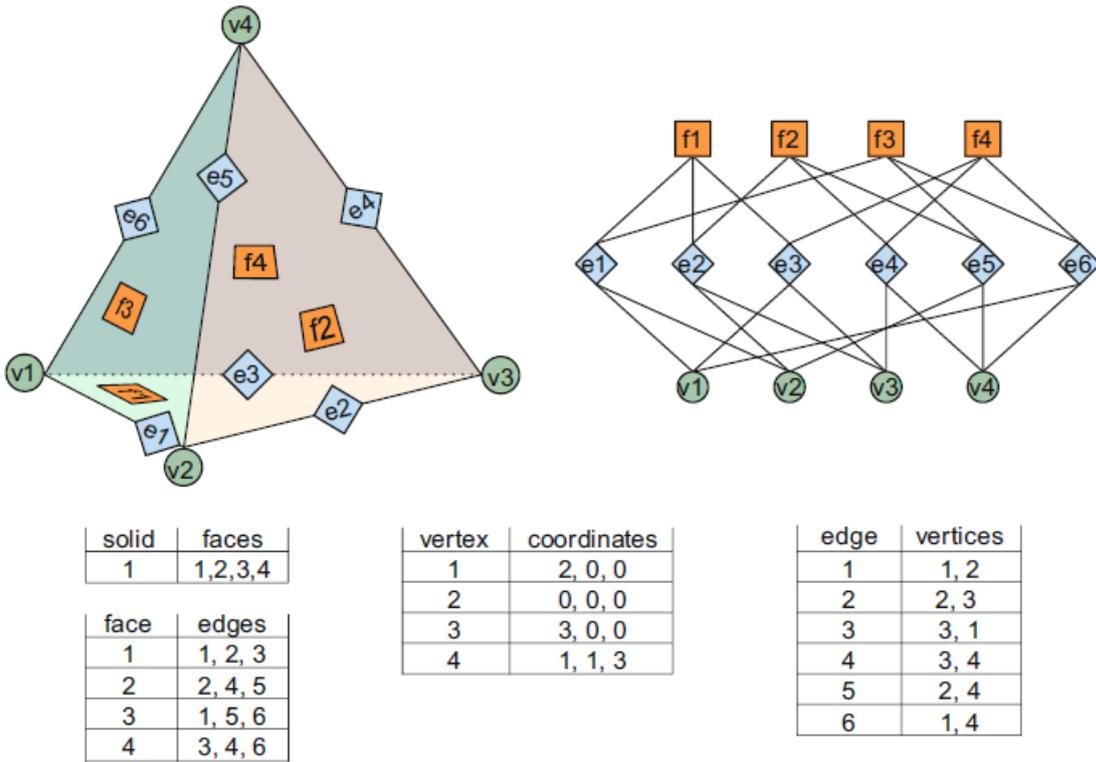


Abbildung 2-2: Darstellung einer ausgefüllten BoundaryRepresentation-Datenstruktur (Borrmann & Berkhahn, 2015)

Das implizite Verfahren versucht den Herstellungsprozess mit der Methode der *Construction Solid Geometry* (CSG) zu erfassen. Über einen Konstruktionsbaum werden die einzelnen Herstellungsschritte dargestellt. Diese werden durch die Verwendung der booleschen Operationen *Vereinigung*, *Schnitt* und *Differenz* an den Grundkörpern Würfel, Zylinder und Pyramide ausgezeichnet (siehe Abbildung 2-3).

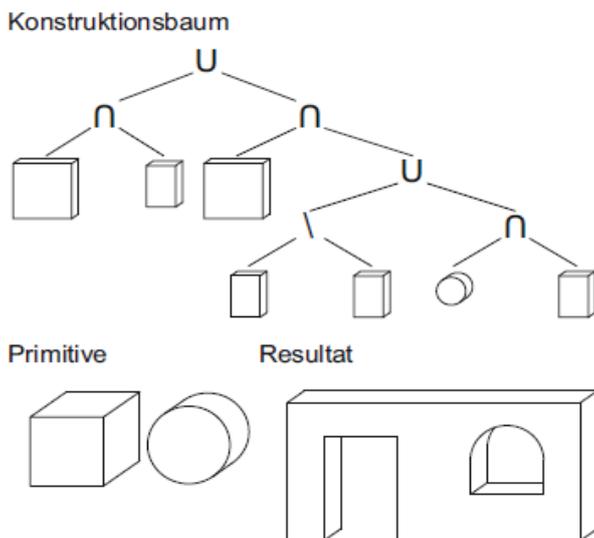


Abbildung 2-3: Der Konstruktionsbaum des CSG-Verfahrens, basierend auf den booleschen Operationen (Borrmann & Berkhahn, 2015)

Diese Methode wurde im BIM-Bereich erweitert, mit der Möglichkeit, den selbstständig generierten Körper für die jeweiligen Operationen zu verwenden (Borrmann & Berkhahn, 2015).

Des Weiteren können geometrische Objekte durch Extrusion oder Rotation erzeugt werden. Dieses Verfahren funktioniert, indem zuerst eine geschlossene Fläche in 2D abgebildet wird. Danach ist es dem Nutzer möglich diese Fläche entlang einer ausgewählten Linie oder Fläche, einem sogenannten 3D-Pfad, entlangzuziehen. So entsteht aus der 2D-Geometrie ein 3D-Körper. Wenn es sich um einen geraden Pfad handelt, wird das Vorgehen als *Extrusion* beschrieben. Bei gekrümmten Kurven, als *Sweep*. Entsprechend diesem Schema führt die Rotation um eine Achse zu einem Rotationskörper. Diese Verfahren finden in der Praxis sehr häufig Verwendung und werden vom IFC-Format unterstützt (Borrmann & Berkhahn, 2015).

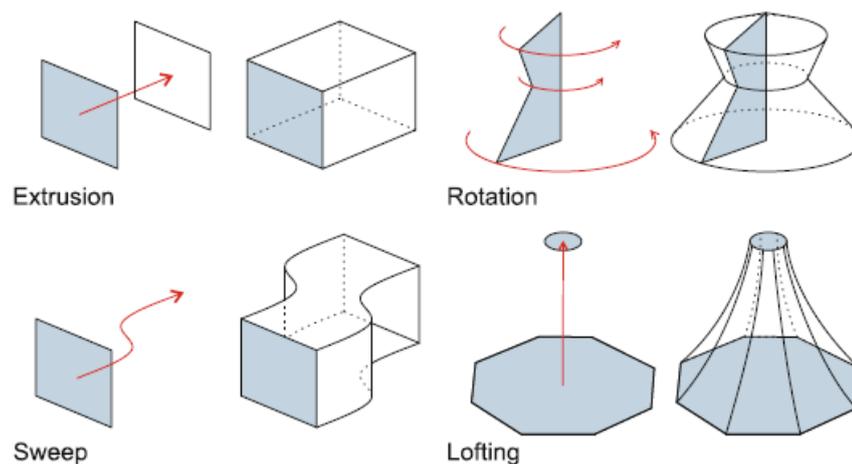


Abbildung 2-4: Extrusion- und Rotationsverfahren (Borrmann & Berkhahn, 2015)

Neben dem Solid Modelling stellt auch das parametrische Modellieren eine gängige Anwendung dar. Mit dem Einstellen von Parametern während des Modellierens ist es möglich, eigenständig ausgewählte Abhängigkeiten des modellierten Objekts darzustellen. Hier kann man zwischen geometrischen- und Abmessungs-Constraints unterscheiden. Unter einem geometrischen-Constraint wird beispielsweise der parallele Verlauf zweier Linien vorausgesetzt. Während die Abmessungs-Constraints sich auf rein geometrische Informationen wie die Länge, Höhe, Distanz, usw. beschränken, so kann beispielhaft das Verhältnis einer Rechteckshöhe zu seiner Länge definiert werden. Verknüpft man dies mit dem zuvor genannten Verfahren der Extrusion oder Rotation, können so parametrisierte Objekttypen entstehen, die auch Familien genannt werden. Wichtig dabei ist zu erwähnen, dass diese auf Referenzebenen oder -achsen

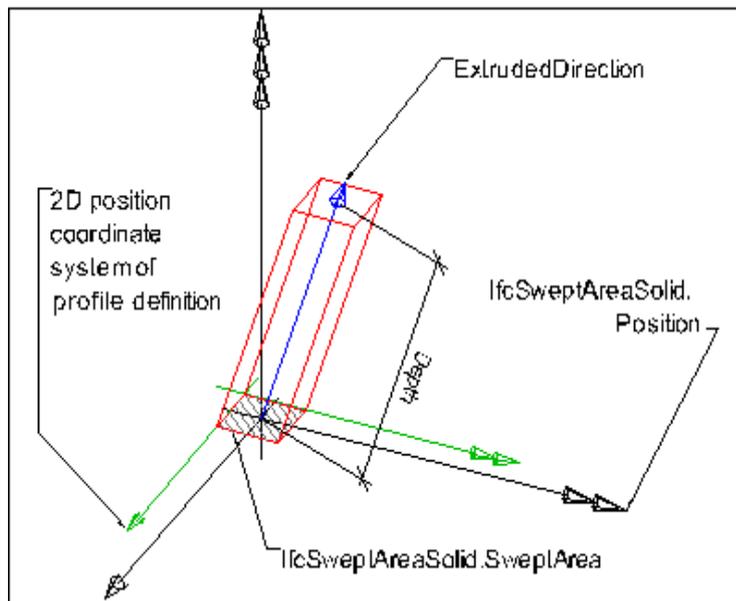
aufbauen. So werden zuerst Referenzebenen oder -achsen definiert, die im parametrisierten Abstand zueinander stehen können. An diesen werden schließlich die Objektflächen oder -kanten ausgerichtet (Borrmann & Berkhahn, 2015).

Aber nicht nur ebene Geometrien sind entscheidend bei der Modellgenerierung. Für ausgefallene architektonische Objekte, die vor allem im Infrastrukturbau vorhanden sind, ist die Darstellung von gekrümmten Flächen und Kurven erforderlich. Hier spricht man von Freiformkurven oder -flächen. Die Freiformkurven, auch Splines genannt, setzen sich aus mehreren Polynomen zusammen. Mathematisch definiert werden diese durch parametrische Funktion, die aufgelöst einen Kurvenverlauf im Raum erzeugen. Die am meisten fortgeschrittenen Freiformkurven sind die NURBS- Non-Uniform-Rational BSplines, welche in allen BIM-Systemen Anwendung finden. Analog verhält es sich bei den Freiformflächen, welchen eine weitere Dimension und schließlich ein weiterer Parameter hinzugefügt wird (Borrmann & Berkhahn, 2015).

Erst durch die geometrische Modellierung wird eine Visualisierung möglich und schließlich auch die Weiterverwendung in einer Modellprüfung oder in einer Mengenermittlung. Damit das erstellte Modell von unterschiedlichen Softwares eingespielt und korrekt dargestellt werden kann, muss es in das IFC-Format exportiert werden. Dabei ist entscheidend, dass an dieser Stelle alle Daten richtig und frei von Verlusten weitergegeben werden. Welche geometrischen Daten generiert und gespeichert werden, wird im Folgenden knapp erklärt.

Eine geometrische Repräsentation wird im IFC-Format immer nur den semantischen Objekten hinzugefügt (Borrmann et al., 2015). Für die geometrische Repräsentation sind bestimmte Klassen (korrekt: Entity) verfügbar. Hier soll anhand von einer Extrusion aufgezeigt werden, wie diese im IFC-Format angewandt werden.

Ziel der Beschreibung einer Extrusion ist es, dass eine geschlossene 2D-Fläche in eine bestimmte Richtung extrudiert wird und somit ein 3D-Körper entsteht.



Für die Klasse *ifcExtrudedAreaSolid* werden zwei Attribute benötigt: *ExtrudedDirection*, zur Richtungsbeschreibung und *Depth*, um die Distanz der Extrusion zu bestimmen.

Abbildung 2-5: Extrusionsdarstellung mit IFC-Daten (BuildingSMART, 2019b)

Wenn man die Vererbungsstruktur betrachtet, so befindet sich an der Spitze die Superklasse *ifcGeometricRepresentationItem*. Diese vererbt an die Unterklassen *ifcCurve*, *ifcSurface* und *ifcSolidModel*. Da es sich bei einer Extrusion um einen entstehenden Körper handelt, wird in diesem Fall an *ifcSolidModel* vererbt. Die zugehörigen Unterklassen könnten hier sowohl für eine Boundary-Representation stehen als auch für ein CSG-Verfahren. Bei einer Extrusion wird jedoch die Klasse *ifcSweptAreaSolid* verwendet. Hier wird die extrudierte 2D-Fläche und ihre Koordinaten bestimmt. Da man hier zwischen einer Extrusion, Rotation und einem Sweep unterscheiden kann, wird eine neue Klasse benötigt. Schließlich gelangt man zur Klasse *ifcExtrudedAreaSolid* (Borrmann et al., 2015; BuildingSMART, 2019b).

Zusammenfassend kann man sagen, dass geometrische Daten, aufgrund der Vererbungshierarchie, durch eine immer weiter verfeinerte Repräsentation beschrieben werden. Im Zuge dessen, werden bestimmte Informationen, in Form von Attributen belegt, die schlussendlich die Geometrie definieren. Dadurch ist eine detaillierte Geometriebeschreibung möglich.

Hier stellt sich nun die Frage, welche Geometrie für den Eisenbahnbau benötigt wird und, ob eine exakte 3D-Darstellung dieser notwendig ist. Dafür werden die benötigten Parameter zur Erstellung herausgesucht und überprüft, ob diese mit dem jetzigen Stand der IFC-Entwicklung realisierbar sind. Damit der letzte Punkt vollständig betrachtet werden kann, soll vorerst noch das Wichtigste zu semantischen Daten festgehalten werden.

2.1.3 Semantischer Modellinhalt

Damit aus einem geometrischen Modell ein intelligentes BIM-Modell wird, sind weitere Daten notwendig. Diese sollen das geometrische Objekt definieren, nach Namen, Materialien, Farbe, aber auch dem Herstellungsprozess, sowie der Abhängigkeit und Verknüpfung mit den anderen Objekten und dem gesamten Modell. Hier spricht man von der Semantik, welche die Bedeutung der Objekte beschreibt. Diese wird objektorientiert angegeben und ist wie in 2.1.1 nach Klassen strukturiert. Maßgebend für die nachfolgende Bearbeitung des Modells, in der Tragwerksprüfung, Modellüberprüfung, Mengenermittlung oder im späteren Facility Management, ist die Weitergabe der semantischen Daten (Koch, 2015). Das liegt daran, dass im IFC-Format jedes Objekt zuerst als semantische Entität oder Klasse beschrieben wird und schließlich über *IfcShapeRepresentation* mit seiner geometrischen Herstellungsart verknüpft wird.

Um nur kurz und vereinfacht die Bedeutung der Semantik zu verdeutlichen:

Es werden beispielsweise jedem Objekt der Klasse Wand, das Attribut des Materials zugeordnet. Dementsprechend können diese Daten zur einfacheren und schnelleren Mengenermittlung verwendet werden. Aber auch durch die Zuweisung gewisser Beziehungen von Lasten zu Objekten, sind die Voraussetzungen für eine Tragwerksprüfung gegeben. Im Facility Management würde die Angabe von Nutzungseigenschaften einzelner Räume gewisse Vorteile bringen (Koch, 2015).

Die Strukturierung in einem IFC-Datenmodell läuft analog, wie in den vorherigen Abschnitten erklärt, ab.

2.1.4 Geometrie einer Eisenbahntrasse

Zuerst muss darauf geachtet werden, dass bei der Planung einer Eisenbahntrasse sowohl ein Lageplan, Höhenplan, als auch der Querschnitt benötigt werden. In folgender Abbildung wird die Verknüpfung der Achse mit dem Lage- und Höhenplan deutlich.

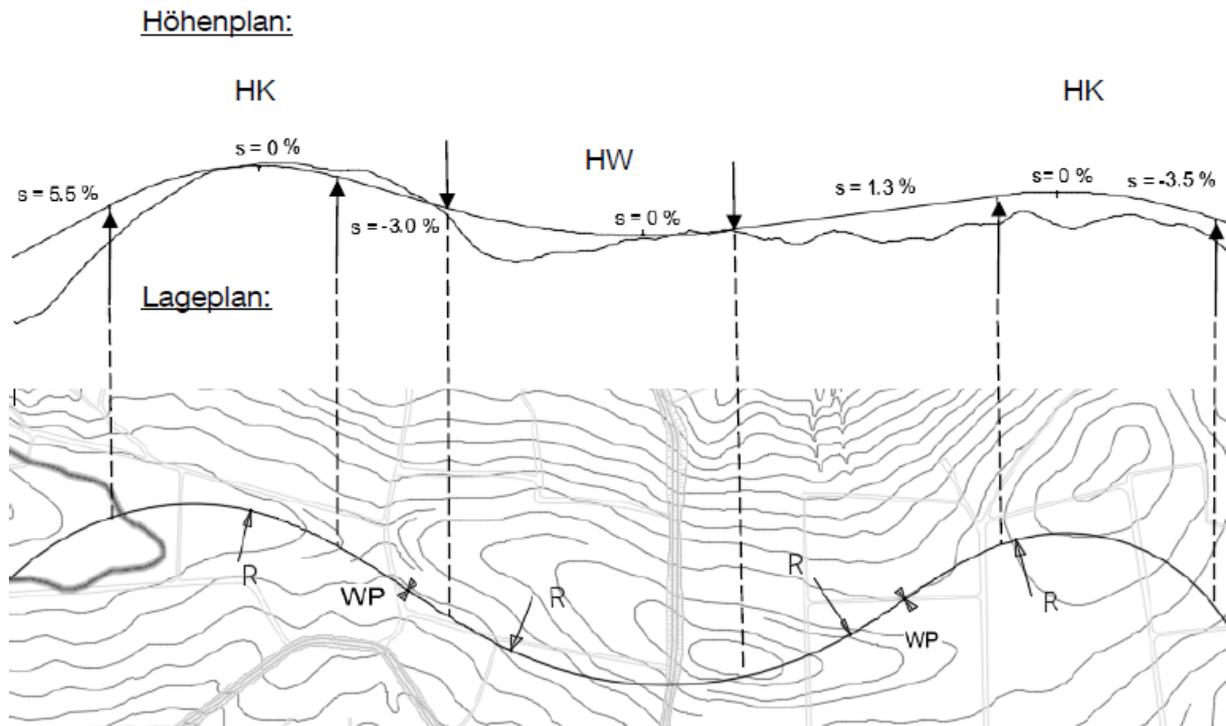


Abbildung 2-6: Abbildung der Achse im Lage- und Höhenplan (Freudenstein, 2017a)

Lageplan

Im 2D-Lageplan soll die Gleistrasse abgebildet werden. Diese setzt sich aus verschiedenen Trassierungselementen zusammen:

- Gerade
- Kreisbogen und zusammenhängende Überhöhung
- Übergangsbogen (Klothoide) (Freudenstein, 2017b).

Diese stellen die benötigten Parameter der Gleistrassierung im Lageplan dar und werden nacheinander erklärt.

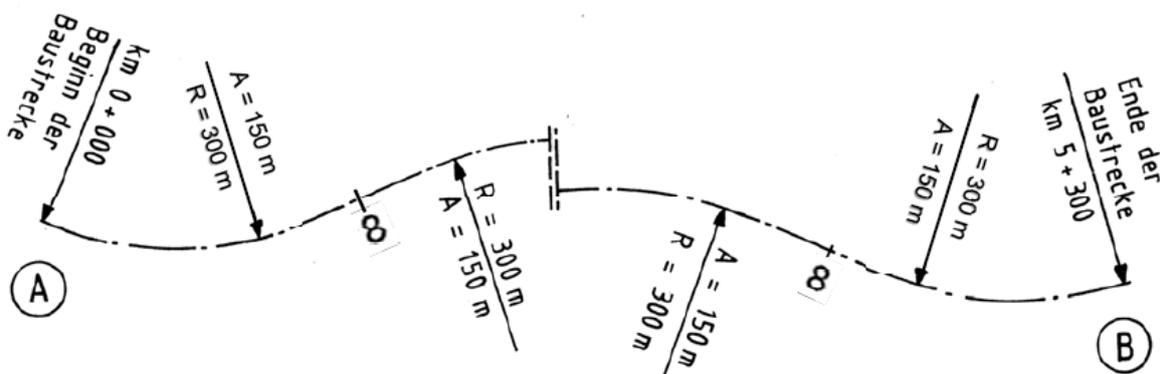


Abbildung 2-7: Darstellung einer Trasse aus Kreisbogen und Übergangsbogen (Freudenstein, 2017b)

In der Abbildung ist eine Achse zu erkennen. Darauf werden der Baubeginn und das Bauende jeweils mit einem Pfeil gekennzeichnet, auf dem der Kilometer als: km 0+000,00, angegeben wird. Alle 100 m wird die Trasse mit einem Strich markiert, und alle 500 m mit Kreis und Beschriftung. Jeder Elementwechsel wird durch einen Pfeil beschrieben. So ist auf der linken Trasse ein Kreisbogen abgebildet, der in einen Übergangsbogen übergeht. Der Radius des Kreisbogens wird mit $R = 300$ m aufgezeigt und der Klothoidenparameter mit $A = 150$ m (Freudenstein, 2017b).

Bei jeder Bogenfahrt wirkt eine Fliehbeschleunigung auf das Fahrzeug. Daher wird die Außenschiene um eine Überhöhung u in [mm] gegenüber der Innenschiene angehoben. Die entstehende Querneigung des Gleises soll die Fliehbeschleunigung ausgleichen. Eine wichtige Rolle nimmt hier die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ein. Die Fliehbeschleunigung lässt sich über die Geschwindigkeit berechnen, und folglich auch die benötigte Überhöhung. Wiederum verknüpft mit Geschwindigkeit und Überhöhung ist die Länge der Klothoide, da in diesem Streckenabschnitt die Überhöhung entsteht (Freudenstein, 2017b).

Der Übergangsbogen soll einen stetigen Krümmungsverlauf gewährleisten. Hier wird zwischen vier Formen unterschieden. Die gängigste Form ist die kubische Parabel oder auch Klothoide (Freudenstein, 2017b).

Höhenplan

Im Höhenplan (Abbildung 2-6) soll, anknüpfend am Trassenverlauf aus dem Lageplan, die Längsneigung des Gleisverlaufes abgebildet werden. Die benötigten Parameter sind hier:

- Gerade
- Ausrundung (Freudenstein, 2017b)

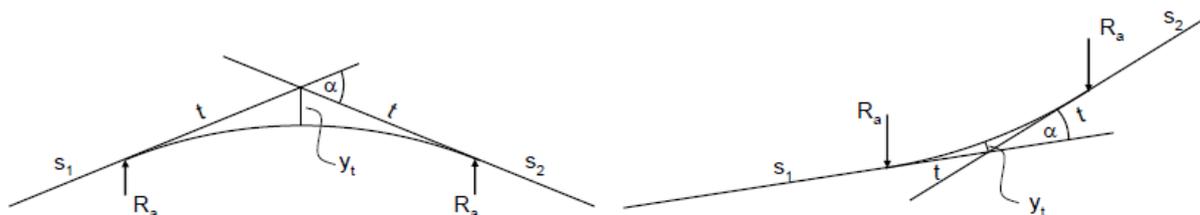


Abbildung 2-8: Darstellung einer Ausrundung im Höhenplan (Freudenstein, 2017b)

In der oben angeführten Abbildung sind die Längsneigungen als Geraden dargestellt, die durch eine Ausrundung miteinander verbunden werden und so den Neigungswechsel abbilden. Hier ist der gewählte Radius ebenfalls wieder von der Geschwindigkeit abhängig.

Querschnitt

Nach Anwendung der oben genannten Parameter ist der Gleisverlauf zu bestimmen. Damit eine vollständige Bestimmung des Gleisverlaufs erreicht wird, ist eine Querschnittbeschreibung notwendig. Hierfür erforderliche Parameter sind:

- Gleisabstand
- Abstand Gleismitte-Planumsbreite
- Planumsbreite
- Fahrbahnhöhe
- Schwellenlänge
- Schotterbreite vor Schwellenkopf
- Neigung der Schotterbettung
- Entwurfsgeschwindigkeit
- Überhöhung im Bogen (Freudenstein, 2017b).

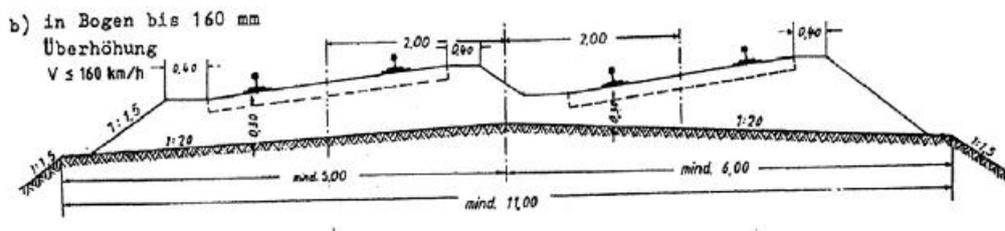


Abbildung 2-9: Gleisquerschnitt zweigleisig im Bogen (Freudenstein, 2017b)

Zu beachten ist, dass die verschiedenen Parameterwerte von der Entwurfsgeschwindigkeit abhängen, was in der unteren Tabelle veranschaulicht wird.

Tabelle 1: Fahrbahnabmessungen nach RIL800.0130 (Freudenstein, 2017b, S. IV/18)

	$v_e \leq 200 \text{ km/h}$ [m]	$v_e > 200 \text{ km/h}$ [m]
Fahrbahnhöhe		
- Bei Schotterbett	0,70	0,76
- Bei Fester Fahrbahn	0,50 bis 0,70	0,50 bis 0,71

- In schwach belasteten Gleisen	0,60	
Schwellenlänge	2,60	2,80
Schotterbreite vor Schwellenkopf		
- Bei $v \leq 160$ km/h	0,40	
- Bei $v > 160$ km/h	0,50	0,45
Neigung der Schotterböschung	1:1,5	1: 1,5

Erst alle Trassierungselemente aus dem Lageplan, Höhenplan und Querschnitt ergeben eine vollständige Gleistrasse und müssen an das dreidimensionale Gelände, in Form einer Raumkurve, angepasst werden (Freudenstein, 2017b). Hier steht die Generierung eines Körpers, das Solid Modelling, nicht im Vordergrund. Viel wesentlicher ist die Beschreibung der Trasse im räumlichen Kontext, sowie die Planung entlang der Trasse. Dadurch ergibt sich die Frage, ob eine 3D-Repräsentation notwendig ist. Für eine besser Veranschaulichung und Übersicht des Trassen- und Geländeverlaufs wäre eine 3D-Repräsentation durchaus sinnvoll, wie in Abbildung 2-6 zu erkennen ist. Welche Dimensionen jedoch für eine Modellüberprüfung der Ausrüstungstechnik erforderlich sind, wird im Laufe dieser Arbeit untersucht.

Inwieweit die in 2.1.2 vorgestellten Geometrieerzeugungsverfahren Anwendung bei der Modellierung einer Eisenbahntrasse finden und wie die erzeugten Daten in IFC 4x2 transferiert werden können, soll in Form einer Tabelle betrachtet werden.

Tabelle 2: Geometrische Darstellung und IFC-Klassen der Trassenparameter einer Eisenbahn

Trassenparameter	Herstellungsverfahren	IFC Umsetzung
Gelände	Boundary Representation	<i>IfcTriangulatedIrregularNetwork</i> zur Flächenabbildung
Lageplan		<i>IfcAlignment2DHorizontal</i> stellt eine lineare Referenz in der x/y-Ebene dar, in der eine Liste von Segmenten gespeichert wird.

Gerade	Linie	<i>IfcLineSegment2D</i>
Bogen	Kreis	<i>IfcCircularArcSegment2D</i>
Übergangsbogen	Freiformkurve	<i>IfcTransitionCurveSegment2D</i>
Verbindung zu einer Linie aus Lage- und Höhenplan		<i>IfcAlignmentCurve</i> beschreibt eine 3D Kurve, welche aus einer vertikalen 2D Kurve besteht, welche wiederum entlang einer horizontalen 2D Kurve verläuft.
Höhenplan		<i>IfcAlignment2DVertical</i> stellt ein Höhenprofil entlang einer horizontalen Linienführung dar, dabei werden die Punktkoordinaten nach Distanz auf der horizontalen Linie und der diesbezüglichen Höhe aus dem Koordinatensystem angegeben. Diese werden je nach Projekt georeferenziert.
Gerade im Höhenplan	Linie	<i>IfcAlignment2DVerSegLine</i>
Ausrundung im Höhenplan	Kreis	<i>IfcAlignment2DVerSegCircularArc</i>
Parabel im Höhenplan	Parabel	<i>IfcAlignmentVerSegParabolicArc</i>
Querschnitt	<ol style="list-style-type: none"> 1. Parametrische Modellierung 2. Extrusion / Sweep 	<i>IfcSectionedSolidHorizontal</i> erstellt ein Solid Model durch einen Sweep von variierenden Querschnitten entlang einer Kurve.
Platzierung von Bauteilen entlang der Achse	<i>Topologische Beziehungen</i>	<i>IfcLinearPlacement</i> erlaubt das Positionieren eines Elements entlang einer Achse.

In Anbetracht einer Modellierung der Ausrüstungstechnik ergibt sich nach wie vor die Frage, ob eine detaillierte 3D-Geometrierepräsentation derer notwendig ist, oder ob provisorische Platzhalter mit Positionskoordinaten ausreichend sind. Dieser Fragestellung soll im Laufe der Modellprüfung nachgegangen werden.

Wie die IFC-Umsetzung ausgeführt wird, soll nun erklärt werden:

Mit der Einführung von *IfcAlignment* wurde eine Klasse geschaffen, die es ermöglicht ein lineares Bezugssystem, zum Positionieren von Elementen, zu verwenden. Dabei verweist das Attribut *Axis* auf die 3D-Raumkurve *IfcAlignmentCurve*, welche durch verschiedene Segmente im Lage- und Höhenplan erzeugt wird. Nun kann jedes Objekt entlang dieser Raumkurve gesetzt werden, über die Verbindung der Subklasse *IfcLinearPlacement*, über *IfcCurve* zur *IfcAlignmentCurve*. Mit dem Attribut *IfcDistanceExpression* kann die Distanz zur Kurve definiert werden. Besonders wichtig ist hier, dass die Positionierung nicht durch das Koordinatensystem im Projekt erfolgt, sondern durch das Messen der lotrechten Entfernung horizontal und vertikal zum ausgewählten Punkt, welcher durch die Distanz entlang der Kurve beschrieben wird. Somit wäre eine zweckmäßige Beschreibung für die Infrastrukturplanung gegeben, beispielsweise beim Positionieren der Ausrüstungstechnik.

Hier ist darauf zu verweisen, dass die benötigten Elemente der Ausrüstungstechnik in der aktuellen Version von IFC noch nicht vorhanden sind, welche aber mit *IfcRail* hinzugefügt werden sollen. Für einen erfolgreichen Datenaustausch bietet im Moment die Klasse *IfcBuildingElementProxy* die Option, als Platzhalter für fehlende physikalische Objekte zu fungieren. So wird jedes Element ohne zugehörige Klasse dennoch identifiziert und enthält dieselben Eigenschaften wie ein *IfcBuildingElement*. Analog kann es mit einem *PropertySet*, einer Geometrie und einer Position im Projekt ausgestattet werden.

Der Querschnitt kann ebenso über die Klasse *IfcDistanceExpression* gesetzt werden. Dabei ist *IfcDistanceExpression* über das Attribut *CrossSectionPosition* der Klasse *IfcSectionedSolidHorizontal* verknüpft. Mit dieser Klasse werden variierende Querschnitte mit Hilfe eines Sweeps entlang einer Kurve zu einem Solid Model herangezogen. Dabei werden *CrossSectionPositions* bestimmt, Positionen entlang der Kurve, welche einen Querschnittwandel ermöglichen, indem die Querschnittspunkte zwischen den jeweiligen Positionen interpoliert werden. Die Positionen können durch

IfcReferent definiert werden. Außerdem können mit *IfcOffsetCurveByDistance* mehrere Bezugslinien im Querschnitt erzeugt werden, die parallel zur Hauptkurve verlaufen. *IfcOffsetCurveByDistance* lässt es zu diese zu benennen, so können Punkte einem sich verändernden Querschnitt leichter zugeordnet werden.

Eine bedeutungsvolle neue Beziehung, die mit IFC 4x2 erstellt wurde, ist *IfcRelPositions*. Diese definiert die Beziehung einer Referenz zu einem Produkt. *IfcPositioningElement* stellt die möglichen Referenzen *IfcReferent* oder *IfcLinearPositioningElement* zur Verfügung, anhand derer andere Elemente platziert werden können. Mit *IfcRelPositions* können nun Änderungen der Achse vorgenommen werden, so dass die dazugehörigen Elemente automatisch ihre Positionierung und Geometrie daran anpassen (BuildingSMART, 2019c).

Zur Veranschaulichung der IFC-Darstellung wird ein simpler Umriss eines Gleisoberbaus aus der Masterarbeit von Esser (2018) in der unteren Abbildung herangezogen.

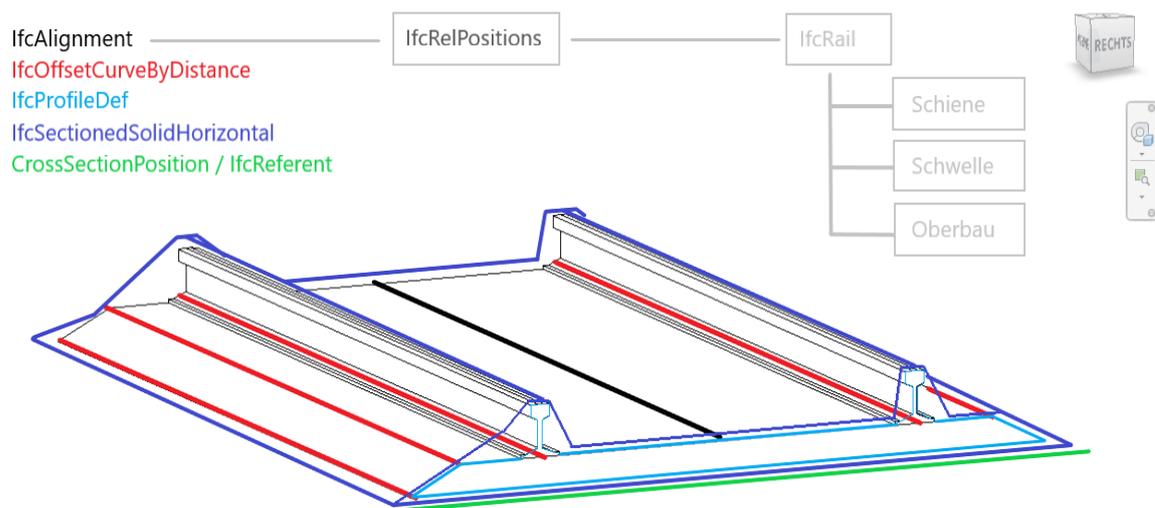


Abbildung 2-10: IFC-Weitergabe eines Gleisoberbaus (Esser 2018)

Elemente könnten wie folgt mit IFC 4x2 definiert werden:

- Abbildung der Gleisachse über *IfcAlignment*
- Achse parallel zur Geisachse mit *IfcOffsetCurveByDistance* zum Setzen der Schiene oder zur Definition des Oberbaus
- *IfcProfileDef* zum Erzeugen des Querschnitts
- Entstehung eines Körpers *IfcSectionedSolidHorizontal*, durch Sweep von *IfcProfileDef*

- *CrossSectionPosition* oder *IfcReferent* als Bezugspunkt oder Stationierung für den jeweiligen Querschnitt

Richtet man sich nach dem aktuellen Stand, könnten derartig provisorische Ansätze zur Abbildung von *IfcRail* aussehen. Außerdem könnte über die Beziehung *IfcRelPositions* die Bezugsachse *IfcAlignment* mit den zu referenzierenden Elementen aus *IfcProduct* verknüpft werden. Hier wäre dies *IfcRail*, in welchem die Schienen, Schwellen, der Oberbau oder auch die Ausrüstungstechnik enthalten sind. In der aktuellen Version von IFC fehlen diese noch. So ist immer nur ein Gesamtquerschnitt definierbar. Anzumerken ist, dass jeder Streckenverlauf individuell ist und dieses Beispiel nicht jeglichen Fall abbildet.

Zusammenfassend kann man sagen, dass mit IFC 4x1 und 4x2 die beabsichtigten fundamentalen Grundsätze zur Weitergabe von Infrastrukturdaten erzielt worden sind. Dabei sind vor allem die Klassen für die Beschreibung der Raumkurve (*IfcAlignment*), die lineare Positionierung (*IfcLinearPlacement*) und dem variierenden Querschnitt (*IfcSectionedSolidHorizontal*) maßgebend. Damit der Oberbau sowie die zugehörigen Elemente auch als solche in einem IFC-Modell quantifizierbar werden, muss hierfür noch eine passende Klasse erstellt werden, was jedoch im Zuge von *IfcRail* geplant ist. Hier sollen alle für die Bahninfrastruktur benötigten Elemente enthalten sein, wie beispielsweise der Oberbau, die Ausrüstungstechnik, aber auch das Streckennetz und die darin enthaltenen Haltepunkte (Borrmann et al., 2017).

Welche Authoring Tools zur Erzeugung der Eisenbahninfrastruktur unter den oben definierten Parametern zur Verfügung stehen, soll im folgenden Kapitel untersucht werden.

2.2 BIM-Planungs-Programme für die Eisenbahninfrastruktur

Mit der Einführung von BIM haben sich viele Applikationen entwickelt, die das Erstellen eines objektorientierten und datenreichen 5D-Bauwerkmodells ermöglichen. Das Augenmerk lag hier vorerst auf dem Hochbau. Demnach ist es notwendig viele Programme nachträglich für den horizontal ausgerichteten Bau, den Infrastrukturbau, zu erweitern. So ist für den Hochbau eine Software, die objektorientiertes, aber räumlich begrenztes Modellieren ermöglicht, vollkommen ausreichend. Im Gegensatz dazu ist

der Bahnbau von achsenorientierten und horizontal verlaufenden Strecken geprägt. Viele BIM-Planungs-Programme sind dadurch unzureichend oder müssen erweitert werden.

Im folgenden Abschnitt werden die unterschiedlichen Programme, die für eine BIM-Planung benötigt werden, vorgestellt. Wie fortgeschritten diese in der Erstellung von Eisenbahninfrastruktur sind, soll beispielhaft anhand der Modelle

- Eisenbahnhaltepunkt und
- Eisenbahntrasse

untersucht werden.

2.2.1 Autodesk Revit

Revit ist eine BIM-Software, welche das architektonische, gebäudetechnische und konstruktive Planen und Entwerfen ermöglicht (Autodesk, 2019a). Im Sinne von BIM wird ein objektorientiertes Modellieren verwirklicht.

Im Rahmen einer Bachelorarbeit wurde von Holzinger (2018) am Lehrstuhl für computergestützte Modellierung und Simulation, der TU München, ein Bahnsteigmodell entworfen. Dieses wird zur Beurteilung herangezogen. Es handelt sich um den Haltepunkt Neuhof:

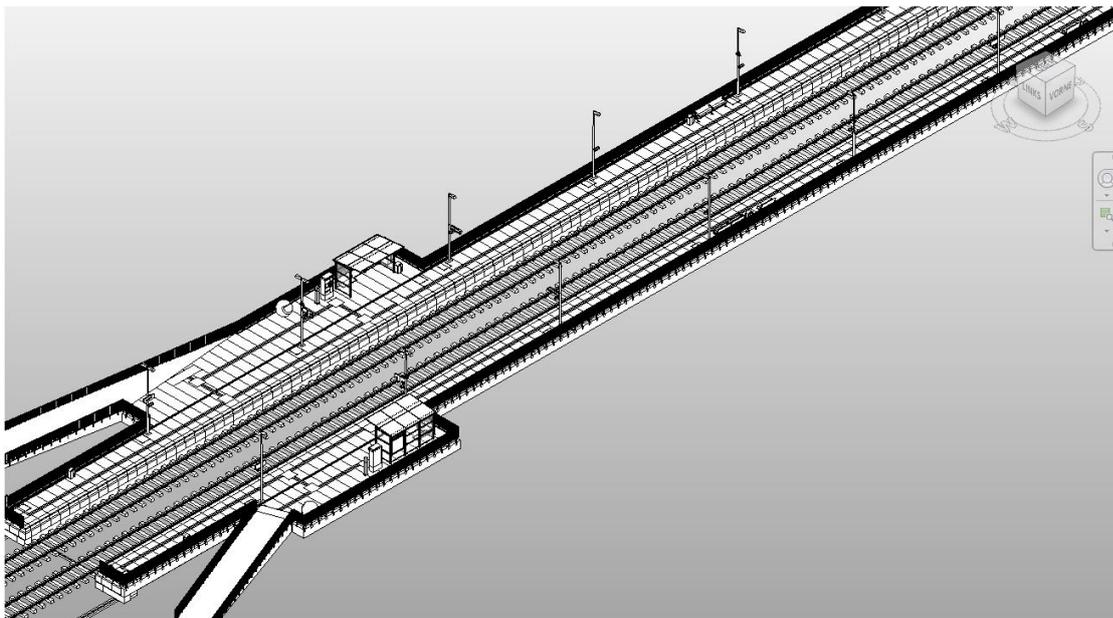


Abbildung 2-11: Haltepunkt Neuhof in Revit (Holzinger, 2018)

Modellierung eines Eisenbahnhaltepunkts

Grundsätzlich lässt sich Revit zur Planung eines Bahnsteigs oder Eisenbahnhaltepunktes, einsetzen. Dafür spricht die dem Hochbau ähnliche räumlich begrenzte Ausdehnung. Dennoch bereiten auch hier ungerade lineare Verläufe Schwierigkeiten. Die Stärke von Revit liegt eindeutig im ausgeprägten Familieneditor und den dazugehörigen *PropertySets* (Esser & Borrmann, 2019). So kann eine exakte Geometrie abgebildet werden, welche gleichzeitig reich an semantischen Informationen ist. Dies kann gewinnbringend bei der Verfeinerung einer vorhandenen Planung, sowie bei der Modellierung von Elementen der Ausrüstungstechnik, eingesetzt werden.

Modellierung einer Eisenbahntrasse

In Hinsicht auf die im vorherigen Kapitel definierten Trassenparameter stellt Revit nicht die nötigen Mittel zur Modellierung zur Verfügung. Eine Abbildung der Elemente im Lageplan wäre bis auf die Klothoide möglich, aber aufgrund der vielen Einschränkungen und Richtlinien sehr mühselig. Eine Verknüpfung zum Höhenplan ist auch nicht realisierbar. Des Weiteren erreicht Revit seine Grenzen in Hinblick auf das Anforderungskriterium der Ausdehnung, sodass es für eine Infrastrukturplanung, welche kilometerlang sein kann, inadäquat ist.

Fazit

Zum Modellieren räumlich begrenzter Modelle, wie dem Bahnsteig, kann Revit herangezogen werden. Der größte Vorteil birgt sich jedoch im mächtigen Familieneditor, mittels dessen Hilfe parametrische Familien von Elementen der Ausrüstungstechnik erstellt werden können. Für die Gesamtplanung einer Eisenbahntrasse mit großer räumlicher Ausdehnung ist Revit aber nicht geeignet.

2.2.2 Autodesk Civil 3D

Autodesk Civil 3D ist eine BIM-Software zur Planung und Bearbeitung von Infrastruktur- und Tiefbauprojekten der Eisenbahn, des Straßenbaus oder auch der Ableitungskanäle (Autodesk, 2019b).

Modellierung eines Eisenbahnhaltepunkts

In Civil 3D ist lediglich eine Abbildung der Bahnsteigkanten möglich (Autodesk, 2019b).

Modellierung einer Eisenbahntrasse

Mit Civil 3D werden alle nötigen Parameter zur Erstellung einer Eisenbahntrasse erfüllt. Dabei liegt ein Lage- und Höhenplan vor, sowie die Planung der Neigung und Überhöhungen. Für den variierenden und komplexen Querschnitt einer Eisenbahn kann der Subassembly Composer Hilfestellung leisten. Dieser stellt ein Werkzeug dar, mit dem eigene Querschnittsbestandteile erstellt werden können. Seit dem neuen Ribbon für die Eisenbahnplanung sind diese Möglichkeiten exakt an die Bedürfnisse der Bahn angepasst. Brückenelemente, Kreuzungen oder auch Haltepunkte können problemlos eingefügt werden (Autodesk, 2019c).

Fazit

Civil 3D ist speziell für die Trassenplanung konzipiert und erweist sich als brauchbares Tool. Außerdem unterstützt Civil 3D im Gegensatz zu Revit bereits den IFC 4x1 Import und Export. Elemente der Oberleitung können in das Civil 3D-Projekt durch die Verwaltung von Dynamo in Civil 3D 2020 eingebettet werden (Autodesk, 2019b).

Welche Lösungen Autodesk Dynamo bereithält soll anschließend aufgefasst werden.

2.2.3 Autodesk Dynamo

Dynamo ist hauptsächlich ein Revit Add-In, bestimmt für das Erstellen von komplexen Geometrien, die durch eine Eingabe in Revit nicht modelliert werden können. Seit der Einführung von Civil 3D 2020 ist Dynamo auch mit Civil 3D kompatibel, und erzeugt so vielfältige Bereicherungen für die Infrastrukturplanung (Autodesk, 2019d). Dynamo ist ein visuelles Programmierwerkzeug, was bedeutet, dass Geometrien generiert werden können ohne die Angabe von Codes, sondern durch das Illustrieren des Ablaufs in Form eines Graphen (Dynamobim, 2019).

Simplifizierungen in der Modellierung eines Eisenbahnhaltepunkts

Mit Dynamo wird ein wichtiger Planungsbestandteil der Infrastruktur ermöglicht: Das Positionieren von Elementen relativ zur Achse. Dementsprechend können achsorientierte Elemente beim Bahnsteigbau, wie die Bahnsteigkanten oder das Gleis entlang von Modelllinien gesetzt werden.

Modellierung einer Eisenbahntrasse

Diese Bereicherung durch Dynamo kommt insbesondere bei der Planung der Eisenbahntrasse zum Einsatz. Dabei spielt nicht nur das Positionieren relativ zur Achse eine

wichtige Rolle. Mit Dynamo wird auch das Erzeugen eines Volumenkörpers durch den Verbund von Querschnitten entlang einer Achse unterstützt (Löffler, 2017).

Da seit 2019 auch für Civil 3D 2020 ein Dynamo Add-In zur Verfügung steht, werden einige Modellierungsaufgaben noch einfacher gelöst. Darunter fallen:

- Positionieren von Elementen entlang der Achse und direktes Update bei Entwurfsänderungen
- Aufteilen des Achskörpers in Segmente zur Bauablaufbeschreibung
- Automatische Aktualisierung von Achskoordinatenänderungen
- Extrusion von ausgewählten CAD-Objekten zu Körpern (Autodesk, 2019d).

Fazit

Dynamo bietet eine enorme Optimierung im Modellierungsverfahren von Eisenbahntrassen. Sowohl in Civil 3D, als auch beim Setzen von Elementen in Revit.

2.2.4 ProVI – OBERMEYER Planen + Beraten GmbH

Das **Programmsystem für Verkehrs- und Infrastrukturplanung** ist eine Trassierungssoftware für Straßen- und Bahnplaner, entwickelt vom Unternehmen OBERMEYER Planen + Beraten GmbH. Sie basiert auf einem CAD-System von AutoCAD und ist bei der Deutschen Bahn AG die Standard-Software (OBERMEYER, 2019).

Modellierung eines Eisenbahnhaltepunkts

Eine vollständige Modellierung des Bahnsteigs wird von ProVI unterstützt.

Mit ProVI wird ein Bahnsteig mit seinen Bahnsteigkanten, Kantensteinen und Fundamenten abgebildet. Außerdem werden die Bahnsteigoberfläche, der Schichtaufbau, die Entwässerung sowie Winkelstützen oder Bordsteine modelliert (ProVI, 2019).

Elemente der Ausrüstungstechnik oder exakte Darstellungen sind hier noch nicht vorhanden.

Modellierung einer Eisenbahntrasse

Als Trassierungssoftware eignet sich ProVI ideal für die Planung der Eisenbahninfrastruktur.

Es umfasst eine richtlinienkonforme Trassierung im Höhen-, Lageplan und im Querschnitt, als auch Möglichkeiten zur Erstellung eines parametrischen 3D-Modells. Beim Planungsprozess der Achse werden alle nötigen Parameter beachtet, darunter eine automatische Richtlinienprüfung der Elementlängen, Radien, Überhöhungen und die Berechnung der zulässigen Geschwindigkeit entlang dieser. (ProVI, 2019)

Weitere Elemente, die eine Eisenbahnplanung einschließt, wie eine Stützmauer, Gabionen, Kabelkanäle, Lärmschutzwände, Weichen und Bahnsteige können mit abgebildet werden. Außerdem wird die Verwaltung der Oberleitungsmasten unterstützt oder auch der Import aus spezifischen Programmen wie ProSig, zur Planung von Leit- und Sicherungstechnik. Neben der Positionierung im Koordinatensystem wird auch immer eine Positionierung relativ zur Achse bereitgestellt (ProVI, 2019).

Fazit

Als Trassierungssoftware bietet ProVI alle Voraussetzungen für eine erfolgreiche Trassenplanung. Besonders hilfreich ist die automatische Konformitätsprüfung der Richtlinien.

3 Die Modellüberprüfung

Das BIM-basierte Model Checking (BMC) entspricht laut Tulke (2015) einer automatisierten und regelbasierten Überprüfung eines BIM-Modells. Dabei werden die semantischen und geometrischen Informationen eines Modells verwendet, um das Modell nach bestimmten Regeln zu untersuchen. Hier kann es sich um baurechtliche Regelungen (Codes) handeln, einer Überprüfung auf gewisse Anforderungen im Architekturwettbewerb oder auch um simple Kollisionsprüfungen der Bauteile (Tulke, 2015).

Das oberste Ziel einer Modellüberprüfung ist die Qualitätssicherung des geplanten Projekts. Folglich setzt sich die Modellüberprüfung aus drei Bestandteilen zusammen:

- Regelsätzen
- Modellinhalt
- Software

(Hjelseth, 2015).

3.1 Regelsätze

Der erste Schritt einer Regelüberprüfung ist die richtige Interpretation des Regelinhalts und schließlich das Übersetzen in eine maschineninterpretierbare Sprache. Dabei wurden schon seit 1960 erste Ansätze entwickelt. Mittlerweile liegen einige digitale Sprachen zur Verfügung, darunter die *Partial Model Query Language (PMQL)*, welche Erweiterungen für das Bauwesen der *Query Language* (welche den Inhalt von Datenbanken abfragt) hervorbringt. Aber auch mit *RASE* (Requirement, Applicability, Select, Exceptions) ist eine Zuordnung des Inhalts möglich, mit der *Building Environment Rule and Analysis (BERA) Language* wurde auf die geometrischen und räumlichen Informationen eines Datenmodells eingegangen und mit der *Visual Code Checking Language (VCCL)* eine Sprache geschaffen, die für Ingenieure und Architekten anwendbar ist, welche keine Experten im Fachbereich des Programmierens sind (Preidel, 2014; Solihin & Eastman, 2015).

Durch die Anwendung dieser Sprachen können die aus dem Datenmodell benötigten Informationen bezogen und die notwendigen Operationen zur Regelprüfung ausgeführt werden. Dieser Überprüfungsalgorithmus kann entweder als Black-Box oder White-Box Methode vorliegen. Bei einer Black-Box Methode ist es dem Anwender

nicht möglich, die Berechnungsschritte einzusehen und schließlich auf Plausibilität zu prüfen. Die White-Box Methode stellt die transparente Variante dar, da hier neben dem Output auch Zwischenergebnisse vorhanden sind. Hier eignen sich beispielsweise visuelle Programmiersprachen gut, um dem Anwender eine Einsicht zu bieten (Preidel, 2014).

Ein detaillierterer Inhalt der Sprachen wird im Rahmen dieser Arbeit nicht aufgegriffen. Das BMC basiert auf dem Lesen von Daten einer Modellstruktur. Hierbei wird die Existenz von bestimmten Daten geprüft oder auch nach impliziten Informationen gefragt. Welche Operationen durchgeführt werden müssen, ist von den jeweiligen Regeln und deren Inhalt abhängig. Diese können nach Solihin & Eastman (2015) in verschiedene Klassen unterteilt werden, welche hier zur besseren Strukturierung übernommen wurden.

Class 1 Rules

Tabelle 3: Class 1 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015)

Erforderlicher Dateninhalt	Gering oder mittel
Datengewinnung	Explizit, durch Abfrage vorliegender Attribute oder Klassenbeziehungen im Datenmodell
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Existenzprüfung - Dateninhalt auf Korrektheit prüfen - Einfache Regelüberprüfung
Bsp.	Grundlegende Überprüfung der Existenz von Klassen oder Attributwerten, wie beispielsweise die Zuordnung eines Signals zu einem Signaltyp (Hauptsignal/Vorsignal/Blocksignal/...) oder die Montagehöhe von Lautsprechern, welche die Basis für weitere Regelüberprüfungen bilden.

Class 2 Rules

Tabelle 4: Class 2 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015)

Erforderlicher Dateninhalt	mittel
Datengewinnung	Explizite Daten werden mit Hilfe von arithmetischen und trigonometrischen Berechnungen zur impliziten Datenbeschaffung verwendet.
Anwendung	<ul style="list-style-type: none"> - Abstandsprüfung (geradlinige Distanz zwischen zwei Punkten) - Kollisionsprüfung (Position eines Punktes innerhalb eines Polygons)
Bsp.	Mindestabstände von Einbauten auf dem Bahnsteig zur Bahnsteigkante; Mindestabstände zur Oberleitung; Mindestabstände von Signalen zur Gleisachse

Class 3 Rules

Tabelle 5: Class 3 Rules für die Modellüberprüfung (Solihin & Eastman, 2015)

Erforderlicher Dateninhalt	hoch
Datengewinnung	<p>Erweiterung der Datenstruktur erforderlich und Generierung impliziter Daten durch</p> <ul style="list-style-type: none"> - Geometrische Operationen mittels <i>Solid Modelling library</i> - Topologische Graphenabbildung - Algorithmen - Weitere semantische Eigenschaften
Anwendung	<p>Regeln, die durch aufwändige Operationen gelöst werden, bsp.:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Geometrische Berechnung von Abständen mehrerer Objekte untereinander 2. Identifikation des nächsten Nachbarn
Bsp.	Positionierung von Einbauten auf dem Bahnsteig in einem gewissen Abstand zum nächsten Objekt.

Ein bedeutendes Ziel bei der Implementierung von Regeln ist allem voran die Wiederverwendbarkeit dieser. Durch eine parameterabhängige Programmierung können Regeln derselben Regelmethode auch bei anderen Sachverhalten abgerufen werden. Damit wäre es möglich eine große Reichweite an Regeln abzudecken und den Implementierungsvorgang deutlich zu erleichtern. Insbesondere bei komplexen *Class 3 Rules* würde dies einen wichtigen Fortschritt mit sich bringen (Solihin & Eastman, 2015).

Auf diese Vorteile haben auch Zhang, Beetz, & Weise (2014) in ihren Untersuchungen zu einem *Model View Checker* hingewiesen. Als problematisch stellte sich jedoch die Definition der unterschiedlichen Begrifflichkeiten heraus. So setzen sie das Festlegen von einheitlichen Terminologien voraus, um einen Austausch und die Wiederverwendbarkeit der Regeln zu gewährleisten.

Wie vorgegangen wird, um die benötigten Modelldaten zu analysieren, wird im nächsten Abschnitt aufgezeigt.

3.2 Modellinhalt

Damit eine Modellüberprüfung erfolgreich ist, müssen die Daten korrekt vorliegen. Die richtige Formatierung spielt hier eine wesentliche Rolle, um alle benötigten Daten zu übertragen. Welche Daten für die jeweilige Regel erforderlich sind, muss im Vorfeld klar definiert werden. Damit dies ordentlich ablaufen kann, wird zur Orientierung eine Parameterübersicht verwendet:

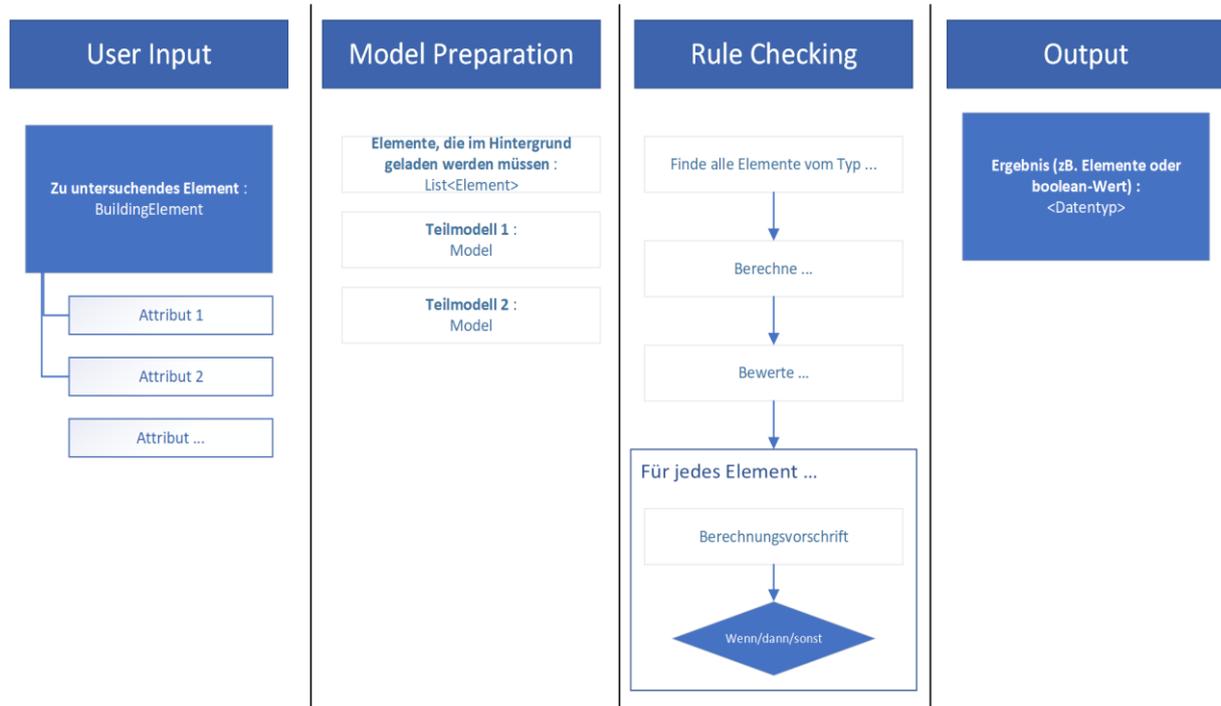


Abbildung 3-1: Übersicht der benötigten Parameter zur Modellüberprüfung (Signon Group, 2019)

1. Präzise Interpretation und ein richtiges Verständnis der jeweiligen Regeln zum Bestimmen des notwendigen Dateninputs
2. Weiterer Dateninhalt, der zur Prüfung benötigt wird, durch Einfluss auf den Input
3. Teilschritte zum Ausführen der Prüfung
4. Rückgabe des Ergebnisses oder Information an den Benutzer

Bei der Ausarbeitung der einzelnen Richtlinien soll die Struktur der Parameterübersicht aus Abbildung 3-1 verwendet werden. Anhand eines Beispiels wird dies nun veranschaulicht.

3.2.1 Anwendung der Parameterübersicht

Zur Veranschaulichung dient folgende Class 3 Rule:

Lautsprecher-Test

Alle Lautsprecher auf dem Bahnsteig sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden und in einem maximalen L - Abstand voneinander entfernt liegen. Dieser L - Abstand entspricht bis zu 20 m.

(Vgl. Ausstattungsvorgaben der DB: Beschallung auf Bahnsteigen V2-2_02-2004, Pos. 4.1.2 und 4.2.1)

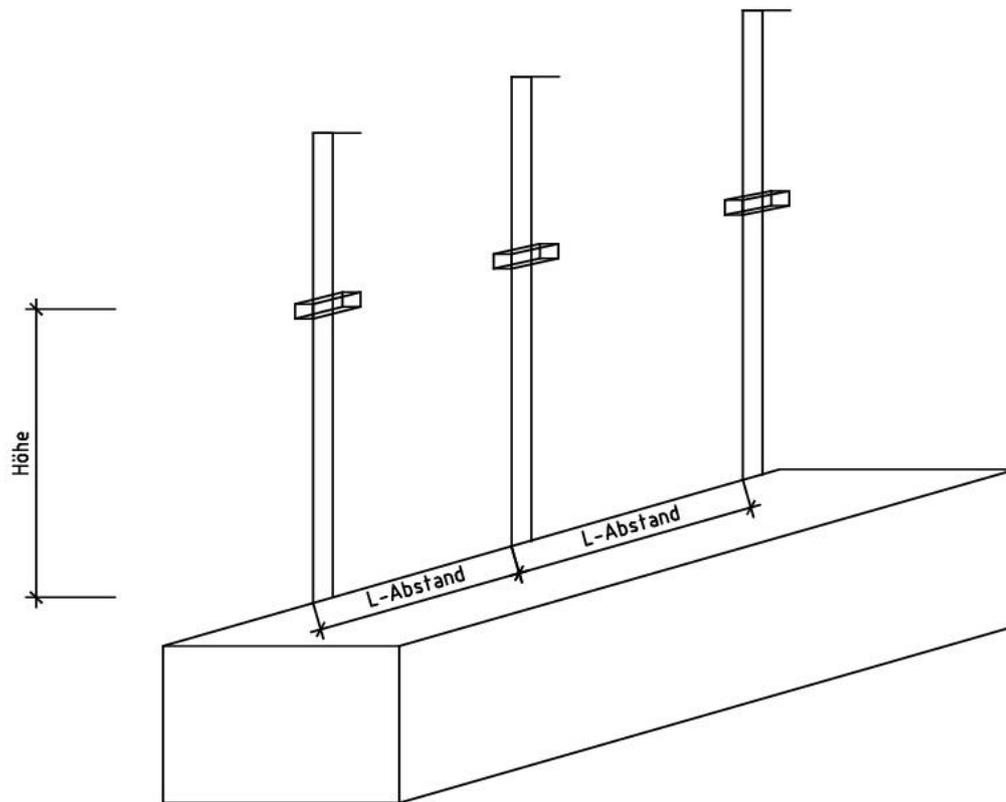


Abbildung 3-2: Lautsprecher-Test

Damit diese Regel überprüft werden kann, sind bestimmte Grundregeln notwendig. Diese können zuvor mit einer *Class 1 Rule* und einer *Class 2 Rule* überprüft werden, welche hier beispielhaft herangezogen werden.

Dementsprechend wird definiert:

- *Class 1 Rule*: Lautsprecher sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden
- *Class 2 Rule*: Lautsprecher sollen befestigt sein

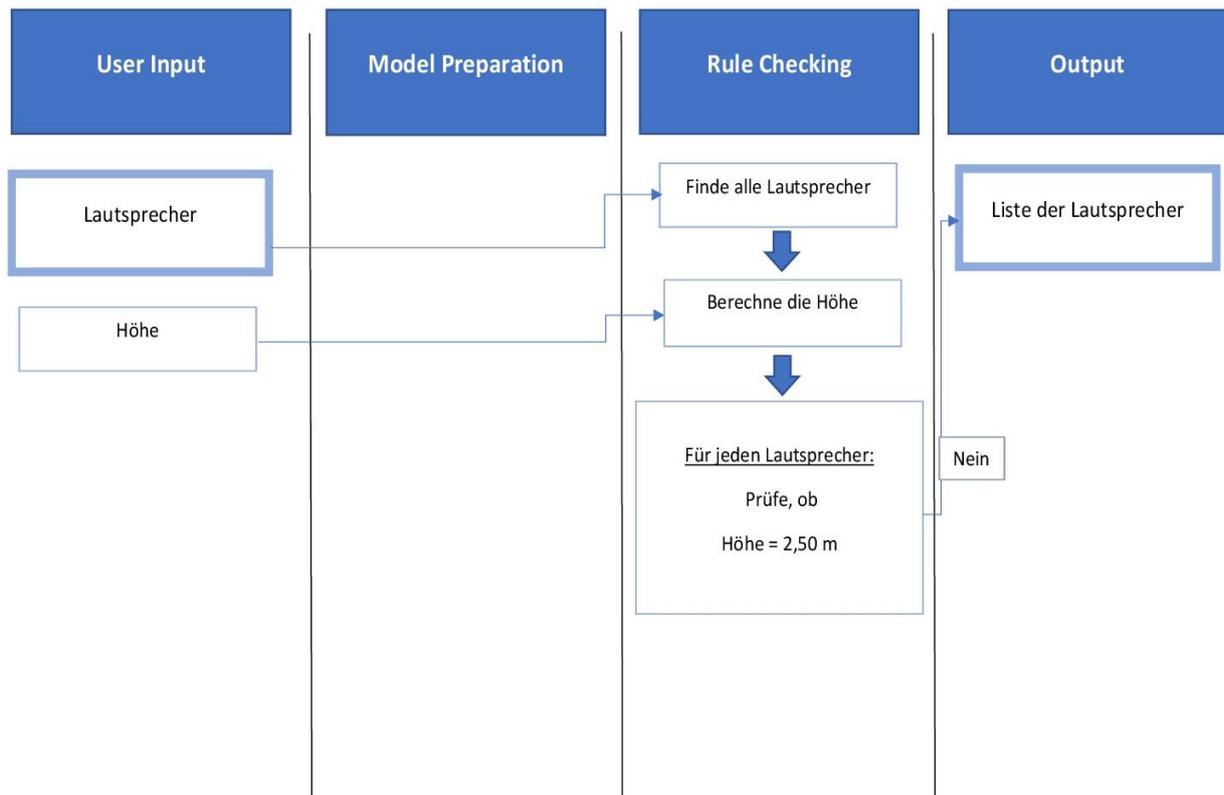


Abbildung 3-3: Parameterübersicht für die Beispielregel: Lautsprecher sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden

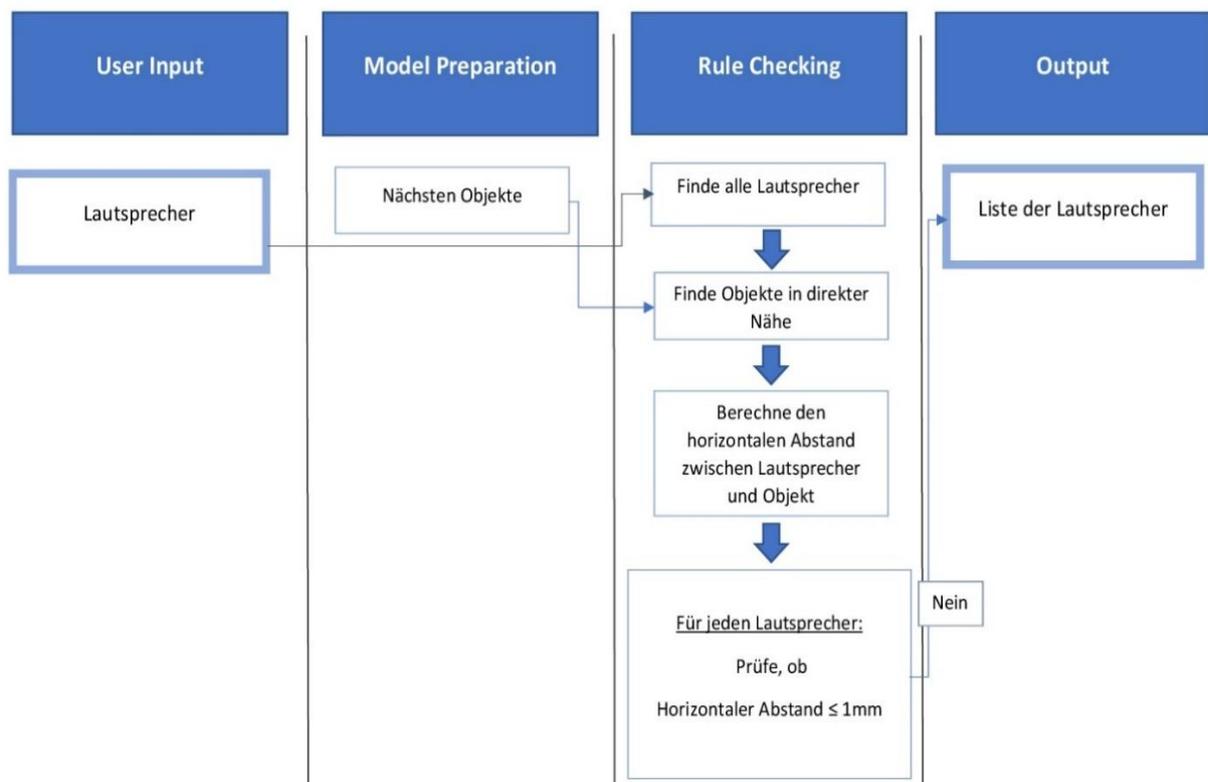


Abbildung 3-4: Parameterübersicht für die Beispielregel: Lautsprecher sollen befestigt sein

3.3 Prüfungsapplikationen: Solibri, Navisworks und DESITE

Um eine Modellüberprüfung durchzuführen, stehen verschiedene Applikationen diverser Hersteller zur Verfügung. Die bekanntesten darunter sind vom finnischen Hersteller Solibri, der Solibri Model Checker, Autodesk-Navisworks und Tekla BIM-Sight (Hjelseth, 2015), aber auch das deutsche Unternehmen ceapoint GmbH bietet mit DESITE MD Pro eine Applikation zur Modellüberprüfung.

Eine Gegenüberstellung der jeweiligen Funktionen soll einem Vergleich der Applikationen dienen:

Tabelle 6: Funktionen und Gegenüberstellung der Modellüberprüfungssoftwares (Hjelseth, 2015, Table 4)

<i>Funktionen</i>	Solibri Model Checker	Autodesk Navisworks	Tekla BIMsight	Ceapoint DESITE MD Pro
Kollisionsüberprüfung	x	x	x	x
Modellüberprüfung	x	-	-	x
Ausgabe Fehlerbericht und Kommentarfunktion	x	x	x	x
Modifizieren von Regeln	x	x	x	x
Kombinieren mehrerer Modelle	x	x	x	x
Konstruktiver Zeitplan / Time-Liner	-	x	-	x

Die wichtigsten Funktionen für das BMC sind die Kollisionsprüfung, die Modellüberprüfung und das Modifizieren der vorhandenen Regeln. Der Tabelle zu entnehmen, bieten lediglich der SMC (Solibri Model Checker) und DESITE MD Pro die Möglichkeit

einer umfangreichen Modellüberprüfung ohne eine Verwendung der Programmierschnittstelle (API). Um die Leistungsfähigkeit der Applikationen besser einschätzen zu können, sollen im nächsten Abschnitt die vorherigen Beispielregeln aufgegriffen und in den genannten Applikationen unter Beweis gestellt werden.

Ein konstruktiver Zeitplan zur Ermittlung der Kollisionszeitpunkte ist eine interessante Funktion, dessen Untersuchung jedoch den Rahmen dieser Arbeit sprengen würde.

Stattdessen spielt die Kombination mehrerer Modelle eine signifikante Rolle. Wie das Zusammenspiel von Modellen unterschiedlicher räumlicher Kontexte, generell eines Eisenbahnhaltepunktes und einer Eisenbahntrasse, zu bewerkstelligen ist, soll in den folgenden Abschnitten ebenfalls überprüft werden.

3.3.1 Anwendung der Beispielregeln

Die in Kapitel 3.2.1 identifizierten Parameter sollen nun direkt in einem Überprüfungsprogramm untersucht werden. Hierfür werden der SMC und DESITE MD Pro verwendet, da in Navisworks und BIMsight, ohne die API Schnittstelle, primär nur Kollisionsprüfungen ausgeführt werden können. Als Überprüfungsmodell wird Holzingers (2018) Modellierung eines Bahnsteigs herangezogen.

Class 1 Rule: Lautsprecher sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden

Im SMC gibt es einen Ruleset Manager, der es ermöglicht vorhandene Regeln zu modifizieren und an die jeweiligen Anforderungen anzupassen. So wurden die zuvor erarbeiteten notwendigen Parameter in die richtige Regelvorlage eingesetzt (siehe Abbildung 3-5). Hier wurden lediglich die angegebenen Attributwerte abgefragt und mit dem Soll-Wert verglichen.

Damit die Abfrage erfolgen konnte, wurde nach einer Übereinstimmung mit dem ‚Typnamen‘ gesucht. In diesem Modell wurde der Lautsprecher als ‚Diffusstrahler‘ ausgezeichnet. Dementsprechend muss für jedes Modell individuell der korrekte Name erfasst werden. Hier ist anzumerken, dass die DB Station&Service AG eine Bauteilbibliothek erstellt hat, welche ausführungsfähige Bauteile mit den dazugehörigen Baustandards enthält (DB Station&Service AG & DB Netz AG, n.d.). Im Rahmen einer Standardisierung und teilautomatisierten Überprüfung stellen Standards und einheitliche Terminologien einen wichtigen Bestandteil dar. Aus diesem Grund werden in den folgenden Prüfungen, soweit möglich, die Bauteilbezeichnungen der DB Station&Service

AG verwendet. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass mit der Einführung von *IfcRail* eine Filterung nach dem IFC-Objekt möglich wird und somit eine teilautomatisierte Überprüfung verbessern wird.

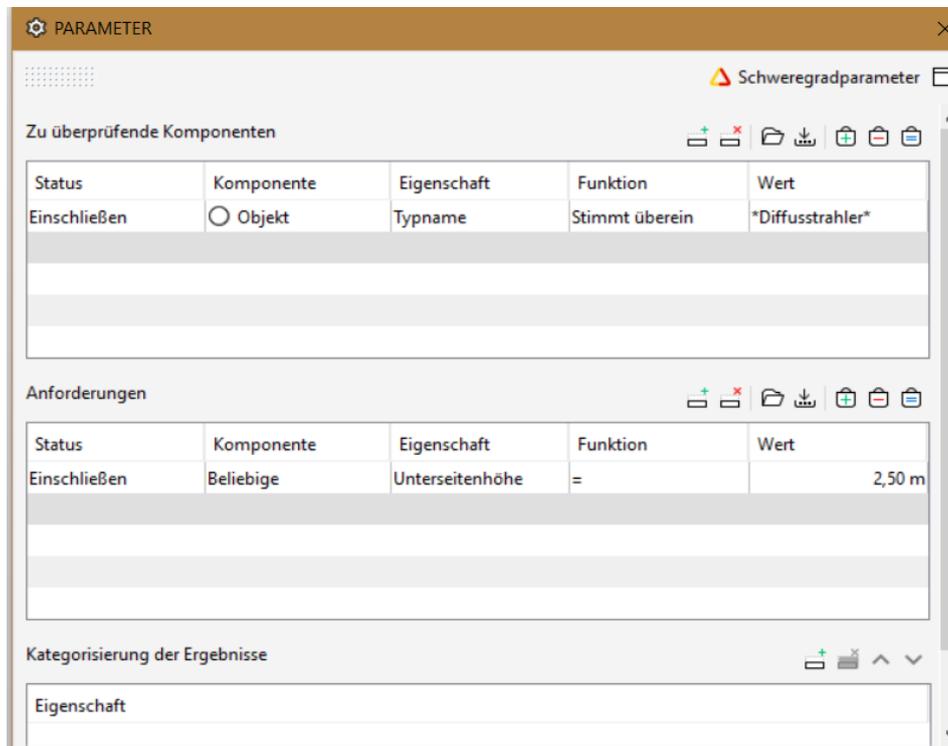


Abbildung 3-5: Auszug der verwendeten Parameter im SMC zur Regelüberprüfung der Höhe der Lautsprecher

Die Höhe des Lautsprechers wird nicht gesondert als Parameter aus der Modellierung benötigt. Technisch liegen die Informationen der Höhe mit den Koordinaten bereits vor. So würde eine Parametervergabe diese Information duplizieren. Das Attribut der *Unterseitenhöhe* wurde hier vom SMC definiert und erleichtert somit die Attributprüfung der Lautsprecherhöhe.

Das Ergebnis der Prüfung sieht folgendermaßen aus:

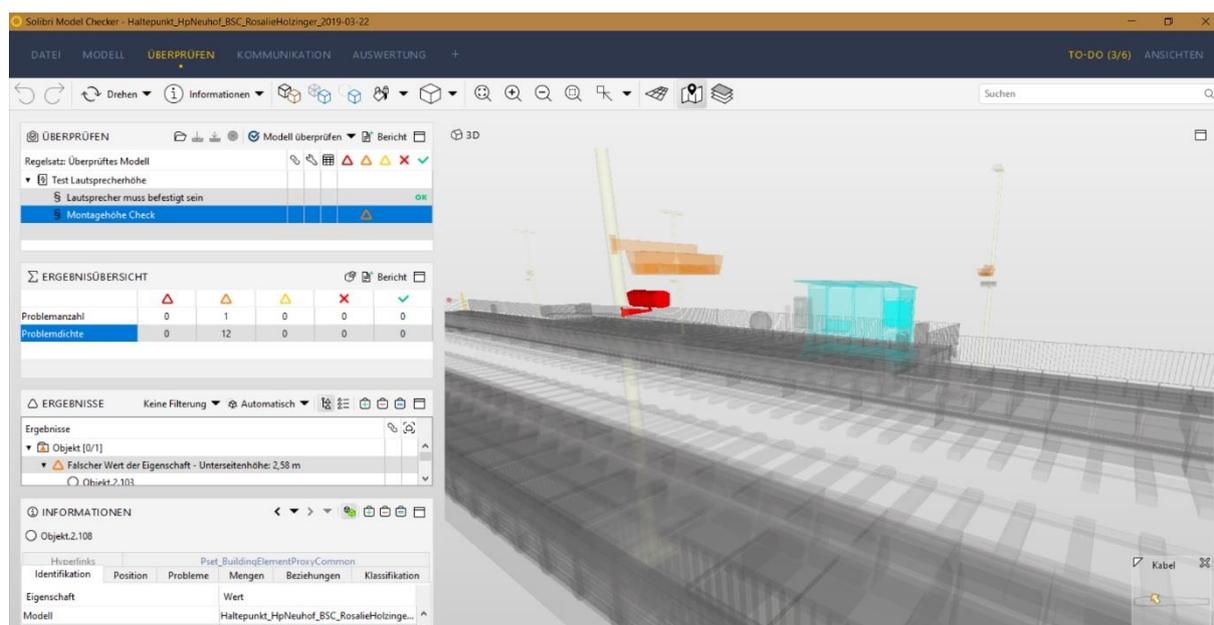


Abbildung 3-6: Überprüfung der Höhe der Lautsprecher im SMC

In der *Problemansicht* werden die gefundenen Probleme aufgezählt. In der Ansicht für die *Ergebnisse* wird das Problem aufgezeigt: *Falscher Wert der Eigenschaft-Unterseitenhöhe: 2,58 m*, und die davon betroffenen Komponenten, in der Abbildung als roter Lautsprecher hervorgehoben.

Mit DESITE MD Pro ist eine Modellüberprüfung ebenso möglich. Dabei wird zuerst ein neuer *Prüflauf* angelegt. In der *Prüfmenge* werden diesem die zu prüfenden Elemente hinzugefügt. Anders als beim SMC werden unter *Regeln* keine vorhandenen Regelvorlagen angeboten, sondern durch ein Fenster die Angabe für einen selbstständigen Code ermöglicht. Hier wird der Unterschied zwischen den in 3.1 erläuterten Methoden der Black-Box und der White-Box deutlich.

Um die Regel der Höhenüberprüfung auszuführen, wird die Projekthöhe des Diffusstrahlers von der Projekthöhe des Belages abgezogen. Anders als im SMC enthält das Attribut *COGz* die z-Höhe des Projektkoordinatensystems. Zur Überprüfung werden zwei Prüfläufe mit unterschiedlichen Prüfmengen erstellt.

Im ersten Prüflauf wird kontrolliert, ob die Höhe des Belages am gesamten Bahnsteig einheitlich ist. Dafür wird der Belag zur Prüfmenge hinzugefügt, wobei nach dem *Namen Belag* und dem *ifcMaterial Betonstein* gefiltert wird, damit nur der Belag auf dem Bahnsteig ausgewählt wird. Der *COGz*-Wert eines Belages wird abgelesen und vorgegeben. Dieser Wert kann für die weitere Prüfung verwendet werden, wenn die Elemente die Voraussetzungen erfüllen.

Im nächsten Prüflauf werden die Diffusstrahler ausgewählt und der COGz - Wert abgefragt. Ein Diffusstrahler besteht die Prüfung, wenn die Differenz einer Höhe gleich 2,50 m entspricht (siehe Abbildung 3-7).

Name	Prüfstatus
newObjectCheckModel (5)	
<ul style="list-style-type: none"> HöheDiffusstrahler (18) <ul style="list-style-type: none"> Ergebnis [DB Schallprojektor mit Lautsprecheranschluss:DB Diffuss... 	Fehlgeschlagen

Ergebnis [Ergebnis [DB Schallprojektor mit Lautsprecheranschluss:DB Diffusstrahler:1854545]]					
Info					
Ergebnis					
Check Element	3_o3W4G8P18eDX6UYD2cFy				
Fehlermeldungen					
Nr.	Regel	Text	Erzeugt	Benutzer	
1	HöheDiffusstrahler	2.7793	2019-07-07T16:34:29	Edina Selimovic	

Abbildung 3-7: Überprüfung der Montagehöhe der Lautsprecher in DESITE MD Pro

Aus den ausgeführten Überprüfungen gehen folgende Daten als notwendiger Input hervor:

- Objekt des Lautsprechers
- Koordinaten des Lautsprechers und weiterer Objekte zur Abstandmessung.

Class 2 Rule: Lautsprecher sollen befestigt sein

Da normalerweise eine Kollision ausgeschlossen werden soll, musste hier auf umgekehrte Art und Weise vorgegangen werden. Dabei sollte der Lautsprecher in Berührung mit einer anderen Komponente sein. Damit diese Berührung identifiziert werden kann, wurde eine horizontale Abstandsberechnung durchgeführt und ein Regelparameter definiert, der nur einen Abstand von 1 mm toleriert. Hier ist zu erwähnen, dass der Abstand zu jedem Element geprüft wird, was bedeutet, dass die Überprüfung auch bei einer fehlerhaften Befestigung als korrekt angezeigt wird. Beispielsweise, wenn der Lautsprecher sich an einer Bahnsteigkante befindet.

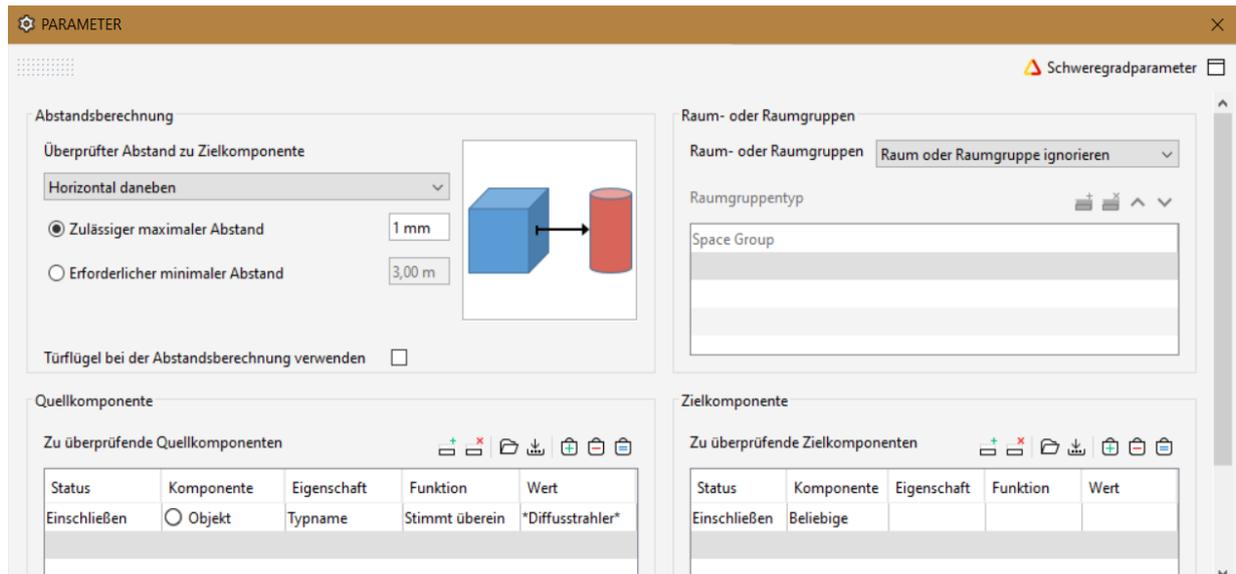


Abbildung 3-8: Auszug der verwendeten Parameter im SMC zur Regelüberprüfung der Befestigung der Lautsprecher

In DESITE MD Pro werden unter *Werkzeuge* weitere Operationen angeboten, welche sich nicht der *Modellüberprüfung* unterordnen. So kann unter *Kontakte* der Kontakt zwischen Objekten ermittelt werden. Dies wird genutzt, um eine Befestigung der Lautsprecher nachzuweisen. Hierfür werden zuerst die Lautsprecher selektiert und schließlich die restlichen Objekte. Danach wird eine Abstandstoleranz von 5 mm angegeben und ein seitlicher Kontaktort vorgegeben. Da es sich um 18 Lautsprecher handelt, müssen ebenso 18 Kontakte identifiziert werden. Diese werden im Protokoll aufgezeichnet.

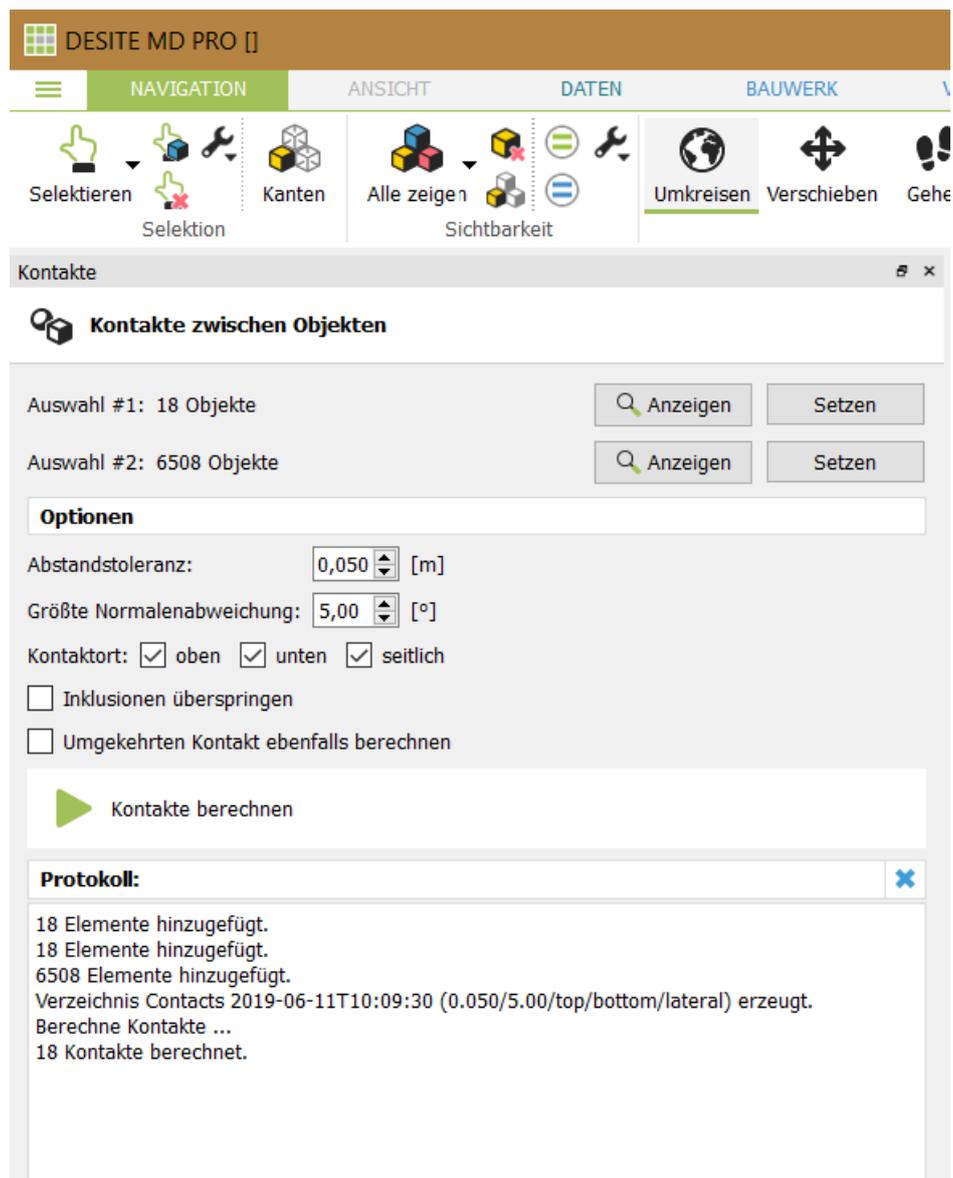


Abbildung 3-9: Prüfung der Kontakte zwischen Objekten in DESITE MD Pro zur Regelprüfung der Befestigung der Lautsprecher

Aus den ausgeführten Überprüfungen gehen folgende Daten als notwendiger Input hervor:

- Objekt des Lautsprechers
- Koordinaten des Lautsprechers
- Geometrie des Lautsprechers
- Weitere Objekte mit Koordinaten und Geometrie.

3.3.2 Zusammenführen der Modelle

Das Zusammenführen der unterschiedlichen Modelle spielt eine signifikante Rolle bei der Modellüberprüfung. Im Hochbau wird diese Funktion genutzt, um Modelle der ver-

schiedenen Gewerke zu einem zu vereinen und dadurch die Qualitätsprüfung des gesamten Projekts durchzuführen. Im Infrastrukturbereich wird dasselbe Vorgehen für einen Eisenbahnhaltepunkt angewendet, dabei können Planungen des Bahnsteigbaus, Kabeltiefbaus und der diversen Ausrüstungstechnik zusammengeführt werden. Analog soll es für Modelle unterschiedlicher räumlicher Kontexte möglich sein.

Zur Überprüfung wurde das Bahnsteigmodell aus vorherigen Kapiteln und eine provisorisch fortführende Trasse, aus Essers Masterarbeit (2018), in die Überprüfungssoftware geladen. Diese wurden beide aus Revit exportiert. Damit diese korrekt zusammengeführt werden, reicht ein manuelles Verschieben in den Programmen nicht aus. Stattdessen werden explizite Koordinaten benötigt.

Schlussendlich erweist sich die Angabe der Koordinaten in den Authoring Tools als erfolgreichste Variante und diejenige mit der höchsten Genauigkeit. Hier ist das Festlegen der Koordinaten eines gemeinsamen Punktes in einer Auftaktbesprechung für alle Projektbeteiligten angebracht. (Anleitung auf Autodesk (n.d.))

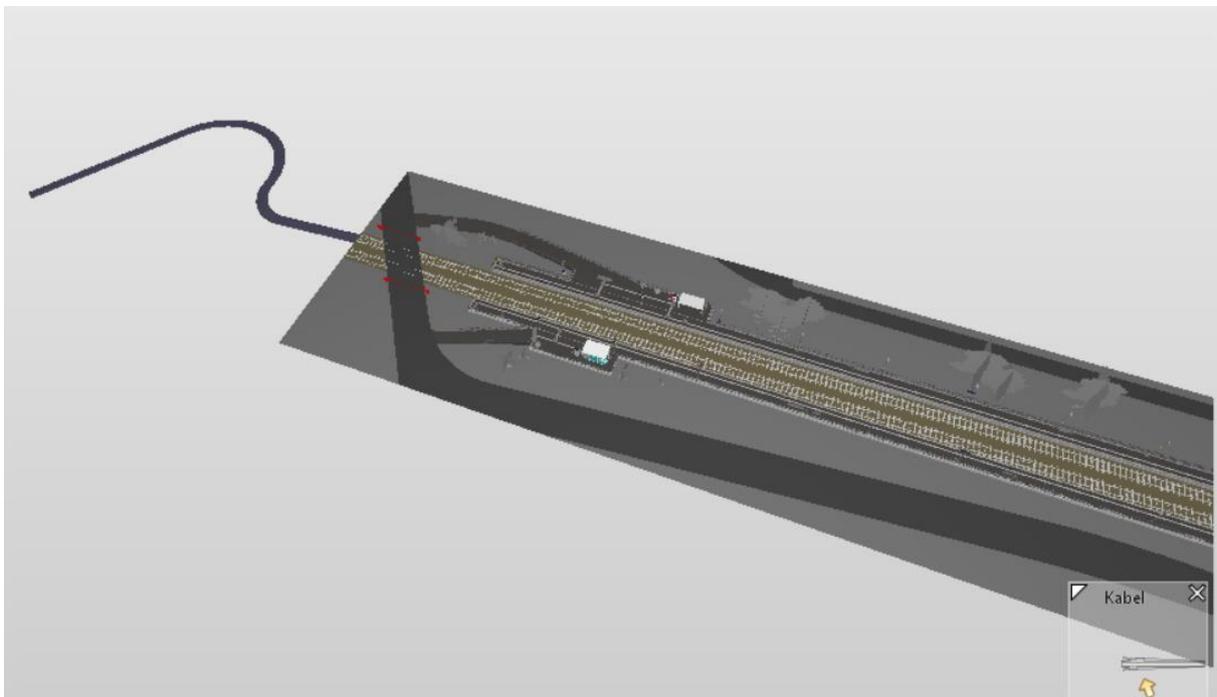


Abbildung 3-10: Zusammenführen der Modelle Eisenbahnhaltepunkt und Eisenbahntrasse im SMC

Für die Infrastruktur wäre es zweckmäßig die Modelle im Datenformat IFC 4x1 zu exportieren, damit die in Kapitel 2.1.4 erläuterten Eigenschaften, wie eine Positionierung entlang der Achse, ermöglicht werden. Diese Informationen können anschließend bei

der Modellüberprüfung einen effektiven Nutzen mit sich bringen. So wäre beispielsweise die automatische Zuordnung eines Elements zum dazugehörigen Gleis eine gewinnbringende Verknüpfung bei einer Mindestabstandsprüfung, da die Information des Abstands über das *IfcLinearPlacement* explizit in der IFC Datei enthalten ist.

In Revit wird kein IFC 4x1 Im- und Export möglich und dementsprechend umgangen. Stattdessen wird Civil 3D eingesetzt. Es wird ein kurzer Trassenabschnitt erstellt und exportiert (siehe Abbildung 3-11). Aufgrund fehlender Implementierung einer IFC 4x1 Schnittstelle schränkt sich die Anzahl der verfügbaren Überprüfungsprogramme ein. Der SMC unterstützt den IFC 4x1 Import nicht und gibt dadurch eine Fehlermeldung aus. In Navisworks wird die Trasse schlecht visualisiert, so dass das Arbeiten damit schwer fällt. Lediglich in DESITE MD Pro werden alle Elemente der Trasse deutlich abgebildet.

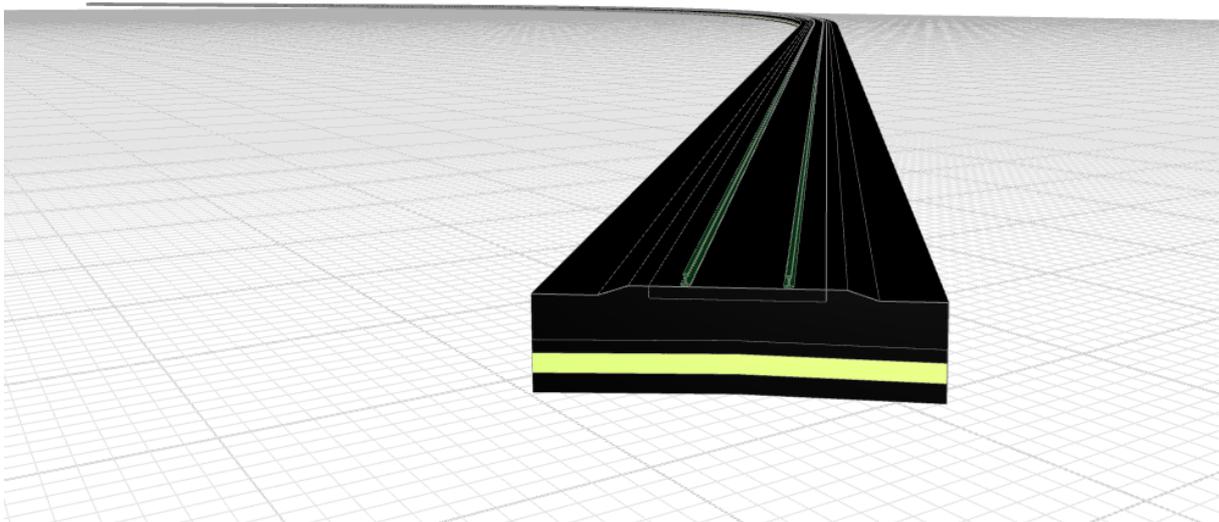


Abbildung 3-11: IFC 4x1 Modell in DESITE MD Pro

Öffnet man die Projektstruktur in DESITE, um den hierarchischen Aufbau des Modells zu betrachten, so stellt man fest, dass die Achse, welche ein für das 4x1 Format charakteristisches Element darstellt, als *unreferenziertes Objekt* gekennzeichnet wird. Wie in Abbildung 3-12 zu sehen ist, werden die übergebenen Klassen des IFC Alignments nicht identifiziert, welche genau die Achse definieren. Außerdem werden Klassen, welche auch im IFC 2x3 vorhanden sind, ohne Weiteres importiert und erkannt, weshalb

die Elemente *Bettung*, *Schiene* und *Weitere* dargestellt werden können (hier als *BuildingElementProxy*). Schlussfolgernd spielt das importierte Format keine Rolle und das Problem ist auf eine Inkompatibilität des IFC 4x1 Imports zurückzuführen.

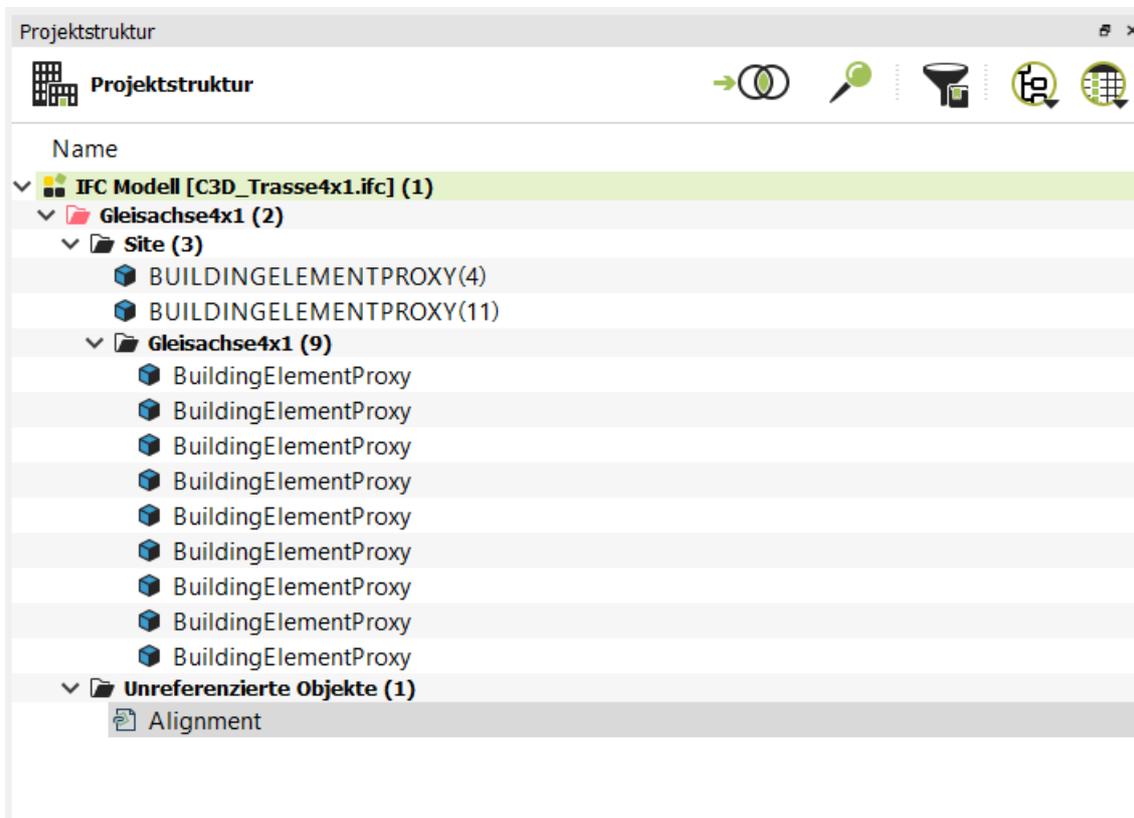


Abbildung 3-12: Projektstruktur der IFC 4x1 Trasse mit Augenmerk auf die Alignment Klasse

Um diese Aussage zu überprüfen wird das Modell im FZKViewer geöffnet. Dieser ist ein kostenloser Viewer, der vom Karlsruher Institut für Technologie entwickelt wurde. Er ermöglicht IFC 4x1 und 4x2 Formate zu importieren und visualisieren.

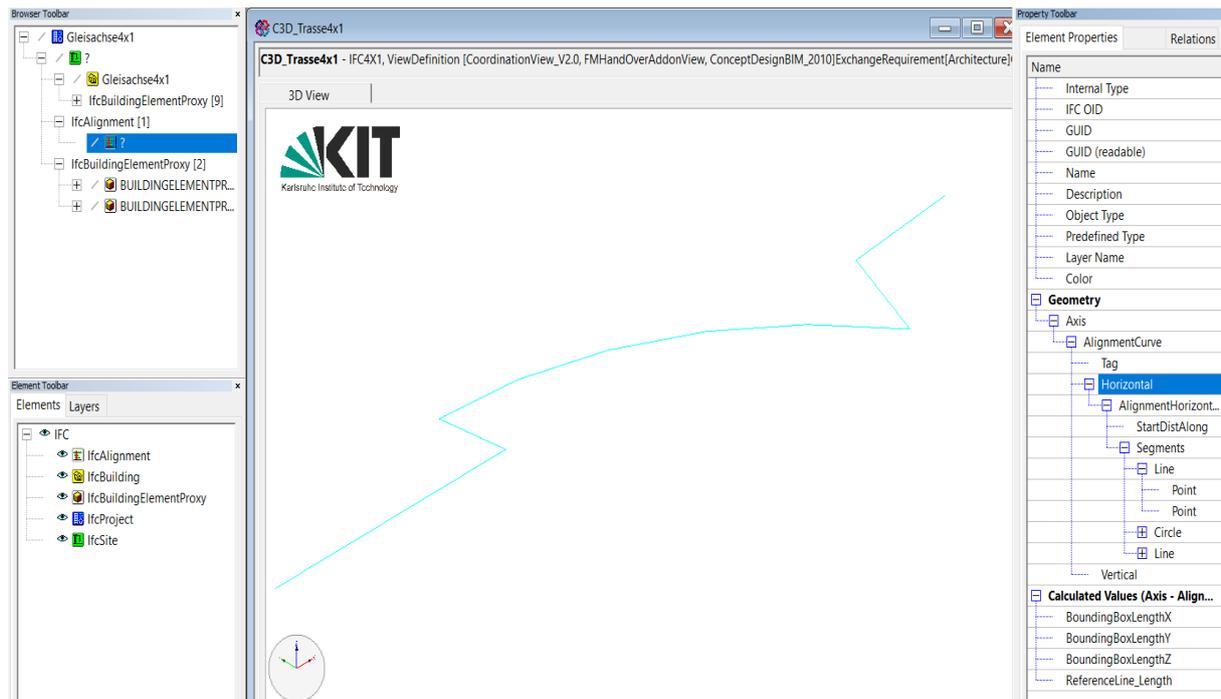


Abbildung 3-13: IFC 4x1 Trasse im FZKViewer

In der ausgegebenen Projektstruktur des FZKViewer wird das Alignment identifiziert und im 3D View-Fenster abgebildet. Unter *Element Properties* kann man die Geometrie der Achse ablesen, eine *AlignmentCurve*, die aus verschiedenen Segmenten erstellt wird.

Auch wenn die Achse dargestellt wird, so wird diese jedoch nicht korrekt abgebildet. Wie in der unteren Abbildung 3-14 zu erkennen, liegen nur drei Punkte der Achse auf der modellierten Trasse.

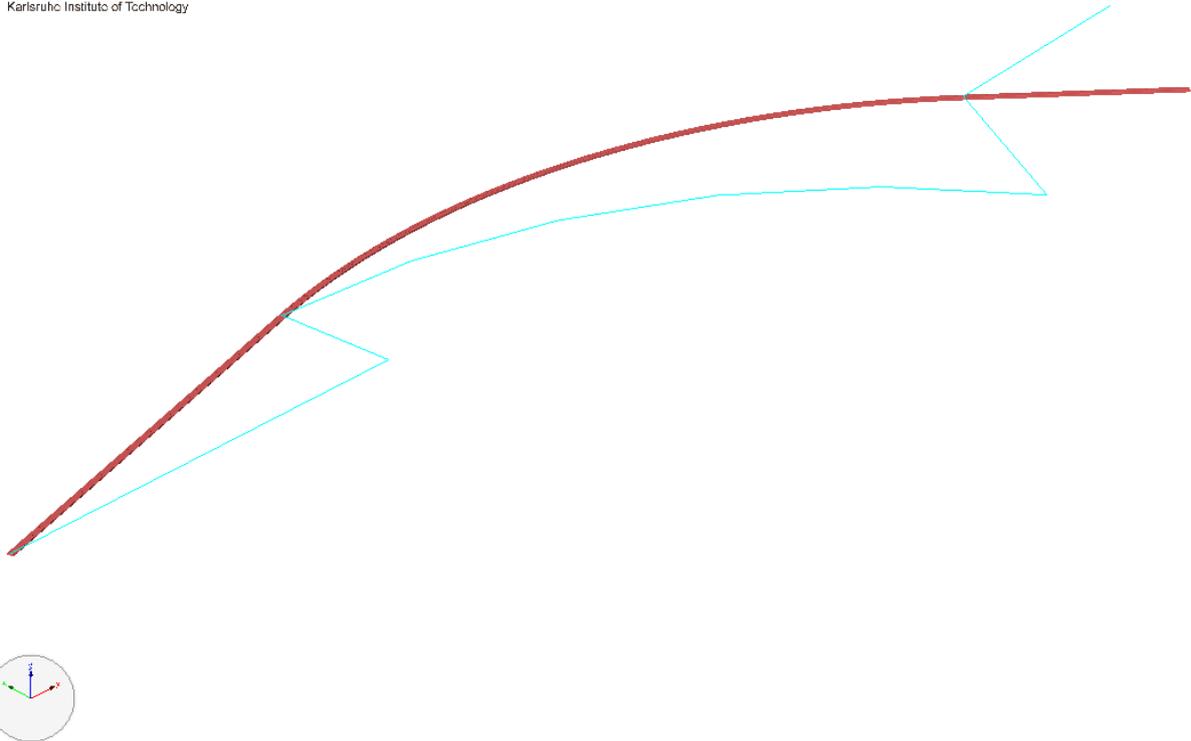


Abbildung 3-14: IFC 4x1 Trasse im FZKViewer mit Augenmerk auf den Achsverlauf

Vergleicht man nun die Daten aus dem FZKViewer und der IFC Datei im Text Editor geht folgendes hervor:

- Die Startpunkte der Segmente stimmen überein
- Die berechnete Länge der Segmente ist korrekt, jedoch die Richtung falsch
- Das IFC Attribut *StartDirection* geht nicht hervor

Weiter fällt auf, dass im FZKViewer einige wichtige Klassen des IFC 4x1 Formates fehlen, darunter *LinearPlacement* oder *SectionedSolidHorizontal*. Beim Öffnen der IFC Datei im Text Editor sind diese ebenfalls nicht vorhanden. Geht man davon aus, dass ein *SectionedSolid* mit dem Attribut *Directrix* entlang der *IfcCurve* verläuft, welche ebenfalls ein Attribut der Klasse *IfcLinearPlacement* ist, so müssten diese Klassen im Text Editor vorhanden sein. Dies lässt auf einen unvollkommenen IFC-Export aus der Ursprungsdatei schließen.

An dieser Stelle würde sich einer Überprüfung mittels einer Model View Definition (MVD) als hilfreich erweisen. Mithilfe einer MVD, von buildingSMART entwickelt, kann

ein Modell nach bestimmten Inhalts- und Austauschforderungen überprüft werden. Damit ist es möglich ein Modell nach bestimmten Klassen und Attributen des IFC-Datenmodells abzufragen und auf Inhalt zu prüfen (Beetz, Borrmann, & Weise, 2015).

In diesem Fall kann eine MVD mit den benötigten Klassen des IFC4x1 erstellt werden und die Exportdatei des Trassenmodells auf Fehler analysiert werden.

Zusammenfassend ist der IFC 4x1 oder auch 4x2 Im- und Export noch nicht ausreichend fortgeschritten, um Anwendung zu finden. Dies würde jedoch signifikante Vorteile in der Modellüberprüfung mit sich bringen und demnach ist die weitere Entwicklung und Implementierung äußerst zu empfehlen.

In dieser Arbeit werden folglich ausschließlich Modellüberprüfungen mit IFC 2x3 Modellen ausgeführt.

4 Implementierung von Regelsätzen der Bahnausrüstungstechnik

Im vorliegenden Kapitel werden die Regelüberprüfungen nach folgenden Schema bearbeitet:

1. Erstellen der Parameterübersicht
2. Untersuchung des technischen Levels
3. Erzeugen der notwendigen Modellierungsparameter
4. Modellüberprüfung
5. Zusammenfassung der benötigten Daten

Die ausgewählten Regeln lauten:

Lautsprecher-Test

Einbauten-Test

Oberleitungs-Test

Gleisfeldbeleuchtungs-Test

4.1.1 Lautsprecher-Test

Class 3 Rule:

Alle Lautsprecher auf dem Bahnsteig sollen auf einer Höhe von 2,50 m montiert werden und in einem maximalen L - Abstand voneinander entfernt liegen. Dieser L - Abstand entspricht bis zu 20 m.

(Vgl. Ausstattungsvorgaben der DB: Beschallung auf Bahnsteigen V2-2_02-2004, Pos. 4.1.2 und 4.2.1)

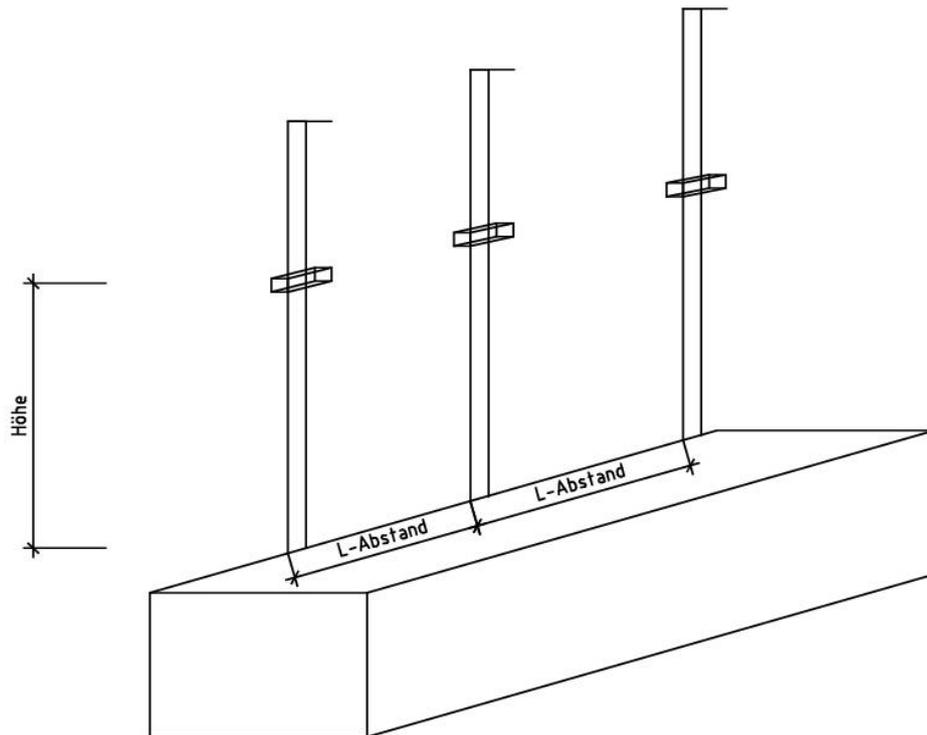


Abbildung 4-1: Lautsprecher-Test

Die Überprüfung der benötigten Höhe von 2,50 m wurde in den vorherigen Kapiteln ermittelt. Nun soll der L - Abstand der Lautsprecher untereinander überprüft werden.

1. Dazu werden vorerst folgende Parameter benötigt:

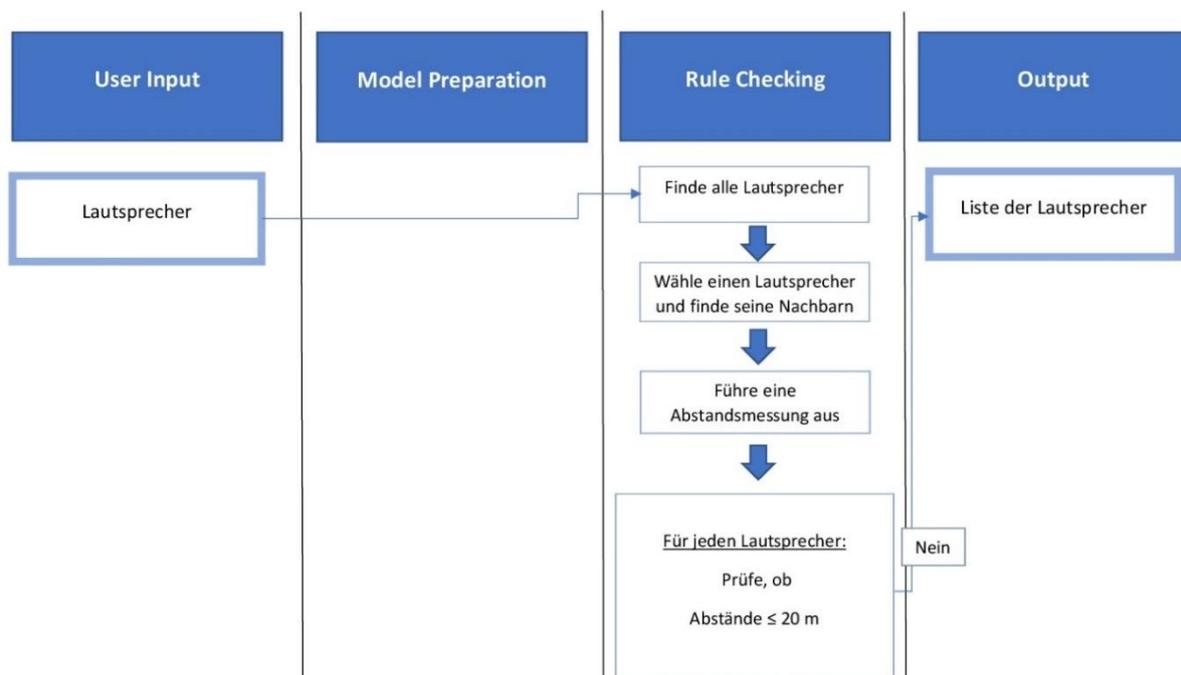


Abbildung 4-2: Parameterübersicht für den Lautsprecher-Test: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein

Bei der Übergabe im SMC wird die Vorgabe einer maximalen horizontalen Messung von 20 m angegeben. Als Quell- und Zielkomponente wird der Diffusstrahler ausgewählt.

Da das Modell aus zwei Bahnsteigen besteht werden hier nicht nur die gesuchten horizontalen Abstände gemessen, sondern auch die vertikalen und diagonale Abstände zum gegenüber liegendem Lautsprecher (siehe Abbildung 4 3).

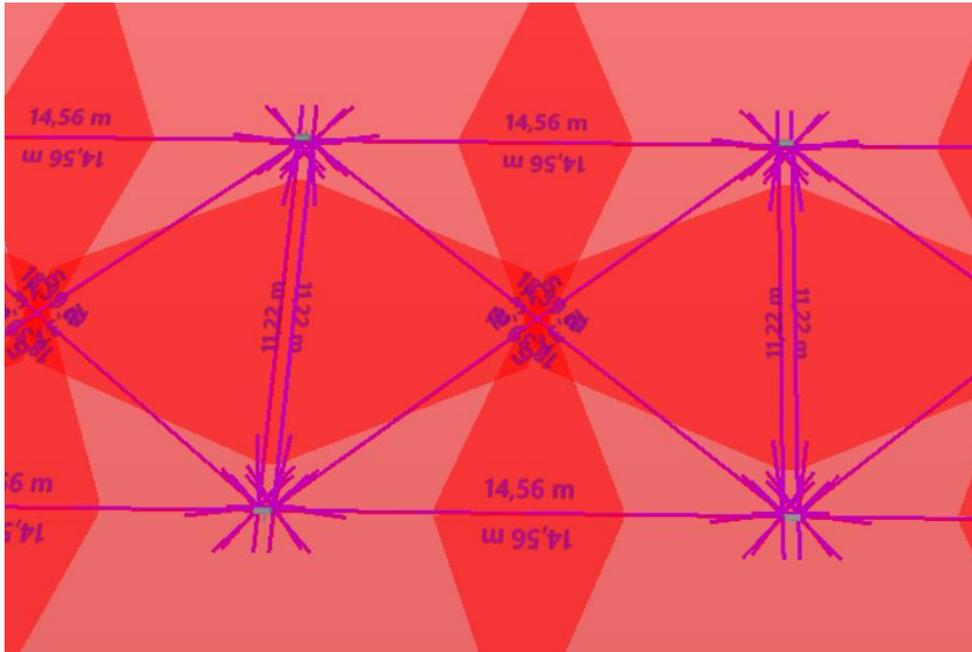


Abbildung 4-3: Horizontale, vertikale und diagonale Abstände der Lautsprecher in der SMC Überprüfung

Damit diese Abstände nicht herausgegeben werden, sollen die Lautsprecher nach Bahnsteigen unterteilt werden. Daraus folgt eine neue Parameterübersicht:

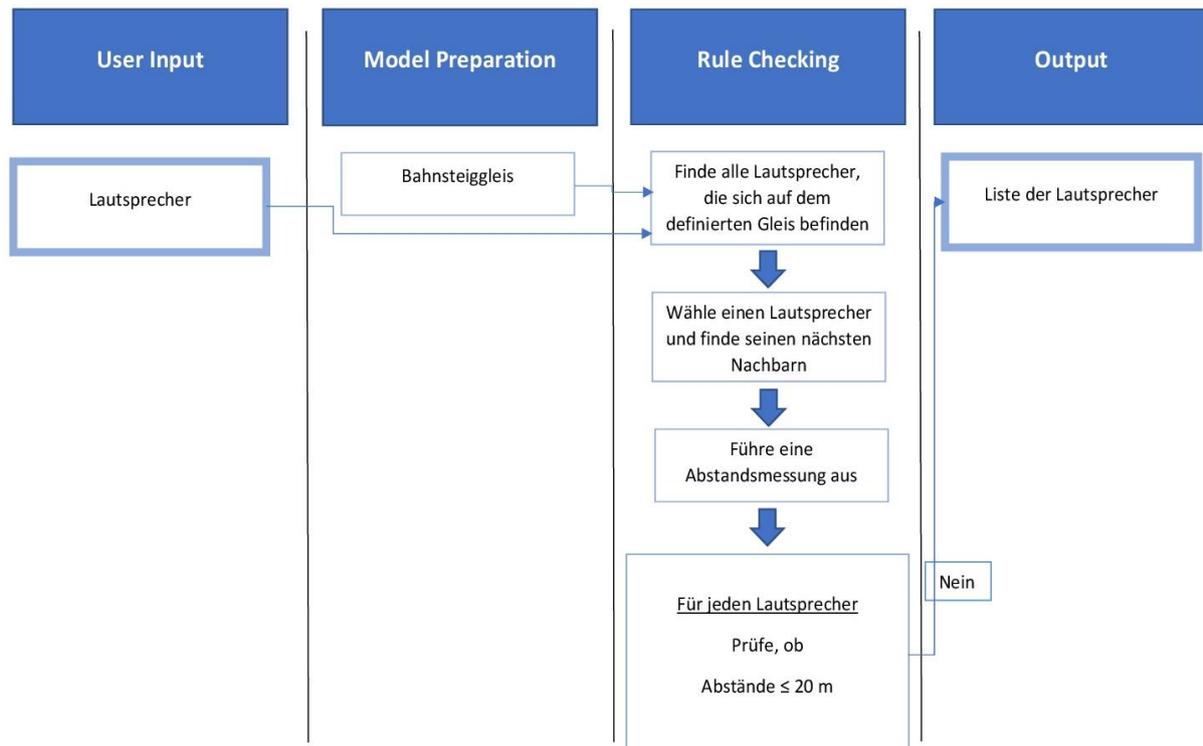


Abbildung 4-4: Parameterübersicht für den Lautsprecher-Test: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein; mit Gleisflächendefinition

2. Aus technischer Sicht sind alle erforderlichen Daten vorhanden. Den Elementen werden in IFC die X, Y und Z Koordinaten übergeben. Daraus lässt sich der Abstand implizit berechnen. Außerdem ist eine räumliche Zuordnung zu einem *IfcSpace* möglich, der für die Gleiszuordnung notwendig ist.
3. Um die Zugehörigkeit der Elemente zu einem Gleis oder Bahnsteig zu bestimmen, muss das Modell nochmals in der Modellierungss Applikation geöffnet und die zwei Bahnsteige zu Flächen definiert werden. Die entsprechenden Flächen wurden *Gleis 1* und *Gleis 2* benannt.
4. Nach Angabe der neuen Parameter im SMC (vgl. Abbildung 4-5), werden ausschließlich die horizontalen Abstände gemessen. Hier ist die manuelle Einstellung des geprüften Gleises notwendig.

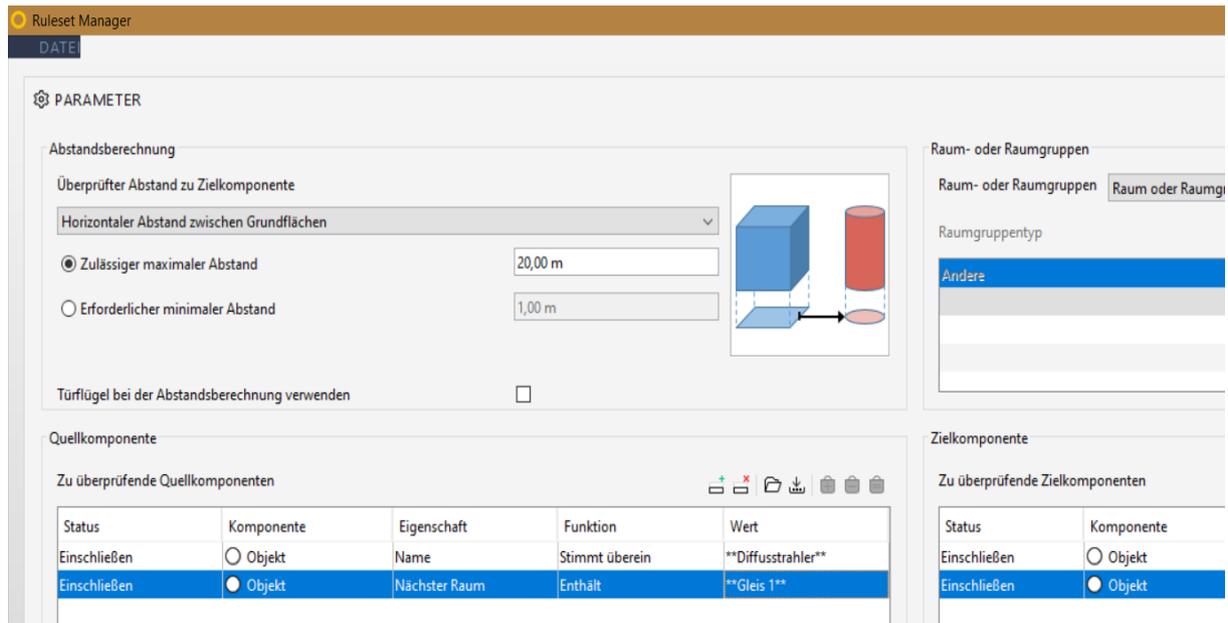


Abbildung 4-5: Parameter zur Regelüberprüfung im SMC: Lautsprecher sollen im Abstand bis zu 20 m voneinander aufgestellt sein

Als nicht relevante Fehler werden nun die Abstände zwischen den Lautsprechern ausgegeben, die nicht direkte Nachbarn sind. Damit dies nicht geschieht, wäre eine Operation zur Bestimmung des nächsten Nachbarn erforderlich. Diese wird im Rule Manager nicht angeboten, so dass die Fehlermeldungen manuell als nicht relevant gekennzeichnet werden müssen. Anderenfalls wäre es möglich eine API-Schnittstelle zu programmieren und auf diese Regel anzuwenden.

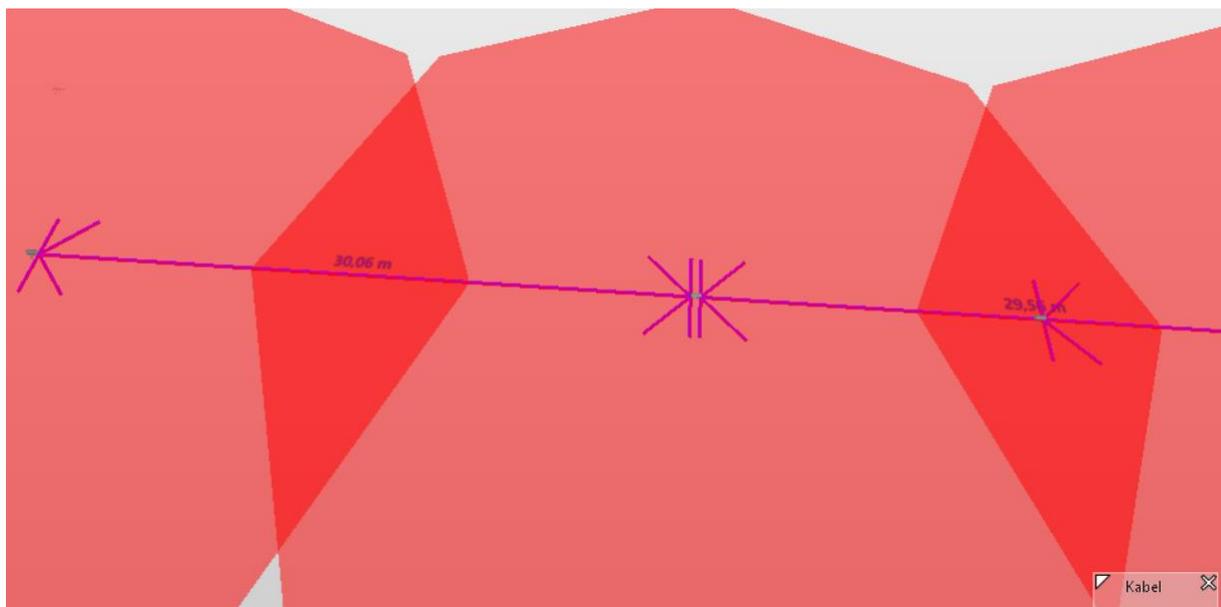


Abbildung 4-6: Nicht relevante Fehleranzeigen bei der SMC Modellüberprüfung

5. Die benötigten Daten für diese Regelüberprüfung werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 7: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: **Lautsprecher-Test**

Lautsprecher-Test	
Modellierung	<u>Benötigte Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> - Objekt: Lautsprecher - Fläche: Gleis - Koordinaten der Objekte
	<u>Anmerkungen</u> keine
Modellüberprüfung	<u>Verwendete Terminologie</u> <ul style="list-style-type: none"> - Typname Diffusstrahler muss angepasst werden - Name der Gleisfläche muss angepasst werden
	<u>Einschränkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> - Höhenparameter steht nicht in jeder Applikation zur Verfügung und muss ermittelt werden - Nächster Nachbar kann nur durch API gefunden werden, dadurch irrelevante Fehlermeldung bei Abständen der Diffusstrahler - Manuelle Eingabe beim Wechsel der untersuchten Gleisfläche

4.1.2 Einbauten-Test

Class 2 Rule:

Zum Schutz der Bahnreisenden sind Mindestabstände der Einbauten auf dem Bahnsteig definiert. Dabei wird zwischen den Einbauten (Hindernissen) unterschieden:

- Kleine Hindernisse: in Bahnsteiglängsrichtung entspricht die Einbaulänge $< 1\text{m}$

Mindestabstände:

Gefahrenbereich – Hindernis: 90 cm

BSK (Bahnsteigkante) – Hindernis: 160 cm

Wenn zwei kleine Hindernisse einen Abstand von $< 2,40\text{ m}$ aufweisen, gelten sie als ein großes Hindernis.

- Große Hindernisse: in Bahnsteiglängsrichtung entspricht $1\text{ m} \leq \text{Einbaulänge} \leq 10\text{ m}$

Mindestabstände:

Gefahrenbereich – Hindernis: 120 cm

BSK (Bahnsteigkante) – Hindernis: 200 cm

- Sehr Große Hindernisse: in Bahnsteiglängsrichtung entspricht die Einbaulänge $> 10\text{ m}$

Mindestabstände:

Gefahrenbereich – Hindernis: 160 cm

BSK (Bahnsteigkante) – Hindernis: 240 cm

Der Gefahrenbereich wird mit 90 cm von der Bahnsteigkante definiert.

(Vgl. Richtlinie 813.0201, Abs.3.3 ff. der Deutschen Bahn AG)

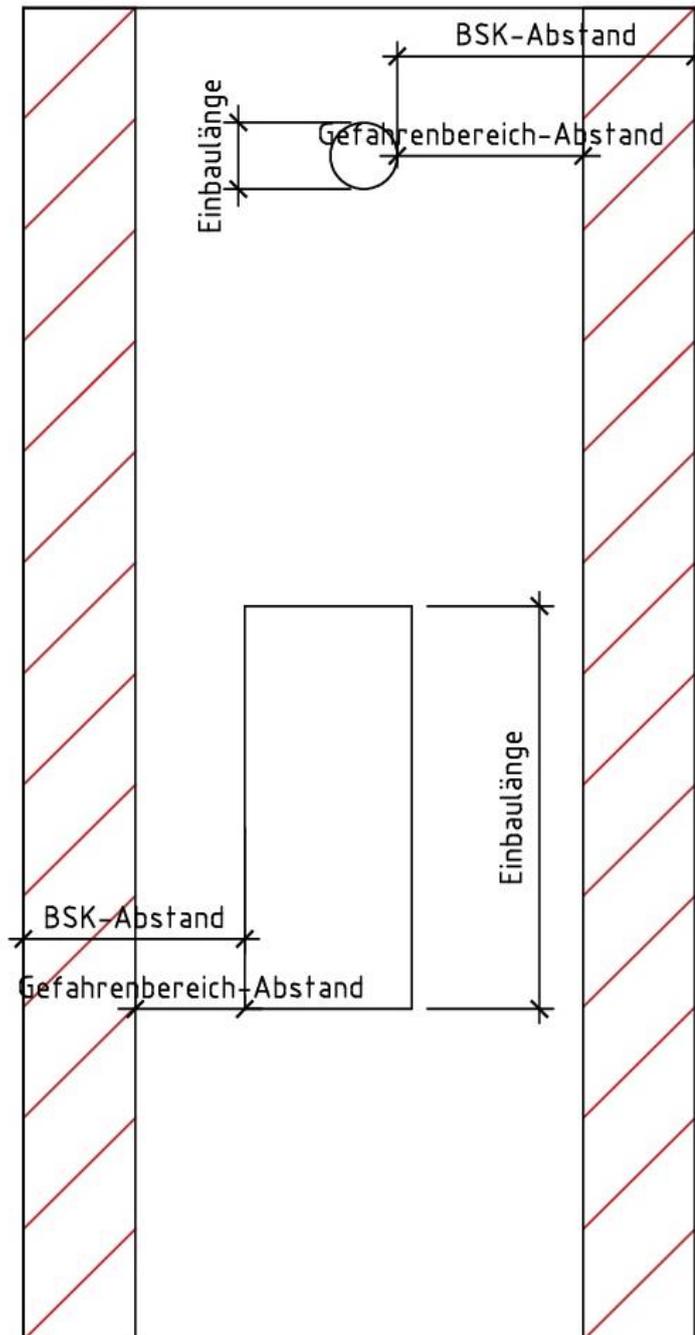


Abbildung 4-7: Einbauten-Test

1. Es werden folgende Parameter benötigt:

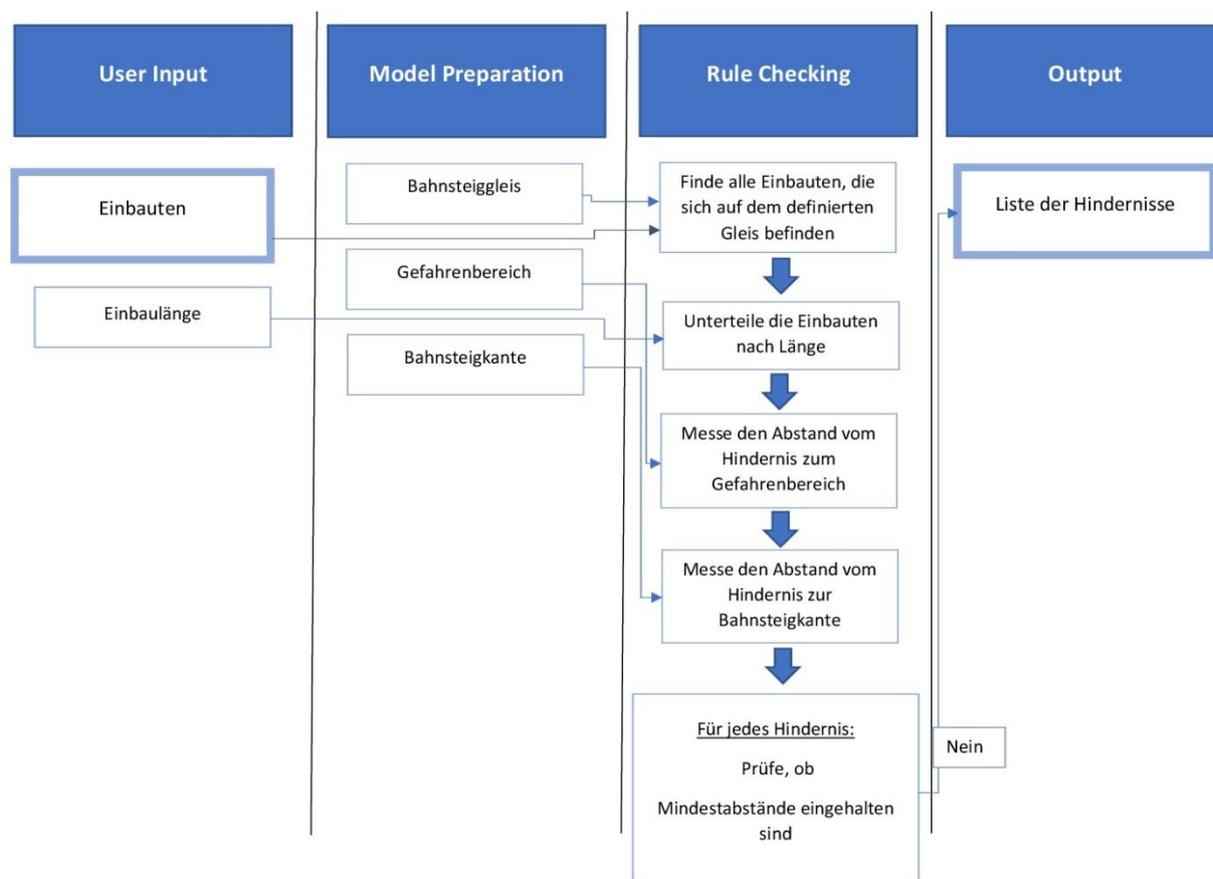


Abbildung 4-8: Parameterübersicht für den Einbauten-Test

- Das Attribut der Einbaulänge spielt hier eine entscheidende Rolle, da die ganze Prüfung davon abhängt. Aus technischer Sicht werden dem IFC Modell Koordinaten der Punkte weitergegeben, aus denen sich das Einbauelement bildet. Dadurch sind die Längen des Elements implizit enthalten. Analog lässt sich implizit, mittels Berechnung, der Winkel des Elements zur x-Achse bestimmen. Wenn dieser Winkel mit dem des Bahnsteigs übereinstimmt, so kann die Länge des Elements entlang des Bahnsteigs ermittelt werden.

Eine Zuordnung der Elemente zum jeweiligen Bahnsteiggleis wird dann sinnvoll, wenn sich Elemente wie Beleuchtungsmasten außerhalb des Bahnsteigs befinden. Hier ermöglicht das IFC-Format eine Raumzuordnung.

Die Abstände können mittels Koordinaten der Elemente berechnet werden.

Könnte man davon ausgehen, dass die Einbauten in Bezug zur Bahnsteigkante positioniert worden sind, so wäre in der IFC 4x1 Datei über das *LinearPlacement* der direkte Abstand zur Bahnsteigkante in der Klasse *IfcDirectExpression* enthalten.

3. In DESITE MD Pro kann mit Hilfe der *Bounding Box* die Länge des Objekts herausgegeben werden. Damit hier die korrekte Länge, entlang des Bahnsteigs, gewählt wird, muss eine Regel verfasst werden, die diese überprüft. Hierfür wird eine Bahnsteigkante erstellt, worauf in unteren Absätzen noch genauer eingegangen wird. Die Bahnsteigkante beträgt, in die von DESITE definierte X-Richtung 169,85 m und in Y-Richtung 0,001 m. Dadurch lässt sich der größere Wert als die Längsrichtung zum Bahnsteig bestimmen (in dem Beispiel der Bounding-Box X-Wert). Nun kann für jedes Einbauelement der korrekte Bounding-Box Wert abgefragt werden. Hierbei gilt es zu erwähnen, dass sich im Beispielmmodell keine Bögen im Bahnsteig befinden, was nicht immer der Realität entspricht und eine Längsrichtung leicht bestimmbar macht.

Für die Überprüfung der Einbaulänge aller Einbauten ist eine weitere Regel von Nöten. Um die Prüfmenge mit den richtigen Einbauten zu befüllen müssen, diese gefiltert werden. Damit die Elemente dem zugehörigen Bahnsteig korrekt zugeordnet werden, muss die Gleisfläche als Raum modelliert werden. Danach können die Einbauten nach ihrem Namen gefiltert, das gewünschte Bahnsteiggleis ausgewählt und so der Prüfmenge hinzugefügt werden. Schließlich kann die Implementierung einer Regel erfolgen, welche die Hindernisse nach Größe sortiert.

Modellprüfung

 Modellprüfung
  Prüfen
  Zurücksetzen
 


Name	Prüfstatus
newObjectCheckModel (3)	
Einbaulänge (114)	Bestanden
Ergebnis [DBI Wetterschutzhaus Kat5:DBI Wetterschutzhaus Kat5:9...	Bestanden
Ergebnis [DB Kendo 90L - 790x475x425:DB Kendo 90L - 790x475x...	Bestanden
Ergebnis [Beuleuchtungsmast_einseitig:Beleuchtungsmast_einseitig...	Bestanden
Ergebnis [Beleuchtungsmast_zweiseitig:Beleuchtungsmast_zweiseit...	Bestanden
Ergebnis [DB Ticketautomat (mit Text und Fundament):LED Ticket...	Bestanden
Ergebnis [DB Kendo 60L - 775x470x350:DB Kendo 60L - 775x470x...	Bestanden
Ergebnis [OB-Sprechsäule:OB-Sprechsäule mit Batteriehalter:9864...	Bestanden
Ergebnis [Beuleuchtungsmast_einseitig:Beleuchtungsmast_einseitig...	Bestanden
Ergebnis [Beuleuchtungsmast_einseitig:Beleuchtungsmast_einseitig...	Bestanden
Ergebnis [DB Ticketautomat (mit Text und Fundament):LED Ticket...	Bestanden
Ergebnis [DB Ticketautomat (mit Text und Fundament):LED Ticket...	Bestanden
Ergebnis [DB Ticketautomat (mit Text und Fundament):LED Ticket...	Bestanden
Ergebnis [Beuleuchtungsmast_einseitig:Beleuchtungsmast_einseitig...	Bestanden

Ergebnis [Ergebnis [Beuleuchtungsmast_einseitig:Beleuchtungsmast_einseitig_mit Schallprojektor:1011552:3]]

Info

Ergebnis

Check Element 2wd_RcyPT8gBncdpl5\$7oZ:3

Fehlermeldungen

Nr.	Regel	Text	Erzeugt	Benutzer
1	KleinesHindernis	0.2999	2019-07-07T17:01:43	Edina Selimovic

Abbildung 4-9: Überprüfung der Einbaulängen in DESITE MD Pro

Anzumerken ist hierbei, dass für eine ausführliche Prüfung alle Komponenten der ausgewählten Bauteile geprüft werden müssen. Aufgrund dessen werden Komponenten eines großen Hindernisses zu kleinen gezählt. Schlussendlich würde der Mindestabstand dennoch korrekt abgefragt werden, da sich das große Hindernis auch zu diesem zuordnen lässt.

Während die Einbaulänge in DESITE abrufbar ist, stellt der SMC kein Attribut zur Verfügung welches die Länge längs zum Bahnsteig erkennt, weshalb bei einer gewöhnlichen Längenabfrage fehlerhafterweise auch die Längen quer zum Bahnsteig ausgegeben werden.

Für eine erfolgreiche Implementierung wurde im Ursprungsmodell in Revit jedem Einbauteil das Attribut der Einbaulänge vergeben und schließlich mit einem benutzerdefinierten *PropertySet* nach IFC exportiert. Das Festlegen der Einbaulänge an der entsprechenden Bauteilseite längs zum Bahnsteig im Familieneditor muss manuell eingetragen werden, da die Position des Bauteils variieren kann.

Somit wurde die Einbaulänge im Datenmodell doppelt hinterlegt. Mit der Parametervergabe wurde eine Information erstellt, welche sich auch implizit berechnen lassen kann und dementsprechend bereits als Information vorhanden ist.

Bezüglich der Gleiszuordnung der Einbauten wurde festgestellt, dass diese nur in einer Revit erzeugten Fläche, und nicht einem Raum, erfolgreich auszuführen ist. Es wird nicht ersichtlich, wie dieser Fehler zu beheben ist. Aus diesem Grund wird der Parameter der Bahnsteiggleis - Zuordnung aus den definierten Regeln entfernt.

Da die Bahnsteigkante nicht als Kante definiert ist, sondern als Bauteil, muss eine Bahnsteigkante definiert werden. Damit eine eindeutige Bahnsteigkante vorliegt, wird diese in Revit erstellt. Hierzu wird eine Familie *BSK* modelliert, die eine dünne extrudierte Linie abbildet. Danach wird mit Hilfe von Dynamo entlang der Bahnsteigkanten-Bauteile eine Modelllinie erzeugt, auf welcher die Familie schließlich in Revit gesetzt werden kann.

Der Gefahrenbereich muss ebenso erst erzeugt werden. Dieser wird in Revit als Raum modelliert und benannt.

4. Nun kann die Modellüberprüfung erfolgen (siehe Abbildung 4-11). Dazu wird der SMC verwendet und die Richtlinie nach Hindernisgröße strukturiert. Somit kann zuerst die Einbaulänge abgefragt und die Bedingung erzeugt werden, dass nur für diese Einbauten die entsprechenden Mindestmaße überprüft werden.

Anzumerken ist die Norm: *Wenn zwei kleine Hindernisse einen Abstand kleiner 2,40 m aufweisen, gelten Sie als ein großes Hindernis*. Um dies einzuhalten, wird unter *Kleine Hindernisse* die erforderliche Bedingung formuliert (siehe Abbildung 4-10). Es wird nicht möglich die ausgeschlossenen Elemente unter *Große Hindernisse* abzulegen, da sich durch die erforderliche Einbaulänge die Elemente gegenseitig ausschließen. So wird eine eigene Regel *Kleine zu großen Hindernissen* erstellt. Dabei werden fälschlicherweise ausschließlich die Elemente, die der Zielkomponente während der Abstandsmessung am nächsten sind, ausgewählt.

INFORMATIONEN

Name:

Beschreibung: Bearbeiten

Alle kleinen Einbauten, die einen Abstand > 2,40 m untereinander aufweisen.

Optionen für bedingte Regel:

- Alle Modellkomponenten überprüfen, wenn bestanden
- Alle Modellkomponenten überprüfen, wenn nicht bestanden
- Nur fehlerhafte Komponenten überprüfen
- Nur fehlerfreie Komponenten überprüfen

PARAMETER Schweregradparameter

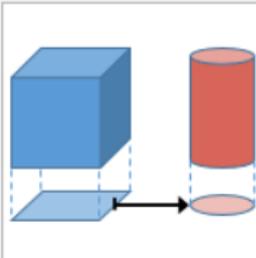
Abstandsberechnung

Überprüfter Abstand zu Zielkomponente

Zulässiger maximaler Abstand

Erforderlicher minimaler Abstand

Türflügel bei der Abstandsberechnung verwenden



Raum- oder Raumgru...

Raum- oder Raumgru...

Raumgruppentyp

Quellkomponente

Zu überprüfende Quellkomponenten

Status	Komponente	Eigenschaft	Funktion	Wert
Finschließen	Objekt	Einbauten Einb	<	1,00 m

Zielkomponente

Zu überprüfende Zie...

Status	Kom
Finschließen	Objekt

Abbildung 4-10: Bedingte Regel im SMC für kleine Hindernisse, die einen Abstand größer 2,40 m untereinander aufweisen sollen

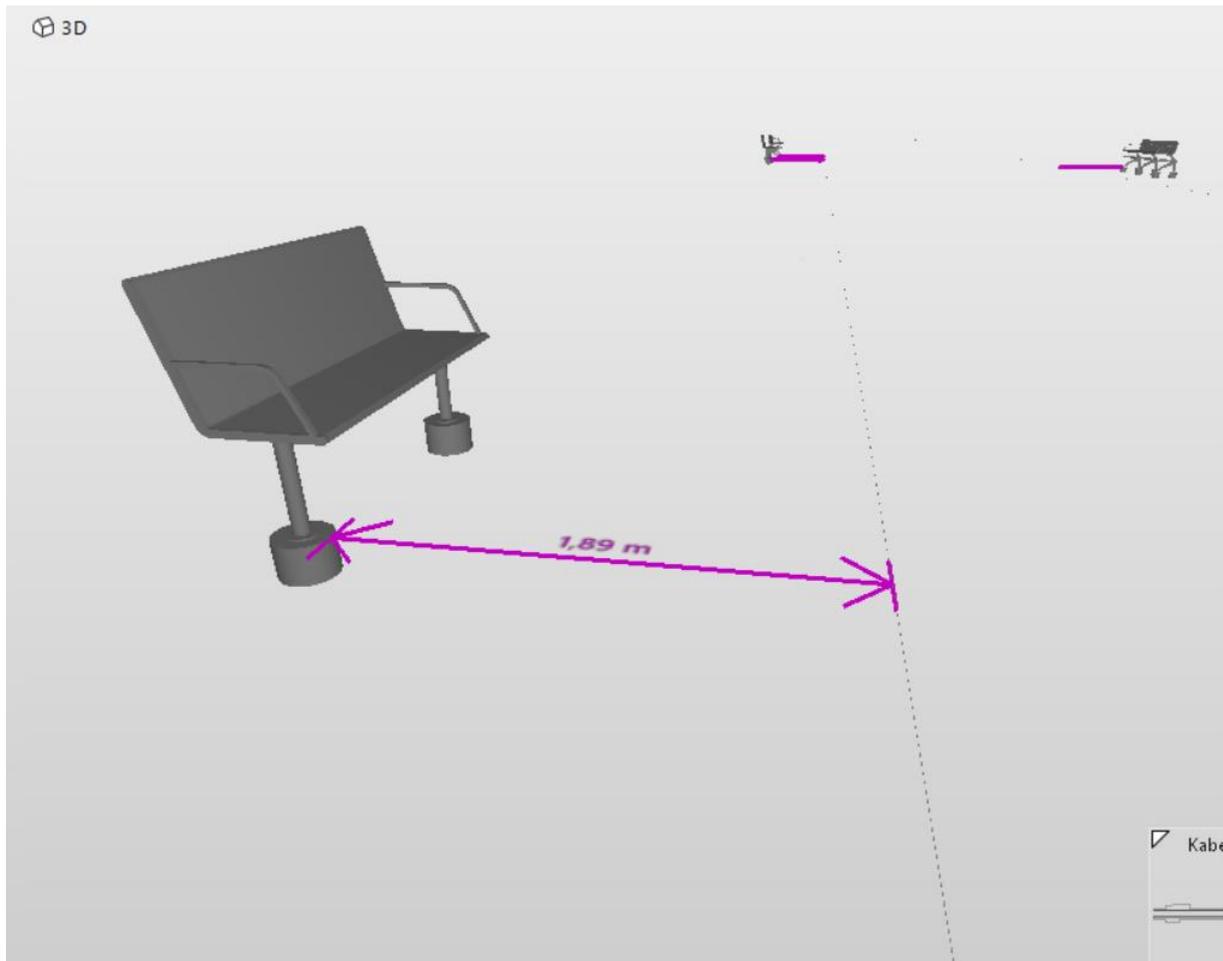


Abbildung 4-11: Einbauten-Test: Abstandsprüfung der Bahnsteigkante zum großen Hindernis

5. Die benötigten Daten für diese Regelüberprüfung werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 8: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: **Einbauten-Test**

Einbauten-Test	
Modellierung	<p><u>Benötigte Parameter</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Objekt: Einbauteil - (Attribut: Einbaulänge) - Objekt: Bahnsteigkante - Raum: Gefahrenbereich - Fläche/Raum: Gleis - Geometrie und Koordinaten der Objekte
	<p><u>Anmerkungen</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Einbaulängen sind längs zum Bahnsteig zu definieren. Bei manuell erstellten Parametern werden Werte doppelt gespeichert.

Modellüberprüfung	<u>Verwendete Terminologie</u>
	<ul style="list-style-type: none"> - Objektname Einbauteil muss angepasst werden - Attribut Einbaulänge muss angepasst werden - Typname der Bahnsteigkante muss angepasst werden - Name des Gefahrenbereichs muss angepasst werden
	<u>Einschränkungen</u>
	<ul style="list-style-type: none"> - Kleine Hindernisse, die zu großen gezählt werden, werden bei der Abstandmessung im SMC nicht vollständig einkalkuliert. - Manuelle Eingabe beim Wechsel der untersuchten Gleisfläche

Bezüglich vorheriger Fragestellung, ob eine 3D-Modellierung der Ausrüstungstechnik erforderlich, oder ein provisorischer Platzhalter mit Positionskordinaten ausreichend ist, kann sich anhand dieser Regelüberprüfung ableiten, dass für die bloße Abstandsmessung keine 3D-Modellierung von Nöten ist. Wird aber nach der Einbaulänge gefragt, so ist eine exakte Modellierung der Elemente nicht zu umgehen. Insbesondere im nächsten Test wird eine 3D-Modellierung unabdingbar.

4.1.3 Oberleitungs-Test

Class 2 Rule:

Es sollen keine Elemente in Berührung mit der 15 kV Oberleitungsanlage kommen.

Dabei ist ein Sicherheitsabstand seitlich der Oberleitung von 2,25 m, ein Sicherheitsabstand unterhalb von 3,50 m und oberhalb von 3,0 m einzuhalten.

(Vgl. Richtlinie 997.0101, Abs. 4 (Bild 4) der Deutschen Bahn AG)

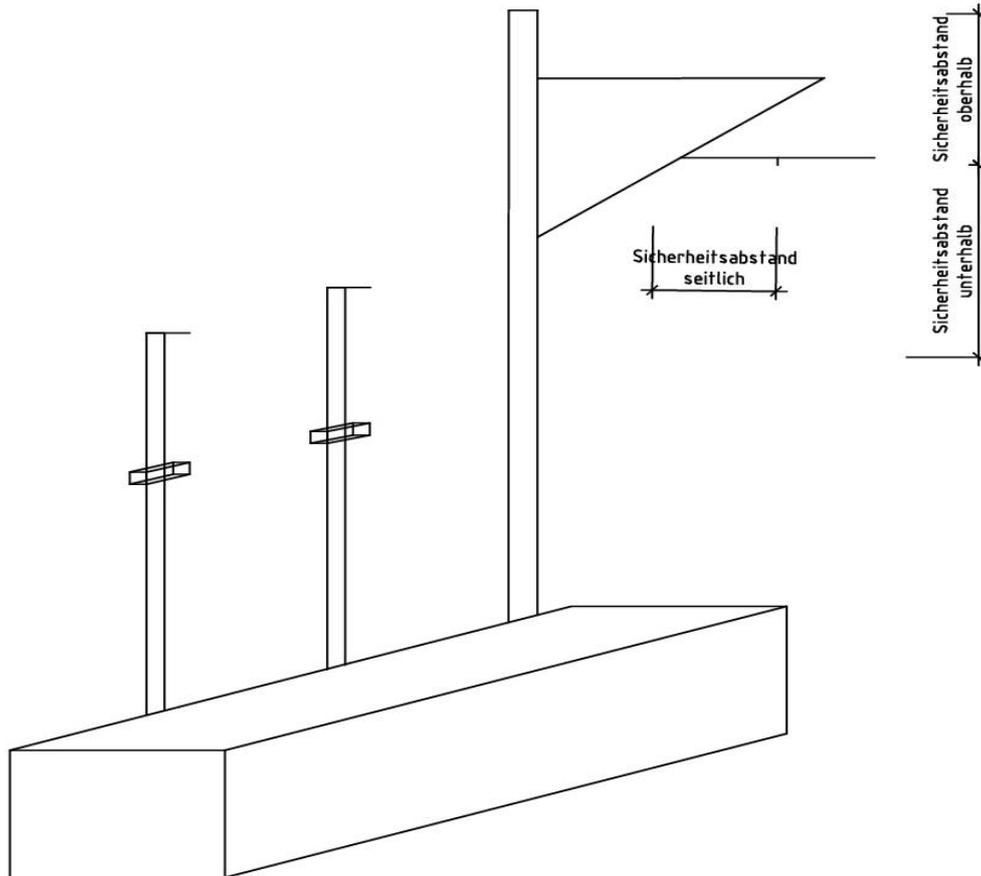


Abbildung 4-12: Oberleitungs-Test

Der Oberleitungs-Test bietet mehrere Ausführungsoptionen, die Mindestabstandsprüfung oder eine Kollisionsprüfung. Im Folgenden wird eine Kollisionsprüfung erarbeitet. Außerdem wurden für den Test mehrere Fachmodelle verwendet, um die tatsächliche Software-Anwendbarkeit einer Regelüberprüfung innerhalb mehrerer Modelle zu testen.

1. Es werden folgende Parameter benötigt:

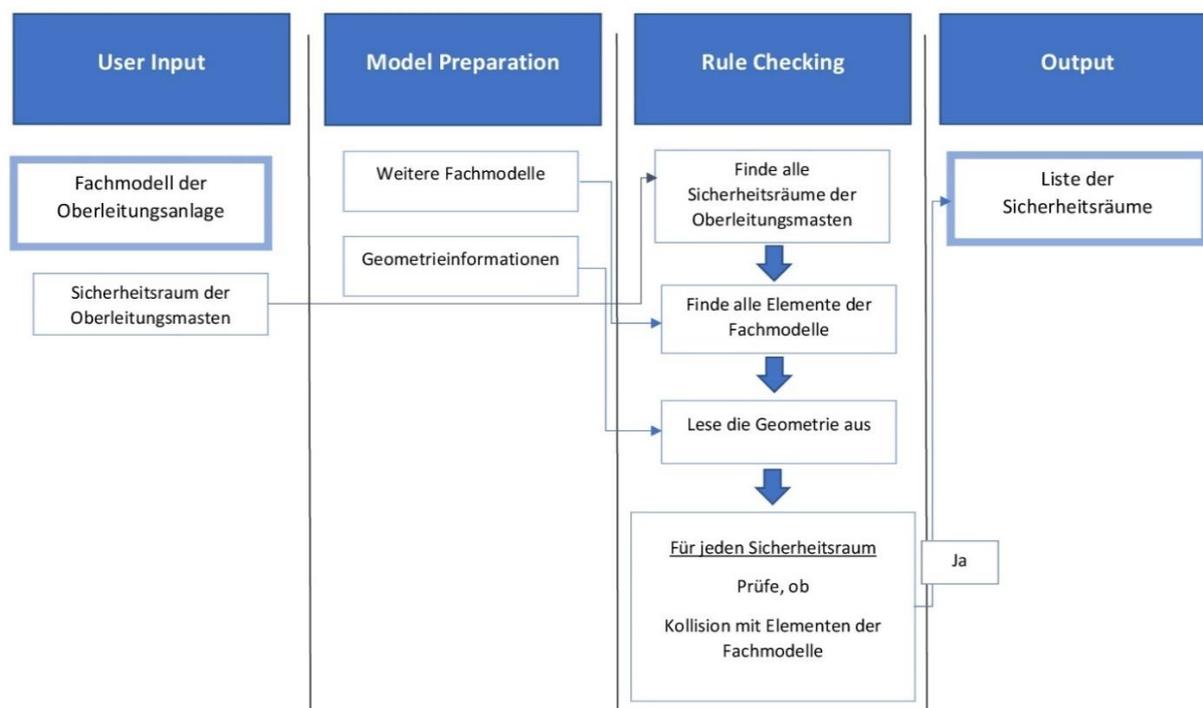


Abbildung 4-13: Parameterübersicht für den Oberleitungs-Test

2. Für eine Kollisionsprüfung stellen die Geometrien der Elemente die wichtigsten technischen Informationen dar. Anhand einer Überlappung oder Berührung der Geometrien können Kollisionen identifiziert werden.
3. Damit die Kollisionsprüfung zwischen verschiedenen Fachmodellen ausgeführt werden kann, wurden drei Modelle verwendet. Das erste Modell beinhaltet Holzingers (2018) Bahnsteigmodellierung und für das zweite wurde ein separates Revit-Projekt mit Oberleitungsmasten erstellt. Hierfür wurden die vereinfachten Oberleitungsmasten-Familien des Lehrstuhls für computergestützte Modellierung und Simulation herangezogen. Das dritte Modell enthält das Lichtraumprofil der Bahn aus Essers (2018) Masterarbeit.

Damit sich die Oberleitungsmasten beim Zusammenführen der Modelle auf der gewünschten Position befinden, wurde hier mit einem Dynamo-Skript gearbeitet. Dafür wurden im Bahnsteigmodell die Gleisachsen als Modelllinien gekennzeichnet und provisorisch jeweils drei Punkten auf jeder Seite vorgegeben. Schließlich wurden diese Punkte als Koordinaten in Excel exportiert. Im neuen Revit-Projekt wurden die Excel-Koordinaten importiert und mit den Elementen aus der Familie der Oberleitung besetzt. Diese mussten manuell in die korrekte Richtung gedreht und schlussendlich an einem Punkt mit den richtigen Projektkoordinaten versehen werden.

Ähnlich wurde beim Lichtraumprofil-Projekt vorgegangen, um die korrekte Position zu erhalten.

Zur Modellierung der Sicherheitsräume wurde im Familieneditor der Oberleitungsmast dahingehend verändert, dass am Anschlusspunkt der Oberleitung ein Extrusionskörper mit den erforderlichen Mindestgrößen erstellt wurde. Da dem Körper kein eigener Name zu vergeben ist, wurde ihm zur Unterscheidung vom Oberleitungsmasten ein Glas - Material zugewiesen.

4. Für den Oberleitungs-Test wurden alle drei Modelle in DESITE importiert. Schließlich wurde die Kollisionsprüfung mit den Sicherheitsräumen der Oberleitungsmasten in einer Prüfmenge und den restlichen Elementen in der anderen Prüfmenge durchgeführt.

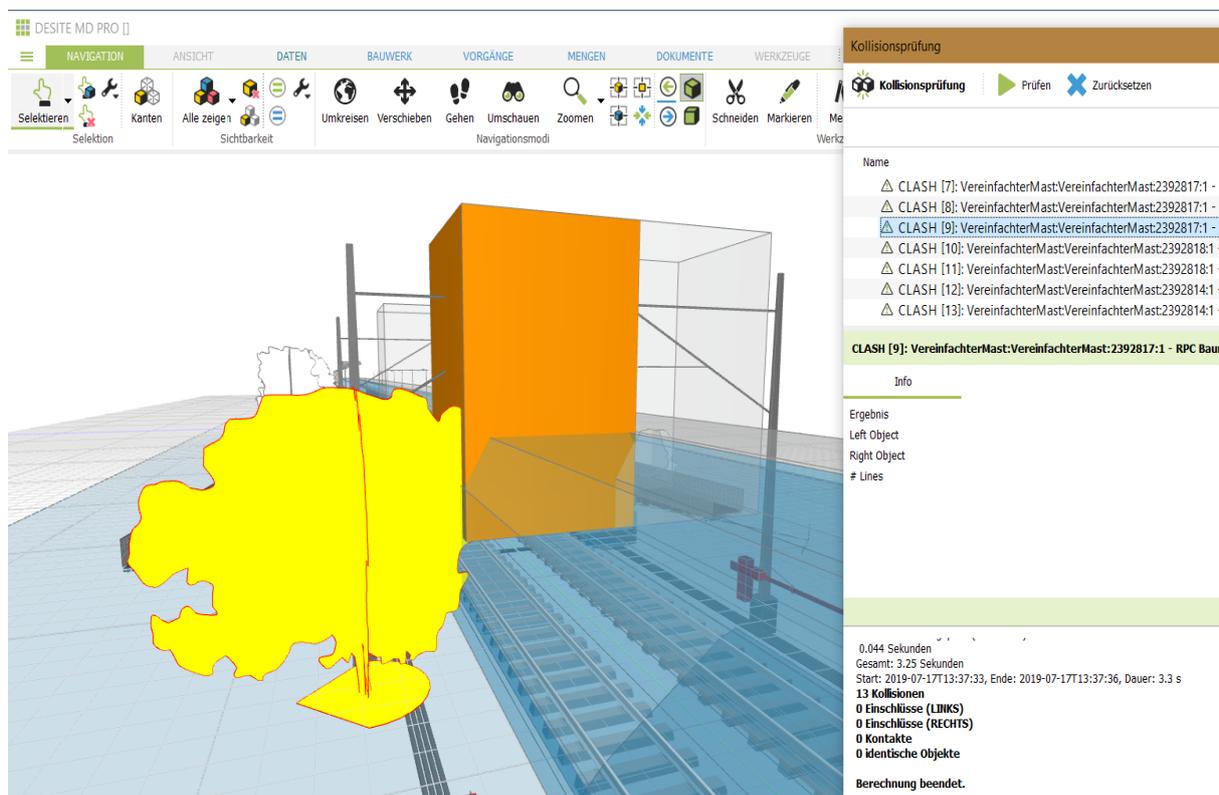


Abbildung 4-14: Kollision des Oberleitungsmast-Sicherheitsraums mit einem Laubbaum

5. Die benötigten Daten für diese Regelüberprüfung werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 9: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: **Oberleitungs-Test**

Oberleitungs-Test	
Modellierung	<u>Benötigte Parameter</u> <ul style="list-style-type: none"> - Objekt: Oberleitungsmast - Raum: Sicherheitsraum - Unterschiedliche Fachmodelle - Geometrie und Koordinaten der Objekte
	<u>Anmerkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> - Projektkoordinaten zum korrekten Zusammenführen erforderlich - Raum wird im Revit-Familieneditor als Körper modelliert
Modellüberprüfung	<u>Verwendete Terminologie</u> <ul style="list-style-type: none"> - Objektname des Sicherheitsraumes muss gefiltert werden <p style="text-align: center;"><i>Keine weiteren Terminologien verwendet, da kompletter Modellinhalt geprüft wurde</i></p>
	<u>Einschränkungen</u> <p>keine</p>

4.1.4 Gleisfeldbeleuchtungs-Test

Class 3 Rule:

Zur Gewährleistung der vollständigen Gleisfeldbeleuchtung wird der Abstand der Beleuchtungsmasten quer zu den Gleisen begrenzt. Dabei steht der „Abstand quer a_q “ im maximalen Verhältnis 2:1 zur Lichtpunkthöhe L_{ph} des Beleuchtungsmastes.

(Vgl. Richtlinie 954.9103, Abs.5.4 der Deutschen Bahn AG)

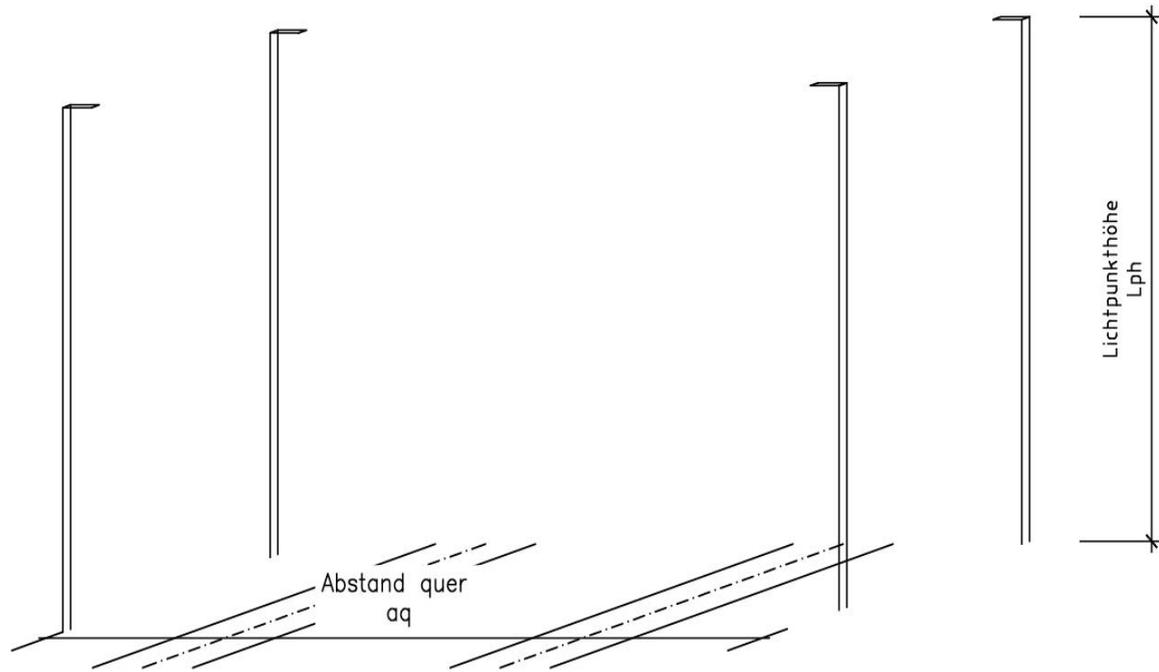


Abbildung 4-15: Gleisfeldbeleuchtungs-Test

1. Es werden folgende Parameter benötigt:

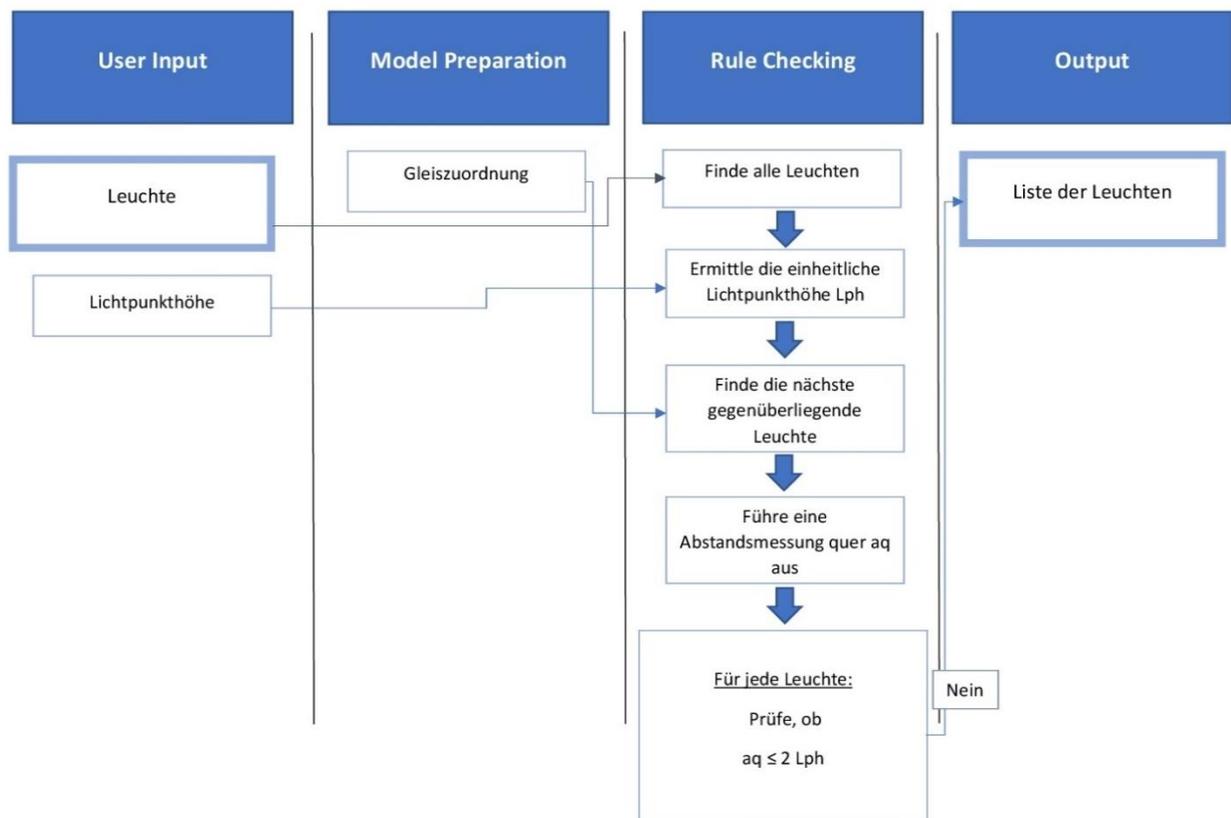


Abbildung 4-16: Parameterübersicht für den Gleisfeldbeleuchtungs-Test

2. Auf technischem Level ist die Ausführung der Regel durchaus machbar.
Die Lichtpunkthöhe lässt sich aus Koordinaten und Geometrie berechnen.
Aus den Positionskordinaten der einzelnen Leuchten sind die Abstände zu ermitteln. Dabei ist zu beachten, dass in diesem Fall der Abstand quer zum Gleis gesucht wird. Dadurch muss definiert werden, dass der Abstand zu einer Leuchte gemessen werden muss, die nicht dasselbe Gleis beleuchtet. In diesem konkreten Fall würden die zuvor genannten Vorteile des IFC 4x1 erneut zum Vorschein kommen.
Nun kann die nächste Leuchte bestimmt und der Abstand quer a_q ermittelt werden.
Danach kann durch die Abfrage der beiden Werte *Lichtpunkthöhe L_{ph}* und *Abstand quer a_q* das maximale Verhältnis überprüft werden.
3. Den entscheidenden Parameter während der Modellierung stellt hier die Gleiszurordnung der Objekte dar. Für folgendes Beispiel werden die erzeugten Bahnsteigflächen aus Kapitel 4.1.1 verwendet.
4. Für die Modellüberprüfung wird das Bahnsteigmodell aus den vorherigen Tests hergenommen.
Bei der Abfrage der Lichtpunkthöhe in DESITE, ohne zuvor modellierten Parameter der Höhe, werden einige Schwierigkeiten festgestellt. Der Beleuchtungsmast kann immer nur als Ganzes selektiert werden, sodass die Leuchte allein nicht ausgewählt werden kann. Dies hängt mit der Modellierung zusammen. Denn obwohl der Beleuchtungsmast aus mehreren Komponenten besteht, wird er als ein Objekt gewertet, da der komplette Beleuchtungsmast mit allen Unterkomponenten in einer Familie erstellt worden ist. Während der Modellüberprüfung, oder Attributprüfung, wird die Höhe des Beleuchtungsmastes nicht pauschal ausgegeben, da hier die verschiedenen Komponentenhöhen beachtet werden. Filtern nach Komponenten in der Prüfmenge ist wiederum nicht möglich, sodass falsche Elemente und Ergebnisse ausgegeben werden. Um dem entgegen zu wirken wäre es sinnvoll die Leuchte in einer separaten Familie zu erstellen, so wie es beim Lautsprecher der Fall war (siehe Abbildung 4-17). Die Lichtpunkthöhe könnte nun analog zu Kapitel 4.1.1 ermittelt werden. Dadurch kann auf die Parametervergabe der Lichtpunkthöhe verzichtet werden.

Eine Abfrage des nächsten Nachbarn müsste nun programmiert werden, was aufgrund des hohen Aufwands außerhalb des Rahmens dieser Arbeit liegt. Somit wird der Implementierungsversuch an dieser Stelle abgebrochen.

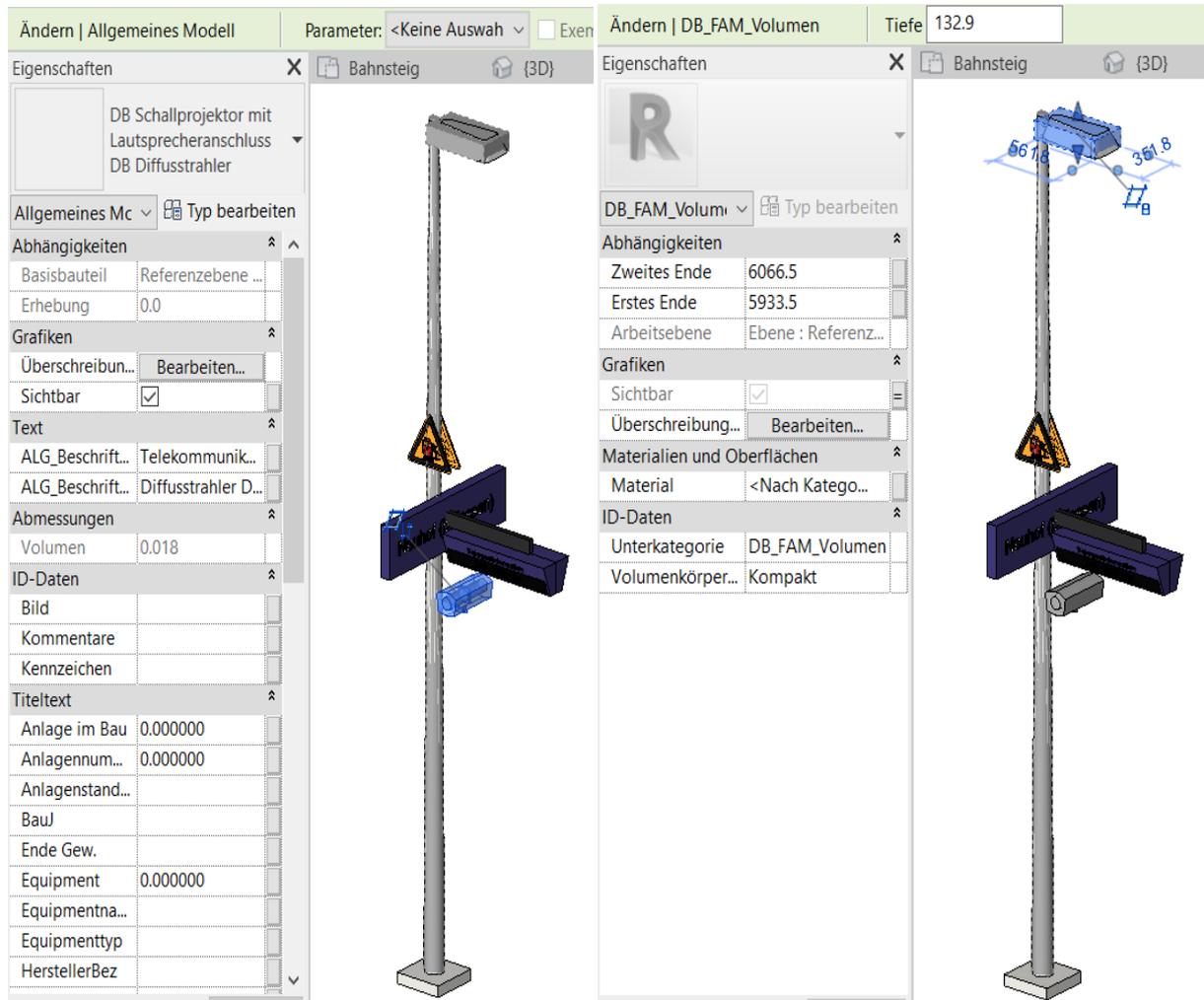


Abbildung 4-17: Gegenüberstellung des Lautsprechers und der Leuchte am Beleuchtungsmast

5. Die benötigten Daten für diese Regelüberprüfung werden in folgender Tabelle zusammengefasst:

Tabelle 10: Schaubild zu den Anforderungen für die Regel: **Gleisfeldbeleuchtungs-Test**

Gleisfeldbeleuchtungs-Test	
Modellierung	<p>Benötigte Parameter</p> <ul style="list-style-type: none"> - Objekt: Beleuchtungsmast mit Attribut: Lichtpunkthöhe / Familie: Leuchte - Gleiszuordnung der Objekte - Geometrie und Koordinaten der Objekte

	<u>Anmerkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> - Attribut der Lichtpunkthöhe kann auch implizit berechnet werden, dafür Familie der Leuchte notwendig
Modellüberprüfung	<u>Verwendete Terminologie</u> <ul style="list-style-type: none"> - Objektname Beleuchtungsmast und Attributname Lichtpunkthöhe / Objektname Leuchte muss angepasst werden - Name Gleis muss angepasst werden
	<u>Einschränkungen</u> <ul style="list-style-type: none"> - Class 3 Rule: größerer Aufwand und Programmierkenntnisse zur Ausführung notwendig

4.1.5 Validierung der Regeln

Zur Validierung der Regeln wurde ein provisorisches Bahnsteigmodell in Revit erstellt. Der 100 m lange Bahnsteig wurde aus Bahnsteigkanten der DB Bauteilfamilie erzeugt. Zur Vereinfachung wurde die Oberseite des Bahnsteigs als Decke modelliert. Einbauten wie Beleuchtungsmasten, Abfalleimer, Sitzbänke und Weitere wurden ebenfalls aus der DB Bauteilfamilie eingefügt. Zur Darstellung der Schienen wird die Modellierung aus Essers (2018) Masterarbeit verwendet.

Lautsprecher-Test

Während der Überprüfung des Lautsprecher-Tests erwiesen sich folgende Anpassungen als notwendig:

SMC

- Regel: Abstand der Lautsprecher
- Parameter: Gleiszuordnung

DESITE

- Regel: Lautsprecherhöhe
- Parameter: Abzugshöhe zur Berechnung der Lautsprecherhöhe

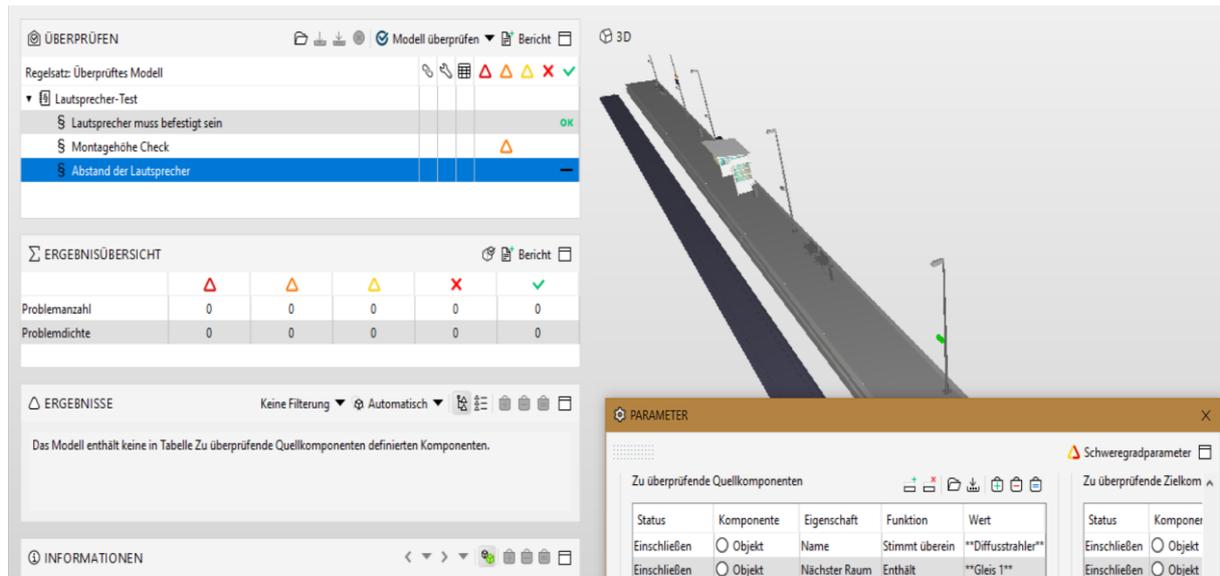


Abbildung 4-18: Validierung des Lautsprecher-Tests im SMC

Einbauten-Test

Während der Überprüfung des Einbauten-Tests erwiesen sich folgende Anpassungen als notwendig:

SMC

- Regel: alle Regeln
- Parameter: Eigenschaft Typname/Typ der Bahnsteigkante
- Parameter: Gleiszuordnung

Die Gleiszuordnung lässt sich im Validierungsmodell nicht ausführen. Nur im Lautsprecher-Test ist diese möglich. Nach einer langen Reihe von Versuchen konnte das Problem nicht behoben werden.

DESITE

Keine Anpassungen

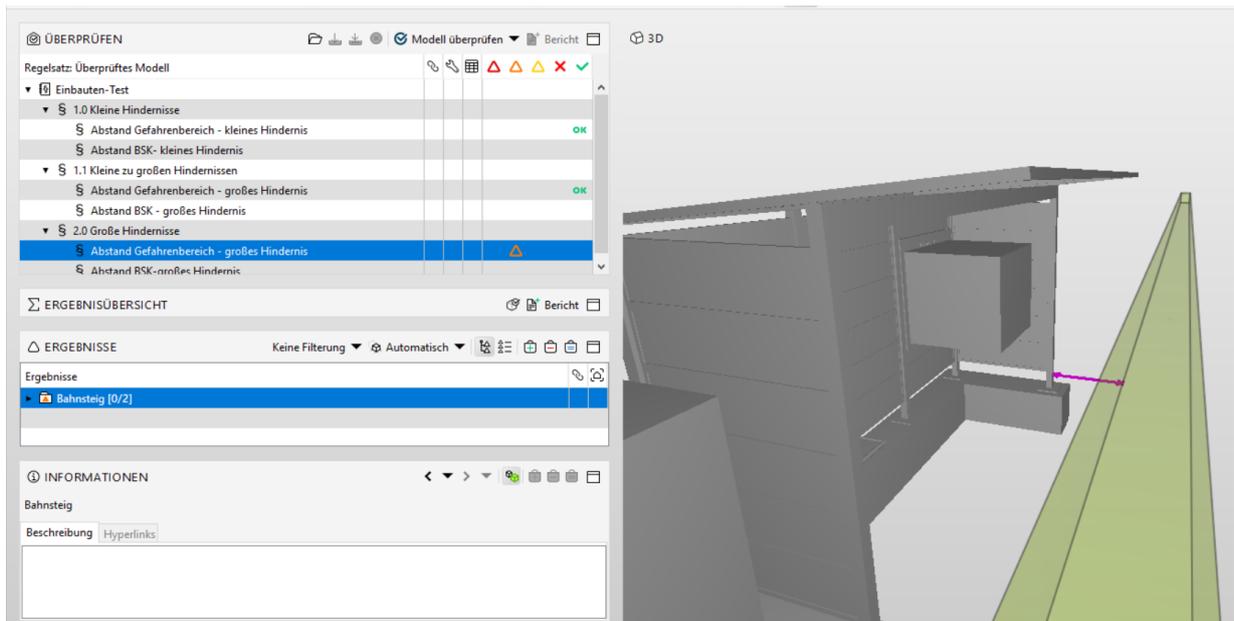


Abbildung 4-19: Validierung des Einbauten-Tests im SMC

Oberleitungs-Test

Während der Überprüfung des Oberleitungs-Tests erwiesen sich folgende Anpassungen als notwendig:

DESITE

Keine Anpassungen

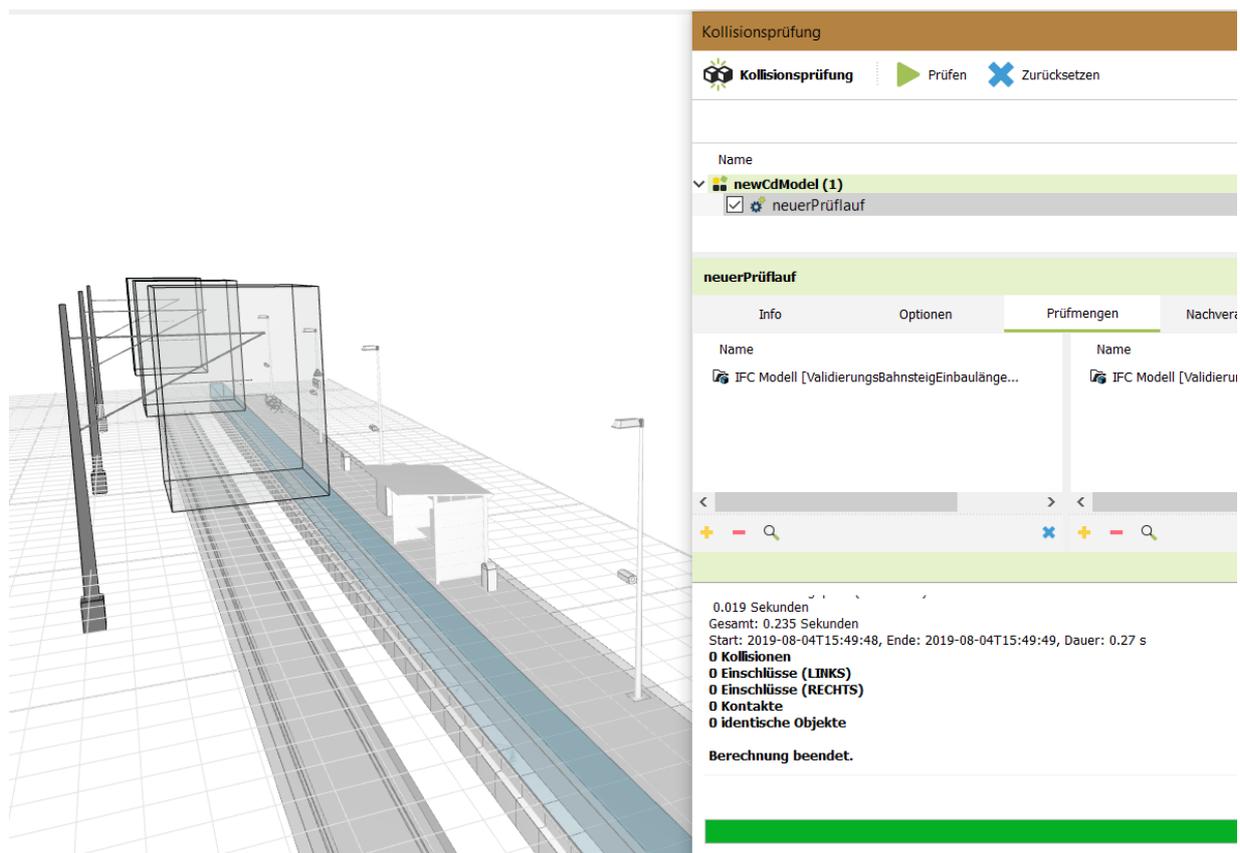


Abbildung 4-20: Validierung des Oberleitungs-Tests in DESITE

5 Zusammenfassung und Fazit

Damit das Building Information Modelling auch im Infrastrukturbereich zu einer besseren Planungseffizienz und höheren Planungsqualität beiträgt, sind noch einige Hürden zu bewältigen. Da BIM in Zukunft auch in der Infrastruktur nicht zu umgehen ist, bemühen sich viele Unternehmen und Organisationen um eine erfolgreiche Integration. Von Arbeiten am öffentlichen Datenaustauschformat zur einfacheren Interoperabilität, den immer feineren Anpassungen der Authoring Tools an die Bedürfnisse der Infrastruktur, bis hin zur tatsächlichen Umsetzung im Unternehmen anhand von Pilot-Projekten.

Hier wurden von BuildingSMART mit dem IFC Alignment und den Teilprojekten IFC Bridge, Road, Rail und Tunnel erste Grundbausteine in diese Richtung gelegt. Wie in dieser Arbeit untersucht, könnten sich durch die Anwendung des IFC 5 für die Infrastruktur große Vorteile für den weiteren BIM-Zyklus ergeben. An dieser Stelle ist es wichtig, dass auch die jeweiligen Softwarehersteller dasselbe Ziel verfolgen, sodass ein erfolgreicher Datenex- und Import gelingt.

Darüber hinaus ist das RIMcomb Forschungsprojekt darum bemüht, die genannten Ziele in der Eisenbahninfrastruktur voranzutreiben. Insbesondere die Modellüberprüfung trägt zu einer effizienten und genauen Planung bei. Um die erforderlichen Richtlinien und Regeln der Bahn zu überprüfen, werden andere Daten als im Hochbau benötigt. Wichtige Ergebnisse im Rahmen der Implementierung sind die daraus folgenden Modellierungs-Parameter. Erst durch die Untersuchung des benötigten Inputs können die Überprüfungen durchgeführt werden.

In dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass nach technischem Stand die Überprüfungen ausgeführt werden können, wenn auch mühsamer ohne das IFC Alignment. Der Implementierungsprozess hat sich meist als positiv erwiesen, wobei IT-Kenntnisse unabdingbar werden können.

Es ist zu erwarten, dass mit IFC Rail eine teilautomatisierte und schnellere Modellüberprüfung erfolgen wird. Dies erfordert die ausgiebige Untersuchung der benötigten Parameter und eine ausgebesserte Modellierung. Damit die Ziele von BIM in der Eisenbahninfrastruktur verwirklicht werden, ist zu einer stetigen Forschung und Zusammenarbeit anzuhalten.

Literaturverzeichnis

- Amann, J. (2018). *Eine objektorientierte Sprache zur Einbettung von Interpretationssemantik in digitale Bauwerksmodelle*. Dissertation, Technische Universität München. URL <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1453871/1453871.pdf>
- Amann, J., & Borrmann, A. (2015). Open BIM for Infrastructure--mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustauschs. In *Tagungsband Zum 6. OKSTRA-Symposium*, 1–10. Köln, DE.
- Autodesk. (n.d.). Verknüpfen einer DWG-Datei und Verwenden gemeinsam genutzter Koordinaten. Retrieved June 5, 2019, from <https://knowledge.autodesk.com/de/support/revit-products/learn-explore/caas/CloudHelp/cloudhelp/2018/DEU/Revit-Model/files/GUID-0C6D8890-73D9-4DAC-A0A6-84C45E54C6A8-htm.html>
- Autodesk. (2019a). BIM-Software-Funktionen. Retrieved April 18, 2019, from <https://www.autodesk.de/products/revit/features>
- Autodesk. (2019b). Civil 3D. Retrieved May 14, 2019, from <https://www.autodesk.com/products/civil-3d/overview#>
- Autodesk. (2019c). The promise of VR visualization for high-speed Rail. Retrieved May 14, 2019, from <http://www.infrastructure-reimagined.com/under-the-hood-the-promise-of-vr-in-high-speed-rail/>
- Autodesk. (2019d). Under the Hood: How Design Automation with Dynamo for Civil 3D Helps Drive Creative Infrastructure Solutions. Retrieved May 12, 2019, from <http://www.infrastructure-reimagined.com/design-automation-dynamo-civil3d/>
- Beetz, J., Borrmann, A., & Weise, M. (2015). Prozessgestützte Definition von Modellinhalten. In: A. Borrmann, M. König, C. Koch, J. Beetz, (Eds) *Building Information Modeling* (pp. 129–147). Wiesbaden, DE: Springer Vieweg.
- Borrmann, A., Amann, J., Chipman, T., Hyvärinen, J., Liebich, T., Muhič, S., ... Plume, J. (2017). *IFC Infra Overall Architecture Project Documentation and Guidelines*.

URL https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/07/08_bSI_Overall-Architecture_Guidelines_final.pdf

- Borrmann, A., Beetz, J., Koch, C., & Liebich, T. (2015). Industry Foundation Classes – Ein herstellerunabhängiges Datenmodell für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. In A. Borrmann, M. König, J. Beetz, C. Koch, & T. Liebich (Eds.), *Building Information Modeling* (pp. 83–127). https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3_6
- Borrmann, A., & Berkahn, V. (2015). Grundlagen der geometrischen Modellierung. In A. Borrmann, M. König, J. Beetz, C. Koch, & T. Liebich (Eds.), *Building Information Modeling* (pp. 25–41). https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3_2
- BuildingSMART. (2019a). Version 4.2 bSI Draft Standard. Retrieved June 05, 2019 from https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/
- BuildingSMART. (2019b). Entity IfcExtrudedAreaSolid. Retrieved May 26, 2019 from <http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4x1/final/html/schema/ifcgeometricmodelresource/lexical/ifcextrudedareasolid.htm>
- BuildingSMART. (2019c). IFC Specifications Database. Retrieved June 05, 2019 from <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. (2015). *Stufenplan Digitales Planen und Bauen*. Retrieved April 15, 2019 from https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- DB Station&Service AG & DB Netz AG. (n.d.). *BIM-Vorgaben BIM-Methodik Digitales Planen*. Retrieved June 08, 2019 from <https://www1.deutschebahn.com/resource/blob/1786332/44b919d8792666d50d6cb4ad46cd2541/Vorgaben-zur-Anwendung-der-BIM-Methodik-data.pdf>
- Dynamobim. (2019). The Dynamo Primer. Retrieved April 20, 2019, from <https://primer.dynamobim.org/>
- Esser, S. (2018). *Implementierung einer Datenschnittstelle zur Unterstützung der modellbasierten Planung von Bahnausrüstungstechnik*. Masterarbeit, Technische Universität München. URL https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018_Esser_Vilgertshofer.pdf

- Esser, S., & Borrmann, A. (2019). *Integrating Railway Subdomain-Specific Data Standards into a common IFC-based Data Model*. 1–13. Technischer Bericht.
- Freudenstein, S. (2017a). *Verkehrswegebau Grundkurs Übung*. Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Technische Universität München.
- Freudenstein, S. (2017b). *Verkehrswegebau Grundmodul*. Lehrstuhl für Verkehrswegebau, Technische Universität München.
- Hjelseth, E. (2015). BIM-based model checking (BMC). In *Building Information Modeling: Applications and Practices* (pp. 33–61). URL <https://doi.org/10.1061/9780784413982.ch02>
- Holzinger, R. M. (2018). *3D-Modellierung von Bahninfrastruktur*. Bachelorarbeit, Technische Universität München.
- Koch, C. (2015). Objektorientierte Modellierung. In A. Borrmann, M. König, J. Beetz, C. Koch, & T. Liebich (Eds.), *Building Information Modeling* (pp. 43–56). https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3_3
- König, M., Amann, J., Borrmann, A., Braun, M., Elixmann, R., Eschenbruch, K., ... Singer, D. (2016). *Wissenschaftliche Begleitung der BMVI Pilotprojekte zur Anwendung von Building Information Modeling im Infrastrukturbau*. URL https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-materialsamm-lung.pdf?__blob=publicationFile
- Löffler, M. (2017). *Evaluierung von 3D-BIM-Software für den Tunnelbau*. Masterarbeit, Montanuniversität Loeben.
- OBERMEYER. (2019). OBERMEYER: ProVI. Retrieved May 14, 2019, from <https://www.opb.de/index.php?id=402>
- Preidel, C. (2014). *Entwicklung einer Methode zur automatisierten Konformitätsüberprüfung auf Basis einer graphischen Sprache und Building Information Modeling*. Masterarbeit, Technische Universität München.
- ProVI. (2019). ProVI Schiene. Retrieved May 14, 2019, from <https://www.provi-cad.de/produkt/schiene>
- RIB. (2019a). 5D MODELLIERUNG - RIB Software. Retrieved April 29, 2019, from <https://www.rib-software.com/loesungen/5d-modellierung/>
- RIB. (2019b). Über RIB - RIB Group. Retrieved April 29, 2019, from <https://www.rib->

software.com/group/ueber-rib/

Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM Handbook*.
<https://doi.org/10.1002/9781119287568>

Signon Group. (2019). *Zwischenbericht Nr. 2 RIMcomb*.

Solihin, W., & Eastman, C. (2015). Classification of rules for automated BIM rule checking development. *Automation in Construction*, 53, 69–82.
<https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.03.003>

Tulke, J. (2015). BIM zur Unterstützung der ingenieurtechnischen Planung. In A. Borrmann, M. König, J. Beetz, C. Koch, & T. Liebich (Eds.), *Building Information Modeling* (pp. 271–282). https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3_16

TÜV SÜD. (2017). RIMcomb: Railway Information Modeling für die Ausrüstungstechnik der Bahninfrastruktur. Retrieved April 10, 2019, from <https://www.tuev-sued.de/rail/rail-e-ssentials/newsletter-2-2017/rimcomb-railway-information-modeling-fuer-die-ausruestungstechnik-der-bahninfrastruktur>

Zhang, C., Beetz, J., & Weise, M. (2014). Model view checking: automated validation for IFC building models. Technischer Bericht. URL <http://bimserver.org/wp-content/uploads/sites/6/2014/10/Model-view-checking-automated-validation-for-IFC-building-models.pdf>

Anhang A

Verwendete Softwarepakete

- Autodesk Revit 2019 – Studentenlizenz
- Autodesk Civil 3D 2020 – Studentenlizenz
- Autodesk Navisworks Manage 2019 – Studentenlizenz
- Autodesk Dynamo 2017 – Studentenlizenz
- DESITE MD Pro 2.4.3 - Ceapoint GmbH – Studentenlizenz
- FZK – Viewer 5.1 - Karlsruher Institut für Technologie – kostenloser Viewer
- Solibri Model Checker v9.9 – Studentenlizenz

Anhang B

Auf dem beigefügten USB-Stick befindet sich folgender Inhalt:

- Die schriftliche Ausarbeitung als PDF-Dokument
- CIVIL 3D: IFC 4x1 Trasse
- DESITE MD Pro: Einbauten-Test und LautsprecherRegeln
- DYNAMO: Skript für die Bahnsteigkanten und Mastkoordinaten
- IFC Prüfmodelle und Validierungsmodell
- REVIT Familie: Mast mit Sicherheitsraum
- SOLIBRI: Einbauten-Test und Lautsprecher-Test