



Technische Universität München

Ingenieur fakultät Bau Geo Umwelt

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation

## **Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung digitaler Datenmodelle am Beispiel einer Bahnsteigplanung**

Masterthesis

für den Master of Science Studiengang Bauingenieurwesen

Autor: Verena Wolf B.Sc.

Matrikelnummer:



1. Betreuer: Prof. Dr.-Ing. André Borrmann

2. Betreuer: Štefan Jaud M.Sc.

Ausgabedatum: 01. Dezember 2018

Abgabedatum: 31. Mai 2019

## Abstract

Data models are used for the interoperable exchange of the digital building model between the different stakeholders of a project. In infrastructure, large-scale linear projects place different demands on the data models than in building construction. For example, the objects are not flat and rectangular, instead they are adapted to the terrain and curved. Furthermore, the entities relevant for building construction are not compatible for a project in the infrastructure and consequently the data models for the infrastructure are not sufficient. For the planning of a building platform, the basic entities are presented in a proposal for a spatial-physical model.

Platforms are a good example of the link between civil engineering and building construction. For this a data exchange between the two areas with the help of data models is necessary. The data models should fulfill semantic and geometrical requirements for a successful exchange result from the application cases.

As an example, the application cases defined by BIM4INFRA2020 were used and the needs of the various requirements in relation to the platform model and the application cases were estimated.

The data models are checked to see whether they meet the requirements. The more requirements needed for the use case are supported by the particular data model, the more suitable the data model is. Representatives from geometric, semantic-geometric and semantic data models are selected and compared with each other. The representatives are DWG, DXF, FBX, OBJ, CPIXML, IFC2x3, IFC4x1, CityGML, LandXML, LandInfra and PlanPro.

The IFC4x1 data model has proven to be the best option when considering the various requirements and use cases.

## Zusammenfassung

Für den interoperablen Austausch des digitalen Bauwerkmodells zwischen den verschiedenen Akteuren eines Projektes werden Datenmodelle verwendet. In der Infrastruktur werden durch großräumig lineare Projekte andere Anforderungen an die Datenmodelle gestellt als im Hochbau. Zum Beispiel sind die Objekte nicht eben und rechtwinklig, sondern an das Gelände angepasst und gekrümmt. Außerdem sind die für den Hochbau relevanten Entitäten für ein Projekt in der Infrastruktur nicht kompatibel und folglich die Datenmodelle für die Infrastruktur nicht ausreichend. Für die Planung eines baulichen Bahnsteiges werden die grundlegenden Entitäten in einem Vorschlag für ein räumlich-physisches Modell dargestellt.

Bahnsteige sind ein gutes Beispiel für die Verknüpfung zwischen Tiefbau und Hochbau. Hierfür ist ein Datenaustausch zwischen den beiden Bereichen mit Hilfe von Datenmodellen notwendig. Die Datenmodelle sollten für einen erfolgreichen Austausch semantische und geometrische Anforderungen erfüllen, diese ergeben sich aus den Anwendungsfällen.

Als Beispiel wurden die von BIM4INFRA2020 definierten Anwendungsfälle (AwF) verwendet und der Bedarf, der verschiedenen Anforderungen, in Bezug auf das Bahnsteigmodell und die Anwendungsfälle eingeschätzt.

Die Datenmodelle werden überprüft, ob diese den Anforderungen gerecht werden. Je mehr für den Anwendungsfall benötigte Anforderungen von dem jeweiligen Datenmodell unterstützt werden, desto besser eignet sich das Datenmodell. Es werden Vertreter aus geometrischen, semantisch-geometrischen und semantischen Datenmodellen ausgewählt und miteinander verglichen. Die Vertreter sind DWG, DXF, FBX, OBJ, CPIXML, IFC2x3, IFC4x1, CityGML, LandXML, LandInfra und PlanPro.

Bei der Betrachtung der verschiedenen Anforderungen und Anwendungsfälle hat sich überwiegend das Datenmodell IFC4x1 als die beste Möglichkeit erwiesen.

## Danksagung

Ich möchte mich hiermit ganz besonders für die Unterstützung bei der Erstellung und Bearbeitung dieser Masterthesis bedanken. Dieser Dank gilt insbesondere...

... meinem Erstbetreuer von der Technischen Universität München, Herrn Prof. Dr.-Ing. André Borrmann und meinem Zweitbetreuer Herrn Štefan Jaud, M.Sc.

... Herrn Dipl.-Ing. Markus Unterreiter, Abteilungsleiter Schiene in München bei OBERMEYER Planen+Beraten GmbH, für die Möglichkeit, mich dem Thema BIM in der Verkehrsinfrastruktur in der vorliegenden Form anzunähern.

... Herrn Dipl.-Ing. Markus Hochmuth für die Unterstützung sowie die enge Zusammenarbeit mit der Gesamtplanungsintegration im Bereich BIM Infrastruktur bei OBERMEYER Planen+Beraten GmbH.

... den Arbeitskollegen in München bei OBERMEYER Planen+Beraten GmbH für die interessanten Fachgespräche.

... den Kommilitonen an der TU München für die Unterstützung während der gesamten Studienzeit.

## Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS .....	VII
TABELLENVERZEICHNIS .....	IX
FORMELVERZEICHNIS .....	X
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS .....	XI
1 EINLEITUNG .....	1
1.1 MOTIVATION .....	1
1.2 ZIEL UND ZWECK DER ARBEIT.....	1
1.3 LITERATURÜBERBLICK .....	2
1.4 AUFBAU DER ARBEIT.....	3
2 BUILDING INFORMATION MODELING .....	5
2.1 BESCHREIBUNG UND DEFINITION .....	5
2.2 INTEROPERABILITÄT.....	6
2.3 LITTLE / BIG UND CLOSED- / OPEN-BIM-METHODE .....	7
2.4 HONORARORDNUNG FÜR ARCHITEKTEN UND INGENIEURE (HOAI) .....	9
2.5 INFORMATIONSANFORDERUNGEN.....	9
2.6 ANWENDUNGSFÄLLE .....	12
2.6.1 AwF 1 Bestandserfassung .....	13
2.6.2 AwF 2 Planungsvariantenuntersuchung .....	13
2.6.3 AwF 3 Visualisierung (Öffentlichkeitsarbeit).....	13
2.6.4 AwF 4 Bemessung und Nachweisführung .....	14
2.6.5 AwF 5 Koordination der Fachgewerke .....	14
2.6.6 AwF 6 Fortschrittskontrolle der Planung .....	14
2.6.7 AwF 7 Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen.....	15
2.6.8 AwF 8 Arbeits- und Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung .....	15
2.6.9 AwF 9 Planungsfreigabe .....	15
2.6.10 AwF 10 Kostenschätzung und Kostenberechnung.....	15
2.6.11 AwF 11 Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe .....	16
2.6.12 AwF 12 Terminplanung der Ausführung .....	16
2.6.13 AwF 13 Logistikplanung.....	16
2.6.14 AwF 14 Erstellung von Ausführungsplänen .....	17
2.6.15 AwF 15 Baufortschrittskontrolle .....	17
2.6.16 AwF 16 Änderungsmanagement bei Planungsänderungen .....	17
2.6.17 AwF 17 Abrechnung von Bauleistungen.....	17
2.6.18 AwF 18 Mängelmanagement.....	18

---

2.6.19	<i>AwF 19 Bauwerksdokumentation</i> .....	18
2.6.20	<i>AwF 20 Nutzung für Betrieb und Erhaltung</i> .....	18
3	BAHNSTEIG .....	19
3.1	REGELWERKE UND DEFINITIONEN .....	19
3.2	VERSCHIEDENE AUSFÜHRUNGSVARIANTEN EINES BAHNSTEIGES .....	21
3.3	LINIENFÜHRUNG UND ACHSE .....	21
3.3.1	<i>Horizontale Trassierungselemente</i> .....	22
3.3.2	<i>Vertikale Trassierungselemente</i> .....	24
3.3.3	<i>Implementierung der Achse in die Datenmodelle</i> .....	25
3.4	BEMESSUNGSRUNDLAGEN FÜR BAHNSTEIGE .....	25
4	RÄUMLICH-SEMANTISCHES MODELL .....	29
4.1	DEFINITIONEN .....	29
4.1.1	<i>Semantik</i> .....	29
4.1.2	<i>Topologie</i> .....	29
4.1.3	<i>Positionierung</i> .....	29
4.1.4	<i>Geometrie</i> .....	30
4.1.5	<i>Objektmodell</i> .....	31
4.1.6	<i>Räumlich-semantisch kohärentes Modell</i> .....	33
4.2	RÄUMLICH-SEMANTISCHES MODELL FÜR DEN BAHNSTEIG INKLUSIVE FACHPLANUNGEN .....	34
5	DATENMODELLE .....	37
5.1	ALLGEMEINER ÜBERBLICK ÜBER DIE GEOMETRISCHEN UND SEMANTISCHEN DATENMODELLE .....	37
5.2	BESCHREIBUNG DER IN DIESER ARBEIT BETRACHTETEN DATENMODELLE .....	41
5.2.1	<i>Autodesk DraWinG File (DWG)</i> .....	41
5.2.2	<i>Autodesk Drawing Interchange File Format (DXF)</i> .....	42
5.2.3	<i>Autodesk Filmbox Technologie (FBX)</i> .....	42
5.2.4	<i>Wavefront Object (OBJ)</i> .....	43
5.2.5	<i>Construction Process Integration XML (CPIXML)</i> .....	44
5.2.6	<i>Industry Foundation Classes (IFC)</i> .....	45
5.2.7	<i>CityGML</i> .....	47
5.2.8	<i>LandXML</i> .....	48
5.2.9	<i>OGC LandInfra / InfraGML</i> .....	49
5.2.10	<i>PlanPro</i> .....	49
6	ENTWICKLUNG EINES KONZEPTES ZUR BEWERTUNG VON DATENMODELLEN .....	51
6.1	EINFÜHRUNG IN DAS ZU ENTWICKELNDE KONZEPT .....	51
6.2	DEFINITION DER ANFORDERUNGEN DER DATENMODELLE .....	51
6.2.1	<i>Allgemeine Anforderungen</i> .....	52
6.2.2	<i>Semantische Anforderungen</i> .....	52
6.2.3	<i>Geometrische Anforderungen</i> .....	53

---

6.3	KONZEPT FÜR DIE BEWERTUNG DER VERSCHIEDENEN DATENMODELLE .....	55
6.3.1	<i>Entscheidungen (<math>\delta_{ij}</math> und <math>\beta_{kj}</math>)</i> .....	55
6.3.2	<i>maximaler Bedarf des Datenmodells (<math>\Delta k</math>)</i> .....	56
6.3.3	<i>absolute Eignung des jeweiligen Datenmodells (<math>\alpha_{ik}</math>)</i> .....	56
6.3.4	<i>relative Eignung des Datenmodells je Anwendungsfall (<math>P_{ik}</math>)</i> .....	56
6.3.5	<i>allgemein gewichteter Mittelwert der Datenmodelle (<math>D_i</math>)</i> .....	57
6.3.6	<i>gewichteter Mittelwert der Datenmodelle (<math>D_i</math>) anhand der Leistungsphasen</i> .....	57
<b>7</b>	<b>ANWENDUNG DES ENTWICKELTEN KONZEPTS</b> .....	<b>58</b>
7.1	BEWERTUNG DER DATENMODELLE MIT ANFORDERUNGEN .....	58
7.1.1	<i>Allgemeine Analyse</i> .....	58
7.1.2	<i>Semantische Analyse</i> .....	58
7.1.3	<i>Geometrische Analyse</i> .....	60
7.2	BEWERTUNG DER ANWENDUNGSFÄLLE MIT DEN ANFORDERUNGEN .....	61
7.2.1	<i>Allgemeiner Bedarf</i> .....	61
7.2.2	<i>Semantischer Bedarf</i> .....	62
7.2.3	<i>Geometrischer Bedarf</i> .....	63
7.3	AUSWERTUNG DER DATENMODELLE BEZÜGLICH DER ANWENDUNGSFÄLLE .....	64
7.4	AUSWERTUNG DER DATENMODELLE BEZÜGLICH DER LEISTUNGSPHASEN .....	66
7.5	DISKUSSION .....	67
<b>8</b>	<b>RÉSÜMÉ</b> .....	<b>69</b>
8.1	FAZIT.....	69
8.2	AUSBLICK.....	72
<b>ANHANG I</b> .....		<b>73</b>
<b>ANHANG I</b> .....		<b>73</b>
<b>ANHANG II</b> .....		<b>74</b>
<b>ANHANG III</b> .....		<b>75</b>
<b>LITERATURVERZEICHNIS</b> .....		<b>76</b>
<b>ERKLÄRUNG</b> .....		<b>84</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Interoperabilität (LAAKSO & KIVINIEMI 2012).....	7
Abbildung 2: Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten der BIM-Methode (BORRMANN ET AL. 2015B) ...	7
Abbildung 3: Darstellung der tangierenden Elemente einer Bahnanlage nach HAOI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) in Beratungsleistung, Objektplanung und Fachplanung mit der Gleis-/ Bahnsteiganlage (blau) als Element der Objektplanung abgegrenzt von den Elementen der Fachplanungen .....	20
Abbildung 4: Verkehrsstation eines Mittelbahnsteiges mit zwei Bahnsteigkanten und zwei Gleisen aus unterschiedlichen Perspektiven .....	21
Abbildung 5: horizontale Elemente der Achse (Gerade (schwarz), Tangente (schwarz gestrichelt), Übergangsbogen (rot) mit Übergangsradius (A) und Kreisbogen (grün) mit Radius (R), Krümmungswechsel der Radien werden mit Pfeilen abgebildet (Darstellung angepasst auf elementare Elemente von MARKIČ ET AL. (2017)) .....	22
Abbildung 6: vertikale Elemente der Achse (Gerade (schwarz), Tangente (schwarz gestrichelt) und Ausrundungsbogen (blau) mit Radius (R) des Ausrundungsbogens in der s-, z- Ebene (Darstellung angepasst auf elementare Elemente von MARKIČ ET AL. (2017)).....	24
Abbildung 7: Abstandsmaß ( $a_b$ ) und Höhenmaß ( $h_b$ ) mit Gleisen und Bahnsteigkanten visualisiert (DB Netz AG 2012D) .....	26
Abbildung 8: Darstellung eines realen Bestandsmodell eines Mittelbahnsteiges mit Schotteroberbau (hellgrau), Gleisen (braun), Bahnsteigkorpus (dunkelgrau) und den Ausstattungselementen Wind- /Wetterschutzhaus und Vitrine aus verschiedenen Perspektiven (links und rechts).....	27
Abbildung 9: Klassifizierung eines Geoobjektes nach der Geoinformatik (LANGE 2002) angelehnt an die Darstellung eines Geoobjekts von TIMPF (2010).....	32
Abbildung 10: Klassifizierung eines Objektes nach der BIM-Methode angelehnt an die Darstellung eines Geoobjekts von TIMPF (2010) .....	32
Abbildung 11: Modell ohne semantische Informationen (Darstellung von STADLER & KOLBE (2007) mit angepassten Kontrasten).....	33
Abbildung 12: Räumlich-semantisches zusammenhängendes Umrandungsmodell bei dem die Semantik mit der Geometrie verknüpft ist (Darstellung von STADLER & KOLBE (2007) mit angepassten Kontrasten).....	33
Abbildung 13: Räumliche und physische Objekte eines Bahnsteiges (eigene Darstellung angelehnt an ein Tunnelmodell von BORRMANN ET AL. (2014)).....	34
Abbildung 14: Vorschlag für ein räumlich-semantisches Modell eines Bahnsteiges inklusive Fachplanungen, (eigene Darstellung inhaltlich angelehnt an DB Station & Service AG & DB Netz AG (2018)).....	35
Abbildung 15: Betrachtete Datenmodelle dieser Arbeit eingeteilt nach geometrischen, semantisch-geometrischen und semantischen Inhalten der Datenmodelle .....	37
Abbildung 16: Ausschnitt des FBX Code des Beispielprojektes mit Objekt Definitionen und deren Anzahl .....	43



---

Abbildung 17: Übersicht der Klasse Station des Railway BIM Data Standard (Darstellung mit angepassten Kontrasten von China Railway BIM Alliance (2016A)).....	46
Abbildung 18: Übersicht der verschiedenen Module des CityGML Datenmodell – Transportmodul farbig umrandet (GRÖGER ET AL. 2012).....	47
Abbildung 19: UML Diagramm des Transport Modell von CityGML (GRÖGER ET AL. 2012).....	48
Abbildung 20: LandXML Übersicht Code des Beispielprojektes.....	49
Abbildung 21: PlanPro Übersicht der Gleisachse (blau) und Bahnsteig (grau) (eigene Visualisierung inhaltlich von SOMMER ET AL. (2019)).....	50
Abbildung 22: Entwickeltes Konzept für eine Datenmodellbewertung mit Anwendungsfällen, Datenmodellen und deren Anforderungen hinsichtlich der Eignung bei der BIM-Methode.....	55

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen den BIM-Anwendungsfällen in den bSI Phasen, den bSI IDM und der HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) Darstellung ohne der ISO 12006-2 (BUILDINGSMART E.V. 2019B).....	11
Tabelle 2: Zuordnung der Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 zu den verschiedenen HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) Leistungsphasen (BIM4INFRA2020, 2018a, 2018b).....	12
Tabelle 3: Allgemeine Informationen über die betrachteten Datenmodelle .....	39
Tabelle 4: Struktur CPIXML Datenmodell (RIB Software AG 2018) mit Bezug zum Beispielprojekt .....	44
Tabelle 5: Ergebnis der betrachteten semantischen und geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) je Anwendungsfall (vgl. Kapitel 2.6) und im Mittelwert über alle Anwendungsfälle in Prozent.....	64
Tabelle 6: Ergebnis der betrachteten semantischen und geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) in den Leistungsphasen der HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) je nach Bedarf der verschiedenen Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 2.6) .....	66
Tabelle 7: Zwischentabelle I aus entwickeltem Konzept (vgl. Kapitel 6.3) enthält Analyse der Unterstützung der definierten allgemeinen, semantischen und geometrischen Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) auf die betrachteten Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1).....	73
Tabelle 8: Zwischentabelle II aus entwickeltem Konzept (vgl. Kapitel 6.3) mit exemplarischen Annahmen des Bedarfs der Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) in den jeweiligen Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 2.6).....	74

## Formelverzeichnis

Formel 1	.....	22
Formel 2	.....	23
Formel 3	.....	55
Formel 4	.....	56
Formel 5	.....	56
Formel 6	.....	56
Formel 7	.....	57
Formel 8	.....	57

## Abkürzungsverzeichnis

$\Delta$	maximaler Bedarf des Datenmodells
3D	dreidimensional
4D	vierdimensional
5D	fünfdimensional
$a_b$	Abstandsmaß
aBa	äußere Abstandsmaß
aBi	innere Abstandsmaß
AwF	Anwendungsfall
BCF	BIM Collaboration Format
BIM	Building Information Modeling
BRep	Boundary Representation
bSI	buildingSMART International
CAD	Computer Aided Design
CAFM	Computer-Aided Facility Management
CPIXML	Construction Process Integration XML
CSG	Constructive Solid Geometry
D	gewichteter Mittelwert der Datenmodelle
DB AG	Deutsche Bahn Aktiengesellschaft
DGM	digitales Geländemodell
DIN	Deutsche Industrie Norm
DWG	DraWinG File
DXF	Drawing Interchange File
EBO	Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung
FBX	Autodesk Filmbox
GML	Geographic Markup Language
$h_b$	Höhenmaß
hBa	äußere Höhenmaß
hBi	innere Höhenmaß
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
i	Index für Datenmodell
IDM	Information Delivery Manual
IFC	Industry Foundation Classes
IFD	International Framework for Dictionaries
j	Index für Anforderung
k	Index für Anwendungsfall
LandInfra	Land und Infrastruktur konzeptionelles Modell
LOD	Level of Detail

---

Lph	Leistungsphase
MVD	Model View Definition
NURBS	non-uniform rational B-Splines
OBJ	Wavefront Object
OGC	Open Geospatial Consortium
OPB	OBERMEYER Planen+Beraten GmbH
P	relative Eignung des Datenmodells je Anwendungsfall
ProVI	Programmsystem für Verkehr- und Infrastrukturplanung
r	Radius
reg lb	Länge des Kreisbogen
Ril	Richtlinie
TSI	technische Spezifikationen für die Interoperabilität
$u_f$	Überhöhungsfehlbetrag
UML	Unified Modeling Language
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
VOB	Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen
w	Wichtung des Anwendungsfalles
XML	eXtensible Markup Language
$\alpha$	absolute Eignung des jeweiligen Datenmodells
$\beta$	Bedarf der Anforderung

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

*„[...] Wir machen BIM bis 2020 zum Standard bei neuen Verkehrsinfrastrukturprojekten.“ (DOBRINDT 2017)*

Im 2015 formulierten Endbericht der Reformkommission Bau von Großprojekten wird von der Bundesregierung ein Stufenplan gefordert, der dieses Ziel realisiert (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015A). In dem entwickelten Stufenplan Digitales Planen und Bauen werden Anforderungen beschrieben, die die Umsetzung der Building Information Modeling (BIM)-Methode ermöglichen. Dazu gehört, dass die Ausschreibung herstellernerneutrale und damit native Datenformate für einen Datenaustausch zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten verlangt. Ebenso muss gewährleistet sein, dass die Softwareprodukte frei gewählt werden dürfen (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015B).

Grundsätzlich gilt, dass Bahnsteige in Deutschland nach den Richtlinien (Ril) der Deutschen Bahn Aktiengesellschaft (DB AG) geplant und durchgeführt werden. Diese Richtlinien sind die Basis für die Standardisierung von Bahnsteigen. Mit der BIM-Methode kann besonders bei standardisierten Bauteilen die Effizienz gesteigert werden und folglich durch die Anwendung der BIM-Methode bei der Planung von Bahnsteigen ein großer Nutzen entstehen.

Die DB AG, als führender Auftraggeber in der Schieneninfrastruktur in Deutschland, veröffentlicht seit dem Jahr 2015 die Vorgaben zur Anwendung der BIM-Methodik bei der Bahnsteigplanung. Die Verwendung der BIM-Methodik ist seit dem Jahr 2017 für alle neuen Projekte, die in der Verantwortung der DB Station & Service AG liegen, vorgeschrieben. In diesen Vorgaben werden jedoch, anders als im Stufenplan vorgeschrieben, meist proprietäre Datenmodelle als Datenaustauschformate verwendet (DB Station & Service AG & DB Netz AG 2018).

## 1.2 Ziel und Zweck der Arbeit

Für die Umsetzung der Open-BIM-Methode nach dem Stufenplan ist die Verwendung der nativen Datenmodelle existenziell. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es herauszufinden, ob derzeit die BIM-Methode für die Bahnsteigplanung durchgeführt werden kann. Dabei wird

untersucht, welches Datenmodell für die Durchführung einer Bahnsteigplanung mit der BIM-Methode am besten geeignet ist.

Um das definierte Ziel zu erreichen wird ein Konzept entwickelt, das die verschiedenen Datenmodelle bewertet. Hierfür werden semantische und geometrische Anforderungen an die Datenmodelle in verschiedenen Anwendungsfällen festgelegt. Diese resultieren aus der Untersuchung der Anwendungsfälle der BIM-Methode und der Beschreibung der Datenmodelle. Die Unterstützung der Anforderungen in den Datenmodellen wird geprüft und der Bedarf der Anforderungen in den jeweiligen Anwendungsfällen festgelegt.

Dadurch können zum einen die Entwickler der Datenmodelle Erkenntnisse über die Fähigkeiten der verschiedenen Datenmodelle gewinnen. Zum anderen kann bei der Durchführung der BIM-Methode in den Auftraggeberinformationsanforderungen das beste Datenmodell für das jeweilige Projekt gewählt und festgelegt werden.

### 1.3 Literaturüberblick

Um einen Überblick über die theoretischen Grundlagen zu erhalten wird eine Literaturanalyse durchgeführt. Hierzu werden einerseits die definierten Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 in Betracht gezogen (BIM4INFRA2020 2018A). Darüber hinaus werden die Grundlagen für eine Bahnsteigplanung und der Achse basierend auf der Ril 813 (DB Netz AG 2012A) und der Ril 800 beschrieben (DB Netz AG 2015). Für die Bewertung der verschiedenen Datenmodelle wird als Hauptliteratur möglichst die offizielle Dokumentation bzw. Spezifikationen des Datenmodells verwendet. Da diese teilweise nicht offen zugänglich oder unzureichend formuliert ist, wird unterstützend zusätzliche Literatur herangezogen.

Vergleiche verschiedener Datenmodelle werden von KUTZNER & KOLBE (2016) durchgeführt. Diese konzentrieren sich im Großen und Ganzen auf den Bereich der Geoinformatik und tangential mit der BIM-Methode. Die Bewertung der Datenmodelle aus dem Bereich der Geoinformatik in Verknüpfung mit der BIM-Methode wird von NEJATBAKHS (2017) vertieft. Sie stellt im Rahmen ihrer Dissertation die Datenmodelle LandXML und CityGML gegenüber. BRÜGGEMANN & BOTH (2015) vergleichen ebenfalls das Datenmodell CityGML, hier jedoch mit IFC. Datenmodelle, die sich mehr auf die Infrastruktur konzentrieren sind OKSTRA, IFC und LandXML. Diese werden von JI (2014) und AMANN & BORRMANN (2015) betrachtet. Des Weiteren wägen HECKNER & WIRTH (2014) verschiedene geometrische Volumenmodelle gegeneinander ab. Ebenso geht MCGLINN ET AL. (2019) auf die verschiedenen geometrischen Kerne der verschiedenen Datenmodelle ein.

Die zuvor genannten Literaturquellen beschreiben und vergleichen die Datenmodelle in der Theorie. Diese Vergleiche sind eine gute Basis, um einen Überblick über die Modelle zu erlangen und sie gegebenenfalls weiterzuentwickeln, jedoch keine Grundlage, um sich für ein Datenmodell in einer bestimmten Anwendung entscheiden zu können. Dafür wird eine Methode benötigt, die die Datenmodelle in Bezug auf ihre Anforderungen im jeweiligen Anwendungsfall evaluiert. Einen ersten Ansatz für eine Bewertung führt WU ET AL. (2017) mit verschiedenen BIM-Reifegradmethoden aus.

#### **1.4 Aufbau der Arbeit**

In Kapitel 2 werden die wichtigsten Begrifflichkeiten des Building Information Modeling vorgestellt. Dabei werden insbesondere die Anwendungsfälle der BIM-Methode bezüglich ihrer Bedürfnisse bei der Datenübertragung beschrieben.

Die technischen Richtwerte einer Bahnsteigplanung werden in Kapitel 3 erläutert. Hier werden ebenso die wichtigsten Elemente der Achse beschrieben, da der Bahnsteig an dieser orientiert ist.

In Kapitel 4 werden die Grundlagen der räumlich-semantischen Modelle definiert. Auf diesen Grundlagen aufbauend wird ein Vorschlag für ein räumlich-semantisches Modell für einen Bahnsteig entworfen.

Im Fokus des 5. Kapitel steht die Beschreibung der verschiedenen Datenmodelle in Bezug auf deren Aufbau und Fähigkeiten bei der Bahnsteigplanung. Als Beispiel wird dazu ein reales Projekt herangezogen.

In Kapitel 6 wird ein Konzept zur Bewertung der zuvor vorgestellten Datenmodelle entwickelt. Dafür werden aus den Anwendungsfällen und den Datenmodellen allgemeine, semantische und geometrische Anforderungen definiert.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 7 das Konzept anhand einer Bahnsteigplanung angewendet und diskutiert. Dabei wird zum einen überprüft ob die Datenmodelle die zuvor definierten Anforderungen unterstützen; Zum anderen wird der Bedarf der Anforderung in dem jeweiligen Anwendungsfall abgeschätzt. Resultierend daraus ergibt sich welches Datenmodell in welchem Anwendungsfall und überdies im Mittelwert über alle Anwendungsfälle geeignet ist. Unter Berücksichtigung welche Anwendungsfälle in welchen Leistungsphasen verwendet werden, kann abgeschätzt werden welches Datenmodell in selbiger herangezogen werden kann.



---

Abschließend wird in Kapitel 8 die Eignung der Anwendung von Datenmodellen zusammengefasst. In einem Ausblick auf die zukünftige Entwicklung mit der Verwendung der Open-BIM-Methode für die Planung von Bahnsteigen wird diese Arbeit abgerundet.

## 2 Building Information Modeling

### 2.1 Beschreibung und Definition

Building Information Modeling aus dem Englischen übersetzt bedeutet Bauwerksinformationsmodellierung. Diese Methode / Prozess / Modell entwickelt sich seit den 1990er im Bauingenieurbereich. Trotz der schnellen Entwicklung und der weiten Implementierung der BIM-Methode ist momentan keine allgemeine Definition verfügbar. Aufgrund der diffusen und facettenreichen Eigenschaften ist es wichtig ein allgemeines Verständnis für die Ziele und das Potential der BIM-Methode zu erhalten. Die Anzahl der Definitionen für die BIM-Methode in dem Bereich des Bauingenieurwesens ist groß. Die Definitionen variieren je nach Stakeholder Perspektive, da jeder unterschiedliches Potential in der BIM-Methode sieht. Im Folgenden werden einige Definitionen vorgestellt (BORRMANN ET AL. 2015B).

Nach VDI 2552-2 lautet die Definition folgendermaßen:

*„Methode zur Planung, zur Ausführung und zum Betrieb von Bauwerken mit einem partnerschaftlichen Ansatz auf Grundlage einer zentrischen Bereitstellung von Informationen zur gemeinschaftlichen Nutzung*

*Anmerkung: Das Bauwerksmodell ist das primäre Werkzeug, das die Arbeitsweise unterstützt und der Verwaltung von Informationen dient (z. B. Zeit, Kosten, Nutzungsdaten). BIM ist kein Softwarepaket, sondern eine Arbeitsmethode, die sowohl die Projektsteuerung als auch die Zusammenarbeit in allen Lebensphasen eines Bauwerks erleichtert.“*

In dieser Definition wird die BIM-Methode mehr als Prozess gesehen, der vom Bauwerksmodell unterstützt wird. Dabei ist das Bauwerksmodell ein Hilfsmittel, um Informationen zu speichern und diese Methode erfolgreich umsetzen zu können.

Die DIN EN ISO 29481-1 definiert die Bauwerksinformationsmodellierung als:

*„Benutzung von gemeinsam genutzter digitaler Repräsentanz eines Bauwerks (inkl. Gebäude und Infrastrukturbauwerke, usw.), um die Prozesse der Bauplanung, der Baukonstruktion und des Bauwerksbetriebs zu erleichtern und eine verlässliche Entscheidungsgrundlage bereitzustellen*

*Anmerkung 1 zum Begriff: Die Abkürzung BIM steht auch für die digitale Repräsentanz der physischen und funktionellen Charakteristika des Bauwerks und der Bautätigkeit.“*

Diese Definition legt insbesondere den Fokus auf das digitale Erscheinungsbild, das mit diesem die Prozesse verbessern soll. In Anbetracht des Kontexts dieser Norm ist dies zu erwarten, da die Norm die Informationslieferbedingungen der Daten im Rahmen der BIM-Methode beschreibt.

Die BIM-Methode ist dabei eine Weiterentwicklung in dem Bereich des Bauingenieurwesens. Es können mit Hilfe dieser Methode nicht nur Geometrien dargestellt werden, sondern die Geometrie kann mit Informationen angereichert werden. Dabei wird nicht nur die Zeichnung der Ansichten des Bauwerks übergeben, sondern ein objektorientiertes Modell. Dieses wird als dreidimensionales (3D) Bauwerksmodell bezeichnet. Zwei weitere Dimensionen ergänzen das 3D-Bauwerksmodell bei der BIM-Methode. Zum einen die Informationen über die Zeit in der vierdimensionalen (4D) Komponente. Und zum anderen in der fünfdimensionalen (5D) Komponente die Kosteninformationen. Jedem Objekt können Informationen der erweiternden Komponenten zugeordnet werden. Dadurch entsteht ein informationsreiches Modell, das für verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden kann (OBERMEYER Planen+Beraten GmbH 2018).

Zusammenfassend lässt sich die BIM-Methode als Sammelbegriff für alle Prozesse, Modelle und Werkzeuge, die die kollaborative und digitale Zusammenarbeit verbessern soll, beschreiben.

## 2.2 Interoperabilität

*„Interoperabilität ist definiert als die Fähigkeit unterschiedlicher Systeme, möglichst nahtlos zusammenzuarbeiten.“ (DUDEN 2019)*

In der Bauindustrie ist dies besonders wichtig, da sehr viele kleine Unternehmen mit unterschiedlichem Digitalisierungsgrad zusammenarbeiten. In Abbildung 1 ist auf der linken Seite das Beziehungsgeflecht zwischen den verschiedenen Akteuren gezeigt. Dabei steht jeder Projektbeteiligte mit jedem anderen Projektbeteiligten direkt in Kontakt. Die Zusammenarbeit ist dabei komplex, da jeder Projektbeteiligter seine eigenen Systeme nutzt. Damit die unterschiedlichen Systeme miteinander bestmöglich zusammenarbeiten können wird als gemeinsame Basis ein interoperabler Standard definiert. Auf der rechten Seite in Abbildung 1 ist dies dargestellt. Mit dem offenen, interoperablen Standard kann sich die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten verbessern, da sie auf einer Basis miteinander kommunizieren (LAAKSO & KIVINIEMI 2012).

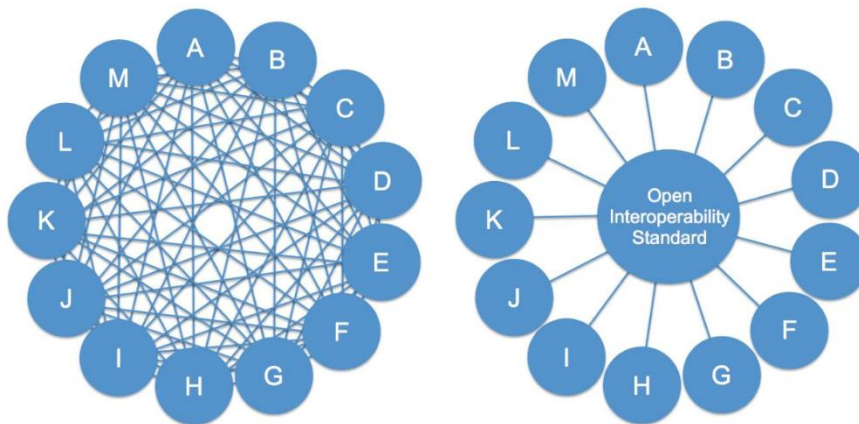


Abbildung 1: Interoperabilität (LAAKSO & KIVINIEMI 2012)

Es wird nach verschiedenen Typen der Interoperabilität unterschieden. Diese sind die syntaktische, semantische und schematische Interoperabilität. Die syntaktische Interoperabilität ist gekennzeichnet durch gemeinsame Formate und Protokolle und die schematische Interoperabilität durch gemeinsame Formulierung. In dieser Arbeit wird die semantische Interoperabilität mit gemeinsamen Begriffen und Definitionen betrachtet. Die Objekte der realen Welt können abstrahiert und in ein konzeptionelles Schema überführt werden. Die verschiedenen Beteiligten besitzen eine gemeinsame Basis für Begriffe, Objekte, Klassen und Eigenschaften. Dafür ist ein standardisiertes Modell mit bestimmten Terminologien und Ontologien erforderlich (KOLBE 2018).

### 2.3 little / BIG und Closed- / Open-BIM-Methode

Der Wechsel von der konventionellen, zeichnergestützten zu der modellbasierten Arbeitsweise erfordert große Veränderungen in den internen und unternehmensübergreifenden Prozessen. Dabei bedarf es von allen Projektbeteiligten eine schrittweise Einführung der BIM-Methode. Dafür existieren unterschiedliche Methoden. Diese werden in der Abbildung 2 dargestellt und im Folgenden erläutert (BORRMANN ET AL. 2015B).

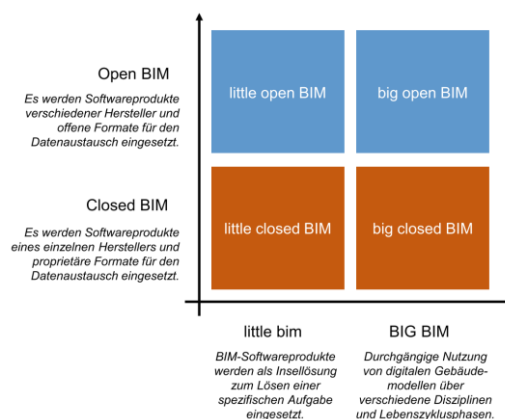


Abbildung 2: Übersicht über die verschiedenen Möglichkeiten der BIM-Methode (BORRMANN ET AL. 2015B)

Zum einen die Unterscheidung anhand des Projektumfanges little BIM und BIG BIM, wobei little BIM für die Nutzung mit nur einem Projektbeteiligten steht. BIG BIM ist nach dem Verein Deutscher Ingenieure (VDI), 2552-2 definiert als „*durchgängige und interdisziplinäre Anwendung der BIM-Methode, bei der die gesamten Potenziale der Methode genutzt werden*“. Es steht folglich für die Nutzung der Methode von mehreren interdisziplinären Projektbeteiligten.

Im Gegensatz dazu wird bei der Differenzierung zwischen der geschlossenen (engl. Closed) BIM-Methode und der offenen (engl. Open) BIM-Methode auf die unterschiedlichen Werkzeuge eingegangen. Nach VDI 2552-2 bedeutet dies für die Closed-BIM-Methode eine „*Arbeitsweise, die auf Produkte eines Softwareherstellers beschränkt ist*“. Für die Open-BIM-Methode ist die Definition eine „*Zusammenarbeit in der Planungs-, Ausführungs-, und Betriebsphase eines Gebäudes basierend auf herstellerneutralen Standards und Workflows*“

Daraus lässt sich ableiten, dass bei der Closed-BIM-Methode proprietäre Datenmodelle für den Austausch zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten zuständig sind. Um verschiedene Softwareapplikationen zu verknüpfen werden oftmals direkte Import- / Exportschnittstellen implementiert.

Folglich besteht mit der Open-BIM-Methode die Möglichkeit die Daten zwischen den verschiedenen Systemen auszutauschen sowie mit verschiedenen Softwareprodukten zu arbeiten. Die einzelnen Akteure werden damit nicht auf die Verwendung spezieller Softwareapplikationen verpflichtet, sondern können sich individuell entscheiden. Im Allgemeinen kann man sagen, dass der größte Nutzen aus der Open-BIM-Methode gezogen werden kann, wenn mehrere Akteure aus verschiedenen Unternehmen Daten austauschen (OBERMEYER Planen+Beraten GmbH 2018).

Die Open-BIM-Methode bietet einige Verbesserungsmöglichkeiten im Bausektor:

- Höhere Produktivität des Bereichs, indem mehr erreicht wird bei gleichen oder geringeren Ausgaben
- Verbesserte Ausgabequalität
- Erhöhte Transparenz der Bauleistungen
- Neue Möglichkeiten für das Branchenwachstum durch Exporte und zusätzliche Serviceangebote
- Ein stärkerer und digital qualifizierter Sektor, der Talente und Investitionen anzieht

Diese Möglichkeiten können am besten mit einem offenem, interoperablem Standard erreicht werden (EU BIM Task Group 2017).

## 2.4 Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI)

Die Honorarordnung für Architekten und Ingenieure ist eine Rechtsverordnung und regelt in Deutschland die Honorare der Ingenieurleistungen und Architektenleistungen. Damit soll den Ingenieuren und Architekten ein gerechtes Honorar sichergestellt werden. Sie wurde im Jahr 1977 erstmals veröffentlicht. Die aktuellste Version ist 2013 in Kraft getreten. Dabei wird ebenso die Qualität, der verschiedenen Leistungsphasen (Lph) gewährleistet. Die HOAI unterteilt den Lebenszyklus eines Bauwerkes in 9 verschiedenen Leistungsphasen. Diese sind:

1. Grundlagenermittlung
2. Vorplanung
3. Entwurfsplanung
4. Genehmigungsplanung
5. Ausführungsplanung
6. Vorbereitung der Vergabe
7. Mitwirkung bei der Vergabe
8. Objektüberwachung – Bauüberwachung und Dokumentation
9. Objektbetreuung

## 2.5 Informationsanforderungen

Für einen einheitlichen Austausch der notwendigen Daten sollten die Informationsanforderungen festgelegt werden. Bei der projektbezogenen Anwendung der BIM-Methode wird dies in den Auftraggeberinformationsanforderungen geregelt. Sie beinhalten welche Daten, wann, in welcher Detailtiefe, in welchem Format, von wem und zu welchem Zweck geliefert werden sollen. In den Auftraggeberinformationsanforderungen werden auch die BIM-Anwendungsfälle definiert. Diese werden zu Beginn des Projektes vom Auftraggeber beschrieben und entsprechen in der konventionellen Planung ungefähr einem Lastenheft (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur 2015B, OBERMEYER Planen+Beraten GmbH 2018).

Eine Organisation, die sich für die Entwicklung der Open-BIM-Methode einsetzt ist buildingSMART. Es ist ein offener, internationaler, herstellernerutraler und non-profit Interessensverbund, der 1995 in den USA gegründet wurde und auch in Deutschland vertreten ist. Das Ziel der Organisation ist die Standardisierung des modellbasierten Ansatzes für die Verbesserung der Planungs-, Ausführungs-, und Bewirtschaftungsprozesse (BUILDINGSMART E.V. 2019A).

Um dieses Ziel zu erreichen definiert buildingSMART grundlegende theoretische Standards, diese sind:

- „Information Delivery Manual“ (IDM), das die Prozesse beschreibt
- „Industry Foundation Classes“ (IFC) transportiert Daten bzw. Informationen
- „BIM Collaboration Format“ (BCF) ist ein Koordinationsaustauschformat
- „International Framework for Dictionaries“ (IFD) ordnet Objekten Begriffe zu
- „Model View Definition“ (MVD) übersetzt Prozesse in technische Voraussetzungen

(BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2019B)

IDM aus dem Englischen übersetzt bedeutet Handbuch der Informationslieferungen. Die IDM soll eine Verbesserung der Interoperabilität (vgl. Kapitel 2.2) über die gesamte Lebensdauer des Bauwerks mit vertraglichen Festlegungen zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten ermöglichen. Als Unterstützung dafür dient die DIN EN ISO 29481.

Die Definition der IDM nach der DIN EN ISO 29481 Teil 1 lautet folgendermaßen:

*„Dokumentation (Handbuch), das die betrieblichen Prozesse und die detaillierten Spezifikationen bezüglich der Informationen, die ein Beteiligter entsprechend seiner Rolle zu einem bestimmten Zeitpunkt in einem Projekt liefern muss, beschreibt“*

Die für einen BIM-Anwendungsfall erforderlichen Informationen sollten in gewünschtem Umfang zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht werden. Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten wird mit Hilfe dieser Norm gefördert. Damit kann die BIM-Methode optimal ausgenutzt werden.

Um diesen zu erzielen beinhaltet die IDM:

- Interaktionspläne / Transaktions-Diagramme
- Prozessbeschreibungen und -Diagramme
- Informationsaustausch-Anforderungen

Besonders die Informationsaustausch-Anforderungen werden in dieser Arbeit betrachtet. Sie beschreiben die Informationen, die für eine erfolgreiche Unterstützung der Anwendungsfälle erforderlich sind. Damit diese technisch von verschiedenen Softwareapplikationen implementiert werden können, werden Modell-Bereichs-Definitionen (engl. Model-View Definition) entwickelt. Diese sollten sich an vorgeschriebene Standard-Informationsschemata orientieren. Die Interaktionsstrukturen, die daraus resultieren schaffen die Grundlage für eine Standardisierung der Austauschprozesse.

Die verschiedenen Koordinierungsprozesse, die bei einem Projekt zwischen den verschiedenen Beteiligten ausgetauscht werden, können mit Methoden und Formaten beschrieben werden. Diese beinhalten die Definitionen der benötigten Informationen, um einen reibungslosen und verlustfreien Austausch zu gewährleisten. In der DIN EN ISO 29481 nach Teil 2 wird dies als Interaktionsframework bezeichnet. Der genaue Wortlaut der Definition ist: „*formale Festlegung, einschließlich der Definition der Rollen, der Transaktionen, von Transaktion-Nachrichten und der Daten-Elemente in diesen Nachrichten*“. Das Interaktionsframework kann von verschiedenen Softwareapplikationen gelesen werden. Jedes Interaktionsframework sollte deshalb den Regelungen des Interaktionsframework-Schemas folgen, um eine Kompatibilität der verschiedenen Softwareapplikationen sicherzustellen.

Die verschiedenen Phasen eines Bauwerks werden von buildingSMART International (bSI) aufgegriffen und als „Design“, „Procure“, „Assemble“ und „Operate“ bezeichnet. In Tabelle 1 werden diese entsprechend den Farben des bSI Logo in den Farben blau, rot, türkis und violett dargestellt. Den verschiedenen Phasen können Anwendungsfälle gemäß des Handbuches für Informationslieferungen zugeordnet werden, die ebenso von bSI definiert werden. Die verschiedenen Leistungsphasen der HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) können parallel zu den bSI IDM Anwendungsfällen den bSI Phasen zugeordnet werden (BUILDINGSMART E.V. 2019B, ).

*Tabelle 1: Zusammenhang zwischen den BIM-Anwendungsfällen in den bSI Phasen, den bSI IDM und der HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) Darstellung ohne der ISO 12006-2 (BUILDINGSMART E.V. 2019B)*

bSI Phases	bSI IDM	HOAI 2013
Design	Portfolio Requirements	Lph 1: Grundlagenermittlung
	Conception of Need	
	Outline Feasibility	
	Substantive Feasibility	
	Outline Conceptual Design	Lph 2: Vorplanung
	Full Conceptual Design	Lph 3: Entwurfsplanung Lph 4: Genehmigungsplanung
Procure	Coordination Design and procurement	Lph 5: Ausführungsplanung
	Production Information	Lph 6: Vorbereiten der Vergabe
		Lph 7: Mitwirken bei der Vergabe
Assemble	Construction	Lph 8: Objektüberwachung
Operate	Operations & Maintenance	Lph 9: Objektbetreuung
	Disposal	





In der Tabelle 2 ist zu erkennen, dass die erst genannten Anwendungsfälle in den früheren Leistungsphasen verwendet werden und die letzten Anwendungsfälle in den späteren Leistungsphasen.

OBERMEYER Planen+Beraten GmbH (OPB) ist bei der Entwicklung der BIM-Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 beteiligt. OPB ist ein planungsorientiertes Unternehmen. Es erweitert die BIM-Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 um detailliertere und dabei auf die Planung bezogene Anwendungsfälle (OBERMEYER Planen+Beraten GmbH 2018).

Im Rahmen dieser Arbeit wurden, die von BIM4INFRA2020 definierten Anwendungsfälle verwendet. Die Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 werden vorgestellt im Hinblick auf die erforderlichen Eigenschaften der interoperablen Datenmodelle.

### **2.6.1 AwF 1 Bestandserfassung**

Die Bestandserfassung dient dazu, die für das Projekt wichtigen Informationen des Bestands in einem 3D-Bestandsmodell darzustellen. Dazu werden zuerst die benötigten Daten definiert und anschließend mit Hilfe von Vermessungen, Laserscanning und bestehenden Unterlagen gewonnen. Die gewonnenen Daten werden in einem Modell abgebildet, klassifiziert und mit semantischen Informationen erweitert. Das daraus entstandene 3D-Modell ist die Grundlage für die weitere Planung und sollte im weiteren Verlauf des Projektes fortgeschrieben werden (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.2 AwF 2 Planungsvariantenuntersuchung**

Die Planung von Bahnsteigen beinhaltet die Untersuchung der Trassierungsoptionen und der verschiedenen Varianten den Bahnsteig auszuführen. Diese werden in der Lph 2 miteinander verglichen. Dabei erfolgt eine Bewertung der unterschiedlichen Varianten hinsichtlich baulich-konstruktiver Art, Termine, Kosten und Qualität. Planungsphasengerecht detaillierte 3D-Modelle ermöglichen den Planungsvariantenvergleich. Dabei dienen die Modelle zur groben Visualisierung, zur Mengenermittlung und zur Kostenschätzung (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.3 AwF 3 Visualisierung (Öffentlichkeitsarbeit)**

Die Visualisierung wird in verschiedenen Leistungsphasen durchgeführt. Je später die Leistungsphase, desto detaillierter sollte die Visualisierung sein. Die Visualisierung in Form von beispielsweise Bildern, Videos und 3D-PDFs ist die Grundlage für Projektbesprechungen in den Leistungsphasen 1 bis 5 und der Öffentlichkeitsarbeit und kann aus den BIM-Modellen

abgeleitet werden. Für eine fotorealistische Visualisierung sollten insbesondere Materialien und Beleuchtungsquellen definiert werden. Die zuvor erstellten BIM-Modelle bilden die Basis für die Visualisierung (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.4 AwF 4 Bemessung und Nachweisführung**

Im Rahmen einer Bahnsteigplanung handelt es sich hauptsächlich um die Planung von Schall und Erschütterung. Die Baustatik Bemessung entfällt, da der Bahnsteig mit Regelwerten dimensioniert wird. Die Regelwerte wurden statisch bemessen und können ohne weitere statische Bemessung im Regelfall verwendet werden. Die Modelle für die Bemessung und Nachweisführung sollten auf den zuvor erstellten Grundlagenmodellen basieren. Das Berechnungsmodell beinhaltet die für die Bemessung relevanten Informationen, insbesondere materialspezifische und geometrische Kennwerte gegebenenfalls auch ein 3D-Volumenmodell. Dabei werden nachweisrelevante Attribute definiert, berechnet und weitergegeben (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.5 AwF 5 Koordination der Fachgewerke**

Die verschiedenen Fachmodelle werden in bestimmten zeitlichen Abständen zu einem Koordinationsmodell zusammengeführt. Mit Hilfe einer automatisierten Konfliktprüfung können die ungewollten Konflikte behoben werden und weitere Kriterien überprüft werden. In den früheren Leistungsphasen können auch räumliche Platzhalter, wie beispielsweise das Lichtraumprofil verwendet werden, um die verschiedenen Fachmodelle zu koordinieren. In den späteren Leistungsphasen werden in die räumlichen Platzhalter die detaillierten Geometrien der Objekte eingesetzt. Die Interoperabilität der verschiedenen Datenmodelle ist hier besonders wichtig. Dazu sollten die Modellinhalte, -einheiten und die Positionierung des Modells definiert werden (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.6 AwF 6 Fortschrittskontrolle der Planung**

Das Modell wird verwendet, um während der Ausführungsplanung den Fortschritt durch die Visualisierungsmöglichkeiten besser zu kontrollieren. Termine können durch die bessere Transparenz leichter eingehalten werden. Die Anforderungen und Ergebnisse der anderen Anwendungsfälle, insbesondere AwF 5 Koordination der Fachgewerke, fließen in die Fortschrittskontrolle der Planung ein. Die Interoperabilität der Modelle ist dabei essenziell (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.7 AwF 7 Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen**

Die Ansichten aus dem Bestandsmodell werden für die Erstellung von 2D-Entwurfs- und Genehmigungsplänen abgeleitet. In dem Modell sollten zuvor genügend Planungsdetails im Modell gespeichert werden, die verwendet werden können. Die abgeleiteten Ansichten ergeben mit Planelementen, beispielsweise Plankopf und Maßketten, die resultierenden Entwurfs- und Genehmigungspläne. Zusätzlich können, falls im Projekt definiert, die Pläne mit 2D-Detailzeichnungen ergänzt werden. Die Detailzeichnungen müssen geometrisch kompatibel mit dem BIM-Modell sein (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.8 AwF 8 Arbeits- und Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung**

Sicherheitsrelevante Aspekte wie Sperrzonen, Zugangsbeschränkungen, Fluchtwege und Brandbekämpfung werden im 4D-Modell abgebildet. Die Visualisierung des Modells vereinfacht die Definition der Maßnahmen und die Kommunikation mit dem Baustellenpersonal. Zusätzlich sollen Anpassungen besser und einfacher dokumentiert werden. Daraus resultiert eine schnellere Übergabe von relevanten Informationen. Diese sollte strukturiert sein und kann den Dokumentations- und Kontrollprozess verbessern (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.9 AwF 9 Planungsfreigabe**

Für die Planungsfreigabe werden die Prüfläufe auf Grundlage der Modelle und den daraus erhaltenen zweidimensionalen Plänen durchgeführt. Bemerkungen können besser nachverfolgt werden und die Kommunikation zwischen den Projektbeteiligten wird verbessert. Die 3D-Modelle sollen mit relevanten und in den Auftraggeberinformationsanforderungen definierten Informationen erweitert werden können. Für die Überprüfung der allgemeinen Planungsvorgaben und der Geometrie sollten die 3D-Modelle automatisiert analysiert werden. Dies ist erst möglich, wenn die Standardisierung weiter fortgeschritten ist. Bis dahin können die 3D-Modelle hauptsächlich als Unterstützung verwendet werden (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.10 AwF 10 Kostenschätzung und Kostenberechnung**

Die Basis für die Kostenschätzung und -berechnung ist die Mengenermittlung. Die Mengen der Objekte werden mit den entsprechenden Längen, Breiten, Volumen und Stückzahl der einzelnen Objekte mit Hilfe des BIM-Modells ermittelt. Die geometrische Modellierung kann mit dem BIM-Modell unterschiedlich detailliert abgebildet werden. Je genauer die geometrische Modellierung, desto besser ist die daraus resultierende Kostenschätzung und -berechnung. Die Kostensicherheit wird durch die aus dem Modell abgeleiteten geometrischen Informationen

übersichtlich dargestellt. Im Falle einer Planungsänderung kann der Aufwand für eine erneute Mengenermittlung und der daraus resultierenden Kostenschätzung und -berechnung durch parametrische Modellierung des Modells verringert werden (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.11 AwF 11 Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe**

In den späteren Leistungsphasen (6,7) kann das Leistungsverzeichnis für die Ausschreibung, Vergabe und Angebotsabgabe mit Hilfe des Modells erstellt werden. Dazu werden die Mengen (vgl. Kapitel 2.6.10) ermittelt und verwendet. Die Mengenermittlungen basieren auf dem Modell und sind daher nicht Vergabe- und Vertragsordnung für Bauleistungen VOB/C konform. Beispielsweise werden im Hochbau Fenster bis zu einer bestimmten Fläche nicht abgezogen, wobei Fenster bei der Ermittlung mit dem Geometriemodell berücksichtigt werden. Das Leistungsverzeichnis kann nur in der Detailtiefe erstellt werden, in der das Modell modelliert ist. Insbesondere für die Ermittlung von Raum,- Flächen,- Längenmaß und Stückzahl ist die BIM-Methode erfolgreich. Die Definition der benötigten Leistungspositionen wird durch ein strukturiertes Modell mit den zugeordneten Elementtypen ermöglicht. Die Erstellung von 4D- und 5D-Modellen wird mit einer definierten Struktur vereinfacht. Bei Bedarf kann ein bepreistes Leistungsverzeichnis basierend auf dem BIM-Modell erstellt werden (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.12 AwF 12 Terminplanung der Ausführung**

Für die Terminplanung wird ein 4D-Modell erstellt. Dafür werden die verschiedenen Modellelemente mit den zugehörigen Vorgängen miteinander verknüpft. Die Strukturen des 3D-Modells, des Vorgangs-/ Terminplans und des Leistungsverzeichnisses sollten kompatibel sein, um einen Bauablauf mit all seinen relevanten Elementen erstellen zu können. Die Terminalsicherheit wird durch die Transparenz gesteigert und ein vollständiger, zusammenhängender Terminplan entsteht. Bei Änderungen, z.B. durch eine Bauablaufstörung müssen diese in allen Modellen konsistent ergänzt werden. Dies kann mit einem zusätzlichen Element in den Modellen umgesetzt werden. Die Terminplanung wird durch die Darstellung mit Hilfe des 4D-Modells leichter verständlich für die Öffentlichkeit und den Auftraggeber (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.13 AwF 13 Logistikplanung**

Die Logistikplanung beinhaltet die Baustelleneinrichtung, Baustelleninfrastruktur, Verkehrsphasen und die Verkehrsführung. Dank der durchgängigen Nutzung des Bestandsmodells wird

der Aufwand verringert. Das 4D-Modell unterstützt die Logistikplanung durch die zeitlich festgelegten Mengen, da die Baumaterialien gezielt geplant werden können. Das BIM-Modell wird in Computer Aided Design (CAD)-Systeme mit relevanten Attributen und Elementen für den Anwendungsfall vervollständigt. Die visuelle Komponente erleichtert das Verständnis und ermöglicht offensichtliche Probleme zu erkennen und zu lösen (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.14 AwF 14 Erstellung von Ausführungsplänen**

Die Ausführungspläne werden aus dem Modell abgeleitet (vgl. Kapitel 2.6.7). Die Ansichten werden ebenfalls mit Planelementen vervollständigt. Die Ausführungspläne entstehen in einer späteren Leistungsphase als die Entwurfs- und Genehmigungspläne und sind daher detaillierter. Die Verwendung des Modells, verringert bei korrekter Modellierung die Fehleranfälligkeit der Ausführungspläne. Gleichzeitig werden die Termin- und Kostensicherheit durch die Verwendung des BIM-Modells verbessert (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.15 AwF 15 Baufortschrittskontrolle**

Der zeitgebundene Baufortschritt wird mit Hilfe des 4D-Modells kontrolliert und stellt die Basis für das Projekt-Controlling dar. Es werden die Ist-Zustände während der Bauausführung eingetragen und mit den Soll-Zuständen verglichen. Die verschiedenen terminlichen Abweichungen können in dem Modell farblich abgebildet werden. Dies ermöglicht es mit geringem Aufwand die zurückliegenden Bereiche zu entdecken und mit entsprechenden Gegenmaßnahmen einen Projektverzug zu minimieren (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.16 AwF 16 Änderungsmanagement bei Planungsänderungen**

In der Leistungsphase 8, der Bauausführung, wird das Modell genutzt, um Planungsänderungen zu dokumentieren und nachzuverfolgen. Durch verbesserte und konsistente Kommunikation sollten mehrfache Bearbeitungen gleicher Änderungen verringert werden (BIM4INFRA2020 2018B).

#### **2.6.17 AwF 17 Abrechnung von Bauleistungen**

In konventioneller Arbeitsweise erfolgt die Abrechnung der Bauleistungen auf Textbasis. Manuell erstellte Tabellen werden verwendet, um die Bauleistungen abzurechnen. In der BIM-Methode soll dies objektorientiert erfolgen. Die digitale Verknüpfung zwischen dem Objektmodell, der Aufmaße und dem Leistungsaustausch ist laut der Deutschen Industrie Norm

(DIN) SPEC 92350 genehmigt. Die Realisierung dieses Anwendungsfalls kann auf dem Anwendungsfall 15, der Baufortschrittskontrolle, basieren (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.18 AwF 18 Mängelmanagement**

Das Modell wird in den abschließenden Leistungsphasen für die Lokalisierung und Dokumentation der entstandenen Mängel in der Ausführungsplanung verwendet. Dabei sollen offene Fragestellungen geklärt werden (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.19 AwF 19 Bauwerksdokumentation**

In der Leistungsphase 8 soll eine Bauwerksdokumentation angefertigt werden. Dazu wird ein „As-Built“-Modell mit genauen Angaben über verarbeitete Materialien und Produkte verwendet werden. Die zuvor assoziierten Informationen an den Elementen können schnell gefunden und für ein mögliches Computer-Aided Facility Management (CAFM)-Modell eingesetzt werden. Es sollte die Möglichkeit bestehen neue Attribute aufgrund von Abweichungen zwischen Planung / Ausführung und Betrieb ergänzen zu können. Eine gewissenhafte Einpflegung der Informationen während der Bauausführung erleichtert dies (BIM4INFRA2020 2018B).

### **2.6.20 AwF 20 Nutzung für Betrieb und Erhaltung**

Dieser Anwendungsfall ist kein Bestandteil einer Leistungsphase, sondern für den Betrieb des Objektes. Es sollen möglichst viele relevante Daten aus dem „As-built“ Modell übernommen werden. Diese dienen einer späteren Zustandsbewertung und erbringen Kostenersparnisse bei Instandsetzungsmaßnahmen (BIM4INFRA2020 2018B).

## 3 Bahnsteig

### 3.1 Regelwerke und Definitionen

Laut der Eisenbahn-Bau- und Betriebsordnung (EBO), zweiter Abschnitt Bahnanlagen, § 4 Begriffserklärungen wird die Bahnanlage in Absatz 1 wie folgt definiert:

*„Bahnanlagen sind alle Grundstücke, Bauwerke und sonstigen Einrichtungen einer Eisenbahn, die unter Berücksichtigung der örtlichen Verhältnisse zur Abwicklung oder Sicherung des Reise- oder Güterverkehrs auf der Schiene erforderlich sind. Dazu gehören auch Nebenbetriebsanlagen sowie sonstige Anlagen einer Eisenbahn, die das Be- und Entladen sowie den Zu- und Abgang ermöglichen oder fördern.“*

In den Absätzen 2 und 8 werden Bahnhöfe und Haltepunkte als Bahnanlagen definiert:

Absatz 2

*„Bahnhöfe sind Bahnanlagen mit mindestens einer Weiche, wo Züge beginnen, enden, ausweichen, oder wenden dürfen. Als Grenze zwischen den Bahnhöfen und der freien Strecke gelten im allgemeinen die Einfahrsignale oder Trapeztafeln, sonst die Einfahrweichen.“*

Absatz 8

*„Haltepunkte sind Bahnanlagen ohne Weichen, wo Züge planmäßig halten, beginnen oder enden dürfen.“*

Im zweiten Abschnitt § 13 Bahnsteige, Rampen sind elementar wichtige Details für Bahnsteige definiert.

Die Technischen Regelwerke im Geltungsbereich der DB AG beinhalten die Ril 813 „Personenbahnhöfe planen“. Im Rahmen dieser Arbeit sind Kapitel 1 „Planungsgrundlagen“ und Kapitel 2 „Bahnsteige und Ihre Zugänge“ interessant (DB Netz AG 2012A). In der Ril 813.0201 wird die Hauptfunktion eines Bahnsteiges *„als Verkehrszone sowie als Verweil- und Aufenthaltsort“* (DB Netz AG 2012C) definiert (DB Netz AG 2012C).

Für die Abgrenzung des Bahnsteiges zu den Elementen, die diesen tangieren wird die HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) verwendet. In der HOAI 2013 werden die *„Verordnungen über*



die Honorare für Architekten- und Ingenieurleistungen“ beschrieben. Die HOAI 2013 beinhaltet die Grundleistungen, besondere Leistungen, Leistungsbilder und Objektlisten. Die für die Bahnanlage relevanten Objekte werden in der HOAI 2013 in Teil 3: „Objektplanung“ und Teil 4: „Fachplanung“ aufgeführt und in Abbildung 3 schematisch abgebildet.

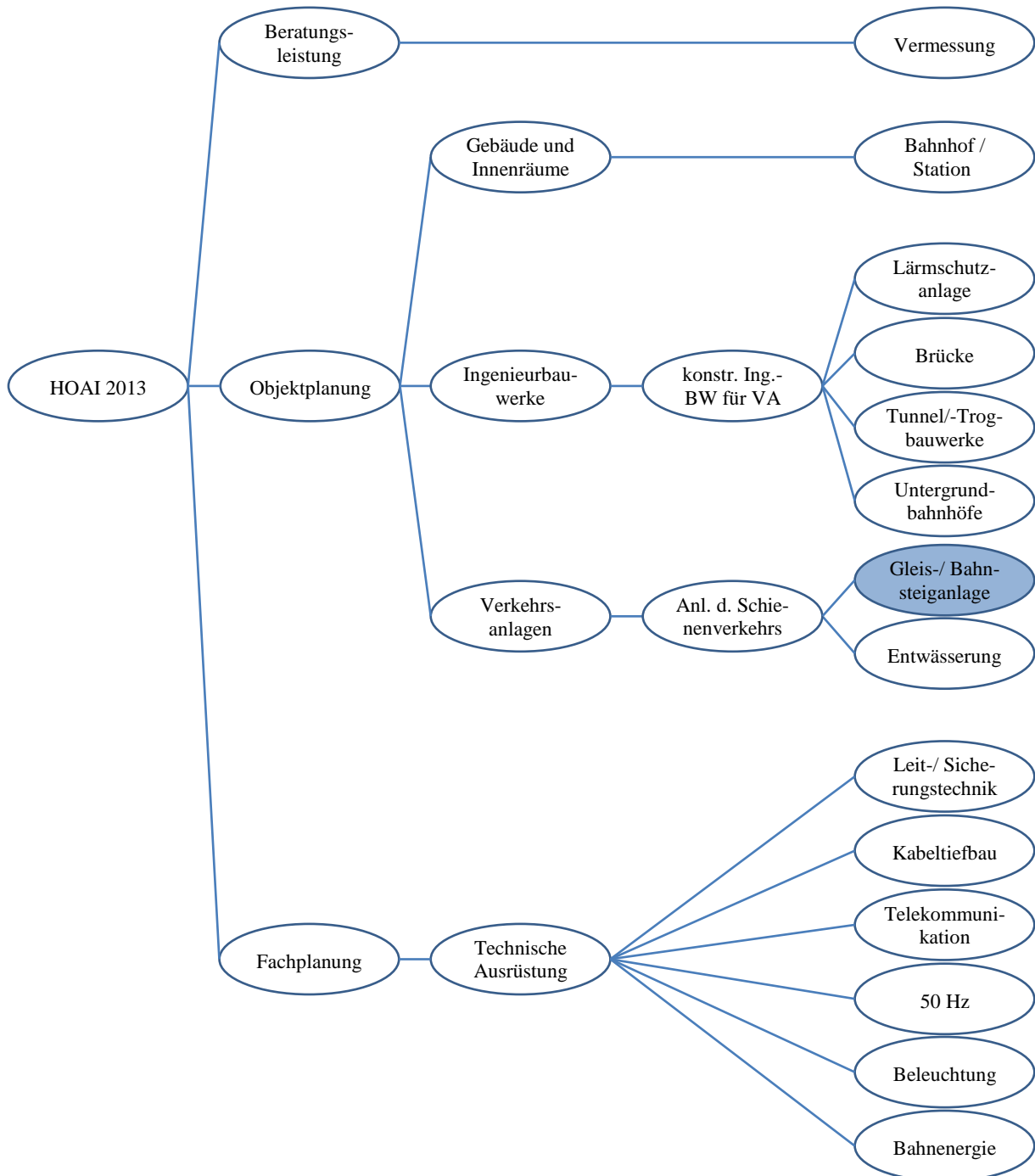


Abbildung 3: Darstellung der tangierenden Elemente einer Bahnanlage nach HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) in Beratungsleistung, Objektplanung und Fachplanung mit der Gleis-/ Bahnsteiganlage (blau) als Element der Objektplanung abgegrenzt von den Elementen der Fachplanungen

Die Objektplanung umfasst die Gebäude und Innenräume, Ingenieurbauwerke und Verkehrsanlagen. Die Anlagen des Schienenverkehrs mit der Gleis- und Bahnsteiganlage inklusive der

Entwässerung beinhalten die Elemente, die in dieser Arbeit vertieft untersucht werden. Die weiteren Gewerke der technischen Ausrüstung, die der Fachplanung zugeordnet werden können, orientieren sich im Verlauf der Verkehrsanlagenplanung an der Bahnsteigplanung. Sie können in separaten Fachmodellen erstellt werden und im Verlauf der Planung in einem Koordinationsmodell zusammengeführt werden.

### 3.2 Verschiedene Ausführungsvarianten eines Bahnsteiges

Bahnsteige können unterirdisch / oberirdisch und als Mittelbahnsteig / Außenbahnsteig realisiert werden. Die unterirdische Planung eines Bahnsteiges ist in Bezug auf die Verkehrsanlagenplanung um den Bahnsteig komplexer als die oberirdische Planung.

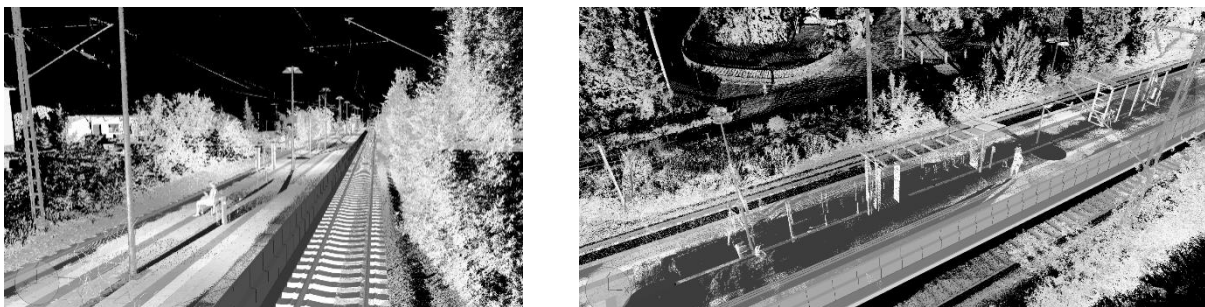


Abbildung 4: Verkehrsstation eines Mittelbahnsteiges mit zwei Bahnsteigkanten und zwei Gleisen aus unterschiedlichen Perspektiven

Der wesentliche Unterschied zwischen einem Mittelbahnsteig und einem Außenbahnsteig ist die Anzahl der Bahnsteigkanten. Ein Außenbahnsteig besitzt eine Bahnsteigkante und ein Mittelbahnsteig zwei Bahnsteigkanten. In dieser Arbeit wird sich auf den Mittelbahnsteig konzentriert sie fokussiert sich auf die Bahnsteigplanung von oberirdischen Personenbahnsteigen.

### 3.3 Linienführung und Achse

Die Achse ist in der linearen Infrastruktur ein wichtiges semantisches Element. Sie beschreibt den linearen Verlauf der Strecke und ist die Leitlinie für die geometrische Gestaltung. Die Positionierung der projektzugehörigen Objekte orientiert sich teilweise an der Achse.

Die Achse ist eine 3D-Kurve, die aus mehreren Teilen zusammengesetzt wird: Die horizontale Achse (im Grundriss), die vertikale Achse (im Aufriss) und eventuell der Querschnitt (MARKIČ ET AL. 2017). Um die Linienführung der Achse beschreiben zu können gibt es verschiedene Trassierungselemente. Diese werden mit Hilfe von internationalen und nationalen Normen standardisiert. Die Bemessungsgrundlagen für die Elemente der Trassierung in Bezug auf die aufeinander aufbauenden Regelungen sind in der NOTTBECK (2016) „Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand“ Kapitel 3:

„Elemente der Eisenbahntrassierung“ detailliert aufbereitet. Im Folgenden werden die Grundlagen und Besonderheiten bei der Eisenbahntrassierung für Bereiche eines Bahnsteiges erläutert.

Die Bemessung der Linienführung wird in Deutschland gemäß der Ril 800.0110 der DB Netz AG durchgeführt. In der Richtlinie sind Vorgaben zu den verschiedenen Trassierungselementen definiert. „Diese Richtlinie ist vom Eisenbahn-Bundesamt als Technische Baubestimmung eingeführt und gilt als anerkannte Regel der Technik im Sinne § 2 Abs. 1 der EBO“ (DB Netz AG 2015). In der Ril 813 „Personenbahnhöfe Planen“ sind ebenfalls Regelungen für die Linienführung in Bezug auf die Bahnsteigplanung beschrieben (DB Netz AG 2012A).

### 3.3.1 Horizontale Trassierungselemente

Im Grundriss, beziehungsweise der x-, y- Ebene, gibt es verschiedene horizontale Elemente. In Abbildung 5 sind die horizontalen Elemente dargestellt. Diese sind die Gerade, der Kreisbogen und der Übergangsbogen in Form einer Klothoide oder einer anderen Form.

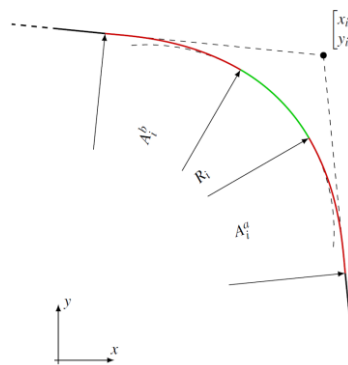


Abbildung 5: horizontale Elemente der Achse (Gerade (schwarz), Tangente (schwarz gestrichelt), Übergangsbogen (rot) mit Übergangsradius (A) und Kreisbogen (grün) mit Radius (R), Krümmungswechsel der Radien werden mit Pfeilen abgebildet (Darstellung angepasst auf elementare Elemente von MARKIĆ ET AL. (2017))

Die Gerade verbindet zwei Punkte auf kürzestem Weg miteinander und besitzt dabei keine Krümmung. Auf Grund der nicht vorhandenen Krümmung wirken auf die Bahn weniger Kräfte und Zwängungen als auf einem Kreisbogen. Die fehlende Krümmung ermöglicht die gleichmäßige Verteilung von den auf die Gleise wirkenden Kräften und es entstehen keine Fliehkräfte. Dies ermöglicht eine Bemessung der Trassierung einer Geraden mit wenig Anforderungen. Bei dem Wechsel zwischen Trassierungselementen ermöglicht eine Regellänge der Geraden ( $reg\ l_g$ ) das Verebben dynamischer Einwirkungen. Die Regellänge ergibt sich aus der Geschwindigkeit ( $v$  in [km/h]) multipliziert mit einem Faktor der in Formel (1) abgebildet wird.

$$reg\ l_g = 0,40 \times v [m] \quad (1)$$

Falls die Regellänge nicht eingehalten wird, kann mit einer Mindestlänge bemessen werden. Der Faktor für die Mindestlänge ist in der Ril 800.0110 definiert (DB Netz AG 2015).

Mit Hilfe eines Kreisbogens kann die Richtung der Linienführung verändert werden. Ein Kreisbogen ist definiert durch eine konstante Krümmung die ungleich Null ist. Neben der Länge, wird hauptsächlich der Radius für einen Kreisbogen als Definitionsparameter genannt. Weitere Parameter sind die Überhöhung, der Überhöhungsfehlbetrag, die Überhöhungsrampe und der Übergangsbogen.

Die Länge des Kreisbogens ( $l_b$ ) wird mit dem gleichen Verfahren wie die Länge einer Geraden in Formel (1) bemessen.

Der Radius ( $r$ ) des Gleisbogens ergibt sich, dargestellt in Formel (2), aus der Geschwindigkeit ( $v$  in [km/h]), dem Überhöhungsbetrag ( $u$  in [mm]) und dem Überhöhungsfehlbetrag ( $u_f$  in [mm]).

$$r = 11,8 \times \frac{v^2}{u + u_f} \text{ [m]} \quad (2)$$

Der Radius sollte allgemein kleiner als 25.000 m sein. Die Gleisbogenradien an Bahnsteigen werden mit einem Radius größer oder gleich 500 m bemessen werden (DB Netz AG 2015).

Die Überhöhung dient dazu die Fliehkräfte in einem Kreisbogen abzumindern. Der Überhöhungswert ist die Differenz zwischen der bogenäußeren Schiene und der bogeninneren Schiene.

In Bereichen von Bahnsteigen sollte laut der DB Netz AG Ril 813.0201A03 die Überhöhung nicht größer als 60 mm sein (DB Netz AG 2012D). In der Ril 800.0110 werden die Werte der Überhöhung mit Hilfe von Geschwindigkeit, Radien und Überhöhungsfehlbetrag berechnet. Für Bereiche an Bahnsteigen sollte der Wert zwischen dem Mindestüberhöhungsbetrag und dem Regelwert angesetzt werden. Der maximale Grenzwert, vorgegeben durch die technischen Spezifikationen für die Interoperabilität (TSI), liegt in Bereichen von Bahnsteigen bei 110 mm (DB Netz AG 2015).

Der Überhöhungsfehlbetrag ist die Differenz zwischen der ausgleichenden Überhöhung und der tatsächlichen Überhöhung. Dieser sollte 130 mm bei einem Radius von unter 650 m nicht überschreiten. Die Ermessensgrenze der Überhöhung bei Bahnsteigen liegt bei 110 mm. Somit ist die Grenze des Überhöhungsfehlbetrags für die Bemessung des Bahnsteiges nicht ausschlaggebend.

Die Überhöhung wird mit Hilfe von Überhöhungsrampen über den Verlauf des Kreisbogens auf- und abgebaut. Dies wird in Deutschland gemäß Ril 800.0110 mit der Verwindung der Gleisfläche um die bogeninnere Schiene realisiert. Die Regelform ist die gerade Überhöhungsrampe, dabei wird die Überhöhung linear stetig verändert. Andere Formen der Überhöhungsrampen sind die S-förmige Überhöhungsrampe und die Überhöhungsrampe nach Bloss. Die detaillierte Bemessung der Überhöhungsrampe ist in der Ril 800.0110 (DB Netz AG 2015) und (NOTTBECK 2016) beschrieben.

In dem Bereich zwischen einer Geraden, mit der Krümmung Null, und einem Kreisbogen, mit einer bestimmten Krümmung, wird ein Übergangsbogen mit einer stetig verändernden Krümmung trassiert. Damit wird eine ruckfreie Fahrt der Bahn ermöglicht. Es gibt viele verschiedene Arten der Übergangsbögen. Die Deutsche Bahn präferiert die Klothoide (stetiger Krümmungswechsel), dann den Übergangsbogen nach Bloss (zweite Ableitung des Grundriss-Verlaufes anhand der Überhöhungsrampe oder der Cosinus-Funktion), und schließlich den S-förmigen Übergangsbogen nach Helmert (zweifache Integration des Krümmungsverlaufes). Die detaillierte Ausführung wird im Rahmen dieser Arbeit nicht vertieft und kann in NOTTBECK (2016) und den entsprechenden Richtlinien nachgelesen werden.

Der Übergangsbogen, der zwei verschiedenen Trassierungselement verbindet benötigt ausreichenden Abstand, um den Krümmungsübergang ruckfrei zu ermöglichen. Der Abstand zwischen den Trassierungselementen wird Abrückmaß genannt (DB Netz AG 2015, NOTTBECK 2016).

### 3.3.2 Vertikale Trassierungselemente

Die vertikalen Trassierungselemente werden in der Gradienten im Aufriss abgebildet. Die Gerade und die Ausrundungskurven zwischen zwei Geraden stellen die elementaren Trassierungselemente da und werden in Abbildung 6 dargestellt.

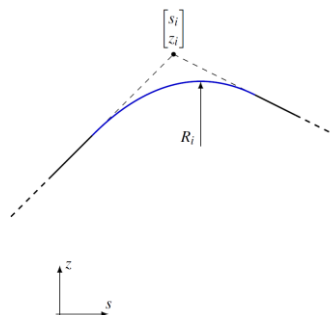


Abbildung 6: vertikale Elemente der Achse (Gerade (schwarz), Tangente (schwarz gestrichelt) und Ausrundungsbogen (blau) mit Radius ( $R$ ) des Ausrundungsbogens in der  $s$ -,  $z$ -Ebene (Darstellung angepasst auf elementare Elemente von MARKIĆ ET AL. (2017))

Die Gerade wird beschrieben mit der Längsneigung, diese beschreibt um wie viel die Bahnstrecke steigt oder fällt. Der Minimalwert von 1,00 ‰ dient zur stetigen Entwässerung. Der Maximalwert der Längsneigung soll aus fahrdynamischen Gründen bei S-Bahnen auf freier Strecke 40,00 ‰ nicht überschreiten. In Haltebereichen, beispielsweise Bahnsteigen, ist bei Neubauten eine Längsneigung kleiner gleich 2,50 ‰ einzuhalten (DB Netz AG 2015).

Die Ausrundungskurve beschreibt den Bereich zwischen zwei Geraden. Es gibt zwei verschiedene Arten der Ausrundungskurven. Einmal die Wanne, die über den Tiefpunkt zwischen zwei Geraden verläuft und zum anderen die Kuppe, die über einen Höhepunkt konstruiert wird. Die Ausrundungskurven zwischen den Längsneigungen sollten nicht kleiner als 20 m sein. Die genauen Planungswerte für die Länge der Ausrundungsbogen können in der Ril 800.0110 nachgelesen werden.

Bei der Trassierung ist darauf zu achten, dass sich Ausrundungen und Verwindungsbereiche nicht überschneiden (DB Netz AG 2015).

### 3.3.3 Implementierung der Achse in die Datenmodelle

In Kapitel 3.3.1 und 3.3.2 werden die Elemente einer Achse definiert. Für die Implementierung in ein Datenmodell sollten folgende Entitäten definiert werden:

- horizontale Achse definiert in der x-, y- Ebene des Koordinatensystems
- vertikale Achse in der z- Koordinate entlang der zuvor definierten horizontalen Achse
- einer Bezugsachse
- eine 3D-Achse die aus der horizontalen und vertikalen Achse oder aus den raumbezogenen Geodaten berechnet wird

(BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018)

## 3.4 Bemessungsgrundlagen für Bahnsteige

Für die Dimensionierung eines Bahnsteiges sind zu Beginn der Planung, Bemessungsgrundlagendaten erforderlich. Im Folgenden werden die Wesentlichsten vorgestellt.

Die tägliche Anzahl der Ein- und Aussteiger eines Personenbahnhofes entspricht dem Reisenaufkommen pro Tag. Dies wird mit einem Nahverkehrsgutachten hinsichtlich der Reisendenverteilung über den Tagesablauf für den Prognosezeitraum ermittelt. Die bemessungsrelevante Reisendenzahl wird für die Lastfälle Normal- und Spitzenverkehr ermittelt (DB Netz AG 2012B). Diese ist für die Berechnung der ausreichenden Bahnsteigfläche (DB Netz AG 2009) und der Bahnsteigzugangsbreite (DB Netz AG 2012F) erforderlich. Grundsätzlich

gilt, je mehr Personen sich auf dem Bahnsteig befinden, desto größer muss die Bahnsteigfläche / zugangsbreite sein.

Die Mindestdurchgangs- und Gehspurbreite ist abhängig von der Art des Bahnsteiges (Außen- / Mittelbahnsteig) und von den auf dem Bahnsteig befindlichen Hindernissen in Form von Bahnsteigausstattungs-elementen (DB Netz AG 2012E).

Die Soll-Gleislage der Bezugsgleise am Bahnsteig ist essenziell für die Bemessung des Bahnsteiges, da sich die Bahnsteigkante und somit der Bahnsteig an der Achse der Gleislage orientiert. Die Einbaumaße für das Abstandsmaß ( $a_b$ ) und das Höhenmaß ( $h_b$ ) ist in Ril 813.0201A03 definiert. Sie sind abhängig von der Nennhöhe des Bahnsteiges. Die Nennhöhe des Bahnsteiges entspricht der Differenz zwischen der Höhe der Schienenoberkante und der Bahnsteigkante. Diese ist bei Bahnsteigen standardisiert und beträgt 960 mm, 760 mm, 550 mm oder 380 mm über der Schienenoberkante. Im Falle einer Überhöhung im Bahnsteigbereich werden die Maße gemäß Abbildung 7 bemessen. Je nach Überhöhung der Bahnsteiggleise verändert sich das äußere und innere Abstandsmaß und das äußere und innere Höhenmaß zur Bahnsteigkante. Das innere Höhenmaß ( $h_{Bi}$ ) wird kleiner und das innere Abstandsmaß ( $a_{Bi}$ ) wird größer, desto größer die Überhöhung ( $u$ ) ist. Analog dazu wird das äußere Höhenmaß ( $h_{Ba}$ ) größer und das äußere Abstandsmaß ( $a_{Ba}$ ) kleiner je größer die Überhöhung wird (DB Netz AG 2012D).

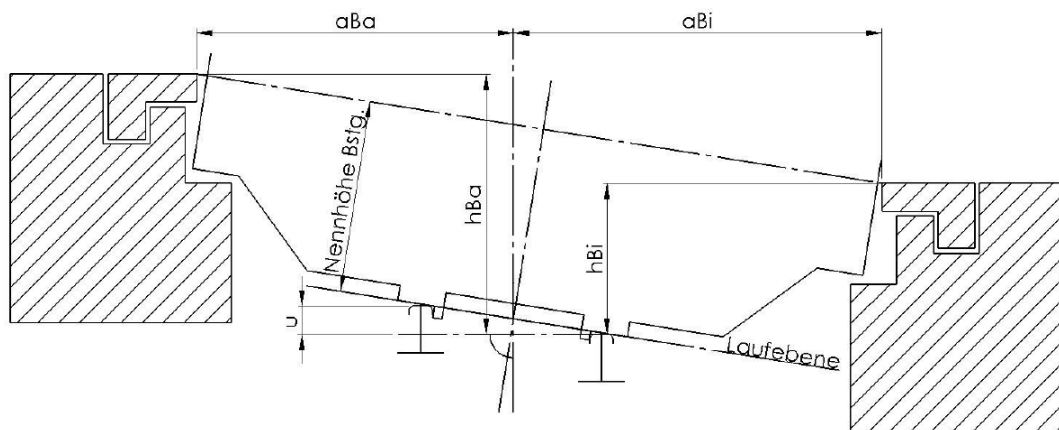


Abbildung 7: Abstandsmaß ( $a_b$ ) und Höhenmaß ( $h_b$ ) mit Gleisen und Bahnsteigkanten visualisiert (DB Netz AG 2012D)

Das Abstandsmaß auf der Bogenaußenseite muss gemäß Ril 813.0201A03 zusätzlich erhöht, wenn

- die Bahnsteigvorderkante senkrecht ist und die Überhöhung mehr als 20 mm beträgt.
- es mehrere Trassenelemente gibt, die mit oder ohne Übergangsbogen verbunden werden.
- Weichen im Bereich des Bahnsteiges vorhanden sind.

(DB Netz AG 2012D)

Die Zuglänge ist ein wichtiger Parameter, um die Bahnsteiglänge zu bemessen. Die Bahnsteiglänge entspricht einer bestimmten Regellänge, von beispielsweise 140,0 m, 170,0 m und 210,0 m. Sie bezieht sich auf die Zuglänge zuzüglich 5,0 m für ungenaues Halten. Weitere Regellängen sind im Bereich zwischen 60,0 m und 405,0 m in der RIL 813.0201 definiert (DB Netz AG 2012c).

Bei der Bemessung der Bahnsteigbreite wird zuerst die Mindestbahnsteigbreite an Querschnitten mit und ohne Hindernisse festgelegt. Darauf folgt die Ermittlung der Breite der Bahnsteige und der Zugänge entsprechend der Prognose für das Verkehrsaufkommen. Schließlich werden beide zuvor beschriebenen Breiten miteinander abgestimmt.

Die Mindestbreite des Bahnsteiges bei einer Geschwindigkeit unter 160 km/h und ohne maßgebende Einbauten ergibt sich aus dem Gefahrenbereich von 0,9 m je Bahnsteigkante und mindestens zwei Gehspurbreiten je 0,8 m für Personen. In Ausnahmefällen kann am Ende des Bahnsteiges die Mindestbreite gemäß RIL 813.0201 (8) reduziert werden (bei Mittelbahnsteigen auf 2,8 m und bei Außenbahnsteigen auf 2,0 m) (DB Netz AG 2012c).

Die maßgebenden Einbauten bei Mittelbahnsteigen sind im Regelfall die Bahnsteigzugänge und die Aufbauten auf dem Bahnsteig. Die Mindestbreite ergibt sich aus der Breite des Zugangs und der Differenz aus dem Mindestabstand fester Bauteile nach der EBO und dem Einbaumaß (vgl. Kapitel 3.4).

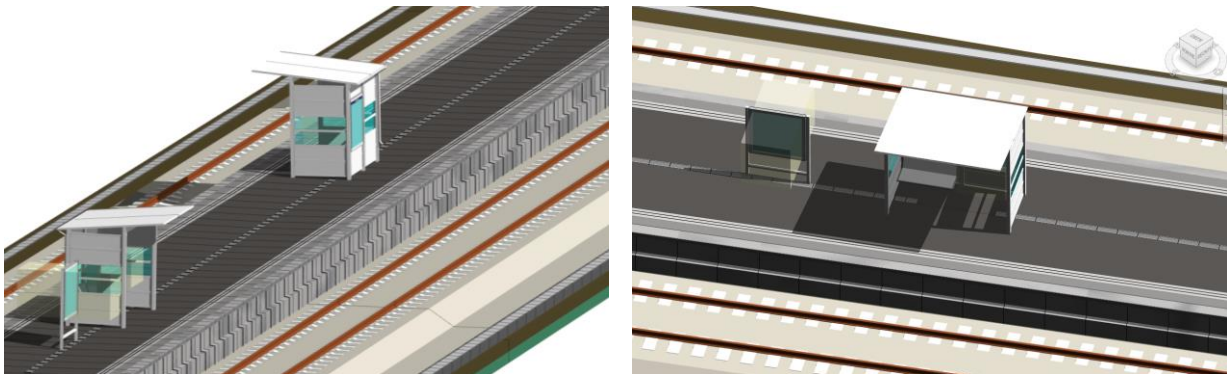


Abbildung 8: Darstellung eines realen Bestandsmodell eines Mittelbahnsteiges mit Schotteroberbau (hellgrau), Gleisen (braun), Bahnsteigkorpus (dunkelgrau) und den Ausstattungselementen Wind- /Wetterschutzhaus und Vitrine aus verschiedenen Perspektiven (links und rechts)

Die Bahnsteigbreite für das Verkehrsaufkommen ist die Summe ausfolgenden Komponenten:

- Breite für aus dem Zug austiegenden Personen je Personendichte des Verkehrsbereiches
- Breite für wartende Einsteiger am Bahnsteig je Personendichte des Aufenthaltsbereichs
- Breite für Zugänge, Stauraum und Service
- Breite für den Gefahrenbereich bezüglich der Anzahl der Bahnsteigkanten

(DB Netz AG 2009)



---

Zum anderen müssen die Zugänge breit genug sein, um die Aussteiger des Zuges auf dem Bahnsteig abzutransportieren bevor der nachfolgende Zug neue Personen bringt. Hierfür ist die Anzahl der Aussteiger notwendig. Diese verwenden die Zugänge bei Verlassen des Bahnsteiges in einer Gruppe und benötigen die Bahnsteigräumzeit. Die Einsteiger werden mit einer Gehspurbreite pauschal mitkalkuliert (DB Netz AG 2012F). Die Anzahl der aussteigenden Personen kann im Falle einer Fahrtreppe gemäß Ril 813.0202A01 reduziert werden. Bei der Bemessung von Mittelbahnsteigen ist je nach Taktung das gleichzeitige Halten von zwei Zügen zu beachten. Im Falle von mehreren Zugängen werden die Personenströme verteilt angerechnet (DB Netz AG 2012F).

Für beide Bemessungen werden die dafür relevanten Personenzahlen ermittelt. Dazu werden für den Lastfall Spitzenverkehr und Normalverkehr die Ein- und Aussteigerzahlen pro Zug verwendet. Diese stammen aus einer Verkehrsprognose oder ersatzweise aus der Tagesbelastung der Personenverkehrsanlage. Dabei ist eine Umrechnung von bahnsteigspezifische in zugspezifische Werte gemäß Ril 813.0201A04 erforderlich. Bei gegenwärtigen Zählungen wird ein Prognoseaufschlag einberechnet (DB Netz AG 2012E).

## 4 Räumlich-semantisches Modell

### 4.1 Definitionen

#### 4.1.1 Semantik

Im Allgemeinen steht der Begriff der Semantik für die Bedeutung oder Interpretation eines Wortes, Satzes, oder einer anderen Sprachenform (HOUGHTON MIFFLIN HARCOURT 2019).

Im Bereich der Informatik beinhaltet der „[...] Begriff *Semantik die Bedeutung von Daten oder Informationen*“ (KOCH 2015). Für die Modellierung von Bauwerksinformationen sind semantische Informationen essenziell, um das Bauwerk ganzheitlich beschreiben zu können (KOCH 2015).

Die fachlich wichtigen Eigenschaften werden in dem Bereich der Geoinformatik mit dem Begriff *Thematik* beschrieben und mit Attributen zu dem Modell hinzugefügt (LANGE 2002).

#### 4.1.2 Topologie

Die räumliche Beziehung von verschiedenen Elementen wird durch die Topologie beschrieben. Eine anschauliche Beschreibung des Topologie Begriffes erfolgt mit Hilfe eines Luftballons. Zuerst befindet sich der Luftballon im aufgeblasenen Zustand und es wird beispielsweise eine Zeichnung darauf abgebildet. Die verschiedenen Objekte der Zeichnung haben eine bestimmte topologische Beziehung untereinander. Bei einer Volumenzu- / abnahme des Luftballons verändert sich die absolute Lage der Objekte (Geometrie), dabei bleibt die relative Lage (Topologie) der Objekte gleich. Das bedeutet Topologie beschreibt die Beziehung verschiedener Objekte. Es wird zwischen verschiedenen Beziehungstypen unterschieden, z.B. Punkt zu Punkt oder Punkt zu Linie (LANGE 2002).

#### 4.1.3 Positionierung

Die Positionierung der geometrischen Elemente wird überwiegend mit Hilfe von Koordinaten beschrieben. Die Koordinaten stammen aus Modellen, die die reale Welt abbilden. Diese entsprechen jedoch nicht exakt der Realität, diese Abweichung kommt von der Darstellung der Erde auf einer flachen Karte, die auf Grund der ellipsoiden Form der Erde nicht ohne Verzerrung möglich ist. Bauprojekte befinden sich meist nur auf einem bestimmten Bereich der Erde, dadurch kann die Erde in verschiedenen Bereichen aufgeteilt und diese auf Koordinatensysteme

abgebildet werden. Die Längen- und Breitengrade eines bestimmten Punktes in der realen Welt können somit auf eine bestimmte Koordinate auf dem Koordinatensystem projiziert werden und sollten nach der Rücktransformation wieder am identischen Punkt liegen. Dabei ist zu beachten, dass der Abstand zwischen zwei Punkten auf der realen Erdoberfläche nicht der Wurzel zwischen den zwei Punkten entspricht, die im Koordinatensystem abgebildet werden (buildingSMART Australasia 2017).

In der Infrastruktur erstrecken sich Projekte über einen großen und linear langen Raum. Bei der Projektion der ellipsoiden, gekrümmten Erde auf ein flaches Koordinatensystem kommt es zu Verzerrungen und Abweichungen. Die BIM-Methode ermöglicht eine genauere Planung als die bisher genutzte konventionelle Planung. Die Abweichung zwischen Planung und dem tatsächlich ausgeführten Projekt ist somit geringer als bei der bisherigen 2D-Planung. Dadurch wird die Ungenauigkeit der Projektion der realen Welt auf das Koordinatensystem erkennbar (MARKIČ ET AL. 2018).

In der Norm „DIN EN ISO 19111 Geoinformation – Koordinatenreferenzsysteme“ und den Veröffentlichungen „Enabling Geodetic Coordinate Reference Systems in Building Information Modeling for Infrastructure“ (MARKIČ ET AL. 2018), „Model Setup IDM Vol 1: Georeferencing BIM“ (buildingSMART Australasia 2017), „Leitfaden Bezugssysteme auf ETRS 89 / UTM“ (DONAUBAUER & KOLBE 2016) wird auf die Grundlagen der Projektion der Erde in Koordinatensystem detailliert eingegangen und somit die Positionierung beschrieben.

#### 4.1.4 Geometrie

In der Geoinformatik wird die Geometrie mit der absoluten räumlichen Lage und der Objektform oder der Objektausdehnung beschrieben. Koordinatensysteme werden als räumliches Bezugssystem genutzt. Lagekoordinaten im metrischen Bezugssystem ermöglichen eine quantifizierbare und objektivierbare Standortbestimmung (LANGE 2002).

Im Folgenden wird ein Überblick über die wichtigsten Elemente die bei der geometrischen Modellierung verwendet werden beschrieben.

Freiformkurven bestehen aus Polynomen die aneinander gereiht werden. An den Schnittstellen der Teile müssen Stetigkeitsbedingungen eingehalten werden um eine akkurate Kurve zu erhalten. Es gibt mehrere Arten von Freiformkurven, zum einen die Beziér-Kurven, die B-Splines und die non-uniform rational B-Splines (NURBS). Sie passieren alle einen definierten Start- und Endpunkt. Dazwischen liegen mehrere Kontrollpunkte die von den Freiformkurvenarten unterschiedlich approximiert werden. Die Beziér-Kurven werden mit

einem Polynomgrad gebildet der an die Anzahl der Kontrollpunkte verknüpft ist. Bei komplexen Kurven mit vielen Kontrollpunkten führt dies zu sehr hochgradigen Polynomen. Die B-Splines sind eine Weiterentwicklung der Bezier-Kurven. Es kann die Kurve mit einem Polynomgrad unabhängig von der Anzahl der Kontrollpunkte gebildet werden. Die Grundlage für die NURBS sind wiederum die B-Splines. Die Kontrollpunkte können gewichtet werden und damit die Form der Kurve für beispielsweise Kegelschnitte anzupassen. Dies bildet die Basis für die Modellierung von gekrümmten Kurven (BORRMANN & BERKHAHN 2015).

Körper sind 3D-Objekte, diese können mit einem Drahtgittermodell, einem Oberflächenmodell oder einem Volumenmodell beschrieben werden. Die Modelle sind in ihrer Komplexität und Fähigkeit unterschiedlich. Die Vor- und Nachteile variieren je nach Anwendung. Die Volumenmodelle können explizit und implizit beschrieben werden. Ein bekannter Vertreter der expliziten Modelle ist das Boundary Representation (BRep) Modell. Bei diesem Modell werden die Objekte mit den wesentlichen Koordinaten beschrieben, aus den verbundenen Koordinaten entstehen Kanten und Flächen. Der Bildungsvorgang des Objektes kann nicht nachvollzogen werden und ist schlecht zu modifizieren. Je ausgeprägter die Geometrie desto größer ist die Datei. Jedoch ist dieses Modell gut interpretierbar und hat eine sehr hohe Genauigkeit in der Geometriemodellierung. Bei den impliziten Modellen, wie Constructive Solid Geometry (CSG) können die Modellierungsschritte des Objektes nachvollzogen werden und später Änderungen vorgenommen werden. Der für die geometrische Objektmodellierung viel verwendete Modellierungstyp ist unter anderem der Sweep. Bei diesem wird ein Querschnitt entlang eines Pfades geleitet und dadurch ein Volumenmodell erzeugt. Die Größe der Datei ist geringer als bei dem BRep Modell (BORRMANN ET AL. 2015A, BORRMANN & BERKHAHN 2015).

#### 4.1.5 Objektmodell

Angelehnt an die Geoinformatik kann ein Bahnsteig als Geoobjekt klassifiziert werden. Die abstrakte Repräsentation des realen Bahnsteiges wird mit der Semantik und dem Raumbezug, hinsichtlich Geometrie und Topologie, beschrieben. Die zeitliche Variabilität wird in der Geoinformatik als Unterscheidungsmerkmal verwendet (LANGE 2002).

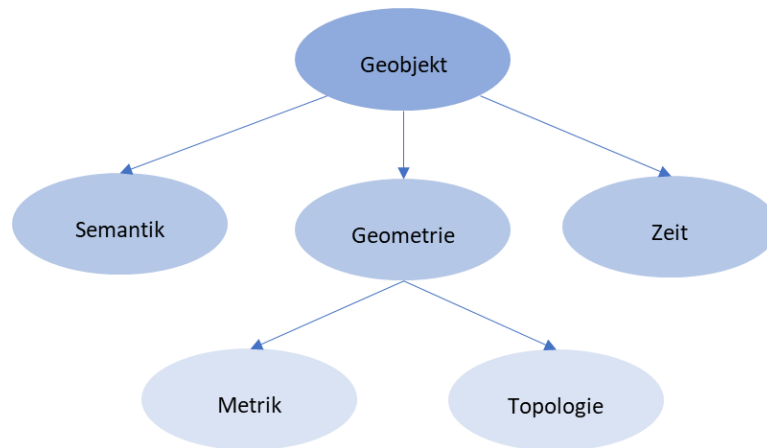


Abbildung 9: Klassifizierung eines Geobjektes nach der Geoinformatik (LANGE 2002) angelehnt an die Darstellung eines Geobjekts von TIMPF (2010)

Bei der BIM-Methode wird die zeitliche Variabilität anders als in der Geoinformatik definiert und wird bei der Beschreibung eines Objekts als Information eingeordnet. Das Objekt wird mit Semantik und Geometrie beschrieben. Die Geometrie beinhaltet die Positionierung und die räumliche Ausdehnung. Die Semantik umfasst alle weiteren Informationen, die nicht geometrisch sind. Die Topologie wird der Semantik zugeordnet, da dies als nicht geometrische Informationen eingeordnet wird. Diese Einordnung differenziert mit der Definition der geometrischen Modellierung. In dieser wird die Topologie der Geometrie zugeordnet ist (BORRMANN & BERKHAHN 2015). Im Rahmen dieser Arbeit wird die Topologie nicht als Element der geometrischen Modellierung betrachtet, sondern auf die Differenzierung zwischen der Semantik und der Geometrie eingegangen. Daher kann die Topologie der Semantik zugeordnet werden.

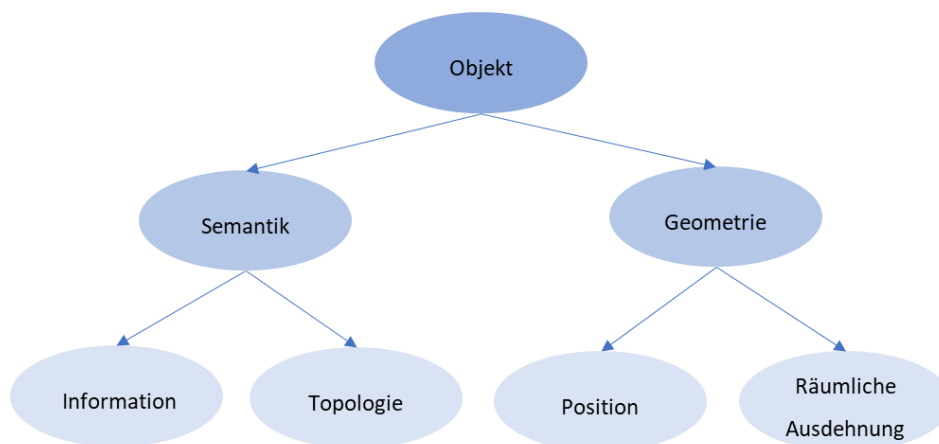


Abbildung 10: Klassifizierung eines Objektes nach der BIM-Methode angelehnt an die Darstellung eines Geobjekts von TIMPF (2010)

#### 4.1.6 Räumlich-semantisch kohärentes Modell

In den Standards ISO 191XX werden die raumbezogenen Informationen in zweifacher Form, der Geometrie und der Semantik, abgespeichert. Die Modelle sollten bei übereinstimmenden Objekten eine zusammenhängende Struktur der Geometrie und der Semantik haben. Die Datenqualität der Modelle variiert je nach Verknüpfungsgrad der Semantik und der Geometrie. Es gibt Modelle, die besitzen nur Geometrie und keine Semantik, die Struktur wird in Abbildung 11 dargestellt (STADLER & KOLBE 2007).

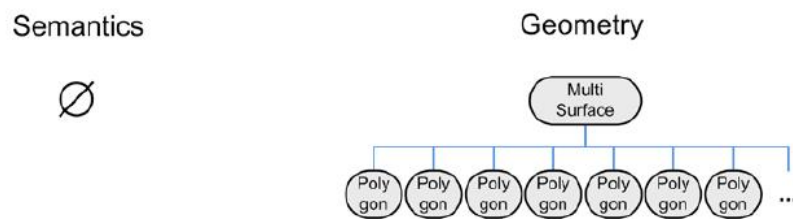


Abbildung 11: Modell ohne semantische Informationen (Darstellung von STADLER & KOLBE (2007) mit angepassten Kontrasten)

Das Modell sollte möglichst reich an Information sein, um diese reibungslos weitergeben zu können. Dies ist realisierbar mit einem Modell, das die gleiche Struktur in Semantik und Geometrie besitzt und die Objekte verknüpft sind. Zwischen den Modellen mit nur Geometrie (vgl. Abbildung 11) beziehungsweise nur Semantik und einem vollständig zusammenhängenden räumlich-semantischen Modell liegen weitere Modelle mit unterschiedlicher Informationsstruktur (vgl. Abbildung 12). Diese sind einfache Objekte mit unstrukturierter Geometrie, einfache Objekte mit komplexer geometrischer Struktur und komplexe Objekte mit unstrukturierter Geometrie. In Abbildung 12 dargestellt, wird ein komplexes Objekt mit strukturierter Geometrie für die theoretische Struktur eines Gebäudemodells abgebildet. In diesem Modell ist die semantische Struktur kohärent zu der geometrischen (STADLER & KOLBE 2007).

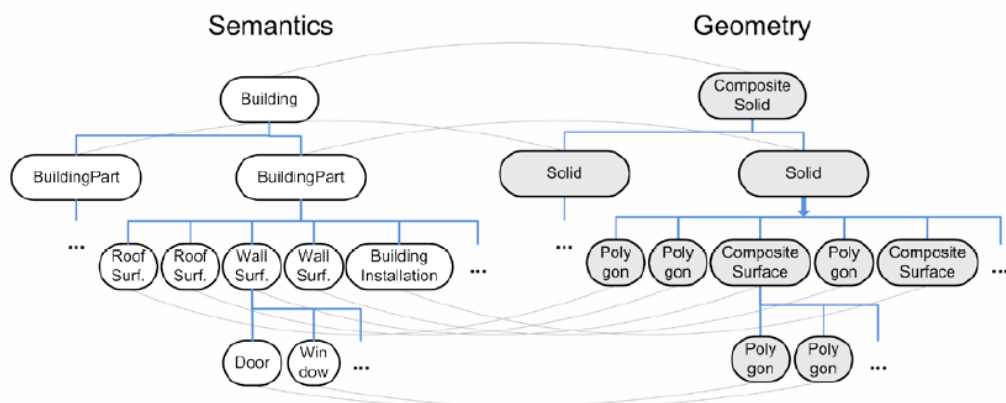


Abbildung 12: Räumlich-semantisches zusammenhängendes Umrandungsmodell bei dem die Semantik mit der Geometrie verknüpft ist (Darstellung von STADLER & KOLBE (2007) mit angepassten Kontrasten)

## 4.2 Räumlich-semantisches Modell für den Bahnsteig inklusive Fachplanungen

Bahnsteige werden in Deutschland nach den Richtlinien der DB AG geplant und durchgeführt (vgl. Kapitel 3.1). Die Richtlinien sind die Basis für die Standardisierung von Bahnsteigen. Die Effizienz mit der BIM-Methode kann besonders bei standardisierten Objekten gesteigert werden. Für einen reibungslosen Austausch ist es wichtig zu definieren welche semantischen und geometrischen Informationen zwischen den verschiedenen Akteuren ausgetauscht werden sollen. Für den Bahnsteig wird ein räumlich-semantisches Modell aufgestellt (vgl. Kapitel 4.1.6). Dazu werden die räumlichen und physischen Objekte eines Bahnsteiges in Abbildung 13 definiert. Die räumlichen Objekte dienen als Platzhalter, für die einzusetzenden physischen Objekte.

Im Rahmen dieser Arbeit wird das räumlich-semantische Modell für nationale kleinere bis mittlere Personenbahnsteige, die mit der Ril 813 bemessen werden, entworfen. Die Entwurfsgeschwindigkeit der Züge ist unter 160 km/h. Der Oberbau ist Schotteroberbau mit Schwellen und keine feste Fahrbahn.

In Abbildung 13 werden die räumlichen und die dazugehörigen physischen Entitäten dargestellt. Die räumlichen Objekte sind das Lichtraumprofil, die Ausstattung, der Bahnsteigkorpus und der Oberbau. Die physischen Entitäten, die dem Oberbau angehören sind die Schiene, Schwelle, der Schotter und der Kabelschacht / -kanal. Im Lichtraumprofil kann später die S-Bahn fahren. Der Bahnsteigkorpus enthält unter anderem die Bahnsteigkante und die Entwässerung. Als Vertreter der Ausstattungselemente wurde das Wind- und Wetterschutzhaus gewählt, da dies die größten geometrischen Abmessungen besitzt und für die anderen Ausstattungselemente somit als Repräsentant verwendet werden kann.

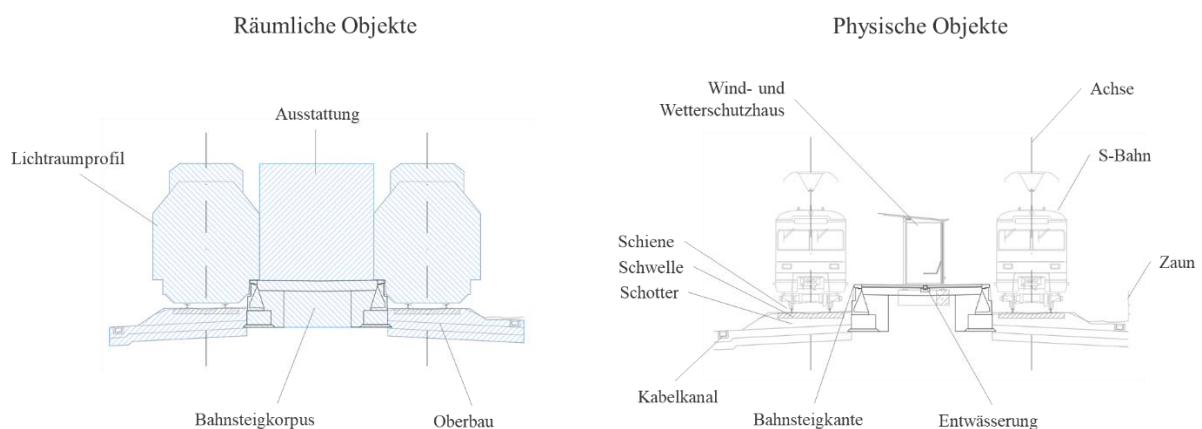


Abbildung 13: Räumliche und physische Objekte eines Bahnsteiges (eigene Darstellung angelehnt an ein Tunnelmodell von BORRMANN ET AL. (2014))

Aus dieser Einteilung kann ein räumlich-semantisches Modell mit physischen Objekten für den Bahnsteig definiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur die Objekte des Lichtraumprofils, des Oberbaus, des Bahnsteigkorpus und teilweise der Ausstattung benötigt. Die anderen Objekte, der technischen und kundenorientierten Ausstattung und der Zuwegung werden zur Ergänzung dargestellt. Diese werden gemäß der HOAI 2013 (Kapitel 2.4 und Kapitel 3.1) von Fachplanungen übernommen.

Projekt, Eisenbahn und Station sind die übergeordneten Objekte. Die räumlichen Elemente werden in Abbildung 14 blau dargestellt. Die physischen Objekte sind grün dargestellt. Wobei die Oberbegriffe dieser dunkelgrün und die Objekte hellgrün dargestellt werden. Die physischen Objekte können mit Hilfe von einer Geometrie beschrieben werden. Die Geometrie kann mit Freiformkurvenlinienelementen und impliziten oder expliziten Volumenmodellen beschrieben werden. Welche Geometrie bevorzugt wird ist in Abbildung 14 mit unterschiedlichem Muster der hellgrünen Entitäten dargestellt.

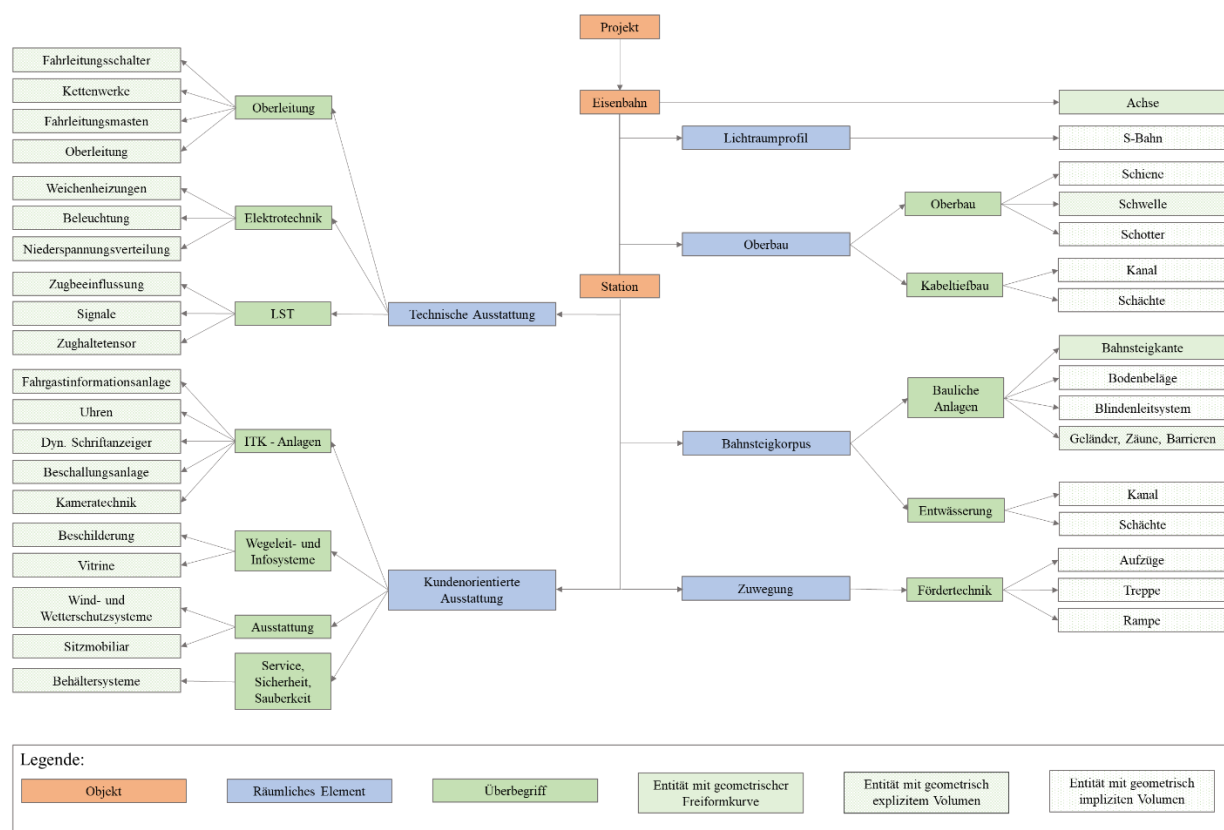


Abbildung 14: Vorschlag für ein räumlich-semantisches Modell eines Bahnsteiges inklusive Fachplanungen, (eigene Darstellung inhaltlich angelehnt an DB Station & Service AG & DB Netz AG (2018))

Die Achse dient als linearer Verlauf für das Lichtraumprofil, den Oberbau und den Bahnsteigkorpus. Die physischen Entitäten dieser räumlichen Elemente orientieren sich folglich alle an der Achse. Die Entitäten der Zuwegung, der technischen und kundenorientierten Ausstattung



---

sind verknüpft mit dem Bahnsteigkorpus, dem Lichtraumprofil und folglich der Achse. Einzelne Entitäten, beispielsweise die Weichenheizung ist verbunden mit der Schiene.

Die Achse und die Bahnsteigkante sollten als Freiformkurve modelliert werden. Die Entitäten, die mit Hilfe einem impliziten Volumen modelliert werden sollen, sind beispielsweise die S-Bahn, die Schiene, der Schotter und der Kanal. Diese Entitäten haben gemein, dass sie entlang der Achse mit einem bestimmten Querschnitt modelliert werden und sich ihre Form je nach Situation verändert. Ein weiterer Grund für eine implizite Darstellung ist, die veränderbare Form der Entität an sich. Schächte beispielsweise sind je nach Situation unterschiedlich hoch und breit und sollten angepasst werden können. Die Entitäten der Zuwegung sollten implizit dargestellt werden, da diese je nach Gelände und Situation variieren. Bei den Entitäten der expliziten Volumendarstellung handelt es sich um standardisierte Elemente, die sich nicht verändern lassen müssen. Schwellen beispielsweise haben je Schwellenmodell eine standardisierte Form und können in dieser Form abgesetzt werden. Die Entitäten der technischen und kundenorientierten Ausstattung können ebenfalls meist explizit verwendet werden.

## 5 Datenmodelle

### 5.1 Allgemeiner Überblick über die geometrischen und semantischen Datenmodelle

Die Speicherung und der Austausch der semantischen und geometrischen Informationen der Objekte wird mit Hilfe der Datenmodelle realisiert. Es gibt unterschiedliche Arten der Datenmodelle. Im Rahmen der BIM-Methode können Datenmodelle little / BIG bzw. Closed- / Open sein (vgl. Kapitel 2.3). Zusätzlich können die Datenmodelle in geometrisch, semantisch und geometrisch-semantisch orientierte Datenmodelle eingeteilt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde von jeder Gruppe möglichst ein Datenmodell ausgewählt und in die betrachteten Datenmodelle aufgenommen. In der Abbildung 15 sind die untersuchten Datenmodelle aufgeführt. Zusätzlich zu diesen Datenmodellen gibt es weitere Datenmodelle, die in dieser Arbeit nicht berücksichtigt werden, da ein bereits untersuchtes Datenmodell eine ähnliche Struktur aufweist oder das Datenmodell für eine Bahnsteigplanung nicht relevant ist.

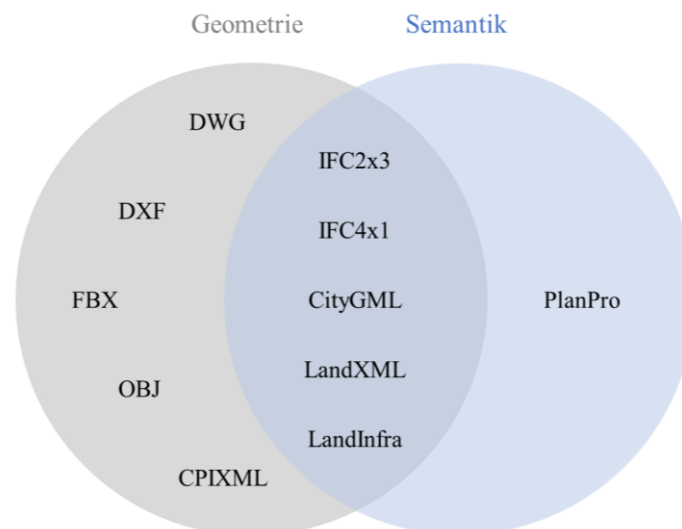


Abbildung 15: Betrachtete Datenmodelle dieser Arbeit eingeteilt nach geometrischen, semantisch-geometrischen und semantischen Inhalten der Datenmodelle

Die allgemeinen Anforderungen an diese Datenmodelle werden in Tabelle 3 dargestellt. Die einzelnen Anforderungen werden wie folgt definiert:

- **Version:** aktuellste, offizielle Version des Datenmodell für eine eindeutige Beurteilung
- **Veröffentlichungsjahr:** offizielles Veröffentlichungsjahr
- **Verantwortliche:** Unternehmen und Interessensgruppen, die das Datenmodell veröffentlichen und weiterentwickeln

- 
- **Nicht proprietär / nativ:** Datenmodell ist nicht herstellergebunden an eine bestimmte Softwareapplikation, sondern entwickelt von non-profit Unternehmen und Interessensgruppen
  - **ASCII:** Datenspeicherung mit Text, für den Menschen lesbar
  - **Binär:** Datenspeicherung mit Zahlensystem, 0 und 1, nicht von Menschen lesbar
  - **XML:** Beschreibung der Dateistruktur in eXtensible Markup Language (XML) (BRACHT ET AL. 2018)
  - **Zertifizierung:** Softwareprodukte können für das Datenmodell zertifiziert werden um einen eindeutig definierten Austausch zu gewährleisten (BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2019A)
  - **Dokumentation:** offene, frei zugängliche Dokumentation zum Erlernen und Verstehen des Datenmodells (WALLNER & BOTH 2017)
  - **Internationalität:** weltweit, in englischer Sprache verwendetes Datenmodell
  - **Anteil an IFC4x1 Entitäten:** prozentualer Anteil von den Entitäten des Datenmodells zu den 801 Entitäten, die in IFC4x1 definiert sind (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018)
  - **Anzahl Entitäten:** Anzahl der Entitäten, die in dem Datenmodell definiert werden, Indikator wie reich an Informationen das Datenmodell ist.

Tabelle 3: Allgemeine Informationen über die betrachteten Datenmodelle

		DWG	DXF	FBX	OBJ	CPIXML	IFC2x3	IFC4x1	CityGML	LandXML	LandInfra	PlanPro
Allgemein	Version	2018 <sup>15</sup>	2018 <sup>15</sup>	7.5	3.0	1.7 <sup>34</sup>	2x3 <sup>36</sup>	4x1 <sup>20</sup>	2.0 <sup>24</sup>	1.2 <sup>28</sup>	1.0 <sup>32</sup>	1.8.0. <sup>35</sup>
	Veröffentlichungsjahr	2018 <sup>15</sup>	2018 <sup>15</sup>	2016	?	2018 <sup>34</sup>	2007 <sup>37</sup>	2018 <sup>37</sup>	2012 <sup>24</sup>	2008 <sup>28</sup>	2016 <sup>32</sup>	2019 <sup>35</sup>
	Verantwortliche	Autodesk Inc. <sup>38</sup>	Autodesk Inc. <sup>15</sup>	Autodesk Inc. <sup>16</sup>	Wavefront Technologies <sup>17</sup>	RIB Software AG <sup>34</sup>	buildingSMART International Alliance for Interoperability <sup>36</sup>	buildingSMART International Ltd. <sup>20</sup>	Open Geospatial Consortium Inc. <sup>24</sup>	Nathan Crews <sup>28</sup>	Open Geospatial Consortium Inc. <sup>32</sup>	DB Netz AG <sup>35</sup>
	nicht proprietär / nativ	✗ <sup>9</sup>	✓ <sup>9</sup>	✗	✓	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓	✓	✓
	ASCII Kodierung	✗ <sup>10</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ bis 6.2	✓ <sup>10</sup>	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>28</sup>	✓	✓
	Binär	✓ <sup>12</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓	✗ <sup>12</sup> / ✓ <sup>17</sup>	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	XML basiert <sup>14</sup>	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>34</sup>	✓	✓	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>28</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Zertifizierung der Software <sup>21</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>21</sup>	✓ <sup>21</sup>	✓ <sup>25</sup>	✓ <sup>28</sup>	✗ <sup>25</sup>	✗
	Dokumentation <sup>1</sup>	✗	✓ <sup>14</sup>	✓ <sup>14</sup> / ✗ <sup>16</sup>	✓ <sup>17</sup>	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>28</sup> / ✗ <sup>39</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Internationalität	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓	✓	✓ <sup>37</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>22</sup>	✓ <sup>22</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	Anteil an IFC4x1 Entitäten <sup>20</sup>	-	10%	-	1%	-	82%	100%	12%	24%	-	16%
	Anzahl Entitäten	?	80	?	6	?	653	801	98	190	?	129
Quellen	<sup>1</sup> (WALLNER & BOTH 2017)	<sup>9</sup> (MAY 2018)	<sup>14</sup> (BRACHT ET AL. 2018)	<sup>16</sup> (AUTODESK 2018B)	<sup>17</sup> (WAVEFRONT 2019)	<sup>34</sup> (RIB Software AG 2018)	<sup>36</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL ALLIANCE FOR INTEROPERABILITY 2007)	<sup>20</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL LIMITED 2018)	<sup>22</sup> (NEJAT-BAKSH 2017)	<sup>28</sup> (LANDXML.ORG 2019)	<sup>32</sup> (SCARPoncini ET AL. 2016)	<sup>35</sup> (SOMMER ET AL. 2019)
	<sup>8</sup> (BORRMANN ET AL. 2017)	<sup>10</sup> (HECKNER & WIRTH 2014)	<sup>15</sup> (AUTODESK 2018A)				<sup>37</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL 2019C)	<sup>21</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL 2019A)	<sup>24</sup> (GRÖGER ET AL. 2012)	<sup>39</sup> (SCARPoncini 2013)		
	<sup>12</sup> (VICTORIA 2016)								<sup>25</sup> (OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM 2019)			
		✓ Anforderung unterstützt		✗ Anforderung nicht unterstützt					?	keine Dokumentation		

Die **Versionen** der Modelle variieren zwischen der Erstversion bei LandInfra bis zu Version 7.5 bei Autodesk Filmbox. Das **Veröffentlichungsjahr** ist mit LandXML im August 2008 ein sehr alter Standard, der in der Weiterentwicklung pausiert hat. LandInfra basiert auf der Version 1.2 von LandXML und wurde weiterentwickelt (SCARPONCINI ET AL. 2016). Die Datenmodelle, die von Autodesk beziehungsweise RIB Software AG als **Verantwortliche** entwickelt werden, werden meist bei der Softwareerneuerung einer neuen Version zugeordnet. Die **Verantwortlichen** von den offenen Datenmodellen wie CityGML und IFC sind nichtstaatliche und nicht kommerzielle Organisationen und Interessensgruppen (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018).

Für einen interoperablen Datenaustausch ist es wichtig ein **natives** Datenmodell zu haben, das nicht ausschließlich die Interessen einer Firma beachtet, da diese meist proprietär sind und hauptsächlich die Anforderungen der Entwicklerfirma abdecken. Beispielsweise entwickelt Autodesk Inc. zusätzlich zum Datenmodell DWG, das für den internen Austausch zwischen den verschiedenen AutoCAD-Anwendungen gedacht war, die offene Schnittstelle DXF (MAY 2018).

In welcher Codierung bzw. Sprache das Datenmodell beschrieben wird ist mit den Kennzeichen **ASCII**, **Binär** und **XML** beschrieben und zur Vollständigkeit mit aufgeführt.

Die **Zertifizierung** ist bei den meisten nativen Datenmodellen möglich. Beispielsweise bei IFC oder CityGML ist die Zertifizierung der eigenen Software gegen Entgelt zu erwerben (BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2019A, OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM 2019). Andere **Zertifizierungen** sind hingegen kostenfrei erhältlich wie bei dem Datenmodell LandXML (LANDXML.ORG 2019).

Die **Dokumentationen** werden wie bei der Zertifizierung von den offenen Datenmodell bereitgestellt. Diese sind für alle frei verfügbar und die Softwareapplikationen können damit eine Import-/ Exportschnittstelle implementieren. Für die proprietären Datenmodelle FBX und DXF, die von Autodesk für den Austausch gedacht sind werden die Dokumentationen offengelegt. Jeder Softwarehersteller hat somit die gleichen Möglichkeiten wie bei offenen Datenmodellen (BRACHT ET AL. 2018).

**International** sind alle betrachteten Datenmodelle außer PlanPro. Dieses Datenmodell basiert auf nationalen Richtlinien, ist somit nur für den deutschen Markt von Bedeutung und benötigt daher nicht unbedingt eine internationale Ausrichtung. Die Nutzung der englischen Sprache ist für die internationale Anwendung der Datenmodelle essenziell, jedoch wird für die nationale Anwendung die Landessprache meist bevorzugt.

Die größte **Anzahl an Entitäten**, der untersuchten Datenmodelle, besitzt IFC4x1 mit 801 Entitäten (BUILDINGSMART INTERNATIONAL ALLIANCE FOR INTEROPERABILITY 2007). Eine große Anzahl an Entitäten deutet auf ein informationsreiches Datenmodell hin. LandXML beinhaltet im Vergleich nur 190 Entitäten (AMANN & BORRMANN 2015). Die Entitäten der IFC4x1 beschreiben hauptsächlich Entitäten des Hochbaues, so dass für Infrastrukturprojekte wie die Bahnsteigplanung trotz der großen Anzahl der Entitäten kaum relevante Entitäten vorhanden sind. LandXML besitzt 20% der Entitäten von IFC4x1 und kann aufgrund seiner Infrastrukturausrichtung die Achse in ähnlicher Weise beschreiben wie IFC4x1. LandXML fehlen Hochbauentitäten, die jedoch für Infrastrukturprojekte eine untergeordnete Rolle spielen (CREWS 2008). Die nativen Datenmodelle legen meist keine Dokumentation offen, damit ist es nicht möglich die exakte Anzahl der Entitäten anzugeben. Dies ist in Tabelle 3 mit einem Fragezeichen dargestellt.

Für die Analyse der Datenmodelle ist es günstig, wenn der Code untersucht werden kann. Dazu wurde ein Bahnsteig mit Hilfe von einem Programmsystem für Verkehrs- und Infrastrukturplanung (ProVI) in der Version 6.0 auf Grundlage eines realen Projektes modelliert. Die Anforderungen an diesen Bahnsteig entsprechen den in Kapitel 4.2 beschriebenen Rahmenbedingungen. Dieser Bahnsteig wurde mit Hilfe von ProVI in verschiedenen Datenmodellen exportiert. ProVI exportiert auf zwei unterschiedliche Arten. Einerseits mit dem Export der Modellkollektion zu IFC2x3, IFC4x0, IFC4x1, CPIXML und FBX. Andererseits mit Hilfe einer Export Schnittstelle zu ASCIBAHN, OKSTRA, LandXML, Civil3D, ALKIS, DWG und Google Earth.

## 5.2 Beschreibung der in dieser Arbeit betrachteten Datenmodelle

### 5.2.1 Autodesk DraWinG File (DWG)

Das Datenmodell DraWinG File wurde ursprünglich von Autodesk für den Austausch zwischen den verschiedenen Autodesk Produkten entwickelt. Das Format wird inzwischen von vielen Softwareprodukten im CAD-Bereich als nicht-natives Format unterstützt. Es ist ein vektororientiertes Format, das die Geometrie anhand von Punkten, Linien und Polygonen beschreibt. Es können auch 3D-Objekte übergeben werden, jedoch bilden die Grundlage größtenteils kleinere Bauteile mit einfacher Geometrie. Mit dem Datenmodell werden einzelne Schnitte übergeben, dabei geht die Logik des Modells verloren (MAY 2018).

## 5.2.2 Autodesk Drawing Interchange File Format (DXF)

Das Drawing Interchange File Format wurde als Austauschformat zwischen den verschiedenen Softwareapplikationen entwickelt. Das Datenmodell ist eine markierte Datendarstellung der Informationen, die in einer DWG vorhanden sind. Das bedeutet, dass jedes Datenelement einem Gruppencode zugeordnet wird. Der Gruppencode gibt an welcher Datenelementtyp und welche Bedeutung das Objekt besitzt. Zuerst wird der Gruppencode dargestellt und danach das Datenelement. Nahezu alle benutzerspezifischen Informationen einer DWG können in einer DXF abgebildet werden. Das Datenmodell baut sich aus verschiedenen Bereichen zusammen. Diese sind „Header“, Klassen, „Tables“, Blöcke, Entitäten, Objekte und „Thumbnailimages“. Der Bereich der Klassen beinhaltet die Informationen der Datenelemente, die in den Bereichen Blöcke, Entitäten und Objekte sind. Die grafischen Elemente werden in dem Bereich der Entitäten und die nichtgrafischen Elemente in den Objekten definiert (AUTODESK 2018A).

## 5.2.3 Autodesk Filmbox Technologie (FBX)

Das Autodesk Filmbox Technologie Datenmodell wird von Autodesk entwickelt. Es wurde ursprünglich als Austauschformat zwischen Anwendungen zur Erstellung digitaler Inhalte entwickelt. Es ist ein objektorientiertes Datenmodell das „Meshes“, NURBS, Kamera, Beleuchtung und weiteren Elemente für die Beschreibung einer dreidimensionalen Szene beinhaltet.

Die Geometrie wird als „Mesh“ mit Hilfe von Polygonen beschrieben. Die Klasse heißt „FbxMesh Class Reference“ (AUTODESK 2018B). Der Aufbau des Datenmodells wird anhand des Beispielprojektes beschrieben. Hierbei ist zu beachten, dass die FBX Version des Beispielprojektes 5 ist. Es ist folgendermaßen aufgebaut:

- „FbxHeaderExtension“: allgemeine Informationen werden gespeichert
- „Object definitions“: Objekte werden definiert und ihre Anzahl gezählt

```

; Object definitions
; -----

Definitions: {
  Version: 100
  Count: 8915
  ObjectType: "Model" {
    Count: 4453
  }
  ObjectType: "Geometry" {
    Count: 4445
  }
  ObjectType: "Material" {
    Count: 17
  }
  ObjectType: "Pose" {
    Count: 4445
  }
  ObjectType: "GlobalSettings" {
    Count: 1
  }
}

```

Abbildung 16: Ausschnitt des FBX Code des Beispielprojektes mit Objekt Definitionen und deren Anzahl

- „Object properties“: enthalten die Eigenschaften der Elemente
  - „Property“: Bei dem Bahnsteigmodell werden von ProVI 60 verschiedene Eigenschaften exportiert
  - Geometrie mit Vektoren und Flächen
- „BindPose“: Elemente werden statisch betrachtet
- „Object relations“: Material wird Objekten zugeordnet
- „Object connections“: Model – Scene – Material – Model
- „Takes and animation section“: Im Beispielprojekt nicht vorhanden
- „Version 5 settings“: Visualisierung und allgemeine Einstellungen

#### 5.2.4 Wavefront Object (OBJ)

Das Datenmodell Wavefront Object wird verwendet, um 3D-Daten auszutauschen und zu speichern. Es ist ein offenes Datenformat, das geometrische Objekte mit Linien, Polygonen, Freiformkurven und Oberflächen beschreibt. Linien und Polygone werden mit Punkten dargestellt. Freiformkurven und Oberflächen sind definiert mit Kontrollpunkten und weiteren Informationen entsprechend der Kurvenart. Das Datenmodell unterstützt rationale und nicht-rationale Kurven. Ebenso werden Kurven die auf Grundlage von Bézier, B-Spline, Vardinal („Catmull-Rom splines“) und Taylor Gleichungen basieren unterstützt. Die aktuelle Version des Datenmodells ist 3.0. Die Daten benötigen keinen „Header“, jedoch ist es üblich eine Bemerkung voranzustellen (MURRAY & VAN RYPER 2019). Es existiert auch eine Programmiersprache, die obj heißt. Diese ist klar abzugrenzen mit dem Datenmodell OBJ (GOGUEN & MALCOLM 2000).



### 5.2.5 Construction Process Integration XML (CPIXML)

„Construction Process Integration XML“ aus dem Englischen übersetzt bedeutet Konstruktionsprozess Integration. Es wurde von der RIB Software AG definiert im Rahmen der Einführung der Software RIB iTWO. Es ist ein proprietäres XML-Format, das den Austausch von Objekten in 3D-Modellen ermöglicht. Die Modelle enthalten zusätzlich zur Geometrie semantische Informationen, wie die Bedeutung, das Volumen und die Mengen der Objekte, die mit individuell definierten Attributen beschrieben werden können (RIB Software AG 2018).

Die Struktur einer CPIXML-Datei gliedert sich in unterschiedliche Bereiche. Diese werden in Tabelle 4 genannt, beschrieben und mit dem Beispielcode belegt.

Tabelle 4: Struktur CPIXML Datenmodell (RIB Software AG 2018) mit Bezug zum Beispielprojekt

Name	Beschreibung	Bahnsteigexport mit ProVI 6.0.
<objects>	Wurzelknoten der XML Datei	Zum Beispiel: <code>xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"</code> <code>xsi:noNamespaceSchemaLocation="CPI-Objects.xsd"</code> <code>sourceApp="ProVI"</code> <code>created="2019-04-16T13:13:54"</code>
<content>	Überblick über die Bereiche, die in der Datei benutzt werden	"objectSection" "objectDataSection"
<ID-Mapping>	globalen IDs werden innerhalb der Datei lokalen IDs gegeben. Dies führt zu einer kleineren Dateigröße.	ID wird jedem Objekt zugewiesen im <rootContainer>
<object-Section>	geometrische Objekte	<materialSection> <rootContainer> <propertySection> <data 3D>
<objectData-Section>	Unterbereich der objectSection, geometrische Definitionen beispielsweise Vektoren und Polygone	Data 3D mit Punkten und Dreiecken
<property-Section>	Unterbereich des Hauptbereiches Eigenschaften werden den Elementen des übergeordneten Bereichs angehängt.	Zum Beispiel: "cpiComponentType" "PVI_BEZEICHNUNG_PROJEKT" "PVI_BAUTEILTYP" "PVI_KM_VON" / "PVI_KM_BIS" "PVI_STAT_VON" / "PVI_STAT_BIS" "PVI_STATIONSBEZUG" "PVI_VOLUMEN_REB_M3"

<material-Section>	ebenfalls ein Unterbereich des Hauptbereichs. Die Materialien werden definiert.	ID wird der Farbe zugewiesen und mit diff, spec, amb und trans beschrieben
<logging-Section>	enthält Fehler und Laufzeiten der Software	Nicht vorhanden
<topology-Section>	Beziehungen der Elemente zu der Höhe werden beschrieben	Nicht vorhanden
<visualisation-Section>	verwaltet Eigenschaften für die Visualisierung, beispielsweise das (Projekt-) Raster und die Ansichtsinformationen.	Nicht vorhanden

### 5.2.6 Industry Foundation Classes (IFC)

Industry Foundation Classes ist ein herstellerunabhängiges, offenes Datenmodell, welches zum Austausch von modellbasierten Daten und Informationen in allen Planungs-, Ausführungs- und Bewirtschaftungsphasen genutzt werden kann. buildingSMART International entwickelt und etabliert IFC als offenen, internationalen Standard für das Bauwesen. Das Datenmodell wird seit 1996 entwickelt. Die erste offizielle Version wurde als Version 2x3 im Jahr 2007 herausgegeben und als ISO/PAS 16739:2005 registriert. 2017 wurde das zweite Addendum von IFC4x0 als offizielle ISO 16739:2018 definiert. Die aktuellste und offizielle Version ist IFC4x1. Der Entwurf der Version IFC4x2 ist seit April 2019 veröffentlicht aber noch nicht offiziell anerkannt (BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2019C).

Seit der Implementierung der Version IFC4 kann das Datenmodell, nicht nur für Hochbauprojekte verwendet werden, sondern auch in der Infrastruktur. Die Implementierung der Achsinformation, semantisch und geometrisch, sowie der Georeferenzierung ermöglichen den Austausch von Infrastrukturprojekten. Mit der Achse wird ein Bezugssystem für die Platzierung von Elementen der linearen Objekte, wie Straßen, Schienen und Brücken definiert. Die lineare Platzierung entlang der Achse wird mit Hilfe einer linearen Bezugsmethode verwirklicht (MARKIČ ET AL. 2018).

Bei IFC 4x1 wird die Achse mit folgenden Entitäten definiert:

- „IFCAlignmentCurve“ als horizontale 2D-Achse in der x-, y- Ebene
- „IFCAlignmentCurve“ in 3D mit einer horizontalen und vertikalen Achse
- IfcOffsetCurveDistances beschreibt eine Kurve, die einen konstanten oder variablen Abstand zu einer referenzierten Basiskurve besitzt
- „IfcPolyline“ als 3D-Achse mit einer 3D-Darstellung
- „IfcPolylinie“ als horizontalen 2D-Achse mit einer planaren Polylinienabbildung

(BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018)

IFC kann mit vielen verschiedenen Geometrien repräsentiert werden:

- Zweidimensional: „Annotation2D“, „Curve2D“
- Dreidimensionale Oberflächenmodelle: „SurfaceModel“
- Dreidimensionale Volumenmodelle: „SweptSolid“, BRep, CSG, „Clipping“, „BoundingBox“
- Mischformen: „GeometricSet“, „SectionedSpine“, „MappedRepresentation“
- Topologische Repräsentation: „TopologyRepresentation“

Das „Advanced BRep“-Modell ermöglicht ab der Version IFC4 BRep Objekten, mit Hilfe von NURBS, die beschriebenen Objekte deutlich genauer und mit geringerem Speicherplatz zu speichern (AUTODESK Handbuch REVIT 2018).

Eine Erweiterung des Standards IFC4x1 wurde als Railway BIM Data Standard von der China Railway BIM Alliance entwickelt aber ist momentan von buildingSMART noch nicht offiziell angenommen bzw. implementiert worden. Diese Erweiterung beinhaltet verschiedene Bereiche der Schieneninfrastruktur, beispielsweise die Achse, die Schiene, den Oberbau, die Brücke und die Station. In Abbildung 17 werden die Beziehungen der verschiedenen Klassen des Bahnsteiges dargestellt. Die Klasse IfcRailwayPlatform ist mit Hilfe der IfcRelContainedInSpatialStructure verknüpft mit den IfcElementen die für die Beschreibung eines Bahnsteiges erforderlich sind (China Railway BIM Alliance 2016A).

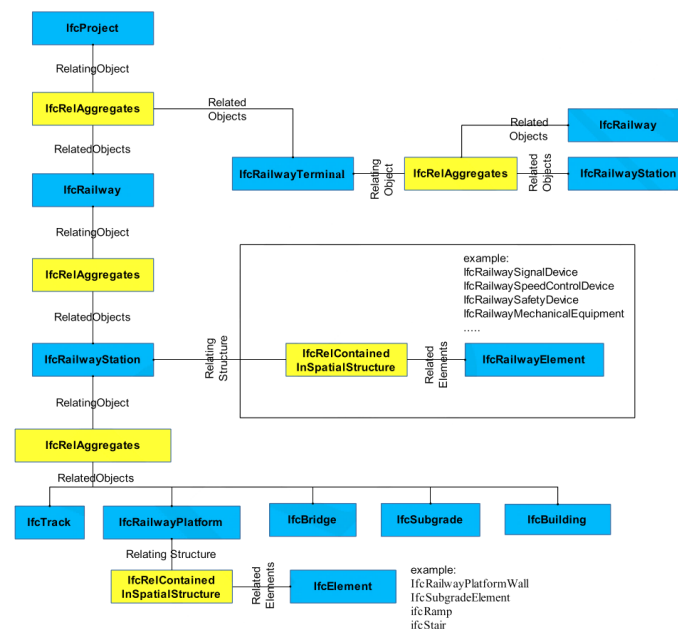


Abbildung 17: Übersicht der Klasse Station des Railway BIM Data Standard (Darstellung mit angepassten Kontrasten von China Railway BIM Alliance (2016A))

In der Version 5 sollen die Bereiche der Infrastruktur Straße, Tunnel, Brücke und Schiene implementiert werden (AMANN & BORRMANN 2015).

### 5.2.7 CityGML

CityGML ist ein offener Standard für die Repräsentation, Austausch und Speicherung von 3D-Stadt- und Landschaftsmodellen. Es wurde von dem internationalen Open Geospatial Consortium (OGC) und der ISO TC211 eingeführt. Die aktuelle Version 2.0 wurde 2012 veröffentlicht. CityGML wurde eingeführt um eine gemeinsame Definition der Entitäten, Attribute und Beziehungen eines 3D-Stadt- und Landschaftsmodell darzustellen. Die Wiederverwendung der gleichen Daten in unterschiedlichen Anwendungsfeldern ist wirtschaftlich wichtig.

Die Modellierung besteht aus zwei Hierarchien, der semantischen und der geometrischen Hierarchie (vgl. Kapitel 4.1.6). Der Vorteil dieser Struktur ist, dass in beiden Hierarchien und zwischen beiden Hierarchien navigiert werden kann, um thematische / semantische oder geometrische Abfragen und Analysen durchzuführen. Bei der Modellierung sollten beide Hierarchien für das gleiche Objekt zusammenhängend sein (STADLER & KOLBE 2007).

In Abbildung 18 ist die Struktur des Datenmodells CityGML dargestellt. Das CityGML Modell ist thematisch aufgeteilt in den Schemakern und die Anwendungsmodule. Die Schemabasis ist die Geographic Markup Language (GML) 3. Basierend auf dem Schemakern beschreiben die verschiedenen Anwendungsmodule spezifische Bereiche der virtuellen 3D-Stadtmodellierung. Die Anwendungsmodule sind unter anderem Brücken, Tunnel, Vegetation und Transport.

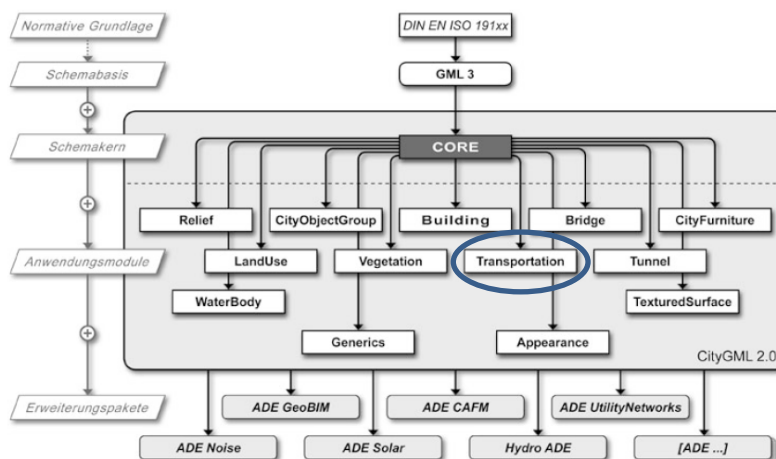


Abbildung 18: Übersicht der verschiedenen Module des CityGML Datenmodell – Transportmodul farblich umrandet (GRÖGER ET AL. 2012)

Das Transportmodul umrandet in Abbildung 18 und in Abbildung 19 detailliert dargestellt beinhaltet zum Beispiel Straßen, Wege, Schienen und Kreuzungen. Ein „TransportationComplex“ wird zusammengesetzt aus verschiedenen „TrafficAreas“ und mehreren „AuxiliaryTrafficAreas“. Den „TrafficAreas“ sind Elemente zugeordnet, die einen Verkehrsnutzen haben,

beispielsweise die Straßenfläche und der Gehweg. Die „AuxiliaryTrafficAreas“ beschreiben weitere Elemente, beispielsweise den Mittelstreifen und die Grünfläche.

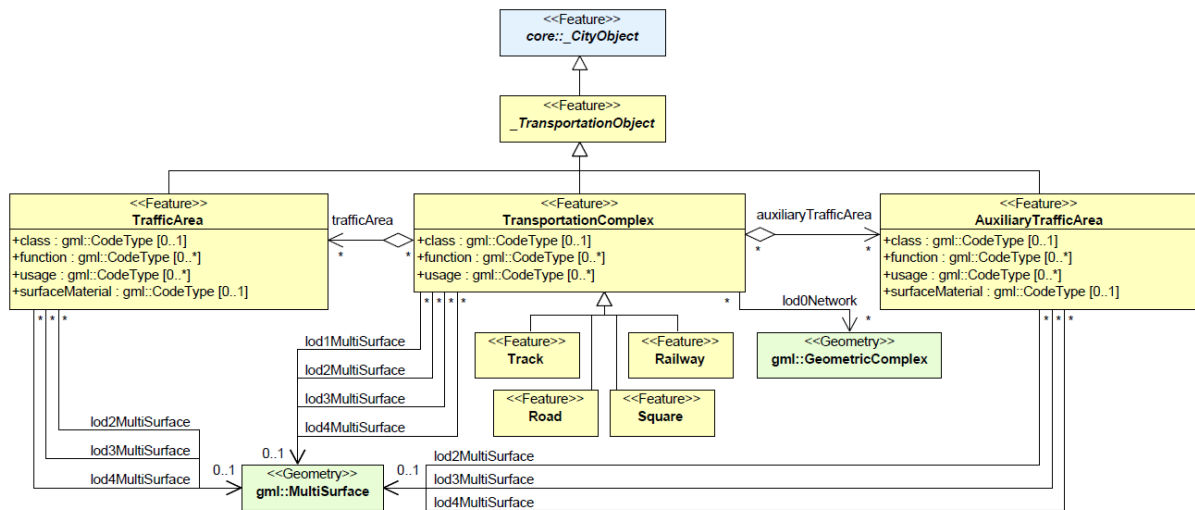


Abbildung 19: UML Diagramm des Transport Modell von CityGML (GRÖGER ET AL. 2012)

Das Transportmodul wurde seit der Veröffentlichung 2012 weiterentwickelt und die verbesserte Version des Transportmoduls veröffentlicht (GRÖGER ET AL. 2012, BEIL & KOLBE 2017).

Die Objekte können in unterschiedlich hoher Auflösung dargestellt werden, dafür differenziert CityGML in fünf konsekutive Detailgrade. Diese werden Levels of Detail (LOD) bezeichnet. Die Transportobjekte werden im LOD 0 als lineare Netzwerke dargestellt. Ab dem LOD 1 werden alle Transportobjekte mit 3D-Oberflächenmodellen beschrieben. In LOD 2 bis LOD 4 ist es weiter unterteilt in „TrafficAreas“ und „AuxiliaryTrafficAreas“ (GRÖGER ET AL. 2012).

Die Version 3.0 ist angekündigt und soll 2019 veröffentlicht werden.

## 5.2.8 LandXML

LandXML ist ein offener Standard für den Datenaustausch von Trassenprojekten. LandXML beschreibt zum Beispiel Geometrie, Koordinaten, Punkte, Achsen, Flurstücke und Vermessungen. Es ist ein natives Datenformat und wurde von verschiedenen amerikanischen und internationalen Unternehmen entwickelt. Unter der Leitung von Nathan Crews wurde im Jahr 2000 das erste LandXML Schema veröffentlicht. Seit der Veröffentlichung der Version 1.2 wurde das Schema längere Zeit nicht weiterentwickelt. LandInfra hat Teile dieses Schemas wiederverwendet. Die Struktur des LandXML Dokument wird von dem LandXML Schema definiert. In dem Schema wird festgelegt welcher Datentyp mit welchen Attributen und Elementen in dem LandXML Datenmodell verwendet werden darf. Ein Beispielsauszug aus einem modellierten Bahnsteig wird nachfolgend gezeigt (LANDXML.ORG 2019).

```

1 <?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
2 <LandXML xmlns="http://www.landxml.org/schema/LandXML-1.2" xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance" xsi:schemaLocation="http://
www.landxml.org/schema/LandXML-1.2 http://www.landxml.org/schema/LandXML-1.2/LandXML-1.2.xsd" version="1.2" date="2019-04-16" time="13:25:20"
readOnly="false" language="english">
3   <Units[...]>
4   <Project name="MA_Wolf_TUM_Original" desc="" />
5   <Application name="ProVI" manufacturer="Obermeyer Planen + Beraten GmbH" version="6.0" manufacturerURL="www.provi-cad.de" />
6   <Alignments name="MA_Wolf_TUM_Original">
7     <Alignment name="A012S" length="11806.448754" staStart="1650.000000" desc="Kilometrierungslinie neu">
8       <CoordGeom[...]>
9         <Cant name="A012S" gauge="1.435000" rotationPoint="insideRail" ...>
10          <StaEquation staAhead="4700.000000" staBack="4701.999620" staInternal="4701.999620" staIncrement="increasing" />
11          <StaEquation staAhead="9500.000000" staBack="9503.000077" staInternal="9504.999697" staIncrement="increasing" />
12          <Profile name="A012S" ...>
13          <CrossSects name="QP012S.A" desc="" ...>
14        </CoordGeom>
15      </Alignment>
16    </Alignments>
17    <Surfaces name="MA_Wolf_TUM_Original">
18      <Surface name="GPR_OUT.gel" desc="Gelände aus GELPRUEF">
19        <Definition surfType="TIN">
20          <Pnts[...]>
21            <Faces[...]>
22          </Faces>
23        </Definition>
24      </Surface>
25    </Surfaces>
26  </LandXML>

```

Abbildung 20: LandXML Übersicht Code des Beispielprojektes

Das Datenmodell LandXML ist in Abbildung 20 abgebildet. Das Format schreibt in den Header die wichtigsten projektspezifischen Informationen (Zeile 1 bis 7). Danach wird die Achse „Kilometrierungslinie neu“ beschrieben. Diese setzt sich zusammen aus den geometrischen Koordinaten und Elementen der Achse im Grundriss, der Überhöhung, der Gradienten und des Querprofils entlang der Achse. Die Geländeoberfläche wird mit einer triangulierten Oberflächendarstellung mit Punkten und Flächen ebenso gespeichert. Der modellierte Bahnsteig kann nicht exportiert werden. Vertiefende Grundkenntnisse über das Datenmodell LandXML beschreibt (Ji 2014) in Kapitel 3 seiner Dissertation „Durchgängige Trassen- und Brückenplanung auf Basis eines integrierten parametrischen 3D-Infrastrukturbauwerksmodells“.

## 5.2.9 OGC LandInfra / InfraGML

Das OGC beschreibt für den Infrastrukturbereich das Land und Infrastruktur konzeptionelle Modell (LandInfra). Der InfraGML Kodierungsstandard stellt die implementierungsabhängige GML-Kodierung von LandInfra dar. Es werden die Bereiche Anlagen, Projekte, Achse, Straße, Schiene, Vermessung, Landschaftseigenschaften, Landschaftsaufteilung und in einer späteren Version Entwässerung beschrieben. Die Topografie des Geländes und die Oberflächeninformationen werden abgebildet. Der Standard bezieht unter Beachtung der Bedeutung der Landschaft Vermessungen ein, um die Infrastrukturanlagen im Gelände zu lokalisieren. InfraGML wird als mehrteiliger OGC 15-111r1 Standard herausgegeben. Der aktuelle Standard wurde 2017 als Version 1.0 veröffentlicht (SCARPONCINI ET AL. 2016).

## 5.2.10 PlanPro

Das PlanPro Datenmodell ist ein semantisches Datenmodell für die Leit- und Sicherungstechnik bei der schienengebundenen Infrastruktur.

In Abbildung 21 wird die Möglichkeit der Bahnsteigmodellierung mit PlanPro schematisch dargestellt. Die Gleisachse wird aus mehreren Elementen zusammengesetzt und als TopKante bezeichnet. Die TopKante hat eine maximale Länge von 100 km, sie kann sich aus mehreren GeoKanten zusammensetzen. Einer GeoKante kann eine maximale Länge von 10 km zugeordnet werden, sie beginnt und endet mit einem GeoKnoten. Die verschiedenen GeoKanten werden mit GeoKnoten miteinander verbunden. Am Anfang und am Ende einer TopKante (Gleisachse) ist ein TopKnoten der den Beginn und das Ende beschreibt. TopKnoten sind folglich immer GeoPunkte.

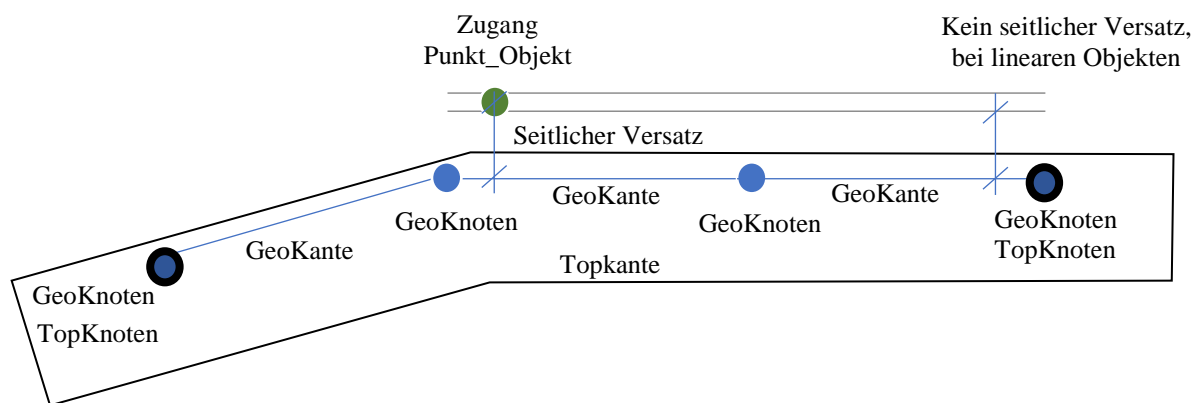


Abbildung 21: PlanPro Übersicht der Gleisachse (blau) und Bahnsteig (grau) (eigene Visualisierung inhaltlich von SOMMER ET AL. (2019))

Die bauliche Bahnsteiganlage setzt sich in dem Datenmodell aus einer oder mehreren Bahnsteigkanten und Bahnsteigzugängen zusammen. Sie orientiert sich an der Gleisachse (Top\_Kante). Die Bahnsteiganlage kann mit einem unverzweigten Bereich\_Objekt modelliert werden. Dazu wird die Bahnsteigkante von einem Startpunkt bis zu einem Endpunkt und einer Richtung von der TopKante abgesetzt. Die Bahnsteigkantenhöhe entspricht den Regelwerten der DB AG (vgl. Kapitel 3.4) mit 56 cm bis 96 cm über der Schienenoberkante. Ingenieurbauwerke können in dieser Version des Datenmodells noch nicht modelliert werden. Die Bahnsteigzugänge können mit Punkt\_Objekten abgesetzt werden. Die Möglichkeiten, die derzeit zur Verfügung stehen sind Treppen, Rampe, Aufzug und Reisendensicherung. Punkt\_Objekte können mit einem seitlichen Versatz gespeichert werden (SOMMER ET AL. 2019).

Dieses Datenmodell besitzt eine sehr gute Dokumentation, die es dem Entwickler erleichtert das Datenmodell zu verstehen (ESSER 2018).

## 6 Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung von Datenmodellen

### 6.1 Einführung in das zu entwickelnde Konzept

In diesem Kapitel wird ein Konzept entwickelt, mit dem die Eignung der Datenmodelle in den verschiedenen Anwendungsfällen überprüft werden kann. Derzeit existiert noch keine umfassende Methode, die die Eignung von Datenmodellen in Anwendungsfällen evaluiert (vgl. Kapitel 1.3). Deshalb wird dazu in dieser Arbeit ein Konzept erstellt, mit dessen Hilfe die Forschungsfrage dieser Arbeit, welches Datenmodell für die Durchführung einer Bahnsteigplanung mit der Open-BIM-Methode am besten geeignet ist beantwortet werden kann. Das zu entwickelnde Konzept stellt eine unabhängige Methode dar um die Eignung zu analysieren. Es kann mit beliebigen Anwendungsfällen, Datenmodellen und Anforderungen durchgeführt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird das entwickelte Konzept inhaltlich gefüllt mit den 20 zuvor beschriebenen Anwendungsfällen von BIM4INFRA 2020 (vgl. Kapitel 2.6) und den 11 betrachteten Datenmodellen bzw. Versionen der Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.2). Aus den Anwendungsfällen und Datenmodellen resultieren Anforderungen, die ebenso in das zu entwickelnde Konzept aufgenommen werden. Diese werden im Folgenden definiert.

### 6.2 Definition der Anforderungen der Datenmodelle

Definition der BIM-Anforderung nach VDI 2552-2:

*„BIM-Anforderung*

*aus BIM-Anwendungen resultierende Festlegungen zur Arbeitsweise im  
Rahmen der BIM-Methode*

*Anmerkung: BIM-Anforderungen setzen sich im Wesentlichen zusammen aus [...] Anforderungen an  
die Daten- bzw. die Modellstruktur.“*

Die Anforderungen der Datenmodelle basieren grundsätzlich auf den BIM-Anwendungen. In dieser Arbeit werden die Anwendungsfälle von BIM4INFRA2020 verwendet (vgl. Kapitel 2.6). Diese werden strukturiert nach den Begriffen Semantik und Geometrie (vgl. Kapitel 4.1). Des Weiteren werden allgemeine Kriterien zur Vollständigkeit miteinander verglichen. Die betrachteten Anforderungen werden im Folgenden definiert.



### 6.2.1 Allgemeine Anforderungen

Die allgemeinen Anforderungen fokussieren sich auf die mögliche Interoperabilität der verschiedenen Datenmodelle. Dazu werden die folgenden Anforderungen aus Kapitel 5 wieder aufgegriffen und hier zur Vollständigkeit nochmals aufgeführt:

- **Nicht proprietär / nativ:** Datenmodell ist nicht herstellergebunden an eine bestimmte Softwareapplikation, sondern entwickelt von non-profit Unternehmen und Interessensgruppen
- **Zertifizierung:** Möglichkeit Softwareprodukte für das Datenmodell zertifiziert zu werden um einen eindeutig definierten Austausch zu gewährleisten (BUILDINGSMART INTERNATIONAL 2019A)
- **Internationalität:** weltweit, in englischer Sprache verwendetes Datenmodell

### 6.2.2 Semantische Anforderungen

Die semantischen Anforderungen beinhalten die nicht-geometrischen Informationen über das Objektmodell, die mit dem Datenmodell übergeben werden sollen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die semantischen Anforderungen zunächst allgemein betrachtet und beschreiben in einem Unterbereich die in der Infrastruktur relevanten Anforderungen. Details über die Bahnsteigplanung sind im theoretischen Teil dieser Arbeit beschrieben (vgl. Kapitel 3 und Kapitel 4.2). Die Bahnsteigplanung wurde nicht detailliert als Anforderung aufgenommen, da kein untersuchtes Datenmodell diese umfassend unterstützt. Im Folgenden werden semantische Anforderungen beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit relevant sind.

- **Individuelle Schemaerweiterung:** Erweiterung des Schema individuell um weitere Entitäten (BRÜGGEMANN & BOTH 2015)
- **Individuelle Attributzuweisungen:** Zuweisung freier, individueller Attribute
- **Räumliche Elemente für nicht physische Elemente:** definierte Struktur im Datenmodell für räumliche Daten, die unabhängig von der grafischen Abbildung der Daten sind (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018)
- **Typisierung:** Zuordnung der Objekte zu bestimmten Entitäten (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Dokumentation der Bauleistungen:** Möglichkeit die Bauleistungen im Datenmodell zu hinterlegen (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Mängelinformationen:** Aufnahme der entstehenden und schon vorhandenen Mängel des Objektes in das Datenmodell (BIM4INFRA2020 2018B)

- **räumliche Beziehung der Entitäten:** Darstellung der räumlichen Beziehung der Entitäten zueinander (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2018)
- **parametrische Abhängigkeit:** keine Veränderung der Beziehungen bei Anpassungen des Modells (BORRMANN & BERKHAHN 2015, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2018)
- **Visualisierung:** visuelle Abbildung der Modelle (WALLNER & BOTH 2017)
- **Material- und Farbeigenschaften:** Beschreibung der Material-/Farbeeigenschaften für Oberflächen (BIM4INFRA2020 2018B)
- **4D-Planung:** Möglichkeit die Zeitkomponente der BIM-Methode zu beschreiben (WALLNER & BOTH 2017)
- **Bauablaufplan:** Ablauf der verschiedenen Vorgänge (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Termininformation:** Start- und Enddatum des Vorgangs (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Verknüpfung der Vorgänge:** logische Beziehung zwischen den verschiedenen Vorgängen (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Mengeninformationen:** Fähigkeit Mengeninformationen zu hinterlegen (BIM4INFRA2020 2018B)
- **5D-Planung:** Möglichkeiten um die Kostenkomponente der BIM-Methode zu beschreiben (WALLNER & BOTH 2017)
- **Kostenelemente:** Möglichkeit die Kostenkennwerte zu hinterlegen (BIM4INFRA2020 2018B)
- **Infrastruktur:** Eignung für den Infrastrukturbereich, in Bezug auf die großen, linearen und gekrümmten Objekte
- **digitales Geländemodell:** Darstellung des digitalen Geländemodells (DGM), für eine Anpassung des Infrastrukturprojektes und dessen Elemente an die Geländeoberfläche
- **Achse:** relevante Entitäten für die Achse
- **Bahnsteig:** relevante Entitäten für den Bahnsteig

### 6.2.3 Geometrische Anforderungen

Die verschiedenen Formen der geometrischen Repräsentation werden zuvor beschrieben (vgl. Kapitel 4.1.4) und werden im Folgenden als geometrische Anforderungen definiert:

- **Kurven:** Beschreibung des räumlichen Verlauf der Kurve durch Auswertung gemeinsamer Parameter (BORRMANN & BERKHAHN 2015, MCGLINN ET AL. 2019)
- **Polylinie:** einfache Kurvendarstellung mit mehreren Linien (MCGLINN ET AL. 2019)

- 
- **Bézier-Kurven:** Art der Freikurve, die mit einer Reihe von Kontrollpunkten die Kurve beschreibt (BORRMANN & BERKHAHN 2015, MCGLINN ET AL. 2019)
  - **NURBS:** Erweiterte Form der Bézierkurven die zusätzlich zu den Eigenschaften der Bézier-Kurven die Gewichtung der Kontrollpunkte beinhaltet (BORRMANN & BERKHAHN 2015, MCGLINN ET AL. 2019)
  - **Achsengeometrie:** 3D-Kurve, die auf einer vertikalen 2D-Kurve entlang einer horizontalen 2D-Kurve definiert ist (BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018)
  - **Flächenmodell:** „Form des Geometriemodells bei dem der geometrische Körper anhand begrenzender Flächen beschrieben wird“ (BORRMANN & BERKHAHN 2015, Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2018, MCGLINN ET AL. 2019)
  - **triangulierte Darstellung:** Beschreibung der Fläche mit Hilfe von Dreiecken (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **Volumenmodelle explizit:** Beschreibung des Körpers über seine Oberfläche (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **BoundaryRepresentation:** Berandungsbeschreibung eines Volumenkörpers (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **Volumenmodelle implizit:** Modellierungsschritte des Objektes können später nachvollzogen werden (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **Constructive Solid Geometry:** Kombination von Grundkörper mit den booleschen Operatoren; Beschreibung der 3D-Körper mit dem entstandenen Konstruktionsbaum (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **Extrusions- und Rotationsverfahren:** Erzeugung eines Volumenmodells mit Hilfe einer Extrusion oder Rotation eines Querschnitts (BORRMANN & BERKHAHN 2015)
  - **Positionierung:** Beschreibung der Elemente mit Koordinaten
  - **Georeferenzierung der Elemente in globalen Koordinatensystemen:** räumliche Darstellung von Objekten in Relation zu der Erde (KADEN 2018)
  - **projektspezifisches, lokales Koordinatensystem:** räumliche Darstellung von Objekten in der x-, y-, z- Ebene (MARKIĆ ET AL. 2018)
  - **achsbezogen:** Platzierung der geometrischen Repräsentation der Elemente entlang einer Achse (BORRMANN ET AL. 2017)

### 6.3 Konzept für die Bewertung der verschiedenen Datenmodelle

Die Bewertung von Datenmodellen erfolgt mit dem Konzept, dass in Abbildung 22 dargestellt wird. Die Indizes werden definiert mit  $i$  für Datenmodell,  $j$  für Anforderung,  $k$  für Anwendungsfall. Dabei gilt:  $i \in \mathbb{N}, j \in \mathbb{N}, k \in \mathbb{N}$ .

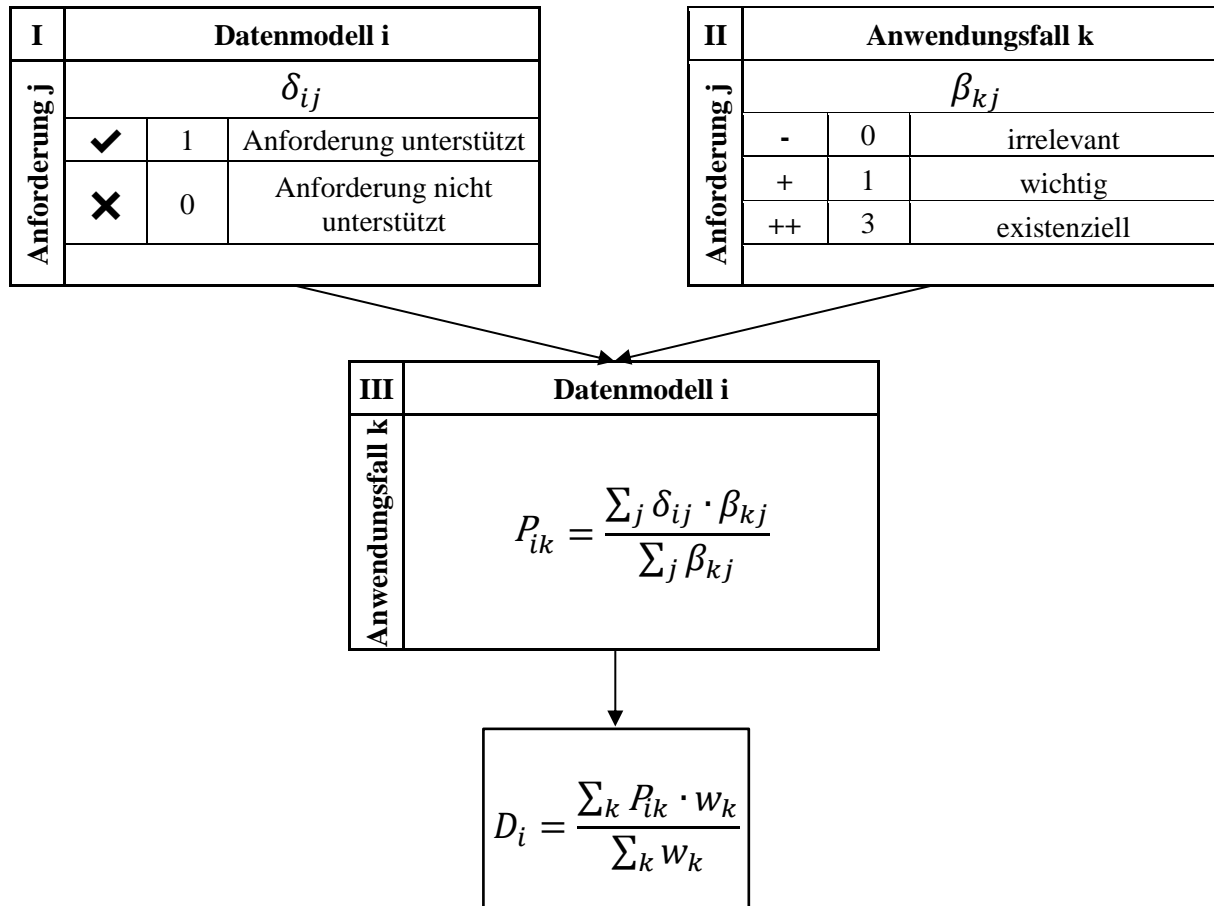


Abbildung 22: Entwickeltes Konzept für eine Datenmodellbewertung mit Anwendungsfällen, Datenmodellen und deren Anforderungen hinsichtlich der Eignung bei der BIM-Methode

#### 6.3.1 Entscheidungen ( $\delta_{ij}$ und $\beta_{kj}$ )

Oben links in Abbildung 22 ist Tabelle I dargestellt. In dieser Tabelle wird eine Fallunterscheidung durchgeführt. Dabei werden  $i$ -Datenmodelle überprüft, ob diese jeweils Anforderung  $j$  unterstützen oder nicht unterstützen.

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Datenmodell } i \text{ unterstützt Anforderung } j \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (3)$$

Oben rechts in Abbildung 22 werden dieselben Anforderungen  $j$  wie in Tabelle I mit  $\beta$  bewertet in Bezug auf den Bedarf der Anforderung  $j$  im jeweiligen Anwendungsfall  $k$ . Die Gewichtung des Bedarfs kann variabel definiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die klassische

Dreipunktregel, angelehnt an die Punkteverteilung im Fußball, gewählt. Die Bezeichnungen sind „irrelevant“, „wichtig“ oder „existenziell“.

$$\beta_{kj} = \begin{cases} 0 & k - AwF \text{ "irrelevant" von Anforderung } j \\ 1 & k - AwF \text{ "wichtig" von Anforderung } j \\ 3 & k - AwF \text{ "existenziell" von Anforderung } j \end{cases} \quad (4)$$

### 6.3.2 maximaler Bedarf des Datenmodells ( $\Delta_k$ )

Aus Tabelle II wird mit der Klassifizierung in Formel (4) der maximale Bedarf mit Hilfe einer Punktzahl von Anwendungsfall  $k$  über alle Anforderungen je Datenmodell in Formel (5) ermittelt. Dies wird in Formel (7) wieder aufgegriffen und bildet dort den Nenner.

$$\Delta_k = \sum_j \beta_{kj} \quad (5)$$

### 6.3.3 absolute Eignung des jeweiligen Datenmodells ( $\alpha_{ik}$ )

Der Zähler der Formel (7) wird mit  $\alpha$  beschrieben. Er stellt die erreichte Punktzahl des Datenmodells über alle von dem jeweiligen Anwendungsfall benötigten (wichtige oder existenzielle) Anforderungen und dabei vom Datenmodell unterstützten Anforderungen dar. Das entspricht der absoluten Eignung des jeweiligen Datenmodells. Es gilt, wie in Tabelle II, die Wertung 0, 1 und 3.

$$\alpha_{ik} = \sum_j \delta_{ij} \cdot \beta_{kj} \quad (6)$$

### 6.3.4 relative Eignung des Datenmodells je Anwendungsfall ( $P_{ik}$ )

Die Auswertung der  $i$ -Datenmodelle in Bezug auf  $k$ -Anwendungsfälle wird in Tabelle III mit den zuvor ermittelten Werten mit einer Division aus Formel (5) und (6) durchgeführt. Das entspricht einem prozentualen Wert  $P$  bzw. einer relativen Eignung, die angibt, wie gut das Datenmodell den jeweiligen Anwendungsfall abdeckt. Das Datenmodell eignet sich vollumfassend, wenn der Quotient 100 % ergibt. Der prozentuale Wert je Datenmodell und Anwendungsfall wird ermittelt und farblich abstufend mit dem Ampelsystem visualisiert. Folglich sind die Datenmodelle mit dem höchsten prozentualen Wert bzw. relative Eignung  $P$  grün, die schlechtesten mit rot und dazwischen mit gelb hinterlegt.

$$P_{ik} = \frac{\alpha_{ik}}{\Delta_k} = \frac{\sum_j \delta_{ij} \cdot \beta_{kj}}{\sum_j \beta_{kj}} \quad (7)$$

### 6.3.5 allgemein gewichteter Mittelwert der Datenmodelle ( $D_i$ )

Der endgültige Mittelwert  $D_i$  in Abbildung 22 und Formel (8) ergibt sich aus dem Mittelwert aller benötigten  $k$ -Anwendungsfälle eines Datenmodells. Die  $k$ -Anwendungsfälle können mit einer Wertung  $w_k$  gewichtet werden. Für eine allgemeine Wertung wird der Faktor  $w_k$  für alle Anwendungsfälle auf eins gesetzt.

$$D_i = \frac{\sum_k P_{ik} \cdot w_k}{\sum_k w_k} \quad (8)$$

wobei

$$w_k = \begin{cases} 1 & \text{Anwendungsfall } k \text{ wird in Leistungsphase benötigt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

### 6.3.6 gewichteter Mittelwert der Datenmodelle ( $D_i$ ) anhand der Leistungsphasen

Die Gewichtung kann in Bezug auf die verschiedenen Leistungsphasen ausgeführt werden. Dazu wird allen Anwendungsfällen, die in der jeweiligen Leistungsphase benötigt werden, eine Gewichtung  $w_k = 1$  zugeordnet. Die Anwendungsfällen, die nicht angewandt werden, erhalten eine Gewichtung  $w_k = 0$ . Mit der Formel (8) können die verschiedenen Datenmodelle je Leistungsphase bewertet werden.

Daraus kann wiederum ein Durchschnitt über alle Leistungsphasen ermittelt werden. Dieser zeigt inwiefern sich das Datenmodell über den gesamten Lebenszyklus eignet.

## 7 Anwendung des entwickelten Konzepts

### 7.1 Bewertung der Datenmodelle mit Anforderungen

Der gesamte Vergleich der verschiedenen Datenmodelle befindet sich im Anhang I. Die verschiedenen Datenmodelle werden mit den Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) analysiert. Die Bewertungskriterien, ✓ oder ✗ (vgl. Kapitel 6.3.1) zeigen ob eine Anforderung von dem Datenmodell unterstützt oder nicht unterstützt wird. Es wurden Anforderungen nur als unterstützt bewertet, wenn diese im Standard vorgesehen sind. Anforderungen, die mit Hilfe von individuellen Lösungen der Datenmodelle für Softwareanforderungen realisiert werden, werden als nicht unterstützt bewertet. Im Falle einer unzureichenden Datengrundlage wurde das Symbol grau gefärbt. So ist zum Beispiel LandXML ein offenes Datenformat, das jedoch unzureichend dokumentiert ist (SCARPONCINI 2013). Im Folgenden sind die wichtigsten Erkenntnisse dargelegt. Es werden im Rahmen dieser Arbeit die elf zuvor vorgestellten Datenmodelle analysiert und somit nur diese in Betrachtung gezogen.

#### 7.1.1 Allgemeine Analyse

Die allgemeinen Anforderungen wurden zuvor beschrieben (vgl. Kapitel 5.1). Davon gehen das **native** Datenmodell, die **Zertifizierung** und die **Internationalität** in die Bewertung der Datenmodelle ein. Im Folgendem werden diese nochmal kurz zusammengefasst.

Die proprietären Datenmodelle sind meist die Datenmodelle, die von Firmen hergestellt werden. Die **nativen** hingegen werden meist von herstellerneutralen Interessengruppen entwickelt. Einige der nativen Datenmodelle können die Import-/ Exportschnittstellen der Softwareapplikationen **zertifizieren**. **International** sind fast alle Datenmodelle.

#### 7.1.2 Semantische Analyse

Die semantischen Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2.2) werden im Allgemeinen von den Datenmodellen für Infrastrukturprojekte noch nicht ausreichend unterstützt. Teilweise sind gute Ansätze vorhanden, die im Folgenden beschrieben werden.

Eine individuelle **Schemaerweiterung** kann in keinem Datenmodell umgesetzt werden, außer in CityGML mit sogenannten Application Domain Extensions (GRÖGER ET AL. 2012). Die Übergabe von **individuellen Attributen** an Elementen ist mit allen Datenmodellen möglich, außer mit dem Datenmodell OBJ.

**Räumliche Elemente** sind in allen semantisch-geometrischen Datenmodellen außer LandXML vorgesehen (CREWS 2008). In IFC2x3 war diese Entität noch auf Hochbauprojekte limitiert, dies wurde in Version IFC4x1 auf Infrastrukturprojekte mit der Entität IfcSpatial ausgeweitet (BUILDINGSMART INTERNATIONAL ALLIANCE FOR INTEROPERABILITY 2007, BUILDINGSMART INTERNATIONAL LIMITED 2018).

Die **Typisierung** der semantischen Objekte wird in allen Datenmodellen unterstützt, die semantischer beziehungsweise semantisch-geometrischer Art sind. Geometrische Datenmodelle können diese Anforderung nicht unterstützen, da die geometrischen Elemente nicht als semantische Objekte identifiziert werden.

Die folgenden Anforderungen sind in keinem der Datenmodelle hinterlegt:

- **Dokumentation von Bauleistungen**
- **Mängelinformationen**

Die **räumliche Beziehung der Entitäten** ist in den semantisch-geometrischen und den semantischen Datenmodellen möglich. Diese Datenmodelle besitzen geografische Elemente, die in einen räumlichen Bezug gesetzt werden. Zusätzlich zu semantischen Datenmodellen kann auch CPIXML Objekte an Ebenen referenzieren und somit eine räumliche Beziehung zwischen den Entitäten erstellen (RIB Software AG 2018).

Die **parametrische Abhängigkeit** zwischen den verschiedenen Entitäten wird in den semantischen und semantisch-geometrischen Datenmodellen gespeichert. Die Datenmodelle DWG und DXF als Vertreter der geometrischen Datenmodelle beschreiben ebenfalls parametrische Abhängigkeiten.

Die **Visualisierung** ist in allen Datenmodellen, außer in PlanPro, möglich. Für eine professionelle Visualisierung sind die **Material- und Farbeigenschaften** wichtig. Diese können in allen Datenmodellen definiert werden, außer in LandXML, und PlanPro (SAFE SOFTWARE 2019B, ESSER 2018). Im CityGML Standard wird die Beschreibungssprache Extensible 3D übernommen wodurch **Material- und Farbeigenschaften** zu der Oberfläche hinzugefügt werden (GRÖGER ET AL. 2012).

Eine **4D-Planung** beschäftigt sich mit der Komponente Zeit und beinhaltet den **Bauablaufplan**, die **Termininformation**, die **Verknüpfung der Vorgänge** und die **Mengeninformationen**. Nur in IFC2x3 und IFC4x1 können diese Informationen standardisiert gespeichert werden. Die **5D-Planung** ist für die **Kostenelemente** verantwortlich. Diese wird ebenso nur von den IFC Versionen standardisiert unterstützt. Die anderen Datenmodelle insbesondere CPIXML



können mit Hilfe individueller Attribute ebenso eine **4D-** bzw. **5D-Planung** realisieren. Die Attribute sind jedoch nicht in dem jeweiligen Standard definiert.

Für den Bereich der **Infrastruktur** sind die Datenmodelle IFC4x1, CityGML, LandXML, LandInfra und PlanPro geeignet. Diese Datenmodelle unterstützen zusätzlich die **Achse**. Für die Modellierung der Infrastrukturprojekte ist die Identifizierung des **DGM** wichtig und wird in den zuvor genannten Datenmodellen, außer LandXML und PlanPro, realisiert. Eine offizielle **Klassenstruktur für bauliche Bahnsteige** ist in keinem Datenmodell vorgesehen. Erste Ansätze für eine Struktur sind in dem Datenmodell PlanPro enthalten (SOMMER ET AL. 2019). In CityGML ist nur der Code 19 für einen Bahnsteig definiert (GRÖGER ET AL. 2012). IFC4x1 definiert keine auf den Bahnsteig bezogenen Entitäten, jedoch wird im „Standard for Information Data Model“ der Bahnsteig detaillierter beschrieben. Dieser Standard ist veröffentlicht, jedoch noch nicht implementiert (China Railway BIM Alliance 2016B).

### 7.1.3 Geometrische Analyse

Die geometrischen Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2.3) werden im Großen und Ganzen von den Datenmodellen für Infrastrukturprojekte teilweise unterstützt. Im Folgenden sind wichtigsten Erkenntnisse über die geometrischen Anforderungen dargestellt.

Die **Speicherung von Kurven** ist in allen Datenmodellen in Form von **Polylinien** möglich. Kompliziertere Kurvenbeschreibungen werden hingegen nicht von allen Datenmodellen unterstützt. Die geometrischen Modelle sind auf die Geometrie Repräsentation spezialisiert und sind darauf ausgelegt **Bézier-Kurven** und **NURBS** zu unterstützen. CPIXML stellt in diesem Kontext eine Ausnahme dar, da sie diese nicht unterstützen. Keines der geometrischen Datenmodelle kann die **Achse** geometrisch unterstützen. Die Datenmodelle, die einen trassenorientierten Ansatz verfolgen ermöglichen die **Achsgeometrie**. IFC implementiert die Entitäten der **Achsgeometrie** in der Version 4x1. Damit ist IFC4x1, im Rahmen der in dieser Arbeit untersuchten Möglichkeiten Kurven geometrisch zu beschreiben, das umfassendste Datenmodell.

**Flächenmodelle** werden von allen Datenmodellen unterstützt, außer PlanPro. Dafür wird die Repräsentationsform der **triangulierten Darstellung** bevorzugt. Dies ermöglichen die Datenmodelle, die Flächen beschreiben können. Dabei ist IFC2x3 eine Ausnahme, da es nur allgemeine Oberflächen beschreiben kann. Die neuere Version IFC4x1 kann jedoch auch triangulierte Darstellungen darstellen.

Die Repräsentation von **expliziten Volumenmodellen** mit Hilfe von **BRep** wird von den meisten Datenmodellen ermöglicht, allerdings nicht von den Datenmodellen FBX, OBJ und

PlanPro. Für die Modellierung von gekrümmten Flächen benötigt diese Repräsentation sehr viel Speichergröße (BORRMANN & BERKHAHN 2015). Die **impliziten Volumenmodelle** verwenden weniger Speicherplatz, werden aber nur von wenigen Datenmodellen unterstützt. Diese sind DWG, DXF und beide Versionen von IFC. Wenn ein Datenmodell **implizite Volumenmodelle** übergeben kann, dann ist die Modellierung mit **CSG** oder **Extrusion- und Rotationsverfahren** möglich.

Die **Positionierung** ist bei allen Datenmodellen möglich. Die Möglichkeiten der **Positionierung** differieren je nach Datenmodell. Jedes Datenmodell kann anhand von Koordinaten, Objekte platzieren und verwendet dabei ein **lokales Koordinatensystem**. Bei der Verwendung der Koordinatensysteme gibt es jedoch Unterschiede zwischen den Datenmodellen. Diejenigen, die eine semantische Komponente besitzen ermöglichen die **Georeferenzierung mit globalen Koordinatensystemen**. Welche Koordinatensysteme verwendet werden, wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Der **Achsbezug** der platzierten Objekte kann nur bei Datenmodellen erfolgen, die eine Achse semantisch definieren. Dies ist wie bei der semantischen Analyse (vgl. Kapitel 7.1.2) beschrieben in den Datenmodellen möglich, die trassenorientiert entwickelt werden.

## 7.2 Bewertung der Anwendungsfälle mit den Anforderungen

Für die Bewertung der Anwendungsfälle werden im Rahmen dieser Arbeit als Beispiel die von BIM4INFRA2020 definierten Anwendungsfälle verwendet (vgl. Kapitel 2.6). Dafür wird der Bedarf der verschiedenen Anforderungen bezüglich der Anwendungsfälle bei der Bahnsteigplanung eingeschätzt. Dies ist in Anhang II dargestellt. Dabei werden die Anforderungen in Bezug auf den Anwendungsfall mit „irrelevant“, „wichtig“ oder „existenziell“ bewertet (vgl. Kapitel 6.3.1). Die Einschätzung variiert je nach Projekt auf Grund wechselnder Rahmenbedingungen und Vertragsvereinbarungen.

### 7.2.1 Allgemeiner Bedarf

Die allgemeinen Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2.1) sind in nahezu allen Datenmodellen von Bedeutung, da diese für eine verbesserte Interoperabilität (vgl. Kapitel 2.2) zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten sorgen. In Abhängigkeit, ob eine normale oder höhere Austauschrate der Datenmodelle zwischen den Projektbeteiligten stattfindet, ist es wichtig bzw. existenziell. Bei Anwendungsfällen, die ein Endprodukt herstellen, dass nicht mehr mit der BIM-Methode weiterbearbeitet wird, sind die allgemeinen Anforderungen irrelevant.

### 7.2.2 Semantischer Bedarf

Die Verwendung der **individuellen Schemaerweiterung** und der **individuellen Attributzuweisung** hat Vor- und Nachteile. Einerseits ist bei einer Erweiterung die Anwendung im Projekt durch den individuellen Einfluss variabler, andererseits ist dadurch ein standardisierter Austausch mit verschiedenen Projektbeteiligten schwieriger. Deshalb sind diese beiden Anforderungen besonders abhängig von den vertraglichen Grundlagen des Projekts. Im Rahmen dieser Arbeit wird die **individuelle Schemaerweiterung** überwiegend als irrelevant eingeschätzt. Teilweise wäre diese wünschenswert und somit als wichtig bewertet. Die **individuelle Attributzuweisung** hingegen ist aufgrund der Übersichtlichkeit des Projektes in den meisten Anwendungsfällen als wichtig zu bewerten.

Die Anforderung **räumlicher Elemente für physische Elemente** ist überwiegend in den frühen Leistungsphasen wichtig, da diese Modelle im späteren Verlauf wiederverwendet werden sollen. Dabei werden dann den **räumlichen Elementen physische Elemente** zugeordnet. Die **Typisierung** der Elemente ist in fast allen Anwendungsfällen wichtig, da somit die Objektivierung der Elemente gewährleistet wird. Bei der Visualisierung müssen die Entitäten nicht unbedingt typisiert sein. Die **Dokumentation von Bauleistungen** und der **Mängelinformationen** ist besonders wichtig in den Anwendungsfällen, die in den späteren Leistungsphasen benötigt werden. Dadurch kann unnötige Kommunikation reduziert werden. Die **räumliche Beziehung der Entitäten** und die **parametrische Abhängigkeit** werden bei den Anwendungsfällen benötigt, die im Verlauf der Planung und der Ausführung Modelle beinhalten, die veränderbar sein sollen.

Die **Visualisierung** wird in nahezu allen Anwendungsfällen benötigt. Existenziell ist dies, in allen Anwendungsfällen, die mit Hilfe der Anforderung **Visualisierung** ein Endprodukt erstellen. Dabei hat die Modellierung der **Material-, und Farbeigenschaften** manchmal eine geringere Bedeutung. Dies hängt jedoch vom jeweiligen Projekt und den vertraglich abgestimmten Auftraggeberinformationsanforderungen ab. Bei Anwendungsfällen, die ein Textprodukt als Endprodukt haben, beispielsweise das Leistungsverzeichnis wird keine **Visualisierung** benötigt.

Die Anforderungen der **4D-** und **5D-Planung** sind verständlicherweise in den Anwendungsfällen irrelevant, die keinen Bezug zur Zeitkomponente bzw. der Kostenkomponente besitzen. Hingegen sind die 4D-Anforderungen besonders wichtig bei der Fortschrittskontrolle der Planung, der Terminplanung der Ausführungsplanung und der Baufortschrittskontrolle. Die **Mengeninformationen** werden weiterführend von der **4D-Planung** in die **5D-Planung**

übernommen. Deshalb ist die **Mengeninformation** nicht nur in den 4D-Anwendungsfällen existenziell, sondern auch in den 5D-Anwendungsfällen.

Die semantischen Anforderungen der **Infrastruktur** sollten bezüglich einer Bahnsteigplanung für fast alle Anwendungsfälle erfüllt werden. Die einzige Ausnahme bildet der Anwendungsfall 3 Visualisierung, dort ist eine semantische Benennung der **Infrastruktur** Objekte nicht von Bedeutung. Insbesondere die **Achse** und der **Bahnsteig** sind bei Anwendungsfällen, die sich mit der Trassenplanung beschäftigen, existenziell.

### 7.2.3 Geometrischer Bedarf

Die **geometrischen Anforderungen** werden mit Hilfe von verschiedenen Modellierungsarten realisiert. Dazu gehören **Kurven** und **Flächen**. Sie werden von allen Anwendungsfällen benötigt. In den Anwendungsfällen, die eine exakte Geometrie erfordern, ist eine bestmögliche Repräsentation mit **NURBS** existenziell. Des Weiteren sind **Kurven**, die eine **Achsgeometrie** modellieren können, besonders wichtig bei Anwendungsfällen, die eine trassenorientierte Anwendung besitzen. Damit können Infrastrukturprojekte bestmöglich abgewickelt werden. Die **Flächenmodelle** und insbesondere die triangulierte Darstellung wird einerseits für die Repräsentation des **DGM** benötigt. Andererseits können damit Oberflächen von Elementen beschrieben werden. Dies wird im Bereich der Infrastruktur in allen Anwendungsfällen benötigt. Die **expliziten Volumenmodelle** werden in den Anwendungsfällen benötigt, in denen das Volumen anhand des Modells ermittelt wird und somit ein Flächenmodell nicht mehr ausreichend ist. Folglich entspricht dies den Anwendungsfällen, die eine **4D-** beziehungsweise **5D-Planung** ermöglichen. Die **impliziten Volumenmodelle** sind in den Anwendungsfällen vorteilhaft, in denen das Volumen im Verlauf verändert werden soll und ein **explizites Volumenmodell**, die Erwartungen somit nicht mehr erfüllen kann.

Bei der **Positionierung** variiert der Bedarf der Anwendungsfälle von irrelevant, bei Anwendungsfällen, die das Modell nicht weiterverwenden, über wichtig, bei Datenmodellen, die ein korrekt platziertes Objekt benötigen, bis hin zu existenziell bei Anwendungsfällen, die ohne korrekte Positionierung kein sinnvolles Ergebnis liefern können.

### 7.3 Auswertung der Datenmodelle bezüglich der Anwendungsfälle

Je mehr für den Anwendungsfall benötigte Anforderungen von dem jeweiligen Datenmodell unterstützt werden, desto besser eignet sich das Datenmodell. In Tabelle 5 wird das Ergebnis dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnis der betrachteten semantischen und geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) je Anwendungsfall (vgl. Kapitel 2.6) und im Mittelwert über alle Anwendungsfälle in Prozent

		DWG	DXF	FBX	OBJ	CPIXML	IFC2x3	IFC4x1	CityGML	LandXML	LandInfra	PlanPro	
Anwendungsfall	1	Bestandserfassung	50%	55%	35%	35%	35%	55%	88%	70%	68%	70%	53%
	2	Planungsvariantenuntersuchung	41%	52%	30%	33%	30%	65%	93%	63%	65%	67%	54%
	3	Visualisierung	93%	93%	93%	93%	67%	67%	100%	67%	53%	80%	20%
	4	Bemessung und Nachweisführung	54%	65%	38%	43%	38%	70%	95%	76%	73%	70%	46%
	5	Koordination der Fachgewerke	39%	52%	35%	39%	43%	65%	93%	87%	80%	85%	61%
	6	Fortschrittskontrolle der Planung	28%	34%	21%	26%	26%	72%	85%	45%	43%	45%	28%
	7	Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen	54%	58%	54%	50%	42%	50%	88%	67%	63%	75%	50%
	8	Arbeits-/ Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung	36%	42%	33%	33%	33%	58%	78%	61%	56%	61%	42%
	9	Planungsfreigabe	33%	44%	33%	44%	30%	52%	74%	67%	63%	59%	37%
	10	Kostenschätzung und Berechnung	43%	46%	34%	34%	34%	74%	97%	57%	51%	57%	31%
	11	Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe	41%	49%	26%	31%	26%	74%	95%	51%	51%	49%	33%
	12	Terminplanung der Ausführung	45%	49%	34%	34%	32%	79%	98%	49%	49%	51%	28%
	13	Logistikplanung	48%	58%	40%	40%	45%	75%	98%	73%	75%	80%	58%
	14	Erstellung von Ausführungsplänen	54%	58%	54%	50%	42%	50%	88%	67%	63%	75%	50%
	15	Baufortschrittskontrolle	41%	46%	30%	30%	28%	74%	93%	43%	46%	46%	28%
	16	Änderungsmanagement bei Planungsänderungen	47%	53%	44%	44%	44%	56%	78%	69%	69%	72%	47%
	17	Abrechnung von Bauleistungen	32%	35%	26%	26%	29%	58%	77%	48%	48%	48%	29%
	18	Mängelmanagement	36%	46%	36%	36%	33%	59%	82%	56%	56%	59%	44%
	19	Bauwerksdokumentation	42%	47%	39%	33%	39%	61%	81%	61%	61%	64%	47%
	20	Nutzung für Betrieb und Erhaltung	41%	48%	41%	41%	38%	48%	72%	66%	62%	66%	45%
<b>Mittelwert</b>		45%	52%	39%	40%	37%	63%	88%	62%	60%	64%	41%	

Im Großen und Ganzen kristallisieren sich die semantisch-geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) als die überwiegend besseren Datenmodelle im Mittelwert über alle Anwendungsfälle heraus.

CPIXML liegt im Vergleich zu den anderen Datenmodellen unter dem Durchschnitt und bleibt somit unter den Erwartungen. Dies liegt daran, dass das auszeichnende Merkmal des Datenmodells, die individuelle Attribuierung ist. Damit können die meisten anderen Anforderungen

individuell ergänzt werden. Jedoch ist dies im Rahmen der Standardisierung mit der Open-BIM-Methode nicht zielführend. Das Datenmodell wird in den Softwareapplikationen, in denen es entwickelt und hauptsächlich verwendet wird, mit individuellen Attributen angereichert und würde damit deutlich mehr Anforderungen erfüllen. Dafür ist jedoch eine standardisierte Dokumentation über die verschiedenen Attribute erforderlich.

DXF und DWG liegen zwischen den Werten der rein geometrischen, der rein semantischen und den gemischten Datenmodellen. Sie erfüllen die gleichen Anforderungen, wie die anderen geometrischen Datenmodelle dies sind hauptsächlich die Entitäten der Kurven und der Flächen. Zusätzlich dazu können DXF und DWG Volumenmodellen geometrisch repräsentieren. Daher ist es für diese Anforderungen besser geeignet als die anderen geometrischen Datenmodelle.

PlanPro, als rein semantisches Datenmodell, besitzt aufgrund fehlender Geometrie keine Visualisierung. Diese ist in den meisten Anwendungsfällen unabdingbar für eine bessere und leichtere Auffassung des Projektes. Außerdem ist das Datenmodell hauptsächlich auf die Leit- und Sicherungstechnik ausgelegt und folglich sind die semantischen Inhalte an diese angepasst. Dabei fehlen in manchen Anwendungsfällen semantische Informationen für eine konstruktive Objektplanung die für die definierten Anwendungsfälle benötigt werden (ESSER 2018).

Die weiterentwickelten Versionen sind im Allgemeinen besser als die Vorgängerversionen. Dies betrifft einerseits LandXML, das den Kern für LandInfra bereitstellt und andererseits IFC, das sich in einem fortwährenden Entwicklungsprozess befindet. Die aktuellste und dabei offizielle Version IFC4x1 ist deutlich besser geeignet als die Vorgängerversion IFC2x3. Einer der wesentlichen Unterschiede zwischen LandInfra und LandXML ist bei dem Anwendungsfall Visualisierung zu sehen.

Ein Anwendungsfall, der bei der Analyse der verschiedenen Anwendungsfälle heraussticht, ist die Visualisierung. Hierbei ist sehr gut zu erkennen, dass die geometrischen Datenmodelle für diese Art der Anwendung ausgelegt sind, da diese den Anwendungsfall Visualisierung sehr gut erfüllen. CPIXML bildet dabei eine Ausnahme bei den geometrischen Datenmodellen. Dieses Datenmodell erfüllt die Anforderungen an den Anwendungsfall Visualisierung im gleichen Umfang, wie die Mehrheit der semantisch-geometrischen Datenmodelle. Erwähnenswert ist auch das Datenmodell PlanPro, da es als rein semantisches Datenmodell in der Entität Topografie geometrische Daten abspeichern kann. Daher erfüllt es einige Anforderungen, die in diesem Anwendungsfall benötigt werden.

Zwischen den einzelnen Anwendungsfällen existieren Synergien, beispielsweise erfüllen die Datenmodelle den AwF 7 Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen im gleichen

Umfang wie AwF 14 Erstellung von Ausführungsplänen. Dies lässt sich auf die gleichen Anforderungen zurückführen, die an die Anwendungsfälle gestellt werden.

Das Datenmodell IFC4x1 stellt sich als das beste Datenmodell heraus. Das ist ein zu erwartendes Ergebnis, da das Datenmodell im Rahmen der Open-BIM-Methode von buildingSMART entwickelt wurde.

#### 7.4 Auswertung der Datenmodelle bezüglich der Leistungsphasen

BIM4INFRA2020 hat festgelegt welcher Anwendungsfall in welcher Leistungsphase verwendet wird (vgl. Kapitel 2.6). Die Gewichtung basiert auf dieser Einschätzung. Für jede Leistungsphase werden die benötigten Anwendungsfälle mit eins gewichtet, die restlichen Anwendungsfälle, die nicht angewendet werden mit null (vgl. Kapitel 6.3.6). Damit wird ermittelt welches Datenmodell in welcher Leistungsphase einen Datenaustausch ermöglicht. Die Ergebnisse werden in Tabelle 6 abgebildet und im Folgenden interpretiert.

Tabelle 6: Ergebnis der betrachteten semantischen und geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) in den Leistungsphasen der HOAI 2013 (vgl. Kapitel 2.4) je nach Bedarf der verschiedenen Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 2.6)

		DWG	DXF	FBX	OBJ	CPIXML	IFC2x3	IFC4x1	CityGML	LandXML	LandInfra	PlanPro	
Leistungsphase	1	Grundlagenermittlung	50%	55%	35%	35%	35%	55%	88%	68%	68%	70%	53%
	2	Vorplanung	51%	57%	45%	47%	40%	61%	90%	67%	63%	70%	44%
	3	Entwurfsplanung	50%	58%	44%	48%	40%	65%	90%	67%	62%	68%	39%
	4	Genehmigungsplanung	54%	59%	46%	47%	40%	66%	92%	60%	57%	64%	36%
	5	Ausführungsplanung	50%	56%	44%	45%	41%	67%	92%	64%	61%	68%	41%
	6	Vorbereiten der Vergabe	33%	44%	33%	44%	30%	52%	74%	67%	63%	59%	37%
	7	Mitwirkung bei der Vergabe	33%	44%	33%	44%	30%	52%	74%	67%	63%	59%	37%
	8	Objektüberwachung	46%	51%	40%	40%	38%	67%	88%	56%	56%	61%	36%
	9	Objektbetreuung und Dokumentation	42%	48%	40%	37%	38%	55%	76%	62%	62%	65%	46%
<b>Mittelwert</b>		45%	53%	40%	43%	37%	60%	85%	64%	62%	65%	41%	

Mit der Gewichtung bezüglich der verschiedenen Leistungsphasen verhalten sich die Datenmodelle ähnlich zum Mittelwert über alle Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 7.3). Rein geometrische Datenmodelle und rein semantische Datenmodelle können die erforderlichen Anforderungen weniger erfüllen als gemischte Datenmodelle.

Die Datenmodelle sind auf frühere Leistungsphasen ausgelegt und decken daher die Anforderungen der früheren Leistungsphasen besser ab als die Anforderungen in den späteren Leistungsphasen. Jedoch kann mit der BIM-Methode in den späteren Leistungsphasen mit

geringerem Aufwand großer Nutzen erzielt werden. Dazu benötigen die späteren Leistungsphasen beispielsweise eine Dokumentation von Bauleistungen und Mängelinformationen. Derzeit kann kein betrachtetes Datenmodell dies standardisiert unterstützen. IFC4x1 ist über alle Leistungsphasen das beste Datenmodell. Wobei es analog zu den anderen Datenmodellen in den späteren Leistungsphasen weniger Anforderungen erfüllen kann als in den früheren Leistungsphasen.

## 7.5 Diskussion

Die Ergebnisse erfüllen im Großen und Ganzen die Erwartungen, die mit dem Konzept herausgefunden werden sollen. Die semantisch-geometrischen Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1) sind im Rahmen der BIM-Methode entwickelt worden. Daher erfüllen diese Datenmodelle die Anforderungen im Allgemeinen besser als Datenmodelle, die für geometrische oder semantische Anwendungen konzipiert sind. Einzig CPIXML schneidet schlechter ab als erwartet. Das liegt daran, dass die Softwareapplikationen, die CPIXML entwickeln, individuelle Attribute definieren, mit denen sie die notwendigen Anforderungen der Anwendungsfälle unterstützen können. Diese Definitionen sind jedoch individuell und basieren nicht auf dem Standard. Das Datenmodell IFC wird als ein semantisch-geometrisches Datenmodell für den Austausch von Bauprojekten entwickelt. Daher ist es absehbar, dass dieses Modell unter den untersuchten Datenmodellen das beste Ergebnis liefert.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die verschiedenen Datenmodelle analysiert. Es wird nicht auf die verschiedenen Softwareapplikationen eingegangen, da die Weiterentwicklung von Softwareapplikationen ein fortlaufender Prozess ist. Die einzelnen Softwareapplikationen sind kurzlebig, in Abhängigkeit vom jeweiligen Softwarehersteller. Dies ist keine Grundlage für eine wissenschaftliche Arbeit und wird daher nicht weiter betrachtet. Die Aktualisierung von Datenmodellen ist ein längerer Prozess und kann daher wissenschaftlich betrachtet werden.

Die Bewertung der Datenmodellen erfolgt in dieser Arbeit auf Grundlage der einzelnen Dokumentationen. Nur wenn die jeweilige Entität in der Dokumentation beschrieben ist, wird die Entität als unterstützt bewertet. Jedoch ist bei manchen Datenmodellen die Dokumentationsgrundlage unzureichend oder gar nicht vorhanden. Dies macht eine eindeutige Bewertung schwierig, beispielsweise ist LandXML nur knapp dokumentiert (SCARPONCINI 2013). Insbesondere geschlossene Datenformate veröffentlichen meist keine Dokumentation. Aber auch offene Datenformate sind ebenfalls sehr komplex und es bedarf Einarbeitungszeit diese Datenformate vollumfassend zu verstehen. IFC ist auf Grund seiner sehr großen Menge an Entitäten sehr unübersichtlich und daher ist es schwierig jede einzelne Entität zu berücksichtigen.



---

Je nach Projekt werden Anforderungen auf Grundlage der jeweiligen Anwendungsfälle und Datenmodelle getroffen. Je nach Anwendung oder Bedarf können diese jedoch variieren. Die Bedarfsbewertung der definierten Anforderungen bei den jeweiligen Anwendungsfällen basiert auf persönlicher Einschätzung und den jeweiligen Informationsanforderungen. Bei der Bewertung der Anwendungsfälle werden Anforderungen, die mehrere Unterpunkte haben höher gewichtet als Anforderungen, die nur einfach aufgelistet sind. Dies führt zu einer ungleichen Gewichtung der Anforderungen im jeweiligen Anwendungsfall. Es werden jedoch in jedem Datenmodell die gleichen benötigten Anforderungen zur prozentualen Bewertung verwendet. Folglich sind es für jedes Datenmodell dieselben Bedingungen und daher miteinander vergleichbar. Die Anforderungen könnten detailliertere Bahnsteig Entitäten beschreiben, da jedoch keines der Datenmodelle Bahnsteige in der Planung umfassend unterstützt, ist dies nicht aussagekräftig. Letztendlich lässt sich zusammenfassen, dass die Datenmodelle, Anwendungsfälle und Anforderungen je nach Informationsanforderungen verändert werden können.

Mit Hilfe des entwickelten Konzeptes können weitere Analysen durchgeführt werden. Dabei können die Datenmodelle variieren und die Anwendungsfälle angepasst werden. Aus den zuvor genannten Parametern (Datenmodell und Anwendungsfälle) können dann neue Anforderungen resultieren. Außerdem kann der Bedarf der jeweiligen Anforderung im Anwendungsfall je nach Projekt variieren.

## 8 Résumé

### 8.1 Fazit

Als Ausgangspunkt dieser Arbeit wurden zuerst die theoretischen Grundlagen über die BIM-Methode beschrieben. Hierfür wurden die verschiedenen Ansätze der BIM-Implementierungen vorgestellt (vgl. Kapitel 2.3), wobei sich die Open-BIM-Methode als der zukunftsorientierteste Ansatz herausstellte. Für den Datenaustausch zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten wird ein offener und interoperabler (vgl. Kapitel 2.2) Standard benötigt. Das Handbuch der Informationslieferung wird genutzt, um die Rahmenbedingungen festzulegen (vgl. Kapitel 2.5). Die Anwendung der Open-BIM-Methode erfordert ein offenes und standardisiertes Datenmodell für die technische Umsetzung. Mit diesem Datenmodell können in den Softwareapplikationen Import- / Exportschnittstellen implementiert werden. Folglich kann dann mit dem Datenmodell ein offener und interoperabler Austausch stattfinden.

Bei einer Bahnsteigplanung sollten die relevanten Inhalte der Bahnsteigplanung im Datenmodell vorhanden sein. Dafür wurden die wichtigsten Elemente einer Bahnsteigplanung vorgestellt. Dazu gehört ebenfalls die Achse, da sich der Bahnsteig hauptsächlich an dieser orientiert (vgl. Kapitel 3).

Im weiteren Verlauf wurden die Inhalte eines räumlich-semantischen Modells und deren Verknüpfungsmöglichkeiten beschrieben. Mit den Grundlagen der Bahnsteigplanung und den räumlich-semantischen Inhalten wurde ein Vorschlag für ein räumlich-semantisches Modell präsentiert (vgl. Kapitel 4).

Als nächster Schritt wurden die schon existierenden Datenmodelle im Bereich der Infrastruktur untersucht und deren Fähigkeiten vorgestellt. Mit Hilfe eines Praxisbeispiels einer Bahnsteigplanung sollten vorhandene Elemente der Bahnsteigplanung identifiziert werden. Dabei wurden geometrische, semantische und semantisch-geometrische Datenmodelle untersucht. Die Datenmodelle blieben überwiegend unter den getroffenen Erwartungen, da keines der Datenmodelle eine umfassende Bahnsteigplanung abdeckt (vgl. Kapitel 5).

Aus den Erkenntnissen der vorherigen Kapitel wurde ein Konzept entwickelt, um die betrachteten Datenmodelle zu analysieren. Aus den definierten Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 2.6) und den betrachteten Datenmodellen (vgl. Kapitel 5) wurden Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) abgeleitet. Die verschiedenen Datenmodelle wurden überprüft, ob diese die Anforderungen

unterstützen oder nicht unterstützen. Dieselben Anforderungen wurden bezüglich Ihres Bedarfs in den jeweiligen Anwendungsfällen mit „irrelevant“, „wichtig“ und „existenziell“ eingeschätzt (vgl. Kapitel 6.3.1, Anhang I, II). Der Bedarf wird folglich mit unterschiedlichen Punktzahlen bewertet. Mit Hilfe dieser beiden Auswertungen kann zum einen die maximal erreichbare Punktzahl des Anwendungsfall je Datenmodell über alle zuvor definierten Anforderungen ermittelt werden (vgl. Kapitel 6.3.2). Zum anderen werden für die Bewertung der Datenmodelle, die Anforderungen, die vom jeweiligen Anwendungsfall benötigt und gleichzeitig vom Datenmodell unterstützt werden, aufsummiert. Daraus folgt die absolute Eignung des Datenmodells (vgl. Kapitel 6.3.3). Anschließend wird daraus der prozentuale Anteil, der aus dem Quotienten der erreichten Punktzahl (absoluten Eignung) und der maximalen Punktzahl errechnet (vgl. Kapitel 6.3.4). Dies wird für jedes Datenmodell in jedem Anwendungsfall durchgeführt. Der prozentuale Anteil indiziert in welchem Umfang das Datenmodell den jeweiligen Anwendungsfall abdeckt. Für eine abschließende Bewertung wird für jedes Datenmodell ein Mittelwert über alle Anwendungsfälle gebildet (vgl. Kapitel 6.3.5). Je nach Bedarf können die Anwendungsfälle bei der Mittelwertbildung, beispielsweise anhand von Leistungsphasen gewichtet werden (vgl. Kapitel 6.3.6).

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das zuvor entwickelte Konzept angewandt. Dazu wurden 11 verschiedene Datenmodelle bzw. Versionen dieser betrachtet (vgl. Kapitel 5.2). Für die Anwendungsfälle wurden die 20 von BIM4INFRA2020 definierten Anwendungsfälle verwendet (vgl. Kapitel 2.6). Aus diesen ergeben sich allgemeine, semantische und geometrische Anforderungen. Diese wurden bezüglich der Anforderungen mit 0 für „irrelevant“, 1 für „wichtig“ und 3 für „existenziell“ eingeschätzt. Dabei haben sich die semantisch-geometrischen Datenmodelle als die überwiegend besseren Datenmodelle herausgestellt. Besonders IFC4x1 deckt die Anforderungen der jeweiligen Anwendungsfälle gut ab. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Anwendungsfälle nach Bedarf in den jeweiligen Leistungsphasen gewichtet. Daraus resultiert welches Datenmodell in welcher Leistungsphase bestmöglich geeignet ist. Auch hier überzeugt das Datenmodell IFC4x1. Besonders die früheren Leistungsphasen werden von den Datenmodellen umfassender erfüllt als die späteren Leistungsphasen.

Das Ergebnis auf die Forschungsfrage, die in der Einleitung beschrieben wurde, ob eine Bahnsteigplanung mit der BIM-Methode möglich ist muss verneint werden. Das liegt daran, dass die offenen Datenmodelle die Bahnsteigplanung nicht ausreichend unterstützen. Das Beste der untersuchten Datenmodelle ist IFC4x1, wobei auch dieses keine relevanten Entitäten für die Bahnsteigplanung besitzt.

Trotz der Vielzahl an Möglichkeiten der Open-BIM-Methode bestehen dennoch bestimmte Einschränkungen. Mit der Open-BIM-Methode sollte ein interoperabler Austausch zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten gewährleistet sein (vgl. Kapitel 2.2). Im Falle eines offenen, detaillierten Standards, dass alle relevanten Anforderungen abdeckt, kann dies ermöglicht werden. Daraus kann ein sehr großer Nutzen im Verlauf des Projektes gezogen werden.

Die offenen Datenmodelle ermöglichen eine softwareunspezifische Umgebung und jeder Projektbeteiligte kann somit seine Software eigenständig wählen. Folglich werden den Unternehmen keine Softwareapplikationen vorgeschrieben. Insbesondere kleinere Unternehmen können somit wettbewerbsfähig und am Markt bestehen bleiben. Des Weiteren bildet sich mit Hilfe von ausgeprägten, offenen und standardisierten Datenmodellen kein Monopol einer einzelnen Softwareapplikation, da die individuellen Stärken jeder einzelnen genutzt werden können. Damit geht die Vielfalt der verschiedenen Softwareapplikation nicht verloren. Im Falle eines unzureichenden Datenmodells, in denen das Datenmodell die Anforderungen in den jeweiligen Anwendungsfällen nicht abdecken kann, kann es zu einem Monopol kommen.

Da die offenen Datenmodelle derzeit noch nicht ausgereift genug sind (vgl. Kapitel 7.3 und Kapitel 7.4), sind direkte Import- / Exportschnittstellen hilfreich für die Umsetzung der BIM-Methode im Projekt. Dabei handelt es sich jedoch nicht wie gewünscht um eine Open-BIM-Methode, sondern um eine Closed-BIM-Methode (vgl. Kapitel 2.3).

Der Prozess der Standardisierung ist komplex. Daher ist ein fortwährender Prozess über die nächsten Jahre zu erwarten und die Open-BIM-Methode ist währenddessen je nach Anwendungsfall nur eingeschränkt nutzbar.

Der Geltungsbereich dieser Arbeit umfasst die betrachteten Datenmodelle (vgl. Kapitel 5) und die Anwendungsfälle (vgl. Kapitel 2.6). Die daraus resultierenden Anforderungen können variieren. Dabei gilt es zu beachten, dass die Anforderungen in jedem Projekt unterschiedliche Bedeutung zugewiesen werden können. Deshalb sollte dies nicht zu verallgemeinernd angesehen werden, sondern je nach Informationsanforderungen und Bedarf projektspezifisch angepasst werden.

Die Dokumentationen der Datenmodelle sind in manchen Fällen unzureichend. Dies beschränkt das Verständnis der Datenmodelle und kann mit einer ausführlicheren Dokumentation der Datenmodelle verbessert werden (vgl. Kapitel 7.1).

Die offenen, standardisierten Datenmodelle sollten weiterhin verbessert werden. Bei einer nachfolgenden Arbeit können weitere Datenmodelle oder neuere Versionen der Datenmodelle

analysiert werden. In anderen Gewerken treten von dieser Arbeit abweichende Anwendungsfälle auf, die ebenfalls analysiert werden können. Daraus resultierend können weitere Anforderungen mit Hilfe des entwickelten Konzeptes bewertet werden.

## 8.2 Ausblick

Ziel aller Beteiligten sollte eine Weiterentwicklung der offenen und standardisierten Datenmodelle sein. Dazu gibt es im Bereich der Bahnsteigplanung im Rahmen der Open-BIM-Methode Ansätze mit IFCRail, dass in der Version IFC5 implementiert wird. Diese Version ist zurzeit in der Entwicklung, jedoch dauert die Veröffentlichung und die Implementierung noch einige Jahre. Diese Aussage kann mit einem Rückblick in die jüngste Vergangenheit der IFC Entwicklung belegt werden. Die Version IFC4 wurde im Jahr 2013 offiziell veröffentlicht. In der Projektplanung wird jedoch noch immer mit der Version IFC2x3 ausgetauscht. Dies liegt hauptsächlich daran, dass die meisten Softwareapplikationen die Version IFC4 noch nicht implementiert haben. Manche Softwareapplikationen besitzen die Möglichkeit für eine Export- / Importstelle für IFC4. Aber nur wenn alle Beteiligten, sich weiterentwickeln kann es zu einem großflächigen Einsatz der neuen Version kommen (vgl. Kapitel 5.2.6).

Für die Implementierung der Version IFC5 ist es wünschenswert, diese möglichst zeitnah zu ermöglichen. Um dieses Ziel zu erreichen, könnten den Softwareapplikation Anreize geschaffen werden, um damit die Prioritäten, die neue Version zu unterstützen, zu erhöhen. In einer intakten Marktwirtschaft ist der freie Leistungswettbewerb ein wichtiges Instrument die Anreize und die Leistungsbereitschaft zu steuern. Die Unternehmen können in dieser nur auf dem Markt wettbewerbsfähig bleiben, wenn sie den technischen Fortschritt ermöglichen. Die Voraussetzung hierfür ist eine herstellerneutrale Ausschreibung, um eine individuelle Wahl zu ermöglichen.

Da derzeit die herstellerneutralen Formate noch nicht für eine Bahnsteigplanung ausreichend sind kann bis zur Implementierung der Version IFC5 die Closed-BIM-Methode verwendet werden. Dabei sollte darauf geachtet werden, dass die freie Marktwirtschaft in diesem Sektor momentan gefährdet ist und dabei kein Monopol entsteht.

Zusammenfassend kann man sagen, dass die Geschwindigkeit der Entwicklung und Implementierung der offenen Datenformate erhöht werden sollte, um eine freie Marktwirtschaft zu gewährleisten.

Tabelle 7: Zwischentabelle I aus entwickeltem Konzept (vgl. Kapitel 6.3) enthält Analyse der Unterstützung der definierten allgemeinen, semantischen und geometrischen Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) auf die betrachteten Datenmodelle (vgl. Kapitel 5.1)

I	Anforderungen	DWG	DXF	FBX	OBJ	CPIXML	IFC2x3	IFC4x1	CityGML	LandXML	LandInfra	PlanPro
		.dwg	.dxf	.fbx	.obj/.mod	.cpixml <sup>34</sup>	.ifc/.ifcxml	.ifc/.ifcxml	.gml/.xml	.xml	.xml	.PlanPro
Allgemein	nicht proprietär / nativ	✗ <sup>9</sup>	✓ <sup>9</sup>	✗	✓	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>28</sup>	✓	✓
	Zertifizierung der Software <sup>21</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>21</sup>	✓ <sup>21</sup>	✓ <sup>25</sup>	✓ <sup>28</sup>	✗ <sup>25</sup>	✗
	Internationalität	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓	✓	✓ <sup>37</sup>	✓ <sup>37</sup>	✓ <sup>22</sup>	✓ <sup>22</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
Semantik	individuelle Schemaerweiterung <sup>2</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>24</sup>	✗ <sup>39</sup>	✗	✗
	individuelle Attributzuweisung	✓ <sup>11</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✗	✓ <sup>33</sup>	✓	✓	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>30</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Räumliche Elemente für physische Elemente <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✗ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	Typisierung <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>99</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Dokumentation von Bauleistungen <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Mängelinformation <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	räumliche Beziehungen der Entitäten <sup>3</sup>	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Parametrische Abhängigkeit <sup>5,3</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>15</sup>	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✓ <sup>6</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	<b>Visualisierung<sup>1</sup></b>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✓	✓ <sup>32</sup>	✗
	Material-/ Farbeigenschaften <sup>4</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>19</sup> /✗	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✗ <sup>30</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗ <sup>40</sup>
	<b>4D-Planung<sup>1</sup></b>	✗	✗	✗	✗	✗ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	Bauablaufplan <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	Termininformation <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	Verknüpfung von Vorgängen <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	Mengeninformationen <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	<b>5D-Planung<sup>1</sup></b>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
	Kostenelemente <sup>4</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗
<b>Infrastruktur</b>	✗	✗	✗	✗	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>	
Digitales Geländemodell	✗	✗	✗	✗	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>43</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗	
Achse	✗	✗	✗	✗	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>	
Bahnsteig	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗/✓ <sup>24</sup>	✗	✗	✗/✓ <sup>35</sup>	
Geometrie	<b>Kurven<sup>23</sup></b>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15,10</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17,10</sup>	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35</sup>
	Polylinie <sup>23</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17</sup>	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓	✓ <sup>32</sup>	✓
	Bezier-Kurven <sup>5,6,23</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17</sup>	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>26</sup>	✗	✓ <sup>32</sup>	✗
	NURBS <sup>5,6,23</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17</sup>	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>26</sup>	✗	✗ <sup>32</sup>	✗
	Achsengeometrie <sup>20</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>
	<b>Flächenmodell<sup>5,23</sup></b>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17</sup>	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	Triangulierte Darstellung <sup>5</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15,10</sup>	✓ <sup>16</sup>	✓ <sup>17,10</sup>	✓ <sup>34</sup>	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26,27</sup>	✓ <sup>6</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	<b>Volumenmodell explizit<sup>5,6</sup></b>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>13</sup>	✗	✗	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	BRep <sup>5</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>13</sup>	✗ <sup>16</sup>	✗	✓ <sup>34</sup>	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>26</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✗
	<b>Volumenmodell implizit<sup>5,6</sup></b>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>13</sup>	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>24,26</sup>	✓ <sup>6</sup> /✗ <sup>43</sup>	✗	✗
	Constructive Solid Geometry <sup>5</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>13</sup>	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>26</sup>	✗ <sup>30</sup>	✗	✗
	Extrusions- und Rotationsverfahren <sup>5</sup>	✓ <sup>13</sup>	✓ <sup>15</sup>	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>20</sup>	✗ <sup>26</sup>	✗ <sup>30</sup>	✗	✗
<b>Positionierung</b>	✓	✓	✓	✓	✓	✓ <sup>20</sup>	✓	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>	
Georeferenzierung mit globalem Koordinatensystem <sup>5</sup>	✗	✓ <sup>15</sup>	✗	✗	✗	✗ <sup>20</sup>	✓ <sup>7,8</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>	
projektspezifische, lokale Koordinatensysteme <sup>7</sup>	✗/✓ <sup>11</sup>	✗/✓	✓ <sup>16</sup>	✓	✗/✓	✓ <sup>20</sup>	✓ <sup>7</sup>	✓ <sup>24</sup>	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>	
Achsbezug <sup>8</sup>	✗	✗	✗	✗	✗	✓ <sup>36</sup>	✓ <sup>8</sup>	✗	✓ <sup>29</sup>	✓ <sup>32</sup>	✓ <sup>35,40</sup>	
Quellen	<sup>1</sup> (WALLNER & BOTH 2017)	<sup>9</sup> (MAY 2018)	<sup>14</sup> (BRACHT ET AL. 2018)	<sup>16</sup> (AUTO-DESK 2018 B)	<sup>17</sup> (WAVE-FRONT 2019)	<sup>33</sup> (XSD-Schema, 2018)	<sup>36</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL ALLIANCE FOR INTEROPERABILITY 2007)	<sup>20</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL LIMITED 2018)	<sup>22</sup> (NEJAT-BAKSH 2017)	<sup>28</sup> (LANDXML.ORG 2019)	<sup>32</sup> (SCAR-PONCINI ET AL. 2016)	<sup>35</sup> (SOMMER ET AL. 2019)
	<sup>2</sup> (BRÜGGEMANN & BOTH 2015)	<sup>10</sup> (HECKNER & WIRTH 2014)	<sup>15</sup> (AUTO-DESK 2018 A)		<sup>18</sup> (CHAKRAVORTY 2019)	<sup>34</sup> (RIB Software AG 2018)		<sup>21</sup> (BUILDINGS-MART INTERNATIONAL 2019A)	<sup>24</sup> (GRÖGER ET AL. 2012)	<sup>29</sup> (CREWS 2008)		<sup>40</sup> (ES-SER 2018)
	<sup>3</sup> (Verein Deutscher Ingenieure e.V. 2018)	<sup>11</sup> (Open Design Alliance 2018)			<sup>19</sup> (MURRAY & VAN RYPER 2019)				<sup>25</sup> (OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM 2019)	<sup>30</sup> (SAFE SOFTWARE 2019 B)		<sup>99</sup> Beispielprojekt
	<sup>4</sup> (BIM4INFRA2020 2018B)								<sup>26</sup> (ANDRAE ET AL. 2016)	<sup>39</sup> (SCAR-PONCINI 2013)		
	<sup>5</sup> (BORRMANN & BERKHAHN 2015)								<sup>27</sup> (COORS ET AL. 2014)	<sup>43</sup> (JI 2014)		
	<sup>6</sup> (OBERGRIEBER 2017)											
	<sup>7</sup> (MARKIĆ ET AL. 2018)											
	<sup>8</sup> (BORRMANN ET AL. 2017)											
<sup>23</sup> (MCGLENN ET AL. 2019)	<sup>13</sup> (SAFE SOFTWARE 2019 A)											
		✓ Anforderung unterstützt		✗ Anforderung nicht unterstützt		✓/✗ ungenaue Datengrundlage						

Anhang II

Tabelle 8: Zwischentabelle II aus entwickeltem Konzept (vgl. Kapitel 6.3) mit exemplarischen Annahmen des Bedarfs der Anforderungen (vgl. Kapitel 6.2) in den jeweiligen Anwendungsfällen (vgl. Kapitel 2.6)

II	Anforderungen	Anwendungsfall																				
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
		Bestandserfassung	Planungsvariantenuntersuchung	Visualisierung	Bemessung und Nachweisführung	Koordination der Fachgewerke	Fortschrittskontrolle der Planung	Erstellung von Entwurfs- und Genehmigungsplänen	Arbeits- und Gesundheitsschutz: Planung und Prüfung	Planungsfreigabe	Kostenschätzung und Berechnung	Leistungsverzeichnis, Ausschreibung, Vergabe	Terminplanung der Ausführung	Logistikplanung	Erstellung von Ausführungsplänen	Baufortschrittskontrolle	Änderungsmanagement bei Planungsänderungen	Abrechnung von Bauleistungen	Mängelmanagement	Bauwerksdokumentation	Nutzung für Betrieb und Erhaltung	
Allgemein	nicht proprietär / nativ	+	++	-	++	++	++	-	+	++	+	++	+	+	-	+	+	+	+	+	+	
	Zertifizierung der Software <sup>21</sup>	+	+	-	++	++	+	-	+	++	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	
	Internationalität	+	+	-	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	
Semantik	individuelle Schemaerweiterung <sup>2</sup>	+	+	-	+	-	-	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	+	
	individuelle Attributzuweisung	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	++	+	
	Räumliche Elemente für physische Elemente <sup>20</sup>	+	+	-	+	++	-	+	+	-	+	-	+	+	+	-	-	-	-	-	-	
	Typisierung <sup>4</sup>	+	+	-	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Dokumentation von Bauleistungen <sup>4</sup>	-	-	-	-	-	++	+	++	++	-	-	-	-	+	+	++	++	++	++	++	
	Mängelinformation <sup>4</sup>	+	-	-	-	-	++	+	++	++	-	-	-	-	+	+	++	++	++	++	++	
	räumliche Beziehungen der Entitäten <sup>3</sup>	+	+	-	+	+	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
	Parametrische Abhängigkeit <sup>5,3</sup>	+	+	-	+	-	+	-	+	-	+	+	-	+	-	-	+	-	-	-	-	
	Visualisierung <sup>1</sup>	+	+	++	+	++	+	+	+	+	+	+	-	++	+	+	+	++	-	+	+	+
	Material-/ Farbeigenschaften <sup>4</sup>	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	-	+	+	+
	4D-Planung <sup>1</sup>	-	+	-	-	-	++	-	+	-	+	+	++	+	-	++	-	+	+	+	+	-
	Bauablaufplan <sup>4</sup>	-	+	-	-	-	++	-	+	-	-	-	++	+	-	++	-	+	+	+	-	-
	Termininformation <sup>4</sup>	-	+	-	-	-	++	-	+	-	-	+	++	+	-	++	-	+	+	+	-	-
	Verknüpfung von Vorgängen <sup>4</sup>	-	+	-	-	-	++	-	+	-	-	-	++	+	-	++	-	+	+	+	-	-
	Mengeninformationen <sup>4</sup>	-	+	-	-	-	++	-	-	-	-	++	++	++	+	-	++	-	+	+	++	-
	5D-Planung <sup>1</sup>	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	++	++	-	-	-	-	-	+	+	-	-
	Kostenelemente <sup>4</sup>	-	+	-	-	-	+	-	-	-	-	++	++	-	-	-	-	-	+	+	-	-
Infrastruktur	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Digitales Geländemodell	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Achse	++	++	-	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Bahnsteig	++	++	-	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
Geometrie	Kurven <sup>23</sup>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Polylinie <sup>23</sup>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Bézier-Kurven <sup>5,6,23</sup>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	NURBS <sup>5,6,23</sup>	++	++	++	++	+	+	++	+	+	++	++	++	+	++	++	+	+	+	+	+	
	Achsengeometrie <sup>20</sup>	++	++	+	+	++	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Flächenmodell <sup>5,23</sup>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Triangulierte Darstellung <sup>5</sup>	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	
	Volumenmodell explizit <sup>5,6</sup>	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	
	BRep <sup>5</sup>	+	+	-	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	-	+	-	+	-	-	-	
	Volumenmodell implizit <sup>5,6</sup>	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	
	Constructive Solid Geometry <sup>5</sup>	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-	
Extrusions- und Rotationsverfahren <sup>5</sup>	+	+	-	+	-	-	-	-	-	-	+	+	-	-	+	-	-	-	-	-		
Positionierung	+	++	-	+	++	-	+	+	-	-	-	+	++	+	+	+	+	-	++	+	+	
Georeferenzierung mit globalem Koordinatensystem <sup>5</sup>	+	++	-	+	++	-	+	+	-	-	-	+	++	+	+	+	+	-	++	+	+	
projektspezifische, lokale Koordinatensysteme <sup>7</sup>	+	+	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	++	+	+	+	+	-	+	+	+	
Achsbezug <sup>8</sup>	+	++	-	+	+	-	+	+	-	-	-	+	++	+	+	+	+	-	+	+	+	
<b>Summe</b>		40	54	15	37	46	47	24	36	27	35	39	47	40	24	46	32	31	39	36	29	
Die Quellen der Anforderungen entsprechen den Quellen aus Anhang I		- „irrelevant“	+ „wichtig“	++ „existenziell“																		

## Anhang III

In dem digitalen Anhang befindet sich folgender Inhalt:

- Der schriftliche Teil der Arbeit als Dokument im Microsoft Word Format
- Der schriftliche Teil der Arbeit als PDF-Dokument
- Der schriftliche Teil der Arbeit als PDF-Dokument anonymisiert
- Die Bewertungsmatrix als Dokument im Microsoft Excel Format
- Die exportierten Dateien der Datenmodelle des Beispielprojektes
  - FBX
  - CPIXML
  - IFC2x3
  - IFC4x0
  - IFC4x1
  - LandXML
- Die exportierten Dateien des Modells
  - Revitdateien
  - ProVI Trassenprojekt
  - Punktwolke



## Literaturverzeichnis

Amann, J., Borrmann, A. (2015): Open BIM for Infrastructure – mit OKSTRA und IFC Alignment zur internationalen Standardisierung des Datenaustauschs. <[https://publications.cms.bgu.tum.de/2015\\_Amann\\_OKSTRA.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/2015_Amann_OKSTRA.pdf)> zuletzt geprüft am 26.04.2019.

Andrae, C., Coors, V., Böhm, K.-H. (2016): 3D-Stadtmodelle. Konzepte und Anwendungen mit CityGML. Berlin: Wichmann Verlag. ISBN: 978-3-879-07599-7.

Autodesk (2018a): AutoCAD User`s Guide. <<http://help.autodesk.com/view/ACD/2018/ENU>> zuletzt geprüft am 03.04.2019.

Autodesk (2018b): FBX Developer Help. <<http://help.autodesk.com/view/FBX/2018/ENU/>> zuletzt geprüft am 10.04.2019.

Beil, C., Kolbe, T. H. (2017): CityGML and the streets of New York - a proposal for detailed street space modelling. ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4/W5, S. 9-16. <<https://www.isprs-ann-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/IV-4-W5/9/2017/isprs-annals-IV-4-W5-9-2017.pdf>> zuletzt geprüft am 13.01.2019.

BIM4INFRA2020 (2018a): ENTWURF: Steckbriefe der wichtigsten BIM-Anwendungsfälle.

BIM4INFRA2020 (2018b): Umsetzung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen“ AP 1.2 „Szenariendefinition“ und AP 1.3 „Empfehlung“. <[https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2018/09/AP1.2-AP1.3\\_BIM4INFRA\\_Bericht-Stufenplan.pdf](https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2018/09/AP1.2-AP1.3_BIM4INFRA_Bericht-Stufenplan.pdf)> zuletzt geprüft am 10.04.2019.

Borrmann, A., Amann, J., Chipman, T., Hyvärinen, J., Liebich, T., Muhič, S., Mol, L., Plume, J., Scarponcini, P. (2017): IFC Infra Overall Architecture Project Documentation and Guidelines. <[https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/07/08\\_bSI\\_OverallArchitecture\\_Guidelines\\_final.pdf](https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/07/08_bSI_OverallArchitecture_Guidelines_final.pdf)>.

Borrmann, A., Berkhahn, V. (2015a): Grundlagen der geometrischen Modellierung. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6, S. 25-41.

Borrmann, A., Flurl, M., Jubierre, J. R., Mundani, R.-P., Rank, E. (2014): Synchronous collaborative tunnel design based on consistency-preserving multi-scale models. Advanced

Engineering Informatics 28, S. 499-517. <[https://publications.cms.bgu.tum.de/2014\\_Borrmann\\_ADVEI\\_Preprint.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/2014_Borrmann_ADVEI_Preprint.pdf)> zuletzt geprüft am 05.02.2019.

Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.) (2015a): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6.

Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J. (2015a): Einführung. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6, S. 1-21.

Bracht, U., Geckler, D., Wenzel, S. (2018): Datenmanagement und Softwarewerkzeugklassen. In: Bracht, U.; Geckler, D.; Wenzel, S. (Hrsg.): Digitale Fabrik. Methoden und Praxisbeispiele. 2., aktualisierte und erweiterte Aufl. Berlin: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-662-55782-2. (VDI-Buch), S. 173-228.

Brüggemann, T., Both, P. von (2015a): 3D-Stadtmodellierung: CityGML. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6, S. 177-192.

buildingSMART Australasia (2017): Model Setup IDM. Vol 1: Geo-referencing BIM. <[http://buildingsmart.org.au/wp-content/uploads/Vol-1-Geo-referencing-BIM\\_v1.2.pdf](http://buildingsmart.org.au/wp-content/uploads/Vol-1-Geo-referencing-BIM_v1.2.pdf)> zuletzt geprüft am 20.03.2019.

buildingSMART e.V. (2019a): buildingSMART - International. <<https://www.buildingsmart.de/buildingsmart-ev/bs-international>> zuletzt geprüft am 10.05.2019.

buildingSMART e.V. (2019b): buildingSMART-Anwenderhandbuch: Aktueller Arbeitsstand. <[https://www.buildingsmart.de/kos/WNetZ?art=News.show&id=1267&pk\\_campaign=newsletter\\_1\\_2019-05-23&pk\\_kwd=buildingSMART-Anwenderhandbuch%3A+Aktueller+Arbeitsstand](https://www.buildingsmart.de/kos/WNetZ?art=News.show&id=1267&pk_campaign=newsletter_1_2019-05-23&pk_kwd=buildingSMART-Anwenderhandbuch%3A+Aktueller+Arbeitsstand)> zuletzt geprüft am 27.05.2019.

buildingSMART International (2019a): Certification. <<https://technical.buildingsmart.org/community/software-certification/>> zuletzt geprüft am 10.04.2019.

buildingSMART International (2019b): Open Standards - the basics. <<https://www.buildingsmart.org/standards/technical-vision/open-standards/>> zuletzt geprüft am 05.04.2019.

buildingSMART International (2019c): Technical Resources. <<https://technical.buildingsmart.org/>> zuletzt geprüft am 10.04.2019.

buildingSMART International Alliance for Interoperability (2007): IFC2x Edition 3 Technical Corrigendum 1. <<https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/TC1/HTML/>> zuletzt geprüft am 09.04.2019.

buildingSMART International Limited (2018): Industry Foundation Classes Version 4.1.0.0. <[https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4\\_1/FINAL/HTML/](https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/)> zuletzt geprüft am 10.04.2019.

Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz: (1967): Eisenbahn-Bau und Betriebsordnung (EBO).

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015a): Reformkommission Bau von Großprojekten. Komplexität beherrschen - kostengerecht, termintreu und effizient Endbericht. <[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/reformkommission-bau-grossprojekte-endbericht.pdf?__blob=publicationFile)> zuletzt geprüft am 04.05.2019.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015b): Stufenplan Digitales Planen und Bauen. Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken. <[https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile)> zuletzt geprüft am 19.11.2018.

Chakravorty, D. (2019): OBJ File Format. Simply Explained for CAD and 3D Printing. <<https://all3dp.com/1/obj-file-format-3d-printing-cad/>> zuletzt geprüft am 04.04.2019.

China Railway BIM Alliance (2016a): Railway BIM Data Standard. (Version 1.0). <<https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/09/bSI-SPEC-Rail.pdf>> zuletzt geprüft am 20.04.2019.

China Railway BIM Alliance (2016b): Standard for Information Model Data Storage of Electric Power, Traction Power Supply, Communications, and Signaling Railway Engineering. bSI SPEC Rail part 2. <<https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/09/bSI-SPEC-Rail-part-2.pdf>> zuletzt geprüft am 20.04.2019.

Coors, V., Gröger, G., Häfele, K.-H., Casper, E. (2014): Handbuch für die Modellierung. Teil 1: Grundlagen (Regeln für valide GML Geometrie-Elemente in CityGML). <[https://files.sig3d.org/file/ag-qualitaet/201311\\_SIG3D\\_Modellierungshandbuch\\_Teil\\_1.pdf](https://files.sig3d.org/file/ag-qualitaet/201311_SIG3D_Modellierungshandbuch_Teil_1.pdf)> zuletzt geprüft am 05.04.2019.

Crews, N. (2008): LandXML-1.2. <<http://www.landxml.org/schema/LandXML-1.2/LandXML-1.2.xsd>>.

DB Netz AG (2009): Ril 813.0201A05 Personenbahnhöfe Planen. Nachweis der ausreichenden Bahnsteigfläche nach dem Reisendenaufkommen.

DB Netz AG (2012a): Ril 813 Personenbahnhöfe Planen.

DB Netz AG (2012b): Ril 813.0102A02 Personenbahnhöfe Planen. Ablaufschema zur Ermittlung der maßgebenden Reisendenzahlen für die Bemessung nach Reisendenaufkommen.

DB Netz AG (2012c): Ril 813.0201 Personenbahnhöfe Planen. Bahnsteige konstruieren und bemessen.

DB Netz AG (2012d): Ril 813.0201A03 Personenbahnhöfe Planen. Bahnsteiglage und -standorte am Gleis; Einbaumaße für Bahnsteige.

DB Netz AG (2012e): Ril 813.0201A04 Personenbahnhöfe Planen. Ermittlung der Mindestbreite des Bahnsteiges.

DB Netz AG (2012f): Ril 813.0202A01 Personenbahnhöfe Planen. Bemessung der Bahnsteigzugangsbreite nach Reisendenaufkommen.

DB Netz AG (2015): Ril 800.0110. Netzinfrastruktur Technik entwerfen.

DB Station & Service AG, DB Netz AG (2018): Vorgaben zur Anwendung der BIM Methodik. Digitales Planen und Bauen 2.3. <<https://www1.deutschebahn.com/resource/blob/1786332/6b06df89b45ff0d04c541c54660a6b1f/Vorgaben-zur-Anwendung-der-BIM-Methodik-data.pdf>> zuletzt geprüft am 29.01.2019.

DIN EN ISO: (2016): 29481-2:2016 Bauwerksinformationsmodelle - Handbuch der Informationslieferungen - Teil 2: Interaktionsframework.

DIN EN ISO: (2017): 29481-1:2017 Bauwerksinformationsmodelle - Handbuch der Informationslieferungen - Teil 1: Methodik und Format.

Dobrindt, A. (2017): Masterplan Bauen 4.0 vorgelegt. Dobrindt: Innovationsführer beim digitalen Bauen werden. <<https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Pressemitteilungen/2017/009-dobrindt-bim-gipfel.html>> zuletzt geprüft am 04.05.2019.

Donaubauer, A., Kolbe, T. H. (2016): Leitfaden Bezugssystemwechsel Koordinatensystem. <[https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/11218/Leitfaden\\_Bezugssystemwechsel.pdf](https://www.ldbv.bayern.de/file/pdf/11218/Leitfaden_Bezugssystemwechsel.pdf)> zuletzt geprüft am 23.04.2019.

Duden (2019): Interoperabilität. <<https://www.duden.de/rechtschreibung/Interoperabilitaet>> zuletzt geprüft am 13.12.2018.

Esser, S. (2018): Implementierung einer Datenschnittstelle zur Unterstützung der modellbasierten Planung von Bahnausrüstungstechnik. <[https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018\\_Esser\\_Vilgertshofer.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/theses/2018_Esser_Vilgertshofer.pdf)> zuletzt geprüft am 15.03.2019.

EU BIM Task Group (2017): Handbook for the introduction of Building Information Modelling by the European Public Sector. Strategic action for construction sector performance: driving value, innovation and growth. <[http://www.eubim.eu/downloads/EU\\_BIM\\_Task\\_Group\\_Handbook\\_FINAL.PDF](http://www.eubim.eu/downloads/EU_BIM_Task_Group_Handbook_FINAL.PDF)> zuletzt geprüft am 02.02.2019.

Goguen, J. A., Malcolm, G. (2000): Software Engineering with OBJ: Algebraic Specification in Action: Springer US. ISBN: 9780792377573. (Advances in Formal Methods).

Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C., Häfele, K.-H. (2012): OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard 2.0.0. <<http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0>> zuletzt geprüft am 04.02.2019.

Heckner, H., Wirth, M. (2014): Vergleich von Dateiformaten für 3D-Modelle. CEDIFA Arbeitsbericht 7. <[http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07\\_3D-Modell-Formate.pdf](http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07_3D-Modell-Formate.pdf)> zuletzt geprüft am 28.02.2019.

Houghton Mifflin Harcourt (2019): Semantics. <<https://ahdictionary.com/word/search.html?q=semantics>> zuletzt geprüft am 01.02.2019.

Ji, Y. (2014): Durchgängige Trassen- und Brückenplanung auf Basis eines integrierten parametrischen 3D-Infrastrukturbauproduktmodells. <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1224662/1224662.pdf>> zuletzt geprüft am 03.05.2019.

Kaden, R. (2018): Leitfaden Geodäsie und BIM Version 1.2. <[https://rundertischgis.de/images/2\\_publicationen/leitfaeden/GeoundBIM/Leitfaden%20Geodäsie%20und%20BIM\\_Onlineversion.pdf](https://rundertischgis.de/images/2_publicationen/leitfaeden/GeoundBIM/Leitfaden%20Geodäsie%20und%20BIM_Onlineversion.pdf)> zuletzt geprüft am 04.04.2019.

Koch, C. (2015a): Objektorientierte Modellierung. In: Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (Hrsg.): Building Information Modeling. Technologische Grundlagen und industrielle Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6, S. 43-56.

Kolbe, T. H. (2018): Vorlesung 8a: Interoperabilität. München:

Kutzner, T., Kolbe, T. H. (2016): Extending Semantic 3D City Models by Supply and Disposal Networks for Analysing the Urban Supply Situation. In: Kersten, T. P. (Hrsg.): Lösungen für

eine Welt im Wandel, Dreiländertagung der SGPF, DGPF und OVG, 36. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF. Bern: Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e.V. (Publikationen der Deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation (DGPF) e.V), S. 382-394.

Laakso, M., Kiviniemi, A. (2012): The IFC Standard. A Review Of History, Development, and Standardization. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*. <[https://www.researchgate.net/publication/252069448\\_The\\_IFC\\_Standard\\_-\\_A\\_Review\\_of\\_History\\_Development\\_and\\_Standardization](https://www.researchgate.net/publication/252069448_The_IFC_Standard_-_A_Review_of_History_Development_and_Standardization)> zuletzt geprüft am 29.01.2019.

LandXML.org (2019): Welcome Land Development Professionals! <<http://www.landxml.org/>> zuletzt geprüft am 04.04.2019.

Lange, N. d. (2002): *Geoinformatik in Theorie und Praxis*. 2. Aufl. Berlin: Springer. ISBN: 3 978-3540-28291-4.

Markič, Š., Donaubaauer, A., Borrmann, A. (2018): Enabling Geodetic Coordinate Reference Systems in Building Information Modeling for Infrastructure. <[https://publications.cms.bgu.tum.de/2018\\_Markic\\_ICCCBE.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/2018_Markic_ICCCBE.pdf)> zuletzt geprüft am 14.12.2018.

Markič, Š., Schlenger, J., Bratoev, I. (2017): Tangible Alignment Design. <[https://publications.cms.bgu.tum.de/2018\\_Markic\\_FBI.pdf](https://publications.cms.bgu.tum.de/2018_Markic_FBI.pdf)> zuletzt geprüft am 13.03.2019.

May, M. (2018): *CAFМ-Handbuch. Digitalisierung im Facility-Management erfolgreich einsetzen*. 4. Aufl. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.

McGlenn, K., Wagner, A., Pauwels, P., Bonsma, P., Kelly, P., O'Sullivan, D. (2019): Interlinking geospatial and building geometry with existing and developing standards on the web. *Automation in Construction* 103, S. 235-250.

Murray, J. D., van Ryper, W. (2019): Wavefront OBJ File Format Summary. <<http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm>> zuletzt geprüft am 01.03.2019.

Nejatbakhsh, N. (2017): Interoperability of traffic infrastructure planning and geospatial information systems. Technische Universität Dresden . <<http://tud.qucosa.de/api/qucosa%3A31143/attachment/ATT-0/>> - 20.03.2019.

Nottbeck, A. (2016): *Untersuchungen zu Auswirkungen von Geschwindigkeitserhöhungen auf Bahnstrecken im Bestand*. Technische Universität München . <<https://mediatum.ub.tum.de/doc/1295100/1295100.pdf>>.

Obergrießer, M. (2017): Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-16781-3.

OBERMEYER Planen+Beraten GmbH (2018): BIM-Koordinatoren-Schulung.

Open Design Alliance (2018): Open Design Specification for .dwg files. Version 5.4.1. <[https://www.opendesign.com/files/guestdownloads/OpenDesign\\_Specification\\_for\\_.dwg\\_files.pdf](https://www.opendesign.com/files/guestdownloads/OpenDesign_Specification_for_.dwg_files.pdf)> zuletzt geprüft am 28.02.2019.

Open Geospatial Consortium (2019): Compliance Navigation. <<http://www.opengeospatial.org/resource/products/compliant>> zuletzt geprüft am 05.04.2019.

RIB Software AG (2018): Specification CPI - Geometry Data Format.

Safe Software (2019a): Autodesk AutoCAD DWG/DXF (ACAD) Geometry Support. <[https://docs.safe.com/fme/html/FME\\_Desktop\\_Documentation/FME\\_ReadersWriters/acad/Geometry-Support-acad.htm](https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_ReadersWriters/acad/Geometry-Support-acad.htm)> zuletzt geprüft am 25.03.2019.

Safe Software (2019b): LandXML Quick Facts. <[https://docs.safe.com/fme/html/FME\\_Desktop\\_Documentation/FME\\_ReadersWriters/landxml/quick\\_facts\\_landxml.htm](https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_ReadersWriters/landxml/quick_facts_landxml.htm)> zuletzt geprüft am 05.04.2019.

Scarponcini, P. (2013): InfraGML Proposal (13-121). <[https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahU-KEwiF7saB2cDiAhVJ2qQKHROnCPgQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fportal.opengeospatial.org%2Ffiles%2F%3Farti-fact\\_id%3D56299&usg=AOvVaw2vNVy3yTx0y6QKBEah-Xhb](https://www.google.de/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahU-KEwiF7saB2cDiAhVJ2qQKHROnCPgQFjAAegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fportal.opengeospatial.org%2Ffiles%2F%3Farti-fact_id%3D56299&usg=AOvVaw2vNVy3yTx0y6QKBEah-Xhb)> zuletzt geprüft am 12.04.2019.

Scarponcini, P., Gruler, H.-C., Stubkjæ, E., Axelsson, P., Wikstrom, L. (2016): OGC® Land and Infrastructure Conceptual Model Standard (LandInfra). <<https://docs.opengeospatial.org/is/15-111r1/15-111r1.html>> zuletzt geprüft am 04.03.2019.

Sommer, M., Klaus, C., Brödel, R. (2019): PlanPro-Glossar 1.8.0.

Stadler, A., Kolbe, T. H. (2007): Spatio-semantic coherence in the integration of 3D city models. <[http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/2-c43/Session1/paper\\_Stadler.pdf](http://www.isprs.org/proceedings/xxxvi/2-c43/Session1/paper_Stadler.pdf)> zuletzt geprüft am 15.01.2019.

Verband Beratender Ingenieure: (2013): Honorarordnung für Architekten und Ingenieure.

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (2018): Entwurf VDI 2552-2. Building Information Modeling Begriffe.

---

Victoria (2016): The DWG File Specification. <<https://www.scan2cad.com/dwg/file-spec/>> zuletzt geprüft am 03.04.2019.

Wallner, S., Both, P. von (2017): BIM Tools Overview. In: Fioravanti, A.; Cursi, S.; Elahmar, S.; Gargaro, S.; Loffreda, G.; Novembri, G.; Trento, A. (Hrsg.): ShoCK! - Sharing of computable knowledge! ECAADe 2017 : proceedings of the 35th International Conference on Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe : 20th-22nd September 2017, Rome, Italy, Dep. of Civil, Building and Environmental Engineering, Faculty of Civil and Industrial Engineering, Sapienza University of Rome. Brussels, Rome: eCAADe (Education and Research in Computer Aided Architectural Design in Europe); Dep. of Civil Building and Environmental Engineering Faculty of Civil and Industrial Engineering Sapienza University of Rome. ISBN: 9789491207129, S. 137-146.

Wavefront (2019): B1. Object Files (.obj). <[http://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj\\_spec.pdf](http://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj_spec.pdf)> zuletzt geprüft am 04.04.2019.

Wu, C., Xu, B., Mao, C., Li, X. (2017): Overview of BIM Maturity measurement tools. ITcon Vol. 22, S. 34-62. <<http://www.itcon.org/2017/3>> zuletzt geprüft am 22.04.2019.



## Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Master-Thesis selbstständig angefertigt habe. Es wurden nur die in der Arbeit ausdrücklich benannten Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder sinngemäß übernommenes Gedankengut habe ich als solches kenntlich gemacht.

Ich versichere außerdem, dass die vorliegende Arbeit noch nicht einem anderen Prüfungsverfahren zugrunde gelegen hat.

München, 31. Mai 2019

---

Verena Wolf

Verena Wolf

████████████████████

████████████████████

verena.wolf@tum.de