



IFC als Datengrundlage für Schallimmissionsberechnungen bei Verkehrsanlagen

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
Master of Science (M.Sc.)
an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität
München.

Betreut von Prof. Dr.-Ing. André Borrmann
Simon Vilgertshofer M.Sc.

Baudirektor Christian Peetz, Landesbaudirektion Bayern

Eingereicht von Johannes Tegeler
Matrikelnummer: 

Eingereicht am 12.08.2022 in München

Abstract

In the current procedure of noise calculation in the Bavarian State Building Administration with the software CadnaA the data basis are 3D-CAD files, which are imported to CadnaA via the civil engineering software iTWO Civil. The geometrical basis data for the noise calculation are the terrain model, the road axis and the 3D city model.

By means of an BIM example project it is analyzed how model data can be used for a noise calculation. The model data comes from a project CDE and can be downloaded as submodels of each domain in IFC data format.

Although CadnaA supports a number of import formats, a direct IFC import is not possible. In CadnaA, roads are processed as polylines and the terrain surface is processed using elevation points, polylines (as contour lines) or terrain defining objects. Various software tools allow the transfer of the geometry contained in IFC files into alternative formats. An import of converted model data to CadnaA shows that the structure of the geometry thereby is unsuitable for noise calculation in CadnaA. There are two reasons for that. Firstly, CadnaA defines objects mostly by point coordinates. Secondly, the model geometry is very strongly segmented. The strong segmentation is due to the modeling in road construction. In this process, solids are usually interpolated from cross sections with a defined spacing, which are strongly granulated especially in narrow curves. In addition, the available model data do not contain an implicit or explicit form of the axis description, for example, as an IFC-Alignment file.

To simplify the models, the geometry contained in the IFC data is accessed via IFC programming interfaces. With the used programming interface „IFC OpenShell“ and the programming language Python, the entities of a file can be addressed individually. This allows the data underlying the geometry presentation to be processed and output directly. The DTM is represented in the available IFC data as a triangle mesh referencing a list of point coordinates. The developed script addresses the points, transforms them into global coordinates and outputs them as a list that can be read by CadnaA. The axis points for describing the road are calculated by another script from corner points of surface layer segments. In addition, the road width and the cross slope can be determined section by section. The axis points can be imported into CadnaA in the same way as the elevation points.

Finally, as an alternative method, a noise calculation is performed in an aggregate model. The strong segmentation of the model files proves to be an obstacle for the noise calculation as well as for the execution of a cut-out between the DTM and the planning models.

Zusammenfassung

Im aktuellen Verfahren der Lärmberechnung in der Bayerischen Staatsbauverwaltung mit der Software CadnaA dienen als Datengrundlage 3D-CAD Dateien, die über die Tiefbausoftware iTWO Civil zu CadnaA importiert werden. Die geometrischen Grundlagendaten für die Lärmberechnung sind dabei das Geländemodell, die Straßenachse und das 3D-Stadtmodell.

Anhand eines BIM-Beispielprojekts wird untersucht, wie Modelldaten für eine Lärmberechnung verwendet werden können. Die Modelldaten stammen aus einer Projekt CDE und können als Teilmodelle der einzelnen Fachdomänen im IFC-Datenformat heruntergeladen werden.

Zwar unterstützt CadnaA eine Reihe von Importformaten, ein direkter IFC-Import ist jedoch nicht möglich. In CadnaA werden Straßen als Polylinien und die Geländeoberfläche in der Regel über Höhenpunkte, Polylinien (als Höhenlinien) oder über geländebestimmende Objekte verarbeitet. Verschiedene Softwarewerkzeuge ermöglichen die Übertragung der in IFC-Dateien enthaltenen Geometrirepräsentation in alternative Formate. Ein Import von konvertierten Modelldaten zu CadnaA zeigt, dass die Struktur der Geometrie dabei für eine Lärmberechnung in CadnaA ungeeignet ist. Einerseits, weil CadnaA wie erwähnt Objekte zumeist über Punktkoordinaten definiert. Andererseits, weil die Modellgeometrie sehr stark segmentiert ist. Die starke Segmentierung liegt an der Modellbildung im Straßenbau. Dabei werden Volumenkörper üblicherweise aus Querprofilen mit einem definierten Abstand interpoliert, die besonders in engen Radien stark granuliert sind. Zudem enthalten die vorliegenden Modelldaten keine implizite oder explizite Form der Achsbeschreibung beispielsweise als IFC Alignment.

Um die Modelle zu vereinfachen, wird auf die in den IFC Daten enthaltene Geometrie über IFC-Programmierschnittstellen zugegriffen. Mit der verwendeten Programmierschnittstelle „IFC OpenShell“ und der Programmiersprache Python können die Entitäten einer Datei einzeln adressiert werden. Damit können die der Geometrirepräsentation zugrunde liegenden Daten direkt verarbeitet und ausgegeben werden. Das DGM ist in den verfügbaren IFC-Daten als Dreiecksnetz, welches auf eine Liste mit Punktkoordinaten referenziert, repräsentiert. Das entwickelte Skript adressiert die Punktkoordinaten, transformiert sie in globale Koordinaten und gibt sie als Liste aus, die von CadnaA gelesen werden kann. Die Achspunkte zur Beschreibung der Straße werden über ein weiteres Skript aus Eckpunkten der Deckschichtsegmente berechnet. Außerdem kann so die Fahrbahnbreite und die Querneigung abschnittsweise ermittelt werden. Die Achspunkte können analog zu den Höhenpunkten in CadnaA importiert werden.

Abschließend wird als alternative Methode eine Lärmberechnung in einem Gesamtmodell durchgeführt. Auch hier erweist sich die starke Segmentierung der Modelldateien als hinderlich bei der Schallberechnung sowie der Durchführung einer Ausstanzung zwischen dem DGM und der Planungsmodelle (Trassenkörper).

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Verkehr und Lärm	2
1.2	Zielsetzung und methodische Vorgehensweise	4
2	Grundlagen der Akustik	6
2.1	Wahrnehmung von Schall	6
2.2	Verkehrslärmschutzverordnung 16. BImSchV	9
2.3	Berechnung des Beurteilungspegels nach den RLS-19	10
2.3.1	Beurteilungspegel an Straßen	11
2.3.2	Schallausbreitung	15
2.3.3	Zusammenfassung	16
3	Grundlagen des Building Information Modeling	17
3.1	Hintergrund und Definition	17
3.2	BIM-Ausarbeitungsgrade	18
3.3	BIM-Klassifizierung	19
3.4	BIM-Leistungsniveaus	19
3.5	BIM-Strategien	20
3.6	BIM Strategie des BMVI	21
3.7	Bauteile, Bauteilgruppen und Fachobjekte im Gesamtmodell	23
3.8	Geometrische Modellierung	24
3.8.1	Explizite Verfahren	24
3.8.2	Implizite Verfahren	26
3.9	BIM im Straßen und Brückenbau	27
4	BIM Datenaustausch	29
4.1	Software Interoperabilität	29
4.2	Das Datenmodell der Industry Foundation Classes (IFC)	29
4.2.1	Schichtenarchitektur im IFC Datenmodell	31
4.2.2	Vererbung	32
4.2.3	Generelles Konzept der Objektbeziehungen	33
4.2.4	Räumliche Aggregationshierarchie	34
4.2.5	Geometrische Repräsentation	34
4.2.6	Aufbau einer IFC STEP-Datei	37
5	Konventioneller Prozess der Lärmberechnung	39
5.1	Beispielprojekt B299	39
5.2	Modelldaten in CDE	40
5.3	Datenaufbereitung in iTWO Civil	42
5.3.1	Datengrundlage	42

5.3.2	Datenschnittstelle von iTWO Civil zu CadnaA	42
5.4	Datenimport zu CadnaA	46
5.5	Schallberechnung in CadnaA	47
6	Datengrundlage zur Lärmberechnung	50
6.1	Geländemodell	50
6.2	Straßenachse/Trasse	51
6.3	Nachbarbebauung/Häuser	52
6.4	Importformate CadnaA	52
7	Ansätze zur IFC-basierten Lärmberechnung	55
7.1	Konvertierung der IFC Modellgeometrie	55
7.2	IFC-Programmierschnittstellen	56
7.2.1	IFC Datenverarbeitung mit IfcOpenShell und Python	57
7.2.2	Import der Daten in CadnaA	68
7.2.3	Vergleich der Berechnungsergebnisse	69
7.3	Zusammenfassung	72
8	Beispiel einer Lärmberechnung in einem Gesamtmodell	74
8.1	Erstellung eines Gesamtmodells in KorFin Model	74
8.2	Lärmberechnung in KorFin	76
9	Zusammenfassung und Ausblick	80
9.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	80
9.2	Fazit und Einsatzgrenzen	81
9.3	Ausblick	83
A	Software	84
A.1	Entfernung ausgewählter Körper aus IFC in Desite	84
A.2	Installation von IfcOpenShell und Python	85
A.3	Orthophotos komprimieren mit IrfanView	86
A.4	Flächen zuschneiden mit QGIS	86
B	Skripte	88
C	Digitaler Anhang	92
	Literaturverzeichnis	93

Abkürzungen

ALKIS	Amtliches Liegenschaftskatasterinformationssystem
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BIM	Building Information Modeling
BImSchV	Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes
BMVI	Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur
BRep	Boundary Representation
BVWP	Bundesverkehrswegeplan
CAD	Computer Aided Design
CDE	Common Data Environment
CEN	Comité Européen de Normalisation
CSG	Constructive Solid Geometry
DGM	Digitales Geländemodell
DOP	digitales Orthophoto
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke
ecw	Enhanced Compression Wavelet
EEA	European Environment Agency
FM	Fachmodell
FzG	Fahrzeuggruppe
GIS	Geoinformationssystem
GM	Gesamtmodell
GUID	Globally Unique Identifier
IFC	Industry Foundation Classes
KBA	Kraftfahrtbundesamt
KFZ	Kraftfahrzeug
LoD	Level of Detail
LOD	Level of Development
LOG	Level of Geometry
LOI	Level of Information
LOIN	Level of Information Need
RLS	Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen
RQ	Regelquerschnitt
SDT	Straßendeckschichttyp
SSoT	Single Source of Truth
STEP	Standard for the Exchange of Product Model Data
vef	Vertex-Edge-Face
VSCode	Visual Studio Code
WHO	World Health Organization
XML	Extensible Markup Language

Kapitel 1

Einführung

„Erst digital, dann real bauen“ lautet der Grundsatz des Stufenplans Digitales Planen und Bauen, der 2015 vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) herausgegeben wurde (BMVI, 2015b). Der Stufenplan sollte die bis dahin im internationalen Vergleich in Deutschland eher schleppend vorangeschrittene Digitalisierung des Planens und Bauens bis 2020 zum Standard für Verkehrsinfrastrukturprojekte machen. Die Forderung zur vermehrten Verwendung von digitalen Methoden gründet auf Empfehlungen der „Reformkommission Bau von Großprojekten“, die einberufen wurde, nachdem es in Deutschland bei einer Reihe von Großprojekten zu Verzögerungen und Kostenüberschreitung gekommen war. Anmerkung: Kurz vor Fertigstellung dieser Arbeit wurde das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) in Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) umbenannt. Mit BMVI ist daher im Folgenden das heutige BMDV gemeint.

Bei der Digitalisierung des Bauens nimmt das Building Information Modeling (BIM) eine zentrale Rolle ein. Dabei werden sämtliche Informationen konsistent über den gesamten Lebenszyklus einer Anlage, von Planung und Bau über die Betriebsphase bis hin zum Rückbau, in einem digitalen Modell gehalten und genutzt. Durch kollaboratives Arbeiten aller Beteiligten an einem Bauwerksmodell steigt die Produktivität, und Planungsfehler können frühzeitig erkannt und beseitigt werden. Zudem können anhand von Analysen und Simulationen am Modell wertvolle Informationen für die Planungs-, Bau- und Betriebsphase gewonnen, visualisiert, ausgewertet und geteilt werden. Für eine möglichst effiziente Anwendung der BIM-Methodik und zur Ausschöpfung aller Vorteile bedarf es Arbeitsabläufen und Werkzeugen mit möglichst geringem Datenverlust zwischen verschiedenen Anwendungen. (BORRMANN, KÖNIG et al., 2021)

Durch zahlreiche Pilotprojekte, Standardisierungen, Veröffentlichungen und Initiativen hat die Verbreitung und Anwendung von BIM nach der Herausgabe des Stufenplans des BMVI einen deutlichen Schub erfahren. Darauf aufbauend wurden mit dem Masterplan BIM Bundesfernstraßen des BMVIs Ende des Jahres 2021 die Weichen für eine noch stärkere Nutzung von BIM beim Bundesfernstraßenbau in der Zukunft gestellt.

Trotz aller positiven Impulse und Fortschritten ist die durchgängige, vernetzte und konsistente Anwendung von BIM im Infrastrukturbau noch nicht erreicht. Werkzeuge, Prozesse und Datenformate für eine durchgehende parametrisierte und vernetzte 3D-Planung befinden sich noch im Entstehen. Modelle werden teils nur für einzelne Gewerke als Insellösung verwendet, und es besteht keine durchgehende 3D-Planung in einem verknüpften Gesamtmodell (APPELT et al., 2021a).

Infrastrukturplanungen stehen immer in einer starken Wechselwirkung mit Umwelt und betroffenen Anwohnern und Anwohnerinnen. Einen großen Stellenwert bei der Planung für Neubau- oder Umbaumaßnahmen und der Akzeptanz der Bevölkerung nimmt die Lärmimmission bzw. der Lärmschutz ein. Durch BIM können bei der Erstellung eines umfangreichen Gesamtmodells effizient große Mengen an Daten verschiedener Art zusammengeführt und überblickt werden. BIM erleichtert dabei die Analyse und Interpretation der Daten, um Eingriffe und deren Auswirkungen zu vermeiden oder möglichst gering zu halten. In einem vernetzten, parametrisierten Modell können viele Umgebungsdaten integriert und früh bei der Planung berücksichtigt werden.

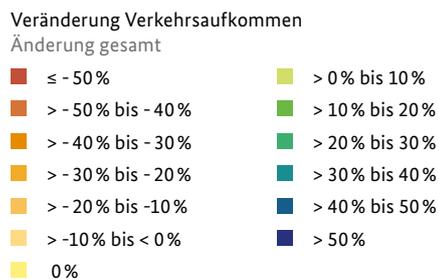
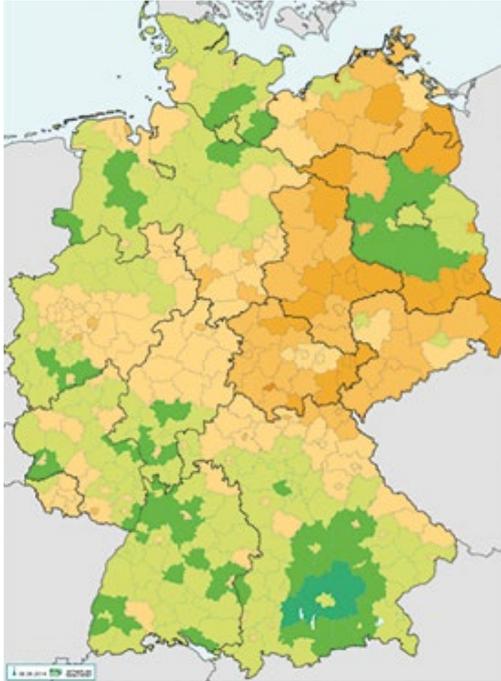
1.1 Verkehr und Lärm

In den vergangenen Jahrzehnten hat der motorisierte Individualverkehr in Deutschland stark zugenommen. Waren 1960 noch 8 Millionen Kraftfahrzeuge (KFZs) in Deutschland zugelassen, bezifferte das Kraftfahrtbundesamt (KBA) 2022 die Anzahl an zugelassenen Fahrzeugen auf fast 60 Millionen. Das entspricht einer Steigerung von etwa 750 %. Die Bevölkerungszahl in Deutschland hat sich zum Vergleich im Zeitraum von 1960 bis 2021 von 73,0 auf 83,2 Millionen Einwohner und Einwohnerinnen gesteigert, was einer Zunahme von etwa 14 % entspricht (DESTATIS, 2022). Besonders stark nahm die Verkehrsbelastung auf Autobahnen zu. Allein von 1985 bis 2000 hat sich der Verkehr hier auf durchschnittlich ca. 46.000 KFZ/24 h verdoppelt (STMB, n. d.).

In den kommenden Jahren wird der Personen- und Güterverkehr weiter zunehmen. Bis 2030 wird, ausgehend von 2010, mit einer Zunahme der Verkehrsleistung in Deutschland von 38 % im Güter- und 13 % im Personenverkehr gerechnet (BMVI, 2016). Analog zur Bevölkerungsentwicklung ist die Zunahme des Verkehrsaufkommens regional sehr unterschiedlich, wie Abb. 1.1 zeigt. Im Süden Deutschlands und im Umland von Großstädten ist ein überdurchschnittliches Wachstum zu sehen.

Deutschland hat weltweit das dichteste und mit einer Gesamtlänge von über 13.000 km eines der längsten Autobahnnetze (IÖR, 2005; STATISTISCHES BUNDESAMT, 2021). Während die Verkehrsinfrastruktur zur Bewältigung der steigenden Verkehrsleistung die Grundlage für wirtschaftliches Wachstum und Sicherung des Wohlstands darstellt, führt der Ausbau zu Konflikten mit Natur- und Lebensräumen. Allein durch Autobahnen gilt in Deutschland eine Fläche von über 10.000 km² als „stark verlärmte“ (IÖR, 2005). Das entspricht dem über 32-fachen der Fläche der Stadt München. Zudem führen Wildfangzäune, Lärmschutzwände und Leitplanken zu einer Zerschneidung von Flächen. In Deutschland ist Straßenverkehrslärm nach Studien des Umweltbundesamts die am stärksten wahrgenommene Art der Lärmbelästigung (Abb. 1.2). In der alle zwei Jahre durchgeführten Erhebung gaben mindestens die Hälfte der Befragten an, durch Straßenverkehrslärm „etwas gestört oder belästigt“ zu sein (UMWELTBUNDESAMT, 2020). Und auch nach dem Bericht „Umgebungslärm in Europa“ der European Environment Agency (EEA) stellt Umgebungslärm, insbesondere Straßenverkehrslärm, nach wie vor ein großes Umweltpro-

Veränderung Verkehrsaufkommen



Einwohnerentwicklung

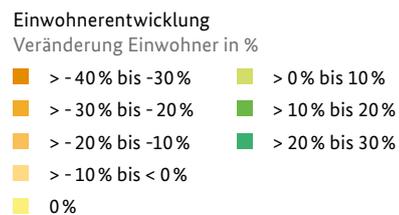
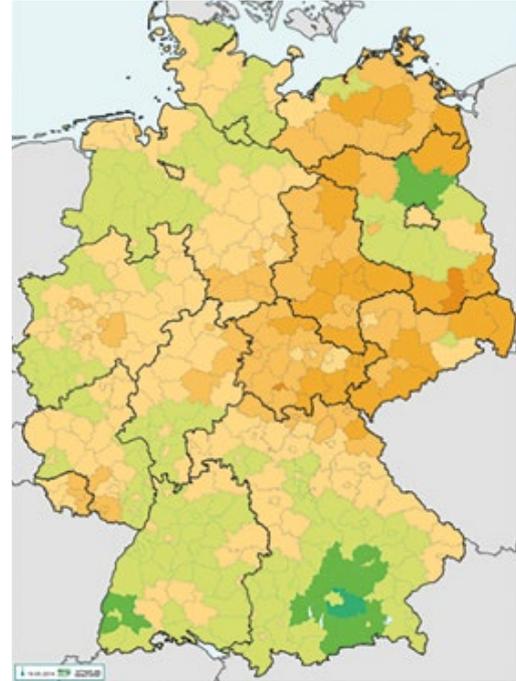


Abbildung 1.1: Veränderung von Verkehrsaufkommen und Einwohnerentwicklung 2030 gegenüber 2010 (BMVI, 2016)

blem dar, das die Gesundheit und das Wohlbefinden von Millionen Menschen in Europa beeinträchtigt.

Rund 20 % der Bevölkerung der Europäischen Union (das entspricht mehr als 100 Millionen Menschen) sind einer langfristigen, gesundheitsschädlichen Lärmbelastung ausgesetzt. Lärm von Straßen-, Schienen- und Flugverkehr sowie Industriequellen kann erhebliche gesundheitliche Auswirkungen haben. Zu den Folgen zählen Schlafstörungen, Erkrankungen des Herz-Kreislauf-Systems und des Stoffwechsels sowie kognitive Beeinträchtigungen bei Kindern (EEA, 2020). In Europa verursacht die langfristige Belastung durch Lärm schätzungsweise 12.000 vorzeitige Todesfälle und trägt zu 48.000 Fällen von Herz-Kreislauf-Erkrankungen pro Jahr bei. 22 Millionen Menschen leiden Schätzungen zu Folge chronisch an starker Lärmbelastung und 6,5 Millionen Menschen an starken Schlafstörungen. Seit 2012 ist die Zahl der Menschen, die hohen Lärmpegeln ausgesetzt sind, relativ konstant. In Zukunft ist jedoch durch steigende Verkehrsbelastung und Städtewachstum mit einer weiter steigenden Zahl an Belasteten zu rechnen (EEA, 2020). Die gesundheitliche Belastung durch Lärm wird häufig unterschätzt. Nach Erkenntnissen der

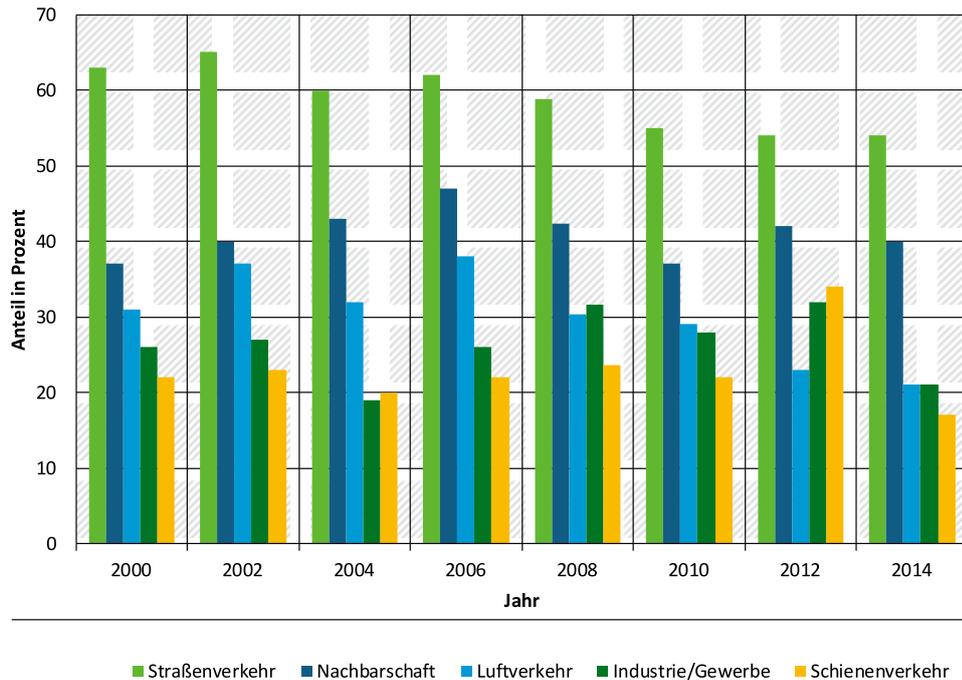


Abbildung 1.2: Lärmbelastung in Deutschland 2000-2014 (UMWELTBUNDESAMT, 2020)

World Health Organization (WHO) ist Lärm, unmittelbar nach Feinstaub, der zweitgrößte umweltbedingte Auslöser für Gesundheitsprobleme (WHO, 2011).

In Deutschland unterliegt der Bau oder wesentliche Änderungen von öffentlichen Straßen oder Schienenwegen den Immissionsgrenzwerten der Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV). Verkehrslärm ist dabei in der 16. BImSchV der Verkehrslärmschutzverordnung geregelt. Bei Neubau oder wesentlicher Änderung eines Verkehrswegs muss sichergestellt werden, dass die Grenzwerte der Verordnung eingehalten werden.

Mit der stark geförderten Entwicklung von BIM im Straßenbau ist das Ziel, alle relevanten Daten und damit auch die Schallimmissionen im digitalen Modell vorliegen zu haben. Zudem können digitale Methoden dazu beitragen, dass bereits in frühen Leistungsphasen umfangreiche Untersuchungen zu Lärmemissionen anhand vielzahliger Varianten durchgeführt werden können. Eine umwelttechnisch optimierte dynamische Trassenfindung kann dabei zu einer Reduzierung der Lärmbelastung führen.

1.2 Zielsetzung und methodische Vorgehensweise

Ziel dieser Arbeit ist zu untersuchen, wie BIM-Modelldaten nach aktuellem Stand für Lärmemissionsberechnungen verwendet werden können. Die Datengrundlage stellen IFC-Modelldaten aus einem CDE eines exemplarischen Straßenbau-Projekts des Bauamts Landshut dar.

Zunächst werden zum besseren Verständnis die Grundlagen der Akustik mit der Wahrnehmung von Schall sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen und das Verfahren zur Berechnung von Beurteilungspegeln in Deutschland erläutert. Neben den Grundlagen der Akustik werden ebenso die Grundlagen des Building Information Modelings thematisiert. Besonders wichtig sind dabei die verschiedenen Möglichkeiten der geometrischen Modellierung. Darauf folgt die Beschreibung der Datenstruktur und der Geometriepäsentationen in den IFC. Anschließend wird zunächst der konventionelle Prozess einer Lärmberechnung bei der Staatsbauverwaltung erläutert und dessen Datengrundlagen und Schnittstellen näher betrachtet. Daraufhin wird untersucht, welche Importmöglichkeiten die einschlägig genutzte Software zur Lärmberechnung CadnaA bietet, und wie IFC-Daten darüber transportiert werden können. Zudem wird analysiert, welche Voraussetzungen für den Import und die anschließende Lärmberechnung an die Modelldaten gestellt werden müssen. Nach erfolgreichem Import werden Daten aus zwei verschiedenen Quellen mit unterschiedlichen Genauigkeiten anhand von beispielhaften Schallberechnungen verglichen. Abschließend werden die Modelldaten in ein BIM-Gesamtmodell eingefügt und dort ebenfalls eine Schallberechnung durchgeführt.

Kapitel 2

Grundlagen der Akustik

2.1 Wahrnehmung von Schall

Die menschliche Wahrnehmung von Schall basiert auf einer Wirkungskette physikalischer Ereignisse. Eine Schallquelle versetzt die sie umgebende Luft in kleine Schwingungen. In Folge der Kompressibilität und Masse der Luft werden diese zum Ohr des Hörers übertragen. Physikalisch gesehen sind die Schwingungen kleine Druckschwankungen in der übertragenden Luft, Gas oder Flüssigkeit. Dabei wird der atmosphärische Ruhedruck p_0 von dem entsprechenden Wechseldruck, dem Schalldruck p , überlagert. Um eine Schallquelle entsteht so ein räumlich verteiltes Schallfeld, das zeitabhängig verschiedene Momentandrücke besitzt.

Am Immissionsort hat Schall zwei wesentliche Merkmale: die Lautstärke bzw. Schallstärke, dargestellt über den Schalldruck und die Frequenz f , definiert durch periodendauern pro Sekunde, ausgedrückt in der Einheit Hertz (Hz). Die relevante Frequenz für den Hörbereich des Menschen liegt bei etwa 16 bis 16.000 Hz (16 kHz). Die individuelle Obergrenze der Hörempfindlichkeit ist abhängig vom Lebensalter und bisheriger Dauerbelastung durch zu laute Beschallung.

Das Verhältnis zwischen Reiz und Empfindung von Schalldrücken ist beim Menschen, vermutlich evolutionär begründet, relativ. Das bedeutet, dass bei hohen Schalldrücken ein größerer Reizuwachs für einen Empfindungszuwachs nötig ist als bei niedrigen Schalldrücken. Die relative Empfindung ermöglicht dem Menschen, sehr leise, wie auch sehr laute Geräusche wahrnehmen zu können. Das wahrnehmbare Schalldruckintervall erstreckt sich über 7 Zehnerpotenzen von ca. $20 \cdot 10^{-6} N/m^2$ bis etwa $200 N/m^2$ (MÖSER, 2015).

Um ein gutes Maß für die empfundene Lautstärke darzustellen, wird zur technischen Beschreibung des Schalldrucks nicht der physikalische Schalldruck, sondern der logarithmierte Schalldruckpegel L verwendet:

$$L = 20 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right) = 10 \lg \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 \quad (2.1)$$

Tabelle 2.1 stellt exemplarisch verschiedene Schalldruckpegel in Abhängigkeit des Schalldrucks verschiedener Situationen dar. Die Bezugsgröße $p_0 = 20 \cdot 10^{-6} N/m^2$ entspricht der frequenzabhängigen Hörschwelle bei einer Frequenz von 1000 Hz . 0 dB setzt somit den „gerade noch“ oder „gerade nicht mehr“ hörbaren Schall fest.

Tabelle 2.1: Zuordnung zwischen Schalldruck und Schallpegel nach MÖSER, 2015

Schalldruck $p(N/m^2)$	Schalldruckpegel $L(dB)$	Beispielsituation
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Hörschwelle
$2 \cdot 10^{-4}$	20	Wald bei wenig Wind
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Bibliothek
$2 \cdot 10^{-2}$	60	Büro
$2 \cdot 10^{-1}$	80	dicht befahrene Stadtstraße
$2 \cdot 10^0$	100	Presslufthammer, Sirene
$2 \cdot 10^1$	120	Start von Düsenflugzeugen
$2 \cdot 10^2$	140	Schmerzgrenze

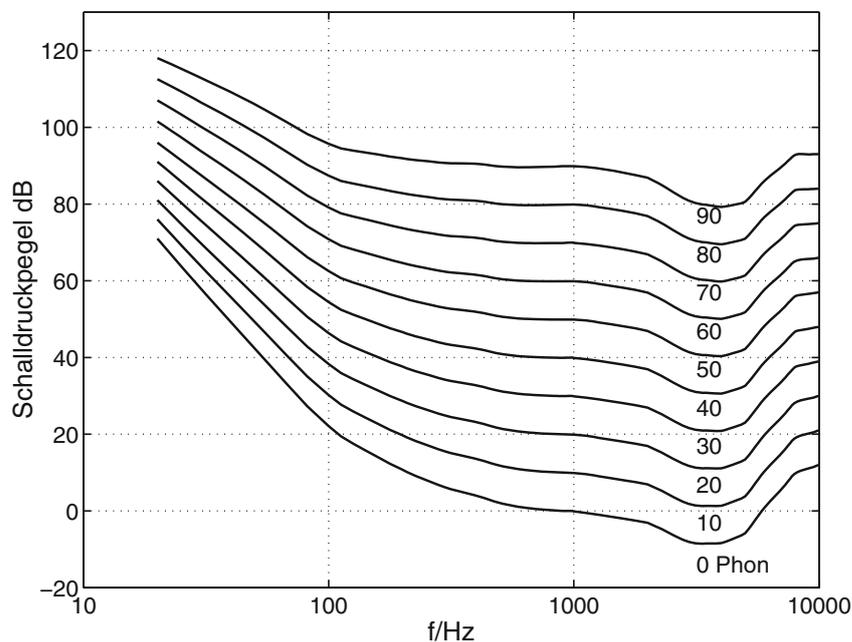


Abbildung 2.1: Kurven gleicher Lautstärkepegel (MÖSER, 2015)

Pegel mehrerer Einzelquellen dürfen nicht einfach addiert werden. Der Gesamtpegel wird mittels „Pegeladditionsverfahren“ berechnet:

$$L_{tot} = 10 \lg \left(\sum_{i=0}^N 10^{L_i/10} \right) \quad (2.2)$$

Drei unterschiedliche PKW mit gleichen Teilpegeln L_i emittieren beispielsweise einen Gesamtpegel, der 4,8 dB höher als ein Einzelpegel L_i ist:

$$L_{tot} = 10 \lg(3 \cdot 10^{L_i/10}) = 10 \lg 10^{L_i/10} + 10 \lg 3 = L_i + 4,8 \text{ dB}$$

Die Lautstärkewahrnehmung des menschlichen Gehörs ist unter anderem frequenz- und pegelabhängig. Um dieser Abhängigkeit gerecht zu werden, werden akustische Messun-

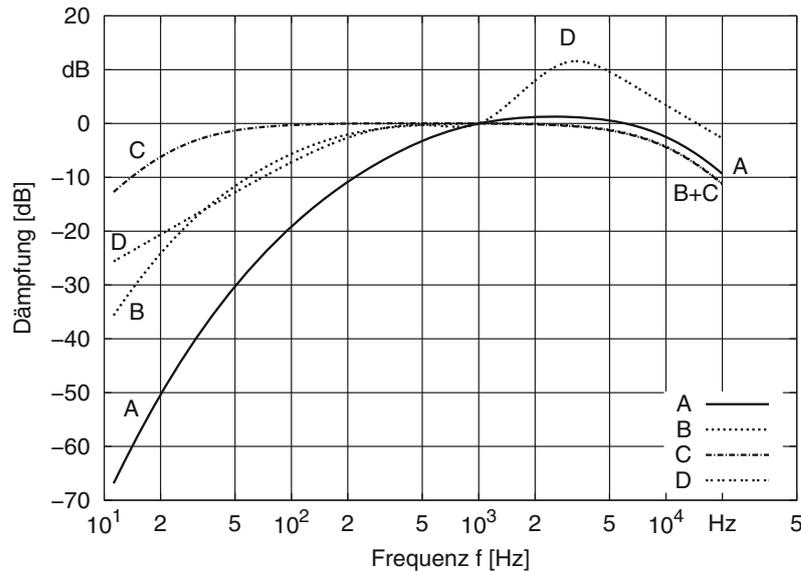


Abbildung 2.2: Filterkurven A, B, C, D (MÖSER, 2015)

gen national und international im sogenannten „A-bewerteten Schalldruckpegel“ angegeben. Die durch Hörversuche ermittelte frequenzabhängige Lautstärkewahrnehmung ist in [Abb. 2.1](#) dargestellt. Die unterste 0 Phon-Kurve stellt die Hörschwelle (p_0) dar.

Die A-Bewertung stellt ein vereinfachtes Verfahren zur Wiedergabe des Zusammenhangs von Schalldruck und subjektiv empfundener Lautstärke dar. In Wahrheit ist die Wahrnehmung von weiteren Faktoren, wie beispielsweise der Bandbreite eines Schallereignisses, beeinflusst. Zur Berechnung des dB(A)-Werts wird dem Lautstärkepegel mittels Pegeladdition ([Gleichung \(2.2\)](#)) ein A-bewerteter Dämpfungsfaktor Δ_i beigemessen ([Abb. 2.2](#)):

$$L(A) = 10 \lg \left(\sum_{i=0}^N 10^{(L_i + \Delta_i)/10} \right) \quad (2.3)$$

Bei spezifischen Geräuschen, beispielsweise Fahrzeugen, existieren, wie in [Abb. 2.2](#) zu sehen, auch andere Bewertungen (B, C, D). Bei gesetzlichen Regelungen wird jedoch weiterhin der dB(A) Wert verwendet (MÖSER, 2015).

Zeitlich veränderliche Geräusche

Die Angabe des A-Pegels funktioniert bei konstanten, stationären Geräuschen. Bei über einen Zeitverlauf variablen Signalen, wie beispielsweise Verkehrslärm, wird zur vereinfachten Vergleichbarkeit der „Energie-äquivalente Dauerschallpegel“ L_{eq} gebildet. Dieser ergibt sich aus dem Schalldruckquadrat im zeitlichen Mittel:

$$L_{eq} = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_{eff}^2(t)}{p_0^2} dt \right) = 10 \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T 10^{L(t)/10} dt \right) \quad (2.4)$$

Mit dem Zeitverlauf des Schalldruckeffektivwerts $p_{eff}(t)$ und dem Pegelzeitverlauf $L(t) = 10 \lg(p_{eff}(t)/p_0)^2$. Bei Beaufschlagung des Schalldrucksignals mit einem A-Filter erhält man den A-bewerteten Energie-äquivalenten Pegel. (MÖSER, 2015)

2.2 Verkehrslärmschutzverordnung 16. BImSchV

In Deutschland sind die die Immissionsgrenzwerte zum Schutz vor Verkehrslärm in der 16. Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (BImSchV) definiert.

§1 Anwendungsbereich

Bei der Beurteilung wird zwischen dem Beurteilungspegel während der Tag- (L_r, T) und Nachtstunden (L_r, N) unterschieden:

L_r, T 6:00 bis 22:00 Uhr

L_r, N 22:00 bis 6:00 Uhr

Die Verordnung ist verbindlich für den Neubau oder bei wesentlichen Änderungen von Straßen oder Schienenwegen anzuwenden. Als wesentliche Änderung einer Straße gilt eine bauliche Erweiterung um einen oder mehrere durchgehende Fahrstreifen für den Kraftfahrzeugverkehr oder eine Erhöhung des Beurteilungspegels des zu ändernden Verkehrswegs um mindestens 3 dB(A) auf mindestens 70 dB(A) am Tag oder mindestens 60 dB(A) in der Nacht. Eine Änderung ist auch wesentlich, wenn der Verkehrslärm von mindestens 70 dB(A) am Tag oder 60 dB(A) in der Nacht durch einen baulichen Eingriff weiter erhöht wird.

§2 Immissionsgrenzwerte

Bei einer wesentlichen Änderung ist zum Schutz der Anwohner sicherzustellen, dass der Beurteilungspegel keinen der folgenden Immissionsgrenzwerte überschreitet:

	Tag	Nacht
1. an Krankenhäusern, Schulen, Kurheimen und Altenheimen	57 dB(A)	47 dB(A)
2. in reinen und allgemeinen Wohngebieten und Kleinsiedlungsgebieten	59 dB(A)	49 dB(A)
3. in Kerngebieten, Dorfgebieten, Mischgebieten und Urbanen Gebieten	64 dB(A)	54 dB(A)
4. in Gewerbegebieten	69 dB(A)	59 dB(A)

§3 Berechnung des Beurteilungspegels für Straßen

Die Verordnung setzt fest, dass der Beurteilungspegel für Straßen nach den Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS)-19 für den Tag- sowie Nachtzeitraum zu berechnen ist. Dabei sind folgende Rahmenbedingungen zu beachten:

- die Geräuschemissionen von Kraftfahrzeugen,
- die akustischen Eigenschaften der Straßendeckschicht,
- die Einflüsse auf dem Ausbreitungsweg.

(»16. BImSchV«, 2020)

2.3 Berechnung des Beurteilungspegels nach den RLS-19

Die Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen (RLS) sind ein bundesweit einheitliches Verfahren zur Berechnung von Beurteilungspegeln im Straßenverkehr.

Im Folgenden wird das Verfahren zur Berechnung des Beurteilungspegels nach den RLS-19 erläutert. Alle Gleichungen in [Abschnitt 2.3](#) sind aus den RLS-19 (FGSV, 2019) übernommen.

Die Stärke der Schallimmission einer Straße wird durch den längenbezogenen Schalleistungspegel L_r beschrieben. Dieser wird aus der Verkehrsstärke M , der Art der Fahrzeuge, deren Geschwindigkeit und dem Typ der Straßendeckschicht berechnet. Gegebenenfalls werden Zuschläge für die Längsneigung der Straße, Mehrfachreflexion und Knotenpunkte hinzugezogen. Auf Parkplätzen werden Schallemissionen durch den flächenbezogenen Schalleistungspegel $L_{W''}$ beschrieben.

An einem Immissionsort werden Straßenverkehrsgeräusche durch den Beurteilungspegel L_r beschrieben. Dieser berechnet sich aus der Stärke der Schallemissionen im Einzugsbereich und berücksichtigt die Minderung auf dem Ausbreitungsweg. Die Stärke der Minderung des Schallpegels ist vom Abstand der Quelle und des Immissionsortes und der mittleren Höhe des Schallstrahls über dem Boden abhängig. Durch Abschirmung in Folge von Lärmschutzwänden oder Gebäuden können weitere Minderungen erfolgen. Reflexionen an Hausfronten, Stützmauern oder Lärmschutzwänden hingegen, können den Schallpegel am Immissionsort erhöhen.

Der Beurteilungspegel L_r wird für Tag ($L_{r,T}$) und Nacht ($L_{r,N}$) getrennt berechnet (siehe [Abschnitt 2.2](#)). Der Berechnung werden die über das Jahr gemittelten stündlichen Verkehrsstärken der Tageszeiträume und die entsprechenden Fahrzeuggruppen (siehe [Tabelle 2.2](#)) am Gesamtverkehrsaufkommen zugrunde gelegt. Zum Vergleich mit Immissionsgrenzwerten müssen die Beurteilungspegel $L_{r,T}$ und $L_{r,N}$ auf ganze Dezibel aufgerundet werden. Bei der Berechnung sind Zwischenergebnisse ungerundet zu übernehmen.

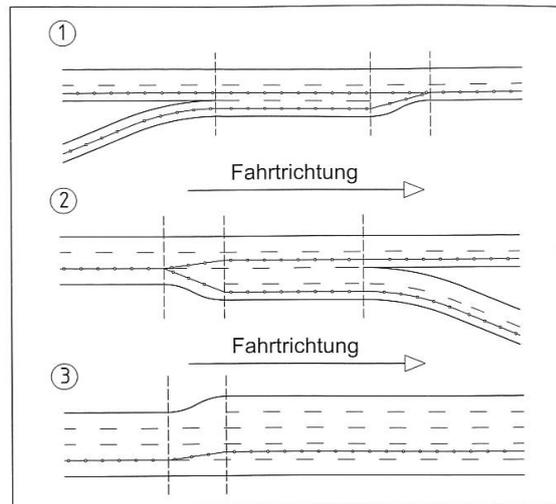


Abbildung 2.3: Position der Quelllinien zur Modellierung einer Straße. (FGSV, 2019)

2.3.1 Beurteilungspegel an Straßen

Beurteilungspegel L_r

Zur Bestimmung des Beurteilungspegels werden Schallquellen im Einzugsbereich in Punktschallquellen unterteilt. Straßen werden in Teilstücke und Parkplätze in Teilflächen mit annähernd konstanten Emissionen und Ausbreitungsbedingungen zerlegt. Die Punktschallquelle ist in der Mitte des Teilstücks bzw. im Flächenschwerpunkt der Teilflächen in einer Höhe von 0,5 m über dem Boden anzusetzen.

Modellierung von Straßen

Bei Straßen wird für jede Fahrtrichtung eine Quelllinie definiert. Bei zwei Richtungsfahrstreifen wird die stündliche Verkehrsstärke M der Straße je zur Hälfte auf eine Quelllinie verteilt. Die Position der Quelllinien hängt, wie in Abb. 2.3 dargestellt, von der Anzahl der Fahrstreifen pro Fahrtrichtung ab. Bei einem Fahrstreifen befindet sich die Quelllinie in dessen Mitte. Bei zwei Fahrstreifen befindet sich die Quelllinie in der Mitte des äußeren Fahrstreifens ①. Bei drei oder vier Fahrstreifen befindet sie sich auf der Trennlinie zwischen den beiden äußeren Fahrstreifen ②. Bei fünf oder mehr Richtungsfahrstreifen über der Mitte des zweitäußeren Fahrstreifens ③.

Tabelle 2.2: Klassifikation der Fahrzeuge in Fahrzeuggruppen (FGSV, 2019)

Pkw	Lkw1	Lkw2	Krafträder
Pkw/Lieferwagen $\leq 3,5t$, auch mit Anhänger	Lkw $> 3,5t$ ohne Anhänger, Busse	Lkw $> 3,5t$ mit Anhänger, Sattelkraftfahrzeuge	Emissionsberechnung wie Lkw2, jedoch mit v_{Pkw} und $D_{StrO} = 0$

Tabelle 2.3: Standardwerte für maßgebliche Verkehrsstärke M [Kfz/h] und Lkw-Anteile p [%] (FGSV, 2019)

Straßenart	Tag			Nacht		
	M	p_1	p_2	M	p_1	p_2
Bundesautobahnen	$0,0555 \cdot DTV$	3	11	$0,0149 \cdot DTV$	10	25
Bundesstraßen	$0,0575 \cdot DTV$	3	7	$0,0100 \cdot DTV$	7	13
Landes-, Kreis-, und Gemeindeverbindungsstraßen	$0,0575 \cdot DTV$	3	5	$0,0100 \cdot DTV$	5	6
Gemeindestraßen	$0,0575 \cdot DTV$	3	4	$0,0100 \cdot DTV$	3	4

Längenbezogener Schalleistungspegel einer Quelllinie

Der längenbezogene Schalleistungspegel L'_W wird wie folgt berechnet:

$$L'_W = 10 \cdot \lg[M] + 10 \cdot \lg \left[\frac{100 - p_1 - p_2}{100} \cdot \frac{10^{\frac{L_{W,Pkw}(v_{Pkw})}{10}}}{v_{Pkw}} + \dots \right. \\ \left. + \frac{p_1}{100} \cdot \frac{10^{\frac{L_{W,Lkw1}(v_{Lkw1})}{10}}}{v_{Lkw1}} + \frac{p_2}{100} \cdot \frac{10^{\frac{L_{W,Lkw2}(v_{Lkw2})}{10}}}{v_{Lkw2}} \right] - 30 \quad (2.5)$$

mit

M stündliche Verkehrsstärke der Quelllinie in Kfz/h

$L_{W,FzG}(v_{FzG})$ Schalleistungspegel für die Fahrzeuge der Fahrzeuggruppe (FzG) nach [Tabelle 2.2](#) bei der Geschwindigkeit v_{FzG} in dB

v_{FzG} Geschwindigkeit der Fahrzeuge

p_1 Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw1 in %

p_2 Anteil an Fahrzeugen der Fahrzeuggruppe Lkw2 in %

In [Tabelle 2.3](#) sind Standardwerte für die stündliche Verkehrsstärke M von verschiedenen Straßenarten und deren jeweiligen Anteilen der Fahrzeuggruppen aufgeführt. Diese Standardwerte sollten nur angewendet werden, wenn keine projektbezogenen Daten zu Verkehrsstärke und Fahrzeuganteilen vorliegen.

Tabelle 2.4: Emissionsparameter $A_{W,FzG}$, $B_{W,FzG}$ und $C_{W,FzG}$ je FzG

FzG	$A_{W,FzG}$ [dB]	$B_{W,FzG}$ [km/h]	$C_{W,FzG}$
Pkw	88,0	20	3,06
Lkw1	100,3	40	4,33
Lkw2	105,4	50	4,88

Schalleistungspegel der Fahrzeuge

Der Schalleistungspegel für Fahrzeuge einer FzG wird wie folgt berechnet:

$$L_{W,FzG}(v_{FzG}) = L_{W0,FzG}(v_{FzG}) + D_{SD,SDT,FzG}(v_{FzG}) + \dots + D_{LN,FzG}(g, v_{FzG}) + D_{K,KT}(x) + D_{refl}(h_{Beb'w}) \quad (2.6)$$

mit

$L_{W0,FzG}(v_{FzG})$ Grundwert für den Schalleistungspegel eines Fahrzeuges der FzG bei der Geschwindigkeit v_{FzG} nach Gleichung (2.7) in dB

$D_{SD,SDT,FzG}(v_{FzG})$ Korrektur für den Straßendeckschichttyp (SDT), FzG v_{FzG}

$D_{LN,FzG}(g, v_{FzG})$ Korrektur für die Längsneigung

$D_{K,KT}(x)$ Korrektur für den Knotenpunkttyp

$D_{refl}(h_{Beb'w})$ Zuschlag für Mehrfachreflexion

Der **Grundwert** des Schalleistungspegels eines Fahrzeuges berechnet sich wie folgt:

$$L_{W0,FzG}(v_{FzG}) = A_{W,FzG} + 10 \cdot \lg \left[1 + \frac{v_{FzG}^{C_{W,FzG}}}{B_{W,FzG}} \right] \quad (2.7)$$

mit

$A_{W,FzG}$ Emissionsparameter FzG nach Tabelle 2.4 in dB

$B_{W,FzG}$ Emissionsparameter FzG nach 2.4 in km/h

$C_{W,FzG}$ Emissionsparameter FzG nach 2.4

v_{FzG} Geschwindigkeit der FzG in km/h

Straßendeckschichtkorrektur

Die RLS-19 enthalten für unterschiedliche Straßendeckschichttypen (SDT) Korrekturwerte $D_{SD,SDT,FzG}(v_{FzG})$ in Tabellenform. Dabei wird zwischen ebenen Straßenbelägen und Pflasterbelägen unterschieden.

Längsneigungskorrektur

Erhöhte Schallimmissionen auf Steigungs- und Gefällestrecken werden durch folgende Korrekturwerte der Längsneigung berücksichtigt:

$$D_{LN,PKW}(g, v_{PKW}) = \begin{cases} \frac{g+6}{-6} \cdot \frac{90 - \min\{v_{PKW}; 70\}}{20} & \text{für } g < -6 \\ \frac{g-2}{10} \cdot \frac{v_{PKW}+70}{100} & \text{für } g > +2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$D_{LN,Lkw_1}(g, v_{Lkw_1}) = \begin{cases} \frac{g+4}{-8} \cdot \frac{v_{Lkw_1}-20}{10} & \text{für } g < -4 \\ \frac{g-2}{10} \cdot \frac{v_{Lkw_1}}{10} & \text{für } g > +2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$D_{LN,Lkw_2}(g, v_{Lkw_2}) = \begin{cases} \frac{g+4}{-8} \cdot \frac{v_{Lkw_2}}{10} & \text{für } g < -6 \\ \frac{g-2}{10} \cdot \frac{v_{Lkw_2}+10}{10} & \text{für } g > +2 \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

mit

g Längsneigung der Fahrbahn in [%] für Steigungen unterhalb von -12 % und oberhalb von 12 % ist $D_{LN,FzG}(g, v_{FzG})$ für -12 % bzw. 12 % zu verwenden

v_{FzG} Geschwindigkeit der FzG in km/h

Knotenpunktkorrektur

Durch Anfahren und Bremsen an lichtzeichengeregelten Knotenpunkten oder Kreisverkehren verursachte Lärmemissionen werden über eine Knotenpunktkorrektur eingebracht. Auf das genaue Verfahren zur Bestimmung der Knotenpunktkorrektur wird hier aufgrund mangelnder Relevanz nicht näher eingegangen.

Mehrfachreflexionen

Bei Verlauf eines Fahrstreifenteilstücks zwischen parallel angeordneten Stützmauern, Lärmschutzwänden oder Hausfassaden wird je Teilstück ein Zuschlag zur Berücksichtigung von Mehrfachreflexionen berechnet. Objekte gelten als parallel, wenn sie in einem Winkel von höchstens 5° zur Straßenachse stehen. Der maximale Abstand der Flächen darf zur Berücksichtigung 100 m betragen. Bei reflexionsmindernden oder stark reflektionsmindernden Lärmschutzwänden wird der Zuschlag vernachlässigt.

$$D_{refl}(h_{Beb}, w) = 2 \cdot \frac{h_{Beb}}{w} \leq 1.6 \quad (2.8)$$

mit

h_{Beb} Höhe der Stützmauern, Lärmschutzwände oder geschlossenen Hausfassaden, wobei die Seite mit der geringeren Höhe maßgeblich ist

w Abstand der reflektierenden Flächen voneinander in m

2.3.2 Schallausbreitung

Reflexionen

Durch Reflexion verursachte Verstärkungen des Schallpegels werden in den RLS-19 durch Spiegelschallquellen bis zur zweiten Ordnung berechnet.

Bei Berechnung der Reflexion wird die Straße an der reflektierenden Fläche gespiegelt, sodass hinter der reflektierenden Fläche eine virtuelle zusätzliche Schallquelle (Spiegelschallquelle) entsteht. Dabei ist nur das Teilstück der Spiegelschallquelle wirksam, von dem aus die „Schallstrahlen“ zum Immissionsort durch die reflektierende Fläche hindurch laufen. Mit der Spiegelschallquelle wird dann die Schallausbreitung berechnet, wobei das reflektierende Hindernis ignoriert wird. Dabei wird ein Reflexionsverlust abgezogen, der von den Eigenschaften des Reflektors abhängig ist (Tabelle 2.5).

Es werden reflektierende Flächen ab einer minimalen Höhe des Reflektors und in Abhängigkeit der Entfernung von Schallquelle und Reflektor berechnet. Der geringere Betrag beider Werte muss für eine Berücksichtigung mindestens 1 m betragen.

$$h_R = 0,3 \cdot \sqrt{a_R} \quad \text{und} \quad h_R \geq 1 \quad (2.9)$$

Dämpfung

Die Schallausbreitung wird nach den RLS-19 jeweils zwischen der Punktschallquelle und dem Immissionsort berechnet. Die Ausbreitung wird in einer vertikalen Ebene angenommen. Schallquellen können auch Spiegelschallquellen sein.

Die Dämpfung der Schallausbreitung zwischen Quelle und Immissionsort wird folgendermaßen berechnet:

$$D_A = D_{div} + D_{atm} + \max\{D_{gr}; D_z\} \quad (2.10)$$

Tabelle 2.5: Reflexionsverlust nach RLS-19

Art des Reflektors	Korrektur D_{RV1}/D_{RV2}
Gebäudefassaden und reflektierende Lärmschutzwände	0,5 dB
reflexionsmindernde Lärmschutzwände	3,0 dB
stark reflexionsmindernde Lärmschutzwände	5,0 dB

mit

$$D_{div} = 20 \cdot \lg[s] + 10 \cdot \lg[2\pi]$$

Pegelminderung durch geometrische Divergenz

$$D_{atm} = \frac{s}{200}$$

Pegelminderung durch Luftdämpfung

$$D_{gr} = \max\left\{4, 8 - \frac{h_m}{s} \cdot \left(34 + \frac{600}{s}\right); 0\right\}$$

Pegelminderung durch Bodendämpfung

h_m = mittlere Höhe des Strahls von von der Quelle zum Immissionsort in m

D_z Pegelminderung durch Abschirmung [Gleichung \(2.11\)](#)

s = Abstand zwischen Quelle und Immissionsort

Pegelminderung durch Abschirmung

Der Pegel wird durch Abschirmung gemindert, wenn ein Hindernis auf der direkten Verbindungslinie zwischen Quelle und Immissionsort liegt.

$$D_z = 10 \cdot \lg[3 + 80 \cdot z \cdot K_w] \quad (2.11)$$

mit

$$z = A + B + C - s$$

Schirmwert, Differenz zwischen der Ausbreitungslänge über eine oder mehrere Beugungskanten und dem direkten Weg zwischen Quelle und Immissionsort.

A = Abstand der Quelle von der ersten Beugungskante in m

B = Abstand der letzten Beugungskante vom Immissionsort in m

C = Länge des Schallwegs zwischen erster und letzter Beugungskante in m

$$K_w = \exp\left(-\frac{1}{2000} \cdot \sqrt{\frac{A \cdot B \cdot s}{2 \cdot z}}\right)$$

Witterungskorrektur zur Berücksichtigung der Strahlenkrümmung durch vertikale Gradienten von Temperatur und/oder Windgeschwindigkeit

2.3.3 Zusammenfassung

Das Verfahren zur Berechnung von Beurteilungspegeln im Straßenverkehr ist in Deutschland einheitlich in den RLS-19 beschrieben. Dabei werden Straßen geometrisch durch Quelllinien repräsentiert. Der längenbezogene Schalleistungspegel einer Quelllinie berechnet sich durch die Verkehrsstärke, den Schalleistungspegel der Fahrzeuge und deren Geschwindigkeit und Anteil an spezifizierten Fahrzeuggruppen. Bei der Berechnung der Schalleistungspegel der Fahrzeuge werden Korrekturwerte für den Straßendeckschichttyp, die Längsneigung, den Knotenpunkttyp und Zuschläge für Mehrfachreflexionen berücksichtigt. Bei der Berechnung der Schallausbreitung zur Bestimmung der Pegel am Immissionsort, werden Mehrfachreflexionen, Dämpfungsfaktoren und ggf. Pegelminderung durch Abschirmung berücksichtigt.

Kapitel 3

Grundlagen des Building Information Modeling

3.1 Hintergrund und Definition

Lange Zeit lag der Zugewinn an Produktivität durch die Digitalisierung in der Baubranche im Vergleich zu anderen Bereichen der Wirtschaft zurück. Zwar wurden in der Wertschöpfungskette schon verbreitet digitale Methoden eingesetzt. Aufgrund der Komplexität von Bauprojekten, mit einer Vielzahl von Beteiligten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen, wurden die generierten Daten jedoch nicht vollumfänglich und konsistent über die verschiedenen Prozesse und Beteiligten hinweg genutzt. Beim Austausch von Plänen (Schnitten, Grundrissen und Detailzeichnungen) konnten die enthaltenen Informationen zum großen Teil nicht automatisch interpretiert werden, wodurch große Potenziale der Informationstechnologie ungenutzt blieben bzw. teilweise bis heute ungenutzt bleiben. Die jeweils von unterschiedlichen Fachplanern erstellten, individuellen Pläne mussten manuell gegeneinander auf Konsistenz geprüft werden. Dies führte bei Planänderungen häufig zu Unstimmigkeiten und Fehlern, die erst während der Bauausführung bemerkt wurden und deswegen in hohen Folgekosten resultierten. Ein weiterer Verlust durch mangelnde Informationstiefe der Baupläne besteht darin, dass Gebäudeinformation für Simulationen und Analysen und für den Betrieb und die Erhaltung nicht direkt übernommen werden können. (BORRMANN et al., 2015)

Die BIM-Methode soll diese Effizienzdefizite beseitigen. Basierend auf der kontinuierlichen Nutzung eines digitalen Modells über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks oder einer Infrastruktur können Informationen konsistent und tiefgreifend in Planung, Bau und Betrieb weiterverwendet werden. Das Building Information Model (BIM) besteht neben der dreidimensionalen Geometrie der Bauteile insbesondere aus nicht geometrischen Informationen wie Typinformationen, technischen Eigenschaften oder Kosten. Bei konsequenter Weitergabe kann das umfassende digitale Gebäudemodell für eine deutlich verbesserte Koordination der Planung sorgen. Zudem dient es für vielfältige Simulationen und Analysen, der Steuerung des Bauablaufs und die Übergabe an den Betreiber. Aufwendige, fehleranfällige Neueingaben werden vermieden, was zu einem Zuwachs an Produktivität und Qualität in der gesamten Wertschöpfungskette führt. (BORRMANN et al., 2015)

In Deutschland wird häufig die BIM-Definition des BMVI verwendet:

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethodik mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen

Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden.“ (BMVI, 2015b)

Dabei liegt der Fokus auf kollaborativem Arbeiten mit dynamischer, hochautomatischer und hochverbundener konsistenter Aktualisierung. BIM darf nicht nur als Digitalisierung der Planung oder Umstellung auf 3D-CAD mit 3D, 4D oder 5D Visualisierung verstanden werden. BIM ist eine objektorientierte Datenmodellierung und Datenaustausch ohne Informationsverlust zwischen Fachmodellen. Alle Fachdaten und -modelle sind vernetzt und in Interaktion miteinander. Definitionen von Modellierungs-, Auswertungs- und Verifikationsroutinen sind reproduzierbar, und es wird im gesamten Lebenszyklus konsequent an einem einzigen Gesamtmodell gearbeitet. Es entsteht eine vollständige Versionierung und Historisierung aller Arbeitsschritte und Modellanpassungen. Für einen erfolgreichen Einsatz ist eine BIM-Strategie über den gesamten Lebenszyklus, von der Bestandsermittlung über den Vorentwurf, Planung und Ausführung bis hin zur Unterhaltung erforderlich. (APPELT et al., 2021a)

3.2 BIM-Ausarbeitungsgrade

In der konventionellen, 2D-Plan gestützten Planung und Ausführung entscheidet der Planmaßstab über den Detaillierungsgrad der Darstellung. Da digitale Bauwerksmodelle keine festgesetzten Maßstäbe haben, hat sich hier das Konzept des Level of Development (LOD) zur Beschreibung von Ausarbeitungsgraden international durchgesetzt. Anders als der Begriff Level of Detail (LoD), der unter anderem im Bereich Computergrafik und GIS eingesetzt wird, enthält das LOD neben der geometrischen Ausarbeitung auch das erforderliche Level der Attribuierung mit alphanumerischer Information. Das LOD setzt sich folglich aus dem Level of Geometry (LOG) und dem Level of Information (LOI) zusammen. Während das LOG meist aus allgemeingültigen geometrischen Spezifikationen übernommen wird, sind die semantischen Informationen (LOI) häufig auftraggeber- bzw. projektspezifisch definiert (ABUALDENIEN et al., 2021).

Um die Verlässlichkeit der Angaben des Ausarbeitungsgrads zu erhöhen, wurden international verschiedene Standardisierungen des LOD vorgenommen bzw. angestrebt. In Deutschland haben eine Reihe von Institutionen LOD-Spezifikationen entwickelt (VBI, 2016; VDI, 2020; DEUTSCHE BAHN, 2022; DEGES, 2022; BIM4INFRA, 2019b). Auf europäischer Ebene wurde vom Comité Européen de Normalisation (CEN) der Standard EN 17412 (CEN, 2020) des Level of Information Need (LOIN) beschlossen, der im Vergleich zum LOD-Konzept nicht die Zuverlässigkeit der Information beschreibt, sondern die notwendigen Informationen für bestimmte Anwendungsfälle spezifiziert.

3.3 BIM-Klassifizierung

Der Übergang von konventionellen zu modellgestützten Prozessen erfordert sowohl unternehmensinterne als auch unternehmensübergreifende Anpassungen von Arbeitsweisen und Routinen. Um eine Überforderung von Marktteilnehmenden zu vermeiden und Prozesse und Abläufe nicht zu gefährden ist ein schrittweiser Übergang zu einer modellbasierten Arbeitsweise sinnvoll und üblich (BALDWIN, 2019; BORRMANN, KÖNIG et al., 2021; VDI, 2020). Nach JERNIGAN, 2008 wird die Ausprägung der BIM-Nutzung durch die Begriffe „little bim“ und „BIG BIM“ klassifiziert. „Little bim“ definiert sich durch die Nutzung von BIM-Softwareprodukten als Insellösung zum lösen einer spezifischen Aufgabe, ohne Weitergabe oder Weiternutzung des Modells. „BIG BIM“ steht hingegen für eine durchgängige modellbasierte Kommunikation und Arbeitsweise über verschiedene Disziplinen und alle Lebenszyklusphasen eines Bauwerks.

Weiterführend wird bei der Frage, ob der Datenaustausch mit proprietären oder offenen Datenformaten geschieht zwischen „Closed BIM“ und „Open BIM“ unterschieden. „Big Open BIM“ steht folglich für die Nutzung von Softwareprodukten verschiedener Hersteller mit offenen Datenformaten über den gesamten Lebenszyklus. (BORRMANN, KÖNIG et al., 2021)

3.4 BIM-Leistungsniveaus

Für die Einteilung in BIM-Leistungsniveaus, auch Levels genannt, enthält die Richtlinie VDI 2552-1 (VDI, 2020) die an den weit verbreiteten und anerkannten orientierten Definitionen, des von der britischen BIM TaskGroup eingeführten, „BIM Maturity Models“ (CDBB, 2011) (BIM-Reifegradstufen). Auch die Norm DIN EN ISO 19650-1 (DIN, 2019) hat die Stufen 1-3 als „BIM-Entwicklungsgrade“ übernommen. [Abb. 3.1](#) stellt die Abfolge der verschiedenen BIM-Level grafisch dar, die nach VDI, 2020 folgendermaßen definiert sind:

Level 0 – Individueller dateibasierter Austausch von Geometrie ohne Prozessunterstützung mit 2D-CAD Plänen als Datei (häufig .pdf oder in proprietären Formaten) oder auf Papier gedruckt.

Level 1 – Dateibasierte Interoperabilität von Geometrie in 2D und/oder 3D Planung mit standardisierten Prozessen. Modellelemente werden ggf. durch 2D-Darstellungen ergänzt. Informationen können mit Zeichnungselementen verknüpft werden. Der Informationsaustausch erfolgt überwiegend über eine gemeinsame Datenumgebung. Eine automatisierte Auswertung von Informationen ist möglich, aber nicht standardisiert.

Level 2 – Interoperabilität von Geometrie und Daten mit standardisierten Prozessen. Offene Dateiformate und modellbasierte Planung, mit strukturierter Informationsverknüpfung. Überwiegend Modellelemente die ggf. mit 2D-Darstellungen ergänzt werden. 2D-Ableitungen werden aus den Modellelementen erstellt. Informationen können strukturiert mit den Zeichnungselementen verknüpft werden. Der Informationsaustausch erfolgt über-

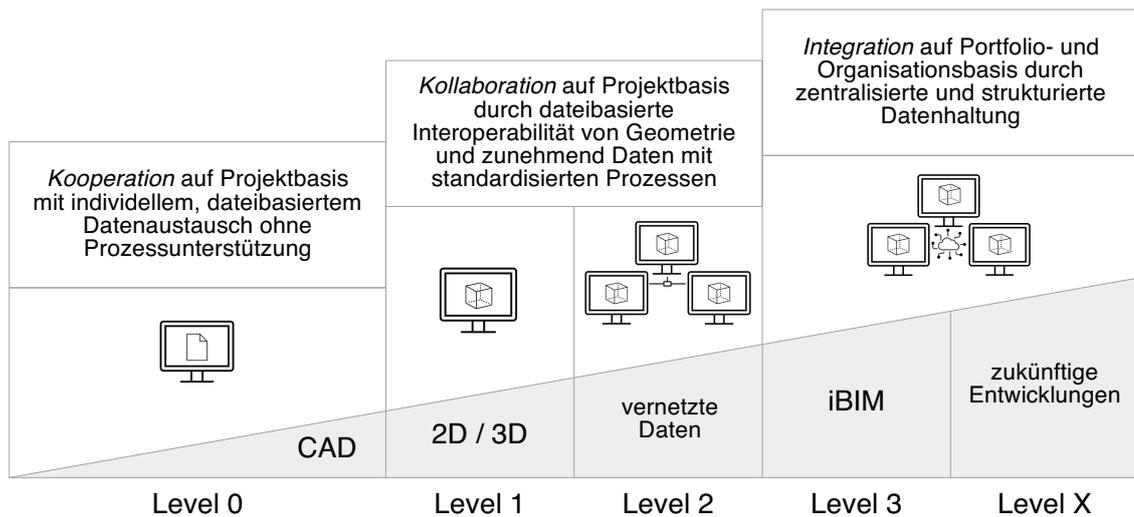


Abbildung 3.1: BIM Reifegrade. Eigene Darstellung nach VDI, 2020; CDBB, 2011; APPELT et al., 2021a

wiegend über eine gemeinsam genutzte Datenumgebung. Automatisierte Auswertungen von Informationen sind möglich, da die Informationen standardisiert sind.

Level 3 – Zentralisierte und strukturierte Datenhaltung. Vollständig offene Prozess- und Datenintegration, verwaltet von einer gemeinsam genutzten Plattform, ermöglicht integriertes BIM (iBIM).

3.5 BIM-Strategien

Aus den BIM-Reifegradstufen lassen sich zwei unterschiedliche BIM-Strategien ableiten, die sich in der Tiefe der BIM-Integration unterscheiden (Abb. 3.2):

BIM-3D CAD, das dem sequentiellen klassischen Planen ähnelt. Fachplanungen werden ohne gegenseitige Integration zusammengesetzt. Somit entsteht ein statisches Koordinationsmodell ohne fachliche Weiternutzung.

BIM 3D-Planen hingegen steht für integratives BIM. Bestandteil ist ein verlustfreier und damit kompletter semantischer Austausch der Fachdaten. Die Vernetzung im Gesamtmodell wird für die gesamte Planung genutzt, dient der automatisierten Planungsprüfung, und es bestehen vernetzte BIM-Anwendungen. Bei Aktualisierung einzelner Fachplanungen bleibt die Vernetzung erhalten. (APPELT et al., 2021a)

BIM 3D-CAD	BIM 3D-Planen
Sequentielles, klassisches Planen nachfolgendes Zusammensetzen ohne Integration der Fachplanungen	Integratives Building- bzw. Infrastructure Information Modeling

Abbildung 3.2: BIM Strategien. Eigene Darstellung nach APPELT et al., 2021a

3.6 BIM Strategie des BMVI

Nachdem es in Deutschland in den letzten Jahren bei einer Reihe von Großprojekten zu Terminplan- und Kostenüberschreitungen kam, wurde 2013 die „Reformkommission Bau von Großprojekten“ einberufen. Die Kommission, bestehend aus Vertretern und Vertreterinnen von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, gab daraufhin 2015 einen „Aktionsplan Großprojekte“ (BMVI, 2015a) heraus. Unter den Handlungsempfehlungen, wie bei Großprojekten künftig Kostenwahrheit und Termintreue gesteigert werden können, wurde kooperatives Planen und die Verwendung von digitalen Methoden (BIM) hervorgehoben (BMVI, 2015b). Als Antwort auf diese Empfehlung gab das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) den „Stufenplan Digitales Planen und Bauen“ für die Einführung von digitalen Prozessen und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken heraus. Danach sollten ab 2020 alle neu zu planenden Projekte regelmäßig BIM in Leistungsniveau 1 nutzen (BMVI, 2015b).

Anknüpfend an den Stufenplan Digitales Planen und Bauen und die Empfehlungen der Reformkommission Bau veröffentlichte das BMVI, 2021 den „Masterplan BIM Bundesfernstraßen“. Dieser Plan beinhaltet die weiterführende Implementierungsstrategie für die Autobahn GmbH und die Auftragsverwaltungen der Länder.

Mit der vollständigen Implementierung von BIM im Bundesfernstraßenbau werden fünf strategische Ziele verfolgt:

- Erhöhung von Wirtschaftlichkeit, Termin- und Kostenstabilität,
- Optimierung der Nachhaltigkeit,
- Verbesserung der Kommunikation durch erleichtertes Zusammenwirken,
- Einführung von herstellerneutralem, modellbasiertem und zentralem Datenmanagement und
- Harmonisierung und Standardisierung der BIM-Implementierung.

Da eine der Hauptursachen für Verzögerungen und Kostensteigerungen bei Bauprojekten Kommunikationsdefizite sind, wird die verbesserte Kommunikation aller Projektbeteiligten unter den Zielen als größter Mehrwert gesehen. Anschauliche Informationsmodelle sorgen für die Intensivierung der vernetzten Arbeitskultur zwischen allen Beteiligten und stellen ein einheitliches Verständnis der Projektinhalte dar. Im gemeinsamen digitalen Projektraum dem sog. Common Data Environment (CDE) wird die Planungs- und Ausführungsqualität durch automatisierte Qualitätssicherungsprozesse und eine Prüfung am Informationsmodell gesteigert (BMVI, 2021). Das BMVI geht bei vollständigem Einsatz von BIM im Bundesfernstraßenbau von Beschleunigungseffekten von 2 bis 4 Prozent und Gesamtkosteneinsparungen von 3 bis 6 Prozent aus (siehe Abb. 3.3).

Zusätzlich ermöglichen realitätsnahe Bauwerksmodelle Projektvisualisierungen, die für eine frühzeitige Öffentlichkeitsarbeit genutzt werden können. Im Rahmen von Planfeststellungsverfahren können diese Visualisierungen eingesetzt werden, um die Akzeptanz in



Abbildung 3.3: Hypothesen über den wirtschaftlichen Nutzen von BIM. (BMVI, 2021)

der Bevölkerung zu erhöhen. Modellbasierte Simulationen zur Lärmausbreitung können beispielsweise Betroffenheitsuntersuchungen der Anwohner visualisieren (BMVI, 2021).

Langfristig soll ein „Digitaler Zwilling“ der Bundesfernstraßen als digitales Abbild der physischen Infrastruktur die Betriebsphase digitalisieren und optimieren. Umfangreich vernetzte digitale Zwillinge bauen auf einer flächendeckenden Anwendung der BIM-Methode über den gesamten Lebenszyklus auf. Daraus ergeben sich Potenziale für die Datenanalyse und -nutzung, wie die Vernetzung von Echtzeitdaten, modellbasierte Simulationen und Prognosen, die verstärkte Einbindung von Hersteller- und Maschinendaten, die Vernetzung Digitaler Zwillinge mit autonom fahrenden Fahrzeugen und die Integration von künstlicher Intelligenz.

Die Implementierungsstrategie auf dem Weg zum „Digitalen Zwilling“ gestaltet sich wie folgt:

- 1 Ab 2021 strategische und organisatorische Angleichung der BIM-Implementierung in den Auftragsverwaltungen der Länder. Die BIM-Implementierung soll auf ein bundesweit einheitliches und standardisiertes Basisniveau gebracht werden.
- 2 Die BIM-Methode soll ausgeweitet und intensiv in alle Niederlassungen und Standorte der Autobahn GmbH gebracht werden.
- 3 Abschluss der BIM-Implementierung in der Autobahn GmbH und den Auftragsverwaltungen der Länder. BIM soll bei allen Projekten zum Standard werden.

Der Abschluss des Masterplans ist der flächendeckende Einsatz von BIM als Regelprozess in der vollen Ausbaustufe. (BMVI, 2021)

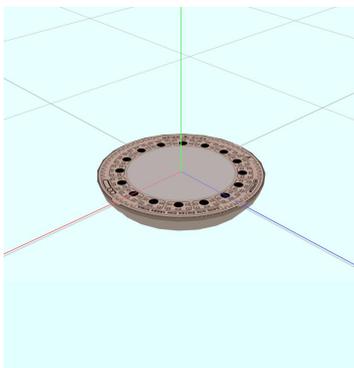
3.7 Bauteile, Bauteilgruppen und Fachobjekte im Gesamtmodell

Bei den Bestandteilen der modellhaften Planung wird zwischen Bauteilen, Bauteilgruppen und Fachobjekten unterschieden (Abb. 3.4). Ein Bauteil stellt dabei ein Muster dar, das „bestellt“ und „verplant“ werden kann. Es befindet sich in Bauteilbibliotheken und hat bauteilspezifische Eigenschaften. Eine Bauteilgruppe benutzt Bauteile für Mustergruppen (Gebinde). Entsprechend haben Bauteilgruppen bauteilgruppenspezifische Eigenschaften. Ein Fachobjekt ist genau ein planerisches Objekt in einem BIM-Modell. Es benutzt Bauteile oder Bauteilgruppen und hat fachobjektspezifische Eigenschaften. Die Parametrik von Fachobjekten basiert auf Fachdaten, die beim Fachplaner in der Autorensoftware verbleiben. Fachobjekte referenzieren folglich Fachdaten, Bauteile und Bauteilgruppen. (APPELT et al., 2021b)

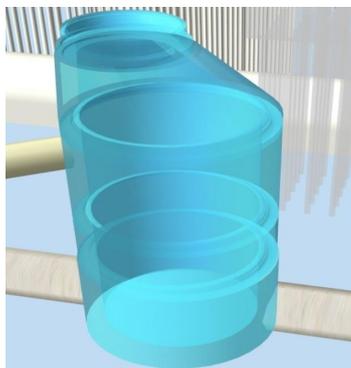
Bei kollaborativem 3D-Planen mit vollständiger Informationsverwaltung sind alle Fachobjekte im Projekt vollständig in einem Gesamtmodell vernetzt (Abb. 3.5). Das Gesamtmodell enthält alle Informationsanforderungen aller Beteiligten und aktualisiert sich dynamisch, da es auf originale Fachdaten zugreift, ohne diese zu kopieren. Für den Austausch der Fachdaten sind geeignete Datenformate und Übertragungstechnologien notwendig, die sich mit der Verbreitung von vernetzter Planung entwickeln. Die IFC stellen dabei eines von vielen Datenformaten dar. Ziel ist, dass Fachplaner verschiedener Disziplinen simultan in einem Gesamtmodell arbeiten. (APPELT et al., 2021a)

Mit der Berücksichtigung der vernetzten Planung lässt sich die eingangs zitierte Definition von BIM erweitern:

„Building Information Modeling bezeichnet eine kooperative Arbeitsmethode auf der Grundlage genau eines Gesamtmodells für das Bauwerk oder Infrastrukturprojekt. Alle für den gesamten Lebenszyklus (Planen, Bauen, Unterhalten, Rückbauen) verfügbaren Informationen wie Fachdaten und sonstige Daten sind in diesem Gesamtmodell vollständig und konsistent enthalten,



(a) Bauteil



(b) Bauteilgruppe

Abwasserschacht	
Name	HS 3.4 (Planung 20181002 PE Becker)
Info	
Transformation	(nicht definiert)
Hilfkonstruktion	<input type="checkbox"/>
Farbe	
Schicht (QP)	0
Zeichnung	
LV Position(en)	
Schallabschirmung	<input type="checkbox"/>
Fahrbahn	-
Lagesystem	absolut
Nullpunkt (absolut)	2601355.47, 5710345.125
Richtung (absolut)	0, 0
Höhensystem	absolut
Z	83.8
Skalierung	1, 1, 1
Lagedrehung	164.11
Einfügestellen darstellen	<input type="checkbox"/>
Medium	Abwasser (AW)
Knoten/typ	Schacht
Funktion	unbekannte Schachtfunktion
Schachttiefe	2.969
Schachttiefe IST	2.91

(c) Fachobjekt

Abbildung 3.4: Bauteil, Bauteilgruppe und Fachobjekt nach APPELT et al., 2021b

werden darin erfasst und verwaltet. Das Gesamtmodell ist die einzige und eindeutige Quelle aller Informationen zu diesem Projekt (SSoT). Der Austausch und die Kommunikation finden mit BIM transparent zwischen allen Beteiligten und über das Gesamtmodell sowie in einer einheitlichen Umgebung statt. BIM beruht auf der verlustfreien Weitergabe genau eines digitalen modellbasierten Datensets.“ (APPELT et al., 2021a)

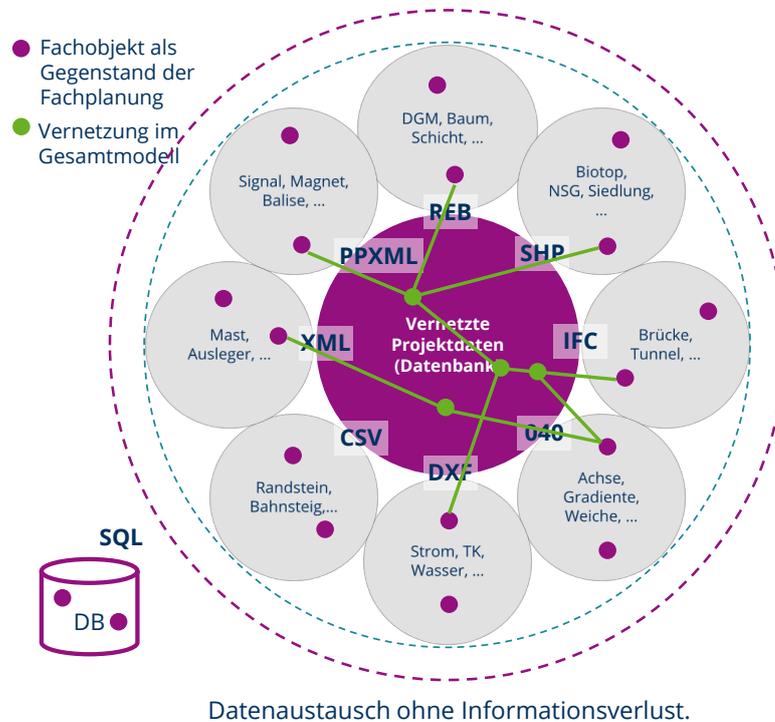


Abbildung 3.5: 3D-Planen. (APPELT et al., 2021a)

3.8 Geometrische Modellierung

Die Verfügbarkeit von 3D-Bauwerks- und Gebäudegeometrie ist eine der wichtigsten Errungenschaften von BIM, auf der auch viele BIM-Anwendungsfälle basieren. Neben der Ableitung von konsistenten Plänen und Schnitten, dient das 3D-Modell für Kollisionsanalysen, Mengenermittlung, Berechnungs- und Simulationsverfahren, photorealistische Visualisierung und weitere Anwendungen (BORRMANN & BERKHAHN, 2021).

Die Modellierung von Volumenkörpern (Solid Modeling) unterscheidet sich in zwei grundlegend verschiedene Ansätze, die im Folgenden erläutert werden.

3.8.1 Explizite Verfahren

Die auch Boundary Representation (BRep) genannten expliziten Verfahren beschreiben volumetrische Körper über ihre Oberfläche. Es ist die am weitesten verbreitete und damit gängigste Art der numerischen Beschreibung von 3D-Körpern. Der Körper ergibt sich

durch eine hierarchische Anordnung von Berandungsflächen (Faces), Kanten (Edges) und Knoten (Vertices), die auch Topologie genannt wird. Jedes Element wird durch Elemente aus der nächst tieferen Ebene beschrieben. Begrenzungsflächen durch Kanten und Kanten durch Punkte. Abb. 3.6 zeigt die Darstellung eines BRep-Körpers und die Beziehungen der faces, vertexes und edges, die in sog. Vertex-Edge-Face (vef)-Graphen beschrieben werden.

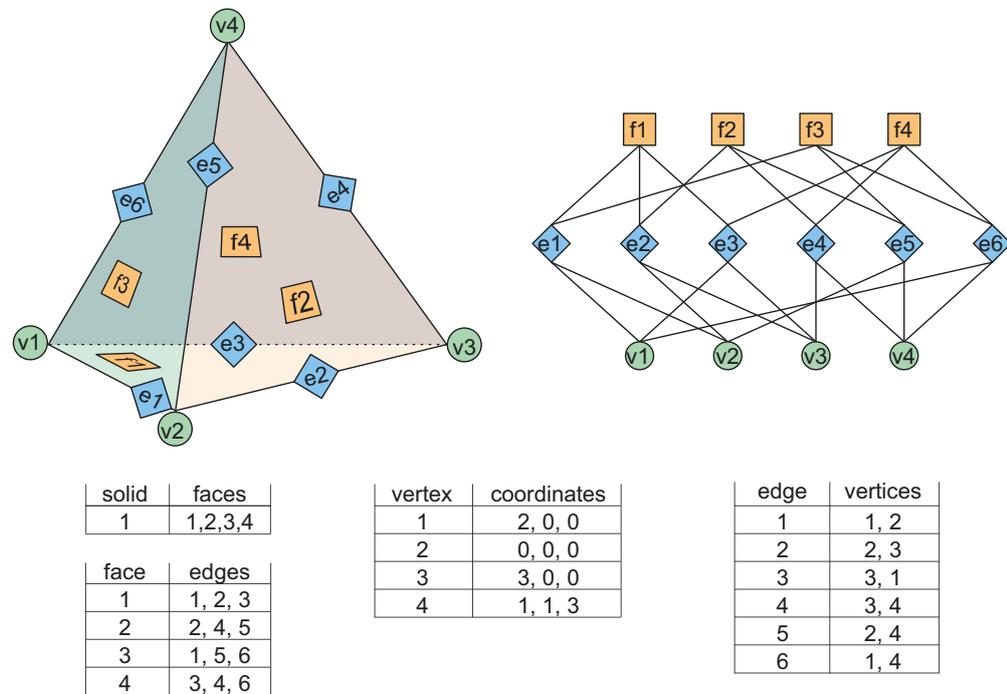


Abbildung 3.6: BRep Datenstruktur (BORRMANN & BERKHAHN, 2021)

Zur Beschreibung eines Körpers muss die topologische Information mit geometrischer Information verknüpft werden. Bei Körpern mit ebenen Flächen und geraden Kanten (wie in Abb. 3.6) besteht diese aus den Koordinaten der Eckpunkte. Mit einer Erweiterung des Datenmodells ist auch die Modellierung von komplexeren Körpern mit gekrümmten Flächen und Kanten möglich. Heutzutage werden jedoch meist noch Körper mit ebenen Kanten und Flächen in IFC übergeben, sodass ursprünglich gekrümmte Umrandungsflächen approximiert werden müssen. (BORRMANN und BERKHAHN, 2021; BIM4INFRA, 2019a)

Eine noch weiter vereinfachte Form der BRep ist die triangulierte Oberflächenbeschreibung, bei der die Oberfläche eines Körpers ausschließlich mit Dreiecksnetzen beschrieben wird. Diese Art der Darstellung von Geometrie wird unter anderem häufig für Visualisierungen oder zur Beschreibung von Geländeoberflächen verwendet. Gekrümmte Flächen werden dabei über eine Verfeinerung des Netzes angenähert, was einen hohen Speicherbedarf zur Folge hat. Dreiecksnetze werden häufig mittels des sog. *Indexed Face Set* beschrieben, das aus einer indizierten Liste mit Punktkoordinaten besteht. Das Netz wird definiert, indem auf die Indizes der Punktliste verwiesen wird. Dadurch wird die redundante Speicherung von Punkten und möglicherweise resultierende Geometriefehler vermieden. (BORRMANN und BERKHAHN, 2021; BIM4INFRA, 2019a)

3.8.2 Implizite Verfahren

Ein anderer Ansatz zur Beschreibung von Volumenkörpern ist das implizite Verfahren, welches Körper über Folgen von Konstruktionsschritten beschreibt. Es wird daher auch prozedurales Verfahren genannt. Constructive Solid Geometry (CSG) stellen eines dieser Verfahren dar, bei dem vordefinierte geometrische Primitive (wie Würfel, Zylinder und Pyramiden) mittels booleschen Operationen miteinander kombiniert werden. Ein Konstruktionsbaum beschreibt den resultierenden Körper eindeutig.

Ein weiteres implizites Verfahren ist die Modellierung mittels Extrusion, Sweep und Rotation. Wie in [Abb. 3.7](#) dargestellt, wird dabei eine 2D-Geometrie entlang eines geraden Pfads (Extrusion) bzw. einer Kurve (Sweep) extrudiert oder um eine Achse gedreht (Rotation) wodurch ein 3D-Körper entsteht. Beim Lofting werden mehrere Querprofile hintereinander im Raum definiert, die durch zwischenliegende Interpolation einen Körper erzeugen. (BORRMANN und BERKHAHN, 2021; BIM4INFRA, 2019a)

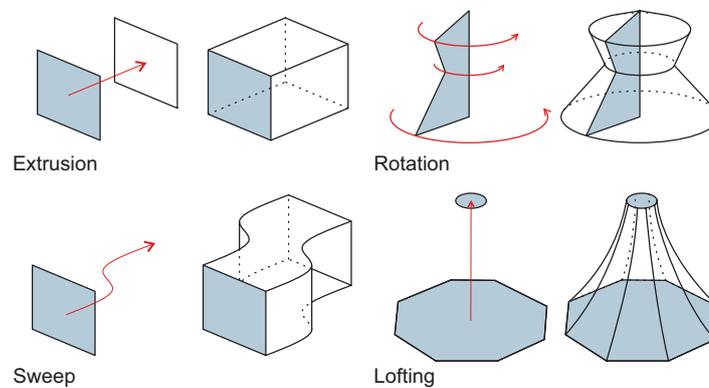


Abbildung 3.7: Extrusions und Rotationsverfahren zum Erzeugen von Körpern (BORRMANN & BERKHAHN, 2021)

3.9 BIM im Straßen und Brückenbau

Nach verschiedenen politischen Initiativen (BMVI, 2015b; BIM4INFRA, 2019b; BMVI, 2021) wird BIM heute vermehrt auch im Straßen- und Brückenbau angewendet. Im Vergleich zum Hochbau gibt es im Infrastrukturbereich jedoch abweichende Anforderungen an Planung, Bau und Betrieb.

Bei Verkehrsprojekten definiert sich das Projektgebiet durch die übergeordnete Führung des Verkehrswegs. Dadurch ergibt sich ein wechselndes ober- und unterirdisches Umfeld und eine Vielzahl von Abhängigkeiten und Betroffenheiten in der Umgebung. Beispielsweise werden für die Ermittlung von Umwelteinwirkungen wie Lärm und Luftverschmutzung oder Grunderwerb, Datengrundlagen aus Geoinformationssystemen eingebunden. Mehr als zwei Drittel der Investitionen des Bundesverkehrswegeplans (BVWP) 2030 gelten dem Erhalt des Bestandsnetzes (BMVI, 2016). Einen erhöhten Stellenwert hat daher die exakte Bestandserfassung, die zu großen Datenmengen führt. Durch die meist großflächige räumliche Ausdehnung ist eine verzerrungsgetreue Einbindung von Lage und Höhe und somit die Berücksichtigung einheitlicher Koordinatensysteme erforderlich. Die Projekte sind meist in öffentlicher Trägerschaft mit herstellerneutralen Ausschreibungen die entsprechend neutrale Datenformate erfordern. (BACH und STIEHLER, 2021; APPELT et al., 2021a)

Modellbildung

Der erste Schritt der Modellbildung ist die Grundlagenermittlung aus der das Bestandsmodell hervorgeht. Dieses Bestandsmodell setzt sich aus einer Vielzahl von 2D- und 3D-Daten wie Flächen- und Bestandsplänen, Geländemodellen, Orthofotos und Stadtmodellen zusammen. Zur Erhöhung der Detaillierung werden Informationen aus Vermessung und Geotechnik herangezogen. Das Bestandsmodell stellt die Grundlage für die Fachmodelle der verschiedenen Disziplinen dar. Derzeit werden zum Datenaustausch neben IFC weitere XML-basierte Formate verwendet, die in Zukunft durch die IFC Infrastrukturerweiterungen ersetzt werden können. Um die einzelnen Fachmodelle lage- und höhengetreu im Gesamtmodell zusammenzuführen ist ein einheitliches Koordinatensystem, bzw. die Anwendung von Transformationen notwendig.

Das Planungsmodell der Verkehrsanlage kann in der Regel aus Standardtrassierungsprogrammen abgeleitet werden, da der Planungsprozess hier schon immer dreidimensional in Form von Achse, Gradienten und Ausbauquerschnitt abschnittsweise definiert wurde (Abb. 3.8). Aus diesen Grundlagen kann eine Trasse im 3D-Raum mathematisch berechnet und abgebildet werden. Dabei ist der aktuelle Stand der Technik eine lineare Kombination von Querprofilen, üblicherweise im Abstand von 5-10 Metern (Abb. 3.9). Dieser Prozess entspricht der in Abschnitt 3.8 erläuterten Extrusion.

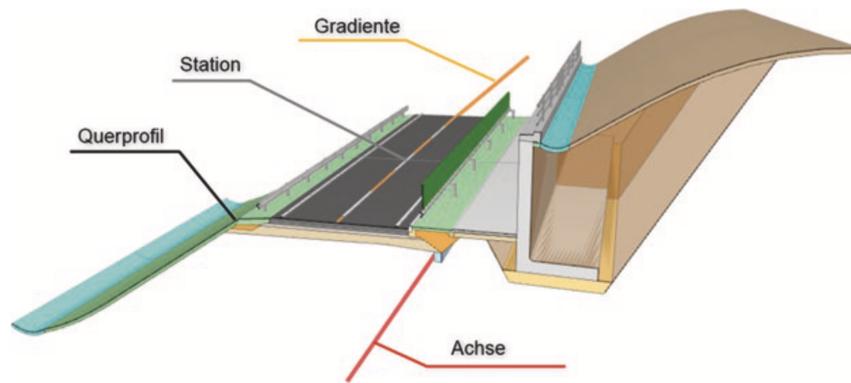


Abbildung 3.8: Grundelemente der Straßenplanung (BACH & STIEHLER, 2021)

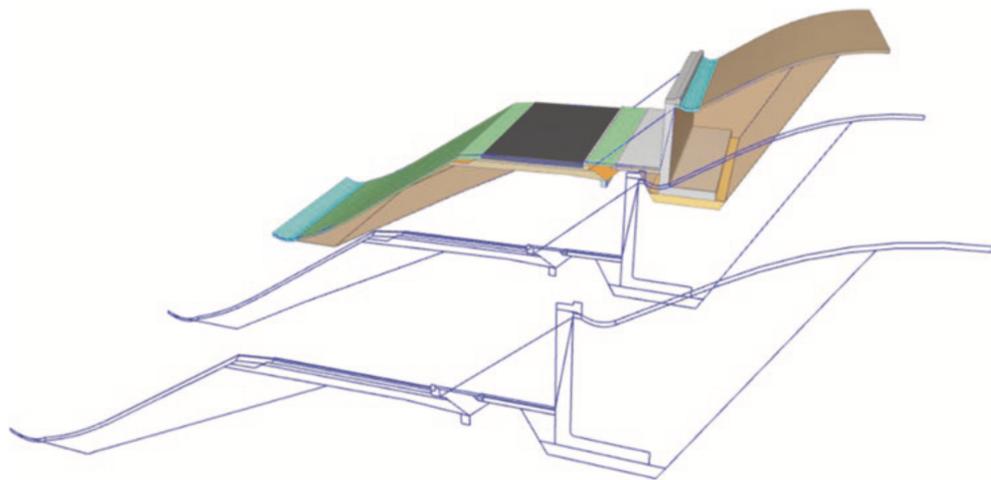


Abbildung 3.9: Bildung der 3D-Trassenkörper (BACH & STIEHLER, 2021)

In der Straßenplanung können schon in frühen Leistungsphasen die wesentlichen 3D-Objekte, die sich aus dem Straßenaufbau (Asphaltschicht, Binderschicht, Frostschuttschicht usw.) und den Anschlüssen an das vorhandene Gelände (Böschungen) ergeben, erzeugt werden. Die Objekte werden in fortschreitenden Leistungsphasen nur ergänzt bzw. weiter detailliert. Bei Änderungen an Achse oder Gradiente muss die Geometrie neu erzeugt werden. Die Definition des LOG-Grades sollte im Straßenbau deswegen nicht über Objekte, sondern über Planungsdetails definiert werden.

Nachteile des aktuellen Verfahrens zur 3D-Körperbildung entstehen in Radien oder Knotenpunkten. Hier werden die Abstände der formgebenden Querprofile bis in den cm-Bereich reduziert, sodass die Körper „tortenweise“ erzeugt werden. Folglich ergeben sich fehlerhafte Mengenermittlungen, die durch einen Korrekturfaktor ausgeglichen werden müssen. Langfristig wird die Umstellung auf eine liniengeführte, parametrische Beschreibung des Streckenverlaufs für die Modellierung angestrebt. Die Darstellung der Querschnitte ergibt sich dann, in zum derzeitigen Verfahren umgekehrter Weise, aus Schnitten der Volumenkörper der Trasse. Ein weiterer Vorteil ist dabei die Reduzierung der Anzahl von 3D-Körpern und damit Dreiecken, was zu einer besseren Performance, einem deutlich reduzierten Speicherbedarf und erhöhter Genauigkeit führt. (BACH & STIEHLER, 2021)

Kapitel 4

BIM Datenaustausch

4.1 Software Interoperabilität

Die Grundlage von BIM ist die durchgängige Nutzung eines digitalen Modells eines Bauwerks als Basis für den Datenaustausch unter allen Projektbeteiligten. Heutzutage existiert im Bauwesen eine Vielzahl von hoch spezialisierten Softwarewerkzeugen für verschiedene Fachsziplinen, die sich in ihrem jeweiligen Einsatzbereich etabliert haben. Der Datenaustausch zwischen diesen spezialisierten Softwareprodukten, den sog. „Automatisierunginseln“, funktioniert teilweise bis heute nicht oder nur unzureichend, was zur Folge hat, dass eigentlich bereits digital vorliegende Daten aufwändig und fehleranfällig neu eingegeben werden müssen.

Da Bauprojekte stark fragmentierte Prozesse mit zahlreichen Beteiligten aus unterschiedlichen Unternehmen sind, ist im Vergleich zur stationären Industrie die Durchsetzung von einheitlichen Vorgaben zu Softwareprodukten erschwert. (BORRMANN & KOCH, 2021) Eine starke Bindung an ein Softwareprodukt würde außerdem zu Abhängigkeiten (sog. Lock-in-Effekt) führen und einen erhöhten Aufwand zur Personalqualifikation in unterschiedlichen Softwarewerkzeugen bedeuten. Zudem muss in Hinblick auf die lange Lebensdauer von Bauwerken die Verarbeitung der Daten nach mehreren Jahrzehnten noch möglich sein, was bei herstellereigenen Formaten schon nach wenigen Versionsschritten nicht mehr zweifelsfrei gewährleistet ist (BIM4INFRA, 2019c). Für öffentliche Bauvorhaben ist die Vorgabe der zu verwendenden Softwareprodukte zudem wettbewerbsrechtlich nicht erlaubt. Der Stufenplan schreibt hier den Einsatz von Open BIM vor.

Für einen flächendeckenden Einsatz von Open BIM bedarf es offener und neutraler Schnittstellen, die einen verlustfreien Transport von Bauwerksdaten zwischen verschiedenen Softwareprodukten ermöglichen. Das IFC-Datenmodell hat sich als offenes Datenformat für die Realisierung von Big Open BIM international durchgesetzt. Im Folgenden wird näher auf die Struktur der Datenspeicherung und die verfügbaren Geometriepäsentationen in den IFC eingegangen.

4.2 Das Datenmodell der Industry Foundation Classes (IFC)

IFC sind ein standardisiertes (ISO 16739-1:2018, DIN, 2018) und herstellernertrales Datenformat für den Austausch von Bauwerksmodellen. Der Standard soll unabhängig über eine Vielzahl von Geräten, Softwareprodukten, Plattformen und Schnittstellen für vielfältige Anwendungsfälle genutzt werden. Das IFC-Datenmodell enthält nicht nur geometrische

Informationen von Objekten wie Bauteilen sondern auch semantische Informationen wie Beziehungen, Konzepte, Prozesse und Personen (BUILDINGSMART, n. d.). Heute sind sie das am weitesten verbreitete Datenformat für die Realisierung von BIG Open BIM.

Nachdem sich anfängliche Bestrebungen für einen einheitlichen Austausch, die bereits auf die 1980er Jahre zurückgehen, nicht durchgesetzt hatten, gründete sich 1994 eine Organisation aus Vertretern der Bau- und Softwareindustrie mit dem Ziel, die Standardisierung voranzutreiben. Die heute unter dem Namen buildingSMART bekannte, international vertretene Organisation, brachte schließlich 1997 eine erste Version der IFC heraus. Seitdem wird das Format fortwährend überarbeitet und erweitert. Die derzeit aktuellste Version ist 4.3. Version 5.0 befindet sich in der Entwicklung (Abb. 4.1). Bei der Implementierung in Softwareprodukte löst derzeit Version 4 die lange am weitesten verbreitete Version 2x3 ab. Durch Offenheit, Neutralität, Standardisierung und lizenzfreie Nutzung hat sich die Datenstruktur in der Industrie bei der Implementierung in vielen BIM-Softwareprodukten durchgesetzt und zur Grundlage für staatliche BIM-Initiativen entwickelt. Der offene Standard ist auch in Hinblick auf die lange Lebensdauer von Bauwerken, die 100 Jahre erreichen kann, von besonderer Bedeutung.

Während das IFC-Datenmodell bis Version 4.0 vorwiegend auf die Wiedergabe von Gebäuden ausgelegt war, wurden mit den IFC 4.3 Erweiterungen für die Beschreibung von Infrastrukturanlagen, wie Straßen, Schienen, Brücken und Tunnel implementiert. (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

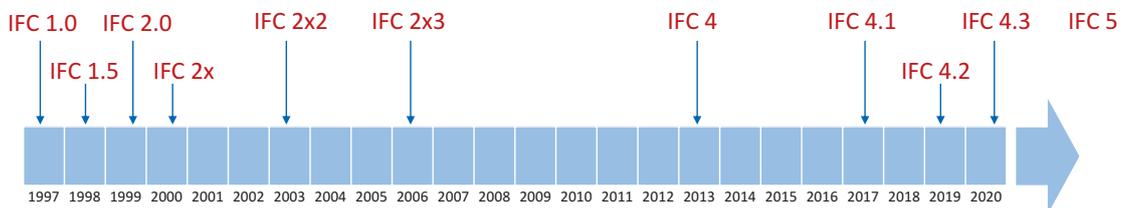


Abbildung 4.1: IFC Versionsgeschichte (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

EXPRESS Datenmodellierungssprache

Die grundlegende Technologie der Datenmodellierung in IFC ist die Datenmodellierungssprache EXPRESS, die aus dem Standard for the Exchange of Product Model Data (STEP) hervorgegangen ist. EXPRESS dient zur Beschreibung von objektorientierten Datenmodellen, die durch Klassen (in EXPRESS als Entitytypen bezeichnet) und deren Attribute und Beziehungen zu anderen Klassen charakterisiert sind. Das objektorientierte Prinzip der Vererbung wird umgesetzt, indem Attribute und Beziehungen an Subtypen weitergegeben werden, sodass Beziehungen zwischen Entitytypen über gemeinsame Attribute ausgedrückt werden. Die Möglichkeit einer grafischen Beschreibung des Datenmodells bietet die Sprache EXPRESS-G.

Besonderheiten des EXPRESS Standards sind die Deklaration von inversen Beziehungen über die Anlage von Attributen und Aggregations-Datentypen wie List, Array, Set und Bag, die die Definition von Beziehungen mit Gruppen von Objekten erleichtern. In einem

Algorithmus 4.1: Definition eines Entitytyps in EXPRESS. (BUILDINGSMART, 2022a; BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

```
1 ENTITY IfcProduct
2   ABSTRACT SUPERTYPE OF(ONEOF(IfcAnnotation , IfcElement , IfcGrid ,
3     ...))
4   SUBTYPE OF IfcObject ;
5     ObjectPlacement : OPTIONAL IfcObjectPlacement ;
6     Representation : OPTIONAL IfcProductRepresentation ;
7   INVERSE
8     ReferencedBy : SET OF IfcRelAssignsToProduct FOR
9       RelatingProduct ;
10  WHERE
11    PlacementForShapeRepresentation : ...
12 END_ENTITY ;
```

optionalen WHERE-Block können algorithmische Bedingungen mit booleschem Ausdruck festgelegt werden, um bei einem „wahren“ Wert eine Instanz als gültig einzustufen. [Algorithmus 4.1](#) zeigt eine Beispielformatierung eines Entitytyps in EXPRESS. Zu Beginn wird in [Zeile 1](#) die Entität über ihren Namen definiert. Anschließend werden in [Zeile 2](#) alle Unterklassen und in [Zeile 3](#) alle Oberklassen der Entität aufgelistet. [Zeile 4](#) nennt alle Attribute und inversen Attribute ([Zeile 6](#)) der Klasse. Darauf folgt der erwähnte WHERE-Block, in dem Bedingungen für einen gültigen Entitytypen definiert sind ([Zeile 8](#)).

EXPRESS dient dazu das Datenmodell zu definieren ohne konkrete Instanzen zu beschreiben. Diese können mittels STEP Physical File, XML-Instanzen, JSON-Strings, RDF oder Datenbanken definiert werden (BORRMANN & BERKHAHN, 2021).

4.2.1 Schichtenarchitektur im IFC Datenmodell

Das IFC Datenmodell ist aufgrund seiner Komplexität und zur besseren Erweiterbarkeit in Schichten unterteilt ([Abb. 4.2](#)). Zur Sicherstellung der Unabhängigkeit der Elemente können Elemente nur auf andere Elemente in einer unter ihnen liegenden Schicht verweisen.

Die oberste Ebene stellt der *Domain Layer* dar, der Schemata mit Klassendefinitionen für spezifische Disziplinen, wie beispielsweise Architektur (Architecture) oder, ab Version 4.3 unter anderem neu hinzugekommen, Straßen (Road) enthält.

Der *Shared Layer* enthält Klassendefinitionen, die für allgemeine Produkte, Prozesse oder Ressourcen spezifisch sind und über mehrere Disziplinen hinweg verwendet werden, wie die Bauteilklassen *IfcWall*, *IfcColumn*, *IfcBeam*, *IfcPlate*, *IfcWindow* etc.

Im *Core Layer* sind die grundlegendsten Klassen enthalten. Der Kernel stellt die abstrakten Basisklassen *IfcRoot*, *IfcObject*, *IfcActor*, *IfcProcess*, *IfcProduct*, *IfcProject*, *IfcRelationship* zu Verfügung, die mit erweiternden Subklassen spezifiziert werden können. Beispielsweise hinsichtlich geometrischer Form und Platzierung von räumlichen Objekten und deren Beziehungen die im *Product Extension* Schema enthalten sind. Außerdem stellt die

Process Extension Klassen zur Beschreibung von Prozessen und Abläufen und die *Control Extension* Basisklassen für Steuerungsobjekte.

Die unterste Schicht, der *Ressource Layer*, stellt die grundlegenden Datenstrukturen wie beispielsweise geometrische Basiselemente (Punkte, Vektoren, parametrische Kurven, gekrümmte Flächen) in der *Geometry Resource* bereit. (BUILDINGSMART, 2022b; BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

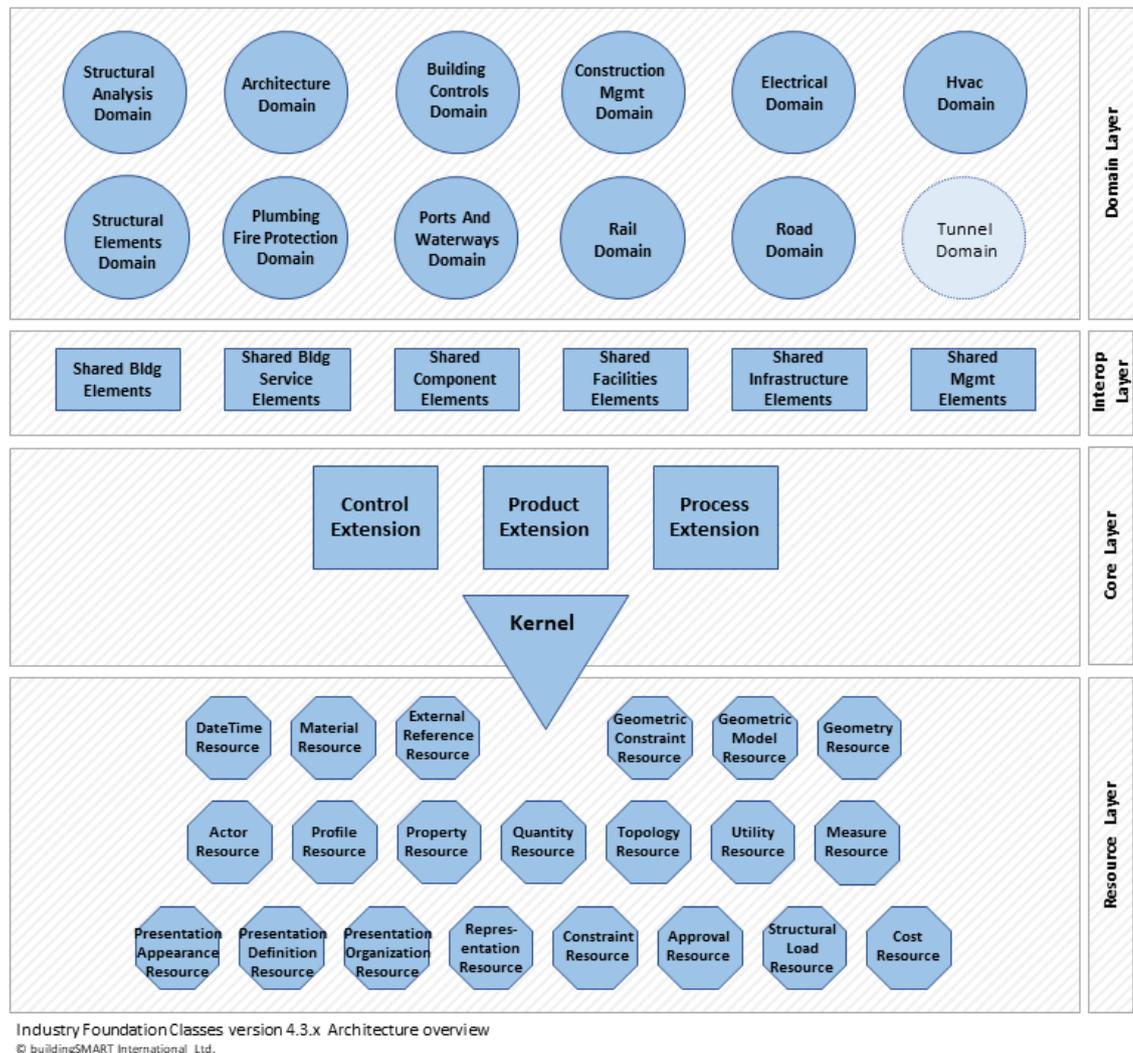


Abbildung 4.2: Schichtenarchitektur in IFC 4.3 (BUILDINGSMART, 2022b)

4.2.2 Vererbung

Die Vererbungshierarchie ist ein zentraler Bestandteil von objektorientierten Datenmodellen, da sie durch Spezialisierungs- und Generalisierungsbeziehungen bestimmt, welche Attribute unter den Klassen vererbt werden.

Abb. 4.3 zeigt einen Ausschnitt der Vererbungshierarchie der IFC. *IfcRoot* stellt die Wurzel des Vererbungsbaums dar. Von ihr werden die Klassen *IfcObjectDefinition*, *IfcPropertyDefinition* und *IfcRelationship* abgeleitet. Dabei ist *IfcObjectDefinition* die abstrakte Superklasse aller Klassen unter *IfcObject*, die physische Objekte wie Bauteile, Raumob-

jekte wie Spaces, konzeptionelle Elemente wie Prozesse oder am Bauvorhaben Beteiligte beschreiben. *IfcRelationship* und ihre abgeleiteten Klassen dienen zur Abbildung von Beziehungen zwischen Objekten. Als direkte Subklasse von *IfcRoot* ist die Semantik der Beziehungen somit von den Objektattributen entkoppelt. Beziehungseigenschaften sind somit direkt am Beziehungsojekt (beispielweise *IfcFillsElement*) gespeichert. Eigenschaften von Objekten, die nicht standardmäßig über das IFC-Datenmodell abgedeckt sind, können über die Klasse *IfcPropertyDefinition* definiert werden. (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

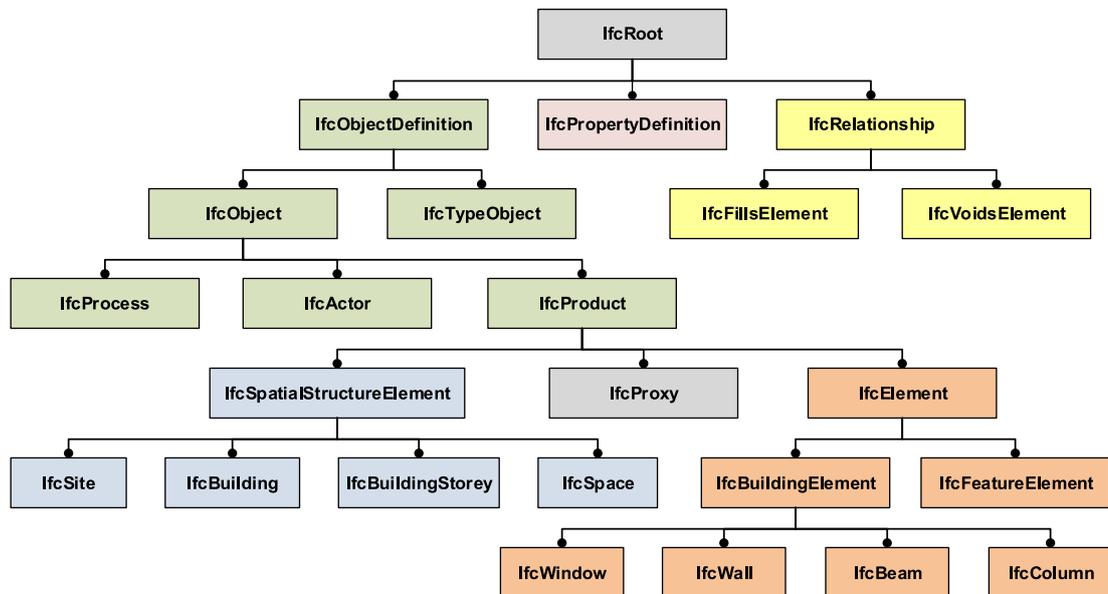


Abbildung 4.3: Vererbungshierarchie der wichtigsten Klassen des IFC Datenmodells (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

4.2.3 Generelles Konzept der Objektbeziehungen

Bauteile können in einem Bauwerksinformationsmodell nicht nur als isolierte Elemente behandelt, sondern müssen immer in Funktion und Zusammenspiel mit anderen Objekten gesehen werden. Die umfangreiche Darstellung von Objektbeziehungen spielt daher eine wichtige Rolle im IFC Datenmodell und stellt ein Alleinstellungsmerkmal des Standards dar. Bei den IFC werden Beziehungen zwischen Objekten nicht über Assoziationen, sondern über die Beziehung repräsentierende Instanzen einer Subklasse von *IfcRelationship* abgebildet. Dieses Merkmal wird auch als Prinzip objektifizierter Beziehungen bezeichnet.

Abb. 4.4 zeigt beispielhaft die Beziehung zwischen einem Wandobjekt und einem in der Wand enthaltenen Fenster über die Beziehungsobjekte *IfcVoidsElement* und *IfcFillsElement*. Vorwärtsbeziehungen gehen vom Beziehungsobjekt aus und zeigen über Attribute mit dem Namen *related...Element* und *relating...Element* auf die in Beziehung gesetzten Objekte. Über inverse Attribute wie *hasOpening*, *voidsElement* und *hasFillings* kann von den in Beziehung stehenden Objekten zum Beziehungsobjekt navigiert werden. (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

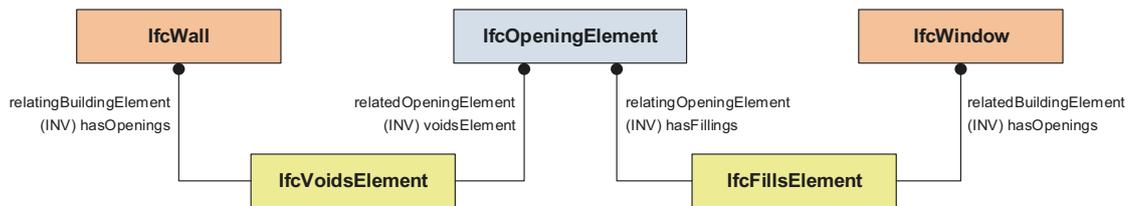


Abbildung 4.4: Prinzip objektfizierter Beziehungen (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

4.2.4 Räumliche Aggregationshierarchie

Aggregationsbeziehungen zwischen Raumobjekten auf unterschiedlichen Hierarchiestufen sind ein wichtiger Bestandteil der Bauwerksbeschreibung in den IFC. Dabei erben Klassen mit räumlicher Semantik (z. B. *IfcSite*) Attribute und Eigenschaften der Oberklasse *IfcSpatialStructureElement* (siehe Abb. 4.3). Zu einem Projekt (*IfcProject*) oder Gebäude (*IfcBuilding*) gehörende Objekte werden über die Beziehungsklasse *IfcRelAggregates* mit dem Gesamtprojekt bzw. Gesamtgebäude in Beziehung gesetzt. Welche Bauteile (Objekte) wiederum mit welchem Raumobjekt in Verbindung stehen ist mit *IfcRelContainedInStructure* modelliert. (BUILDINGSMART, 2022b; BORRMANN und BERKHAHN, 2021)

Abb. 7.3 zeigt die Aggregationshierarchie zwischen einem *IfcProject* und einem *IfcBuildingElementProxy*. Wie in der Abbildung dargestellt, sind Bauteile üblicherweise mit Geschossen verknüpft, auch wenn die reale Anlage gar keine Geschosse besitzt (beispielsweise bei Straßen). Erst mit den kürzlich eingeführten umfangreichen Erweiterungen von IFC 4.2 und 4.3 sind Entitäten zur Beschreibung der räumlichen Hierarchie von Infrastrukturanlagen verfügbar (Abb. 4.5).

4.2.5 Geometrische Repräsentation

Eine Besonderheit des IFC-Datenmodells ist die konsequente Trennung zwischen der semantischen Beschreibung und der geometrischen Repräsentation von Bauteilen (Abb. 4.6). Objekte werden zuerst als semantische Entität beschrieben, die anschließend mit einer oder mehreren geometrischen Repräsentationen verknüpft werden kann. Dadurch ergibt sich die Möglichkeit, Objekte je nach Anwendungsszenario unterschiedlich geometrisch darzustellen. Für Visualisierungen reicht beispielsweise eine einfache auf Dreiecken basierte Darstellung, während für Änderungen am Modell durch Modellierungswerkzeuge BRep oder CSG Repräsentationen notwendig sind (Abschnitt 3.8).

In den IFC erben alle Geometrieklassen von der abstrakten Superklasse *IfcGeometricRepresentation* (Abb. 4.6). Die Subklassen *IfcCurve*, *IfcSurface* und *IfcSolidModel* dienen der Beschreibung von Kurven, Flächen und Körpern. Weitere Subklassen zur Beschreibung von Punkten, Vektoren und Richtungen sind *IfcCartesianPoint*, *IfcCartesianPointList*, *IfcVector* und *IfcDirection*. Kurven können in 2D und 3D über die Subklassen *IfcBound*

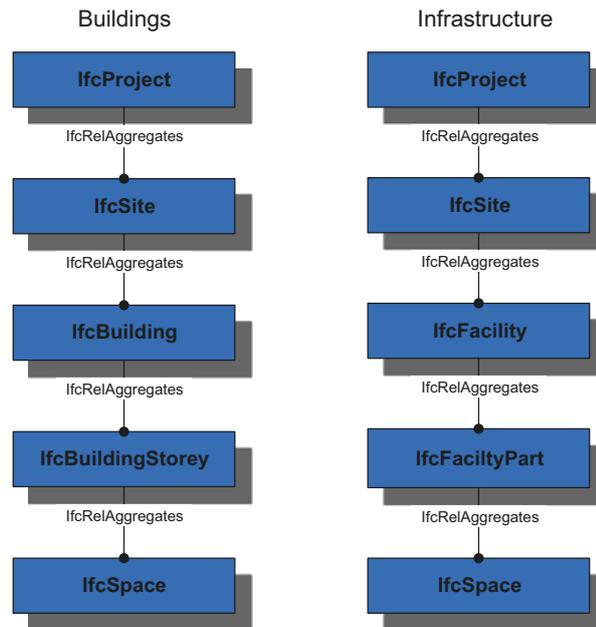


Abbildung 4.5: Räumliche Hierarchie von Gebäuden und Infrastrukturanlagen (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

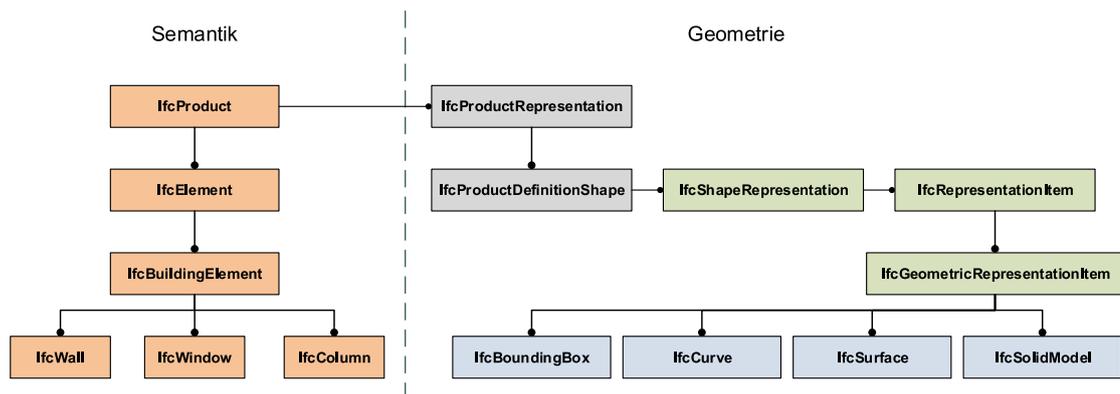


Abbildung 4.6: Trennung zwischen semantischer und geometrischer Beschreibung von Objekten im IFC-Datenmodell (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

dedCurve, *IfcConic* *IfcLine* und *IfcBSplineCurve* dargestellt werden. *IfcCompositeCurve* erlaubt die Zusammensetzung einer Kurve aus einzelnen Teilkurven.

Für die Beschreibung von Oberflächen und Körpern über zusammengesetzte ebene Teilflächen stellt das IFC-Datenmodell zwei Flächenmodelle zu Verfügung: Die *IfcFaceBasedSurface* für die Modellierung von Körpern ohne Hohlräume und die *IfcShellbasedSurface* für Körper mit Hohlräumen, die über beliebig viele *IfcShell* Objekte beschrieben werden.

Geländeoberflächen werden häufig über Dreiecksnetze beschrieben. Die IFC enthalten für diese einfache Art der Geometriebeschreibung die Klasse *IfcTriangulatedFaceSet*, die sich von *IfcTesselatedFaceSet* ableitet (Abb. 4.7). Als Grundlage dieser Darstellungsform nutzt IFC das *Indexed Face Set* Verfahren. Wie in Abb. 4.7 zu sehen, verweist *IfcTriangulatedFaceSet* über das Attribut *Coordinates* auf die Klasse *IfcCartesianPointList3D*, die eine

Liste mit dreidimensionalen Punktkoordinaten enthält. Das Attribut *CoordIndex* enthält die Indizes für die drei Eckpunkte aus der Punkt-Koordinatenliste. Über das Attribut *Normals* können optional die Normalen der Flächen angegeben werden. (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

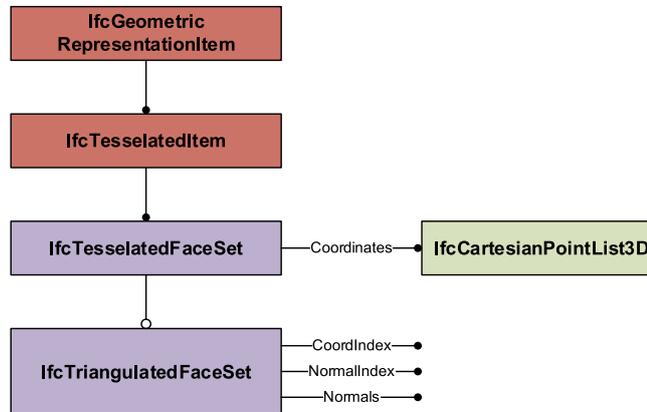


Abbildung 4.7: IFC-Datenstruktur zur Abbildung von triangulierten Flächen (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

Die Boundary Representation (**BRep**) ist die mächtigste und vielseitigste Art der Geometriebeschreibung (BORRMANN, BEETZ et al., 2021). Unter den Subklassen *IfcManifoldSolidBrep*, *IfcFacetedBrep* und *IfcAdvancedBrep*, die die **BRep** Datenstruktur in IFC umsetzen, ist *IfcFacetedBrep* diejenige für Körper mit ebenen Brandungsflächen.

Abb. 4.8 zeigt die Struktur eines solchen *IfcFacetedBrep*. Das Attribut *Outer* des **BReps** referenziert ein Objekt vom Typ *IfcClosedShell*, welches wiederum auf eine Menge von *IfcFace*-Objekten verweist. Jedes *IfcFace* Objekt kann sich aus beliebig vielen Brandungen zusammensetzen, wobei *IfcOuterBound* die äußere Brandung der Fläche darstellt. *IfcFaceBound*-Objekte verweisen auf ein *IfcLoop*-Objekt, welches auf die Liste der Eckpunkte (*IfcCartesianPoint*) der Fläche verweist. Auch in diesem Konzept werden Punkt und Kanten nicht redundant gespeichert sondern ggf. wiederholt referenziert. (BUILDINGSMART, 2022b; BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

Die IFC enthalten neben impliziten Geometriebeschreibungen wie **BRep** weitere Verfahren wie beispielsweise **CSG**. Aufgrund des Umfangs und der untergeordneten Relevanz für diese Arbeit wird hier jedoch auf eine nähere Betrachtung verzichtet.

Relative Positionierung

Bei der geometrischen Modellierung im IFC-Datenmodell wird stark auf die Anwendung lokaler Koordinatensysteme gesetzt. Eine hierarchische Gliederung bietet den Vorteil von flexiblen Lageänderungen von Bauteilgruppen sowie ganzen Bauwerken. Koordinaten von Wandobjekten werden beispielsweise in Bezug zur zugehörigen Etage gesetzt. Die Lage der Etagen wird wiederum in Bezug zum Gebäude gesetzt usw. Modifikationen der Lage des Gebäudes müssen nun nur an einer Stelle durchgeführt werden, alle übrigen relativen

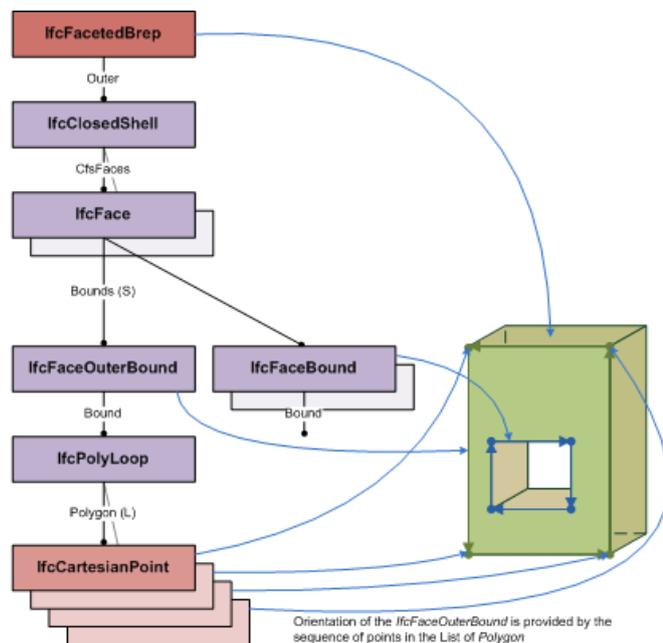


Abbildung 4.8: Struktur eines BRep der Klasse *IfcFacetedBrep* (BUILDINGSMART, 2022b)

Koordinaten bleiben unverändert. Dieses Konzept des *Local Placements* wird in den IFC über Subklassen des *ObjectPlacement* und des optionalen Attributs *PlacementRelTo* realisiert. (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

4.2.6 Aufbau einer IFC STEP-Datei

Die am weitesten verbreitete Methode konkrete Instanzen des per EXPRESS definierten Datenschemas abzubilden ist der STEP-Standard. Genaugenommen wird zur Speicherung von IFC-Dateien das im STEP P21 definierte und nach nach ISO 10303-21 (ISO, 2016) normierte alphanumerische Datenformat verwendet. Ein Vorteil eines alphanumerischen Datenformats ist die Lesbarkeit der enthaltenen Informationen.

IFC-Dateien bestehen aus zwei Abschnitten: dem Header, der Dateiinformationen enthält und einem Data-Teil mit Projektinformationen. Algorithmus 4.2 zeigt einen beispielhaften Header einer IFC-Datei mit dem verwendeten ISO Standard, der Model View Definition, dem Dateinamen, dem Datum der Erstellung, dem Ersteller, dem Autorenwerkzeug und der IFC Version. Der darauffolgende Data-Teil (Algorithmus 4.3) enthält das der Datei zugrunde liegende Projekt mit seinen Bestandteilen. Objekte werden in IFC zeilenweise über ein #-Zeichen und eine folgende Objektzahl (natürliche Zahl) definiert und referenziert. #1 definiert beispielsweise das enthaltene Projekt und referenziert auf #2, die Besitzhistorie. \$-Symbole stehen für leere Verweise oder Attribute. In den folgenden Zeilen sind weitere Informationen, wie die verwendeten Einheiten (#7-#19), der geometrische Repräsentationskontext (#20) und der Einfügepunkt (#22) enthalten. Danach folgen Angaben zur relativen Positionierung, das in der Datei enthaltene Gebäude, die zugehörigen Stockwerke, die referenzierten Bauteile etc.

Algorithmus 4.2: IFC Header Beispiel (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

```
1 ISO-10303-21;
2 HEADER;
3 FILE_DESCRIPTION (('ViewDefinition [CoordinationView ,
4   QuantityTakeOffAddOnView]'), '2;1');
5 FILE_NAME ('HelloWall.ifc', '2014-10-20T17:02:56', ('Architect'),
6   ('Building Designer Office'), 'My IFC tool', 'My IFC tool',
7   'Max Mustermann');
8 FILE_SCHEMA (('IFC2X3'));
9 ENDSEC;
```

Algorithmus 4.3: IFC Data Beispiel (BORRMANN, BEETZ et al., 2021)

```
1 DATA;
2 #1 = IFCPROJECT('0YvctVUKr0kugbFTf53O9L', #2, 'Default Project',
3   'Description of Default Project', $, $, $, (#20), #7);
4 #2 = IFCOWNERHISTORY(#3, #6, $, .ADDED., $, $, $, 1217620436);
5 #3 = IFCPERSONANDORGANIZATION(#4, #5, $);
6 #4 = IFCPERSON('ID001', 'Mustermann', 'Max', $, $, $, $, $);
7 #5 = IFCORGANIZATION($, 'MF', 'Musterfirma', $, $);
8 #6 = IFCAPPLICATION(#5, '0.10', 'My IFC tool', 'TA 1001');
9 #7 = IFCUNITASSIGNMENT((#8, #9, #10, #11, #15, #16, #17, #18, #19));
10 ...
11 #11 = IFCCONVERSIONBASEDUNIT(#12, .PLANEANGLEUNIT., 'DEGREE', #13);
12 #12 = IFCDIMENSIONALEXONENTS(0, 0, 0, 0, 0, 0, 0);
13 #13 = IFCMEASUREWITHUNIT(IFCPLANEANGLEMEASURE(1.745E-2), #14);
14 ...
15 #20 = IFCGEOMETRICREPRESENTATIONCONTEXT($, 'Model', 3, 1.000E-5, #21, $
16   );
17 #21 = IFCAXIS2PLACEMENT3D(#22, $, $);
18 #22 = IFCCARTESIANPOINT((0., 0., 0.));
19 ...
```

Kapitel 5

Konventioneller Prozess der Lärmberechnung

Das folgende Kapitel beschreibt den konventionellen (3D-CAD) Prozess einer Lärmberechnung bei der Staatsbauverwaltung anhand eines Beispielprojekts des Bauamts Landshut.

5.1 Beispielprojekt B299

Bei dem exemplarischen Projekt handelt es sich um den dreistreifigen Ausbau eines 3,75 Kilometer langen Abschnitts der B299 zwischen den Orten Geisenhausen und Vilsbiburg südöstlich von Landshut. Das Projekt mit einem Volumen von 13,6 Mio. Euro ist eines von derzeit 20 BIM-Pilotprojekten im Straßenbau in Bayern.

Abb. 5.1 zeigt einen Ausschnitt aus dem Übersichtslageplan der Maßnahme. Von Landshut kommend wird die Fahrbahn unmittelbar nach der Anschlussstelle Geisenhausen für eine Länge von 1350 Meter um einen Überholfahrstreifen erweitert, um auf dem Steigungsabschnitt eine sichere LKW-Überholmöglichkeit zu Verfügung zu stellen. Nach einer Wechselstelle beginnt etwa auf Höhe Kiemannstetten der ebenfalls 1350 Meter lange Überholfahrstreifen für die Steigung auf der Gegenseite. Im Zuge des Ausbaus wird die Anschlussstelle Geisenhausen teilplanfrei mit einer sogenannten „Trompete“ neu geordnet. Die rechtsgeführte Trompete führt die aus Richtung Vilsbiburg nach Geisenhausen abfahrenden Fahrzeuge über ein neu zu bauendes Brückenbauwerk. Zudem sind zwei weitere Brückenneubauten zur Unterführung von Gemeindeverbindungsstraßen erforderlich. Einmal südlich des Gemeindeteils Johannesbergham und nördlich von Kiemannstetten. Der Ausbau ist nach der Entwurfsklasse 2 für Landstraßen (EKL 2) als RQ 11,5+ geplant.



Abbildung 5.1: Ausschnitt aus dem Lageplan des Vorentwurfs (Bauamt Landshut)



Abbildung 5.2: CDE des Beispielprojekts mit Darstellung einzelner Teilmodelle

5.2 Modelldaten in CDE

Das Common Data Environment (CDE) ist ein gemeinsamer digitaler Projekttraum, in dem Projektbeteiligte verschiedene Informationen aus unterschiedlichen Domänen austauschen. Die Anforderungen, die an eine CDE gestellt sind, werden von der Norm ISO 19650-1 (DIN, 2019) beschrieben. Unter anderem existieren für die Projektbeteiligten unterschiedliche Zugriffsbereiche mit klaren Statusdefinitionen und Statusübergängen mit optionalen Freigabe- und Genehmigungsprozessen.

Aus praktischer Erfahrung ist die durchgehende Verwendung eines einzigen Modells für den gemeinsamen Austausch nicht zu empfehlen, da zeitlich unabhängige Parallelbearbeitung erschwert ist und Fragen der Verantwortlichkeit und Haftung schwieriger zu klären sind (PREIDEL et al., 2021). Daher wird vermehrt auf einen, auch in ISO 19650-1 enthaltenen, kollaborativen Ansatz gesetzt. Dabei erstellen und bearbeiten Modellautoren ausschließlich das domänenspezifische Fachmodell, für das sie verantwortlich sind. Zur Koordination und Konfliktbehebung wird das Fachmodell in regelmäßigen Abständen mit Fachmodellen anderer Domänen zusammengeführt. Alle Fachmodelle bilden gemeinsam das Gesamtmodell (GM).

Das CDE des vorliegenden Projekts folgt den Empfehlungen des kollaborativen Ansatzes und enthält gesondert die Teilmodelle der einzelnen Fachplanungen. Abb. 5.2 zeigt die Darstellung einzelner Fachmodelle in dem CDE (Fachmodell (FM) Vermessung und B299). In der linken Seitenleiste können die domänenspezifischen Modelle zur Ansicht zugeschaltet oder isoliert dargestellt werden. Neben der Angabe des aktuellen Bearbeitungsstands besteht hier auch die Möglichkeit des Downloads der individuellen Teilmodelle im IFC Format.

In dieser Arbeit werden folgende Teilmodelle aus dem CDE verwendet:

- Bestandsvermessung (VM_200_MOD_10_211126_B_Vermessung.ifc)
- Bundesstraße B299 (VK_300_MOD_09_220211_B_B299.ifc)
- Knoten D (VK_300_MOD_07_220211_B_Knoten_D.ifc)
- Knoten G (VK_300_MOD_09_220216_B_Knoten_D.ifc)
- Wegenetz (VK_300_MOD_07_220216_B_Wegenetz.ifc)
- Ingenieurbauwerke:
 - ING_200_T-MOD-BW01_06_220223.ifc
 - ING_200_T-MOD-BW7539507_02_210205.ifc
- Straßenausstattung (VK_300_MOD_07_220407_B_Straßenausstattung.ifc)

Aufbereitung der (Teil-) Modelldateien

In den Teilmodellen sind die Volumina des Oberboden- bzw. Erdabtrags als Körper enthalten ([Abb. 5.3](#)). Für die Verwendung der Modelle in einer Lärmberechnung in einem Gesamtmodell müssen diese Körper aus dem Modell entfernt werden, da sie die berechnete Schallausbreitung verfälschen würden.

In der Software „Desite md pro“ können die Volumina selektiert und entfernt werden. Das genaue Vorgehen ist in [Anhang A.1](#) beschrieben. Nach Entfernung der Erdkörper kann die Datei in Desite wieder als IFC exportiert werden. Dabei muss der Export in globalen Koordinaten ausgewählt werden, wenn beim Import eine Transformation zum Nullpunkt durchgeführt wurde.

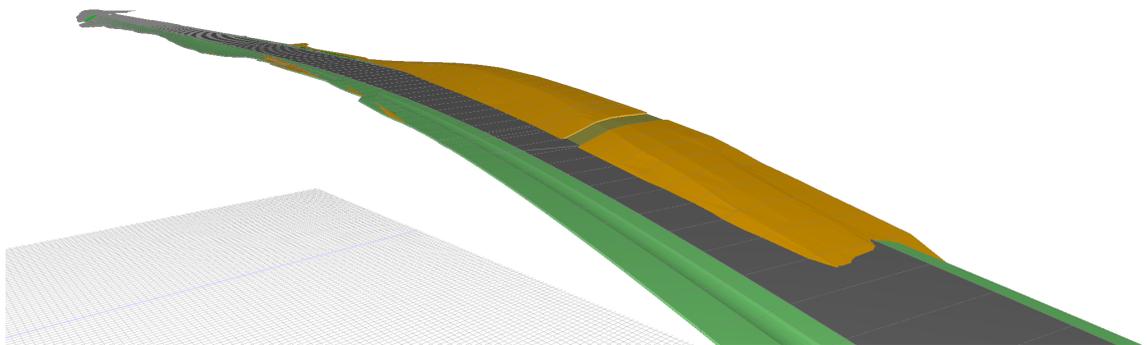


Abbildung 5.3: Teilmodell B299 mit Volumenkörper der Erdarbeiten

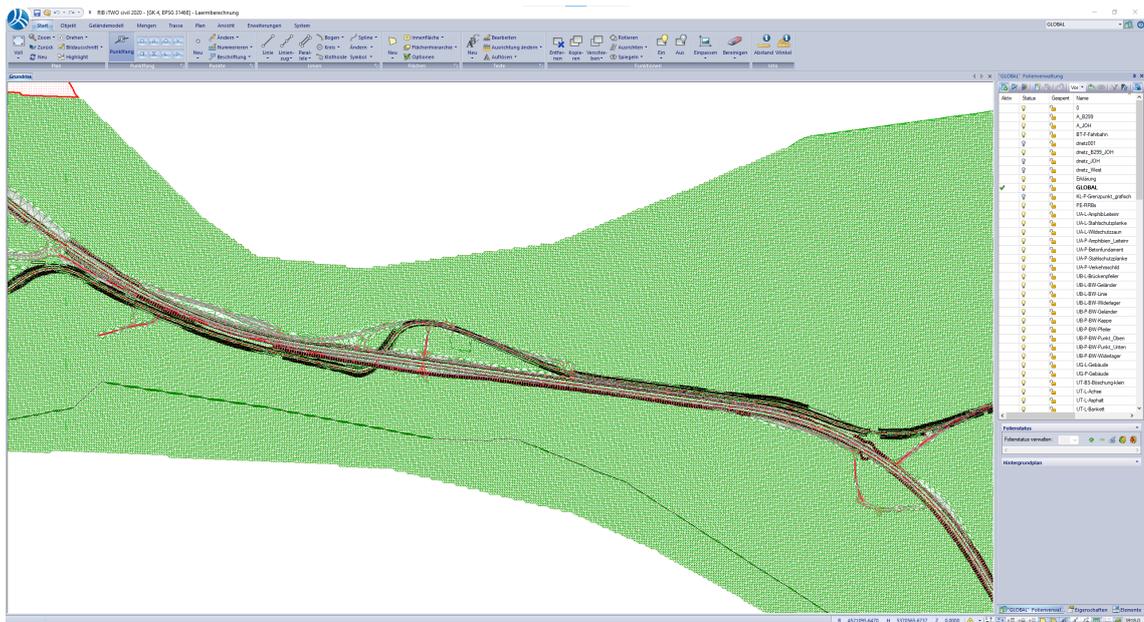


Abbildung 5.4: Projektplanung in iTwo Civil

5.3 Datenaufbereitung in iTwo Civil

5.3.1 Datengrundlage

Eine für dieses Projekt durchgeführte, konventionelle Lärmberechnung basiert auf Planungsdaten, die in der Tiefbau Planungssoftware "iTwo Civil" angereichert werden (Abb. 5.4). Die Projektdatei enthält fast alle straßenbaurelevanten Daten, wie das DGM, Achsen, Gradienten, Querprofile und den Trassenkörper. Das Bestands-DGM der Planungsdatei ist aus einer Bestandsvermessung und DGM5 Rasterdaten des Vermessungsamts zusammengesetzt. Der Trassenkörper wird abschnittsweise aus Querprofilen, mit einem Profilabstand von in der Regel fünf Metern, bei Knotenpunkten und Details bis Zentimetern, interpoliert. Durch eine Verschneidung des Trassenkörpers mit dem Bestands-DGM entsteht das Planungs-DGM.

5.3.2 Datenschnittstelle von iTwo Civil zu CadnaA

Aus iTwo Civil können in der Projektdatei die relevanten Daten in das von der Lärmberechnungssoftware CadnaA lesbare Format „.cst“ exportiert werden. Für eine Übertragung des triangulierten Planungs-DGMs zu CadnaA müssen zunächst Höhenlinien generiert werden:

Im Reiter *Höhenlinien* können neue Höhenlinien auf Basis eines Dreiecksnetzes generiert werden (Abb. 5.5). Dabei empfiehlt es sich, vorher alle Folien, bis auf das DGM (hier: *dnetz_B299_JOH*), auszublenden (Abb. 5.6 (a)).

Bevor die Höhenlinien berechnet werden, muss das triangulierte DGM (*dnetz_B299_JOH*) im Dialog ausgewählt werden. Anschließend können die Abstände der Höhenlinien de-

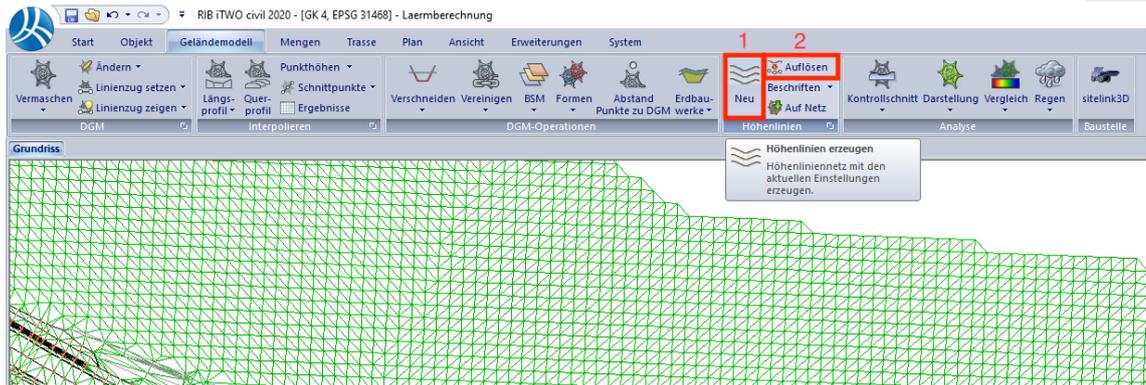
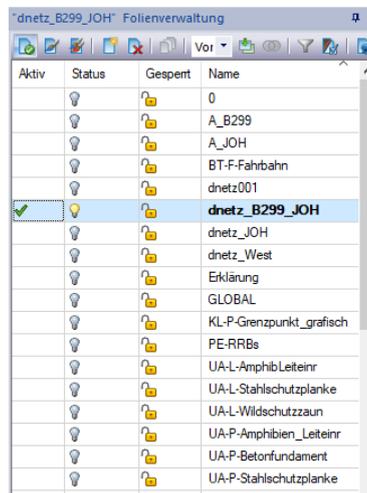
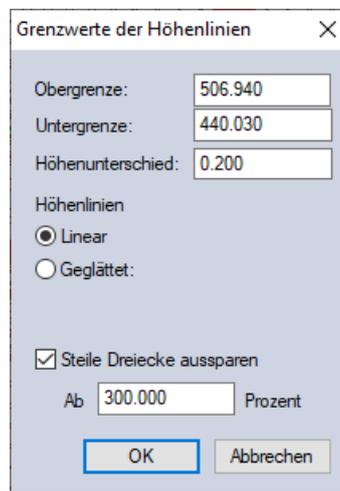


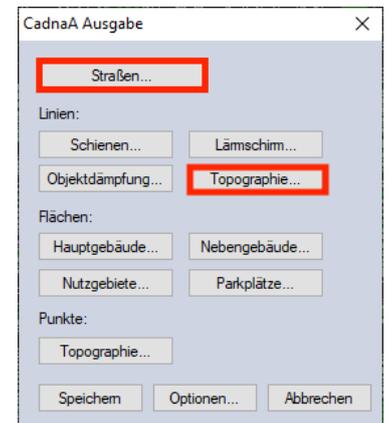
Abbildung 5.5: Generierung von Höhenlinien auf Basis des Projekt-DGMs



(a) Folienverwaltung



(b) Grenzwerte der Höhenlinien



(c) CadnaA Ausgabe

Abbildung 5.6: Konfiguration in iTwo Civil

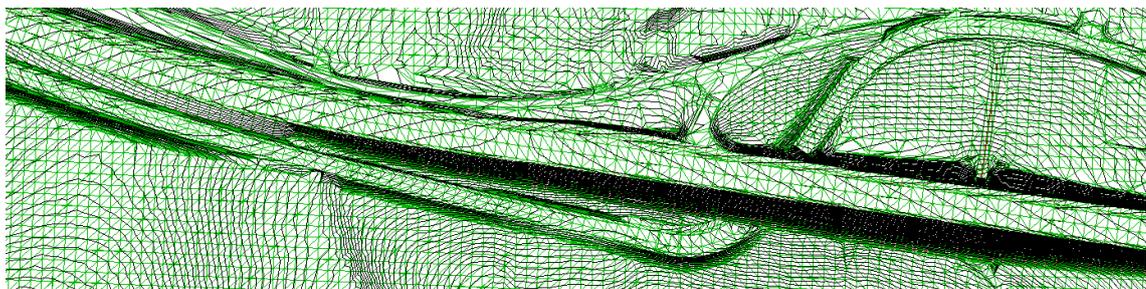


Abbildung 5.7: Planausschnitt mit generierten Höhenlinien



Abbildung 5.8: Export iTwo Civil zu CadnaA

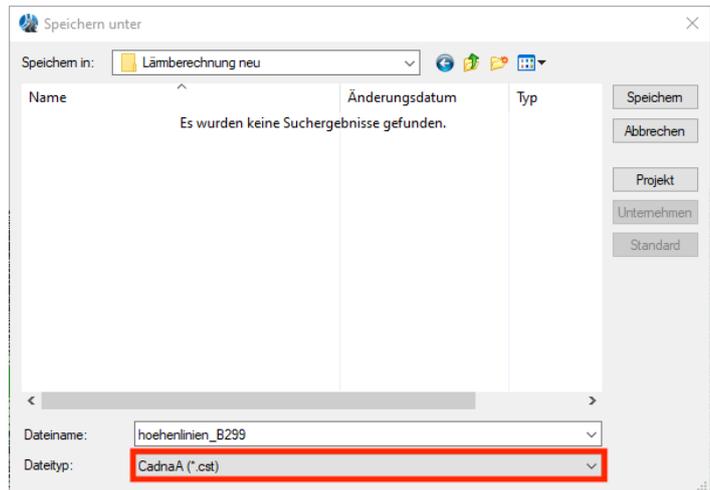


Abbildung 5.9: Auswahl des Datenformats .cst

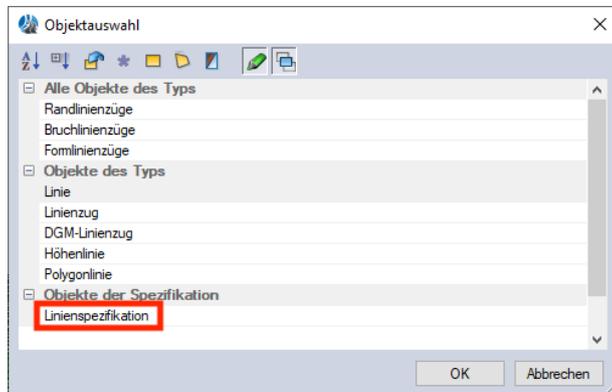


Abbildung 5.10: Objektauswahl

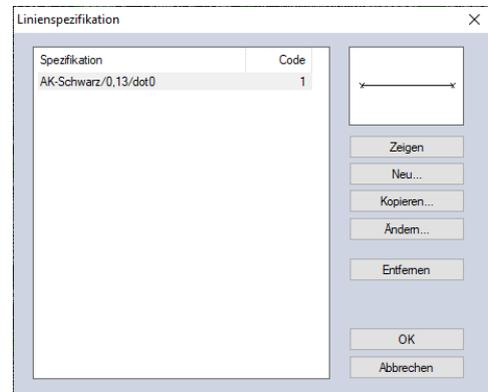


Abbildung 5.11: Linienspezifikation

finiert werden. Dabei sollte Höhenlinien *linear* und *sehr steile Dreiecke aussparen* ausgewählt werden (Abb. 5.6 (b)). Nachdem die Höhenlinien berechnet wurden (Abb. 5.7), müssen sie über die Funktion *Auflösen* im Reiter *Höhenlinien* in Linienzüge umgewandelt werden.

Über das Startmenü können die Höhenlinien schließlich exportiert werden: *Exportieren* → *Fremdformate* (Abb. 5.8). Im folgenden Fenster den Dateityp *CadnaA (*.cst)* wählen (Abb. 5.9) und speichern. Darauf folgt der Dialog *CadnaA Ausgabe* (Abb. 5.6 (c)). Hier unter *Linien* die Option *Topographie...* wählen. Als letzter Schritt muss noch die richtige Linienart zugewiesen werden. Im Fenster *Objektauswahl* (Abb. 5.10) unter Objekte der Spezifikation *Linienspezifikation* auswählen und im folgenden Fenster (Abb. 5.11) die Spezifikation der Höhenlinien (hier: *AK-Schwarz/0,13/dot0*) auswählen. iTwo Civil übergibt die Höhenlinien anschließend als Punktdaten in eine von CadnaA lesbare .cst Textdatei (siehe Algorithmus 5.1).

Der Export von Straßen von iTwo Civil zu CadnaA funktioniert ähnlich zum Vorgehen des letzten Export-Schritts der Höhenlinien. Bei *CadnaA Ausgabe* (Abb. 5.6 rechts) diesmal *Straßen...* auswählen. Im folgenden Fenster die gewünschte Achse selektieren (hier: *A_B299*), Start und Anfangsstation und Fahrbahnrand und Fahrspurweite definieren.

Algorithmus 5.1: Höhenlinien.cst

```
1 Beginn Ausgabe STRACAD für CADNAA.        Zeit: 26.05.2022 15:24:40  xx%
2 \NEU                                        ho"
3 \NAME Topographie-Linie                  st"
4     4521375.673 5370301.617         495.000        ho$
5     4521373.363 5370301.970        495.000        ho$
6     4521373.275 5370302.002        495.000        ho$
7     4521372.115 5370302.261        495.000        ho$
8     4521371.509 5370302.748        495.000        ho$
9     ...          ...                ...            ...
```

Algorithmus 5.2: Trasse.cst

```
1 Beginn Ausgabe STRACAD für CADNAA.        Zeit: 24.02.2022 14:42:00  xx%
2 Achse A_B299 von Station 450.000 bis 3000.000  xx%
3 Breitenbänder: AFL, AFR,                  xx%
4 zugehörige Ränder: , , ,                  xx%
5 \Neu                                        st"
6 \KM= 450.00                                st"
7 halbe Spurbreite links                    rechts          xx%
8 \Dim RandLinks= 6.000 RandRechts= 6.000    st"
9 Stat QNeig AxRechts AxHochAxHöheProf AxHöheGel AbstSpLAbstSpRxx%
10 \NAME A_B299                               st"
11 450 2.50 4520857.738 5370448.089 486.698 486.749 0.000 -0.000 st$
12 455 2.50 4520862.023 5370445.512 486.833 486.900 0.000 -0.000 st$
13 460 2.50 4520866.315 5370442.946 486.972 487.046 0.000 -0.000 st$
14 465 2.50 4520870.612 5370440.391 487.112 487.189 0.000 -0.000 st$
15 470 2.50 4520874.916 5370437.846 487.252 487.329 0.000 -0.000 st$
16 ... ..
```

Auch hier wird eine .cst Textdatei generiert. Die Datei der Trasse (Algorithmus 5.2) enthält abschnittsweise in fünf Meter Abständen die Stationsnummer, die Querneigung der Fahrbahn, Rechts- und Hochwert der Achse, Höhe der Achse, Höhe des Geländes und Abstand der Spur links und rechts.

Aus den Planungsdaten können zusätzlich die Grundflächen für Haupt- und Nebengebäude exportiert werden. Da dabei jedoch die Information der Gebäudehöhe nicht enthalten ist und diese im Nachgang einzeln in CadnaA eingestellt werden muss, wird hier auf das 3D-Gebäudemodell mit LoD2 zurückgegriffen. Im Rahmen der Resortvereinbarung steht der LoD2 Datensatz im Behördennetzwerk oder unter https://geodatenonline.bayern.de/geodatenonline/seiten/bayernatlas-plus_info zu Verfügung. Durch das ebenfalls bereitgestellte Gitter als .shp-Datei können in einer GIS-Software die für das Projekt relevanten Kacheln identifiziert werden. Für den Datensatz des Gemeindeteils *Johannesbergham* ist nach Abb. 5.12 die Kachel 742_5372 herunterzuladen.

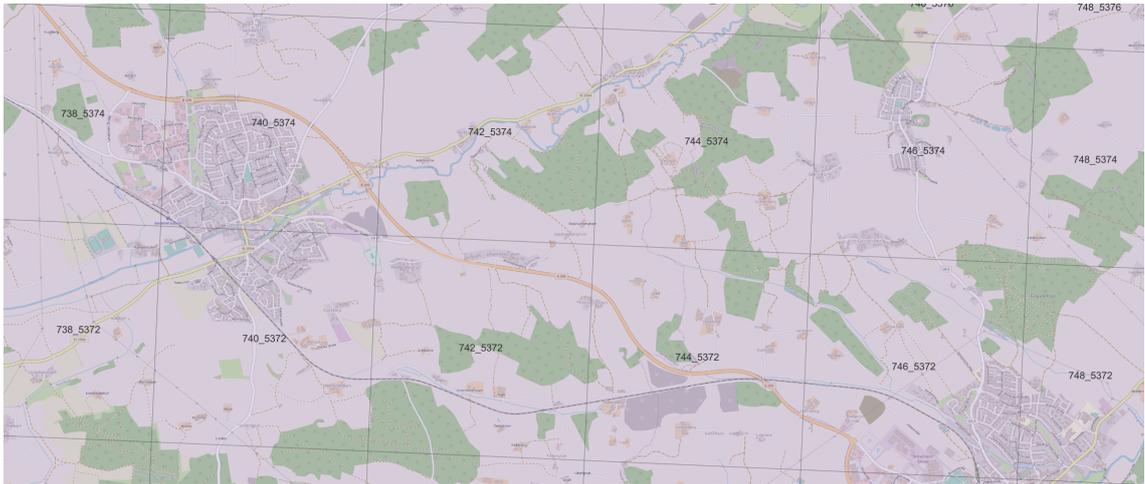


Abbildung 5.12: Darstellung der LoD-Kacheln im Projektgebiet in QGIS



Abbildung 5.13: ObjectTree in CadnaA

5.4 Datenimport zu CadnaA

Nun stehen das DGM, die Trasse und das LoD2 Gebäudemodell als Grunddaten für die Lärmberechnung im Entwurfsstadium mit CadnaA bereit. Um die importierten Daten in CadnaA verwalten zu können, wird der sogenannte *ObjectTree* (Abb. 5.13) genutzt.

Zum Import der Höhenlinien, sowie der Trasse aus iTWO Civil muss im Importfenster der Dateityp *.cst ausgewählt werden (Abb. 5.14). Das 3D-Gebäudemodell liegt im Format CityGML vor, dementsprechend muss hier der Dateityp CityGML (*.gm1) ausgewählt werden. Da Projektdaten und Daten des Vermessungsamts in unterschiedlichen Koordinatenreferenzsystemen vorliegen (Tabelle 5.1), muss hier eine Koordinatentransformation eingestellt werden. Diese wird vor dem Import im Importfenster über **Optionen** → **Transform...** definiert (Abb. 5.15).

Nach Import aller Grunddaten werden die Höhenlinien, die Trasse und die Gebäudaten im Grundriss in CadnaA dargestellt (Abb. 5.17). Aus den Höhenlinien berechnet CadnaA ein DGM, welches zusammen mit den LoD2 Gebäudevolumen in der 3D-Ansicht betrachtet werden kann (Abb. 5.16).

Tabelle 5.1: Koordinatenreferenzsysteme im Projekt

Datenquelle	Name	Datum	Bezugsellipsoid	EPSG-Code
Vermessungsamt	UTM Zone 32N	ETRS89	GRS80	25832
Projektdaten	3-Degree Gauß-Krüger Zone 4	DHDN	Bessel	31468

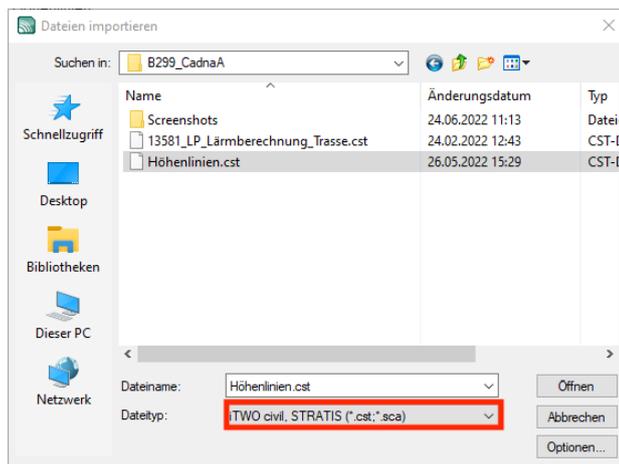


Abbildung 5.14: CadnaA Import mit Dateityp *.* .cst

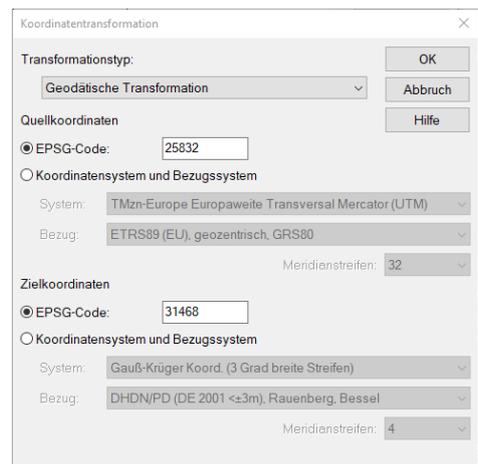


Abbildung 5.15: Koordinatentransformation in CadnaA

5.5 Schallberechnung in CadnaA

Nach der Aufbereitung in iTWO Civil und des Imports zu CadnaA stehen die Grunddaten für die Berechnung bereit. Bevor jedoch die Berechnung von Schallimmissionen nach den [RLS-19](#) durchgeführt werden kann, müssen noch weitere Daten und Einstellungen ergänzt werden:

- die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV) ([Abb. 5.18](#))
- der Straßentyp
- die zulässige Höchstgeschwindigkeit
- der Straßendeckschichttyp
- die Art der Längsneigungsermittlung
- ggf. ein Zuschlag für Mehrfachreflexionen

Des Weiteren kann der Regelquerschnitt (RQ) der Straße definiert oder der Abstand von Fahrbahnnachsen und Rändern manuell definiert werden ([Abb. 5.19](#)), falls in der importierten Achse keine Breiten- und Spurinformatoren enthalten sind.

Vor der Berechnung können Immissionspunkte oder Hausbewertungen im Projektgebiet definiert werden, die den Schallimmissionspegel an den gewählten Orten detailliert wiedergeben.

Das Projektgebiet kann auf ein Rechengebiet reduziert werden, falls nur ein bestimmter Abschnitt für die Rasterberechnung relevant ist. Nach der Berechnung werden die Iso-phonen der Immissionspegel im Grundriss ([Abb. 5.20](#)) und in der 3D-Ansicht ([Abb. 5.21](#)) dargestellt.



Abbildung 5.16: 3D-Ansicht des Projektgebiets in CadnaA

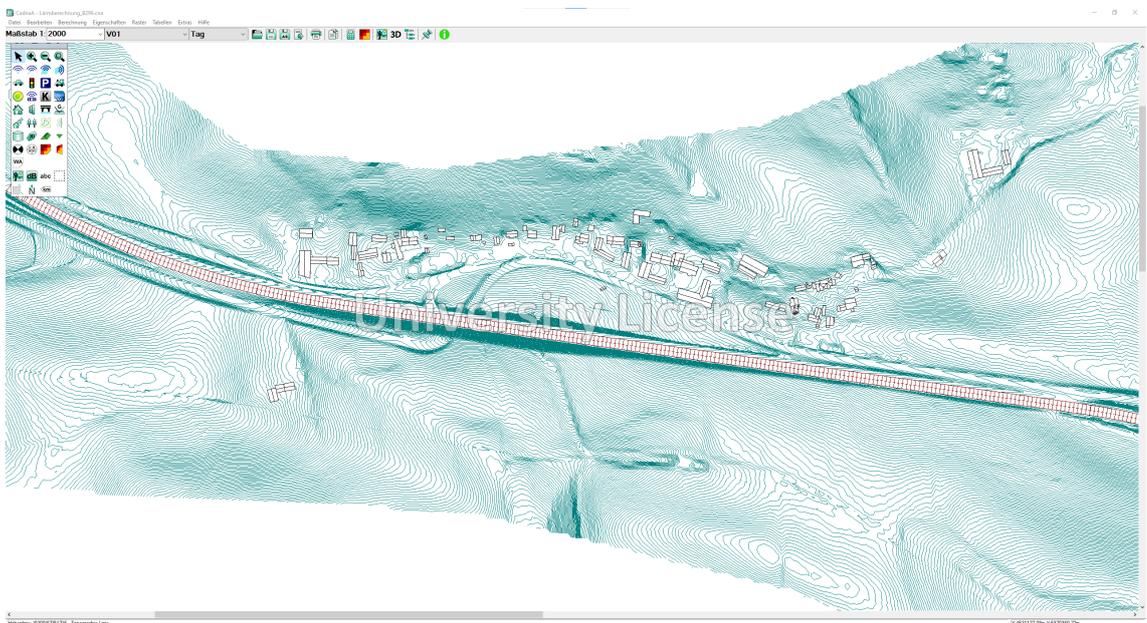


Abbildung 5.17: Ausschnitt Lageplan des Projektgebiets in CadnaA mit Höhenlinien, Trasse und LoD2 Gebäudemodell

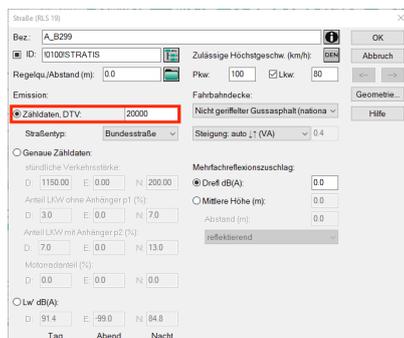


Abbildung 5.18: Einstellungen Straße

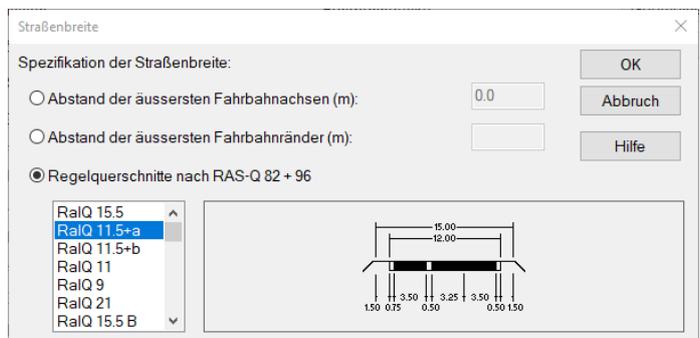


Abbildung 5.19: Einstellung Regelquerschnitt

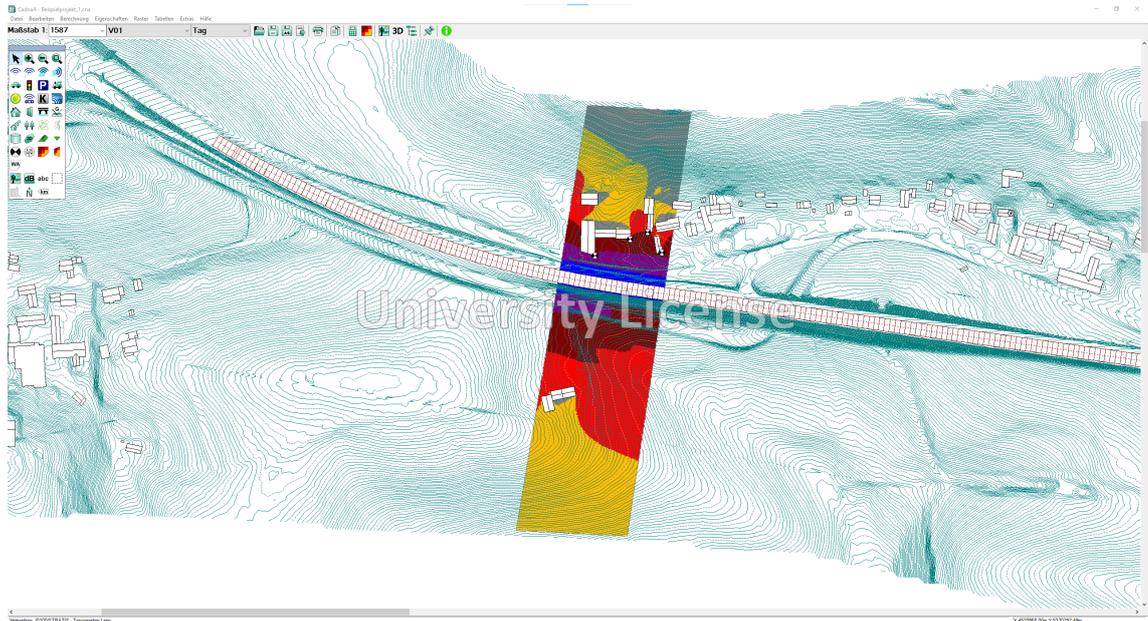


Abbildung 5.20: Ausschnitt Rasterberechnung in definiertem Rechengebiet, Darstellung der Isophonen in CadnaA im Grundriss

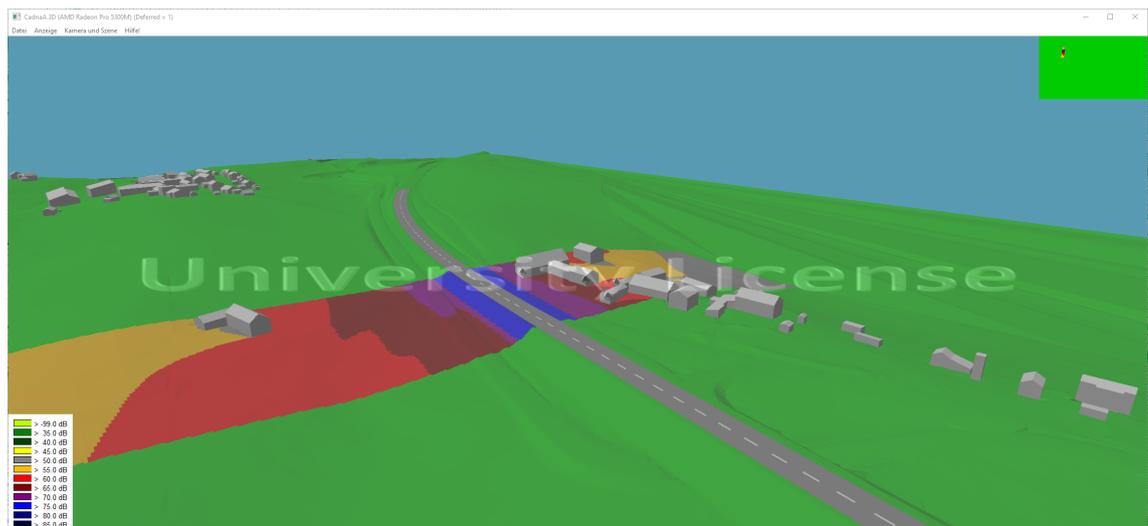


Abbildung 5.21: Ausschnitt Rasterberechnung in definiertem Rechengebiet, 3D-Darstellung der Isophonen in CadnaA

Kapitel 6

Datengrundlage zur Lärmberechnung

Im folgenden Kapitel wird dargestellt, welche geometrischen Grunddaten für eine Lärmberechnung im Vorentwurf erforderlich sind. Anschließend werden die Möglichkeiten zum Datenimport zu CadnaA dargestellt.

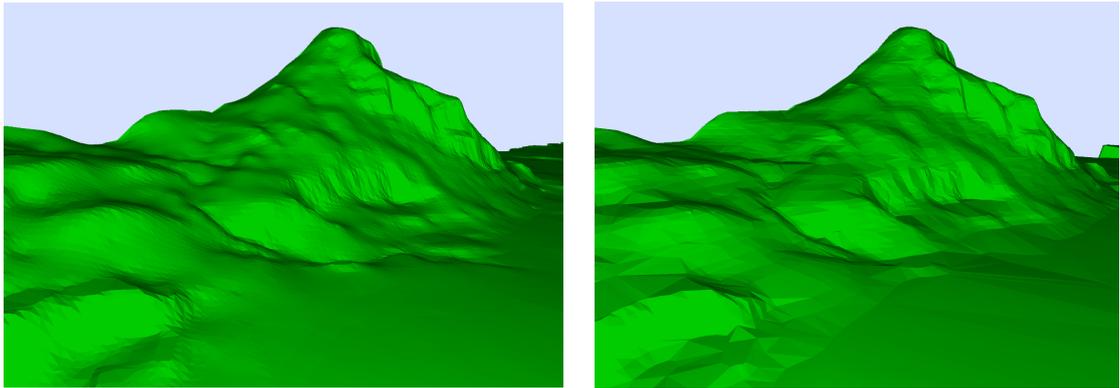
CadnaA ist eine gutachtenfähige Software des Herstellers DataKustik GmbH, welche neben weiteren Funktionen die Berechnung und Beurteilung von Lärmimmissionen nach gesetzlichen Richtlinien an Straßen ermöglicht (DATAKUSTIK, n. d.).

6.1 Geländemodell

Der Geländeverlauf des Untersuchungsgebiets hat einen wesentlichen Einfluss auf die Schallausbreitung und stellt somit geometrisch einen wichtigen Bestandteil der Schallausbreitungsberechnung dar. Bei relativ zum Boden eingegebenen Objekten bestimmt die Topographie deren Höhenlage. Das Abschirmmaß, die geometrische Ausbreitungsdämpfung und die Luftdämpfung ergeben sich aus Abstand und ggf. Umwegen der Schallstrahlen zwischen Quelle und Immissionsort. Durch den Geländeverlauf bedingte Umwege können die Schallstrahlen maßgeblich verlängern. Nach den [RLS-19](#) wird die Pegelminderung durch Bodendämpfung, neben weiteren Parametern, durch die mittlere Höhe des Schallstrahls von der Quelle zum Immissionsort bestimmt. (FGSV, 2019; DATAKUSTIK, n. d.)

Bei der Genauigkeit des verwendeten Geländemodells gibt es in der Richtlinie keine Vorgaben. DATAKUSTIK, n. d. empfiehlt bei einem Bodenmodell aus Höhenlinien eine Höhenstaffelung zwischen 1 und 5 Metern, um die Komplexität des Modells bei annähernd gleichbleibender Prognosegenauigkeit zu reduzieren und entsprechend Rechenzeit einzusparen. Bei einer Staffelung der Höhenlinien von mehr als 5 Metern werden unter Umständen relevante Geländedetails wie Kuppen oder Einschnitte bei der Schallausbreitung nicht berücksichtigt. Die in [Abb. 6.1](#) dargestellten DGMs wurden beispielsweise aus Höhenlinien mit 1 Meter Abstand (a) bzw. 6 Metern Abstand (b) erzeugt. Eine weitere Möglichkeit, Geländedaten zu CadnaA zu importieren, sind Höhenpunkte.

CadnaA berechnet die Dreiecksvermaschung aus allen geländebestimmenden Objekten, die dem Programm zu Verfügung gestellt werden. Das bedeutet, dass Höhenlinien und Höhenpunkte auch kombiniert verwendet werden können. Bei der programminternen Berechnung werden Höhenlinien immer als Schirmkanten mit der absoluten Höhe der Höhenlinien interpretiert. Im Fall eines aus Höhenpunkten triangulierten DGMs werden die aus der Berechnung des Dreiecksnetzes entstandenen Kanten berücksichtigt. Bruchkan-



(a)

(b)

Abbildung 6.1: 3D-Ansichten eines Geländemodells berechnet aus Höhenlinien mit 1 m (a) und 6 m (b) Abstand (DATAKUSTIK, n. d.)

ten müssen zur Berücksichtigung durch parallele Höhenlinien der Ober- und Unterkante ersetzt oder eingegeben bzw. importiert werden. Vor der Ausbreitungsrechnung berechnet CadnaA die Absoluthöhen an allen Stützpunkten der Objekte.

Über einen Schnitt des Schallstrahls zwischen Quellpunkt und Immssionsort mit allen Höhenlinien, Bruchkanten und abschirmenden Elementen wird im Zuge der Ausbreitungsrechnung der Schallumweg und die damit verursachte Abschirmung ermittelt. Aus der Höhe des Schallstrahls über dem Geländeprofil mit Berücksichtigung der Schnittpunkte wird zudem die Bodendämpfung berechnet. (DATAKUSTIK, n. d.)

Das Geländemodell kann aus Höhenlinien und -punkten, Bruchkanten, aber auch aus Objekten bestehen, deren Bodenhöhe als Absoluthöhen eingegeben wurde. Für die Generierung eines Geländemodells in CadnaA sind in der Regel folgende geometrische Objekte vorgesehen:

- Höhenlinien
- Höhenpunkte
- Bruchkanten

Objekte mit lokaler Bodenhöhe können auch geländebestimmend sein, wenn die Option „Objekte an jedem Punkt geländebestimmend“ aktiviert ist.

6.2 Straßenachse/Trasse

Straßen werden in CadnaA als Linienobjekt bzw. Liniensegmente mit mehreren Stützpunkten modelliert oder importiert. Über die anschließende Eingabe des Querschnitts der Straße wird die Lage der Emissionslinien nach den ausgewählten Richtlinien (hier: RLS-19) bestimmt (Abschnitt 2.3). Wie in Abb. 5.19 dargestellt kann entweder die Straßenbreite, der Abstand der äußeren Fahrstreifenachsen oder der entsprechende Regelquerschnitt

angeben werden. Bei der Straßenbreite wird standardmäßig von einem Abstand der Emissionslinie vom Straßenrand von 1,75 Metern ausgegangen. Die Breite kann für jeden Stützpunkt des Linienzugs, der die Straße repräsentiert, individuell eingestellt werden, wodurch Aufweitungen bzw. Verziehungen abgebildet werden können. Die Querneigung der Fahrbahn hat bei mehrstreifigen Straßen eine Verlagerung der Emissionslinie zu Folge, weswegen deren Berücksichtigung für eine korrekte Modellierung von Bedeutung ist. In CadnaA kann die Querneigung der Fahrbahn, analog zur Fahrbahnbreite, für jeden Stützpunkt des Linienzugs eingestellt werden. Die Einstellung der Verkehrsstärke der Straße kann als DTV sowie durch Tagesgänge mit stundenweisen Verkehrszahlen realisiert werden. (DATAKUSTIK, n. d.)

Zudem existieren folgende Einstellmöglichkeiten bei Straßen in CadnaA:

- Geschwindigkeitsbegrenzung Pkw/Lkw, auch für Tag/Abend/Nacht
- Steigung/Gefälle (kann auch automatisch mit der Definition der Richtungsfahrstreifen von CadnaA berechnet werden)
- Eigenabschirmung
- Zusatzbreite
- Schirmhöhe
- Stationierung

6.3 Nachbarbebauung/Häuser

Häuser bestehen in CadnaA aus senkrecht auf dem Boden stehenden Wänden, die einen geschlossenen Polygonzug bilden. Bei der Schallausbreitungsberechnung werden die Hauswände immer bis zur Fußpunktlinie der triangulierten Geländeoberfläche berücksichtigt. Reflektierende Flächen in z-Richtung wie Überhänge und Dachflächen werden in der Berechnung nicht berücksichtigt.

6.4 Importformate CadnaA

CadnaA kann Daten in unterschiedlichen Dateiformaten importieren. Dabei müssen die zu importierenden Objekte mit den geometrischen Objekttypen in CadnaA übereinstimmen:

„Wenn beabsichtigt ist, aus Fremdprogrammen Daten nach CadnaA zu übernehmen, ist es sinnvoll, darauf zu achten, dass die Objektarten mit den geometrischen Objekttypen übereinstimmen. Zum Beispiel können zu importierende Punkte in CadnaA als Immissionspunkte, Punktquellen, Höhenpunkte, Ampeln

oder Tennisbälle übernommen werden oder zu importierende Linien als Linienquellen, Straßen, Schienen, Höhenlinien oder Schirme usw.“
(DATAKUSTIK, n. d.)

Beim Datenimport stehen unter Anderem folgende Importoptionen zu Verfügung:

- Zuordnung der Objektart zu einem Layer
- Beschränkung des Imports auf einen Ausschnitt
- Beschränkung des Imports auf eine Objektart
- Koordinatentransformation
- Import unbekannter Attribute als „Memo-Variable“

In CadnaA stehen folgende Formate zum Import zur Verfügung:

CadnaA CadnaA-Dateien mit dem eigenen Dateiformat `.cna`. Jede CadnaA Datei kann in eine bestehende Datei importiert werden.

ESRI Shape Ursprünglich von der amerikanischen Firma ESRI für die Software ArcView entwickelt, hat sich das sog. Shapefile zu einem Quasi-Standard für vektorielle Geodaten für GIS-Anwendungen entwickelt. Shapefiles bestehen in der Regel aus mindestens drei Dateien:

- `.shp` zur Speicherung der Geometriedaten
- `.dbf` für die Speicherung von Sachdaten (Attributdaten)
- `.shx` Index für die Verknüpfung von Geometrie und Sachdaten

Üblicherweise sind shapefiles layer- bzw. themenorientiert. Das heißt, jeder Layer besteht aus einer eigenen Datei wie z.B: *Bebauung.shp*, *Verkehrsflächen.shp* etc. Für CadnaA relevante Attributdaten können Objekthöhen, DTV einer Straße, der Regelquerschnitt einer Straße etc. sein.

Autocad DWG/DXF DWG (drawing) ist ein proprietäres, von der Firma Autodesk entwickeltes Binärformat, für das keine öffentlich zugängliche Dokumentation der Datenstruktur verfügbar ist. In dem Format können 2D- sowie 3D-Zeichnungen und Metadaten gespeichert werden. Neben vielen Autodesk-Produkten wird das Format auch nicht-nativ von zahlreichen CAD-Anwendungen anderer Hersteller unterstützt.

Im Gegensatz dazu ist für das DXF (Drawing Exchange Format) eine öffentliche Dokumentation verfügbar. Der Nachteil ist jedoch, dass DXF weniger Objekttypen unterstützt und deswegen nicht so vielseitig eingesetzt werden kann. (ADOBE, n. d.)

SketchUp Das Format SketchUp `.skp` ist ebenfalls ein proprietäres Datenformat der gleichnamigen 3D-Modellierungssoftware, die von der Firma Trimble vermarktet wird.

CityGML ist ein offenes herstellerneutrales Datenformat, das sich für den fachübergreifenden Austausch virtueller Stadtmodelle international durchsetzen konnte (EBERSTSHÄUSER et al., 2021). CadnaA benutzt Voreinstellungen für Importlayer um die Bezeichnungen für Objektlayer in CityGML richtig zuzuordnen.

Stratis/iTWO Civil Für den Import aus der Tiefbausoftware iTWO Civil der Firma RIB steht das CadnaA-spezifische Format `.cst` zu Verfügung. Es können die Objekttypen Straßen, Höhenlinien, Damm-/Böschungslinien und Bebauung importiert werden. Die Schnittstelle zwischen iTWO Civil und CadnaA wurde in [Abschnitt 5.3.2](#) detaillierter betrachtet.

ASCII-Objects American Standard Code for Information Interchange ([ASCII](#)) ist eine 7-bit Zeichenkodierung, die 128 Zeichen definiert ($7^2 = 128$). In CadnaA werden Objekte als offene oder geschlossene Polygonzüge als Textdatei mit Koordinatenpunkten (x, y, z) importiert. Die (Polygon-) Punkte werden jeweils einem in den Importeinstellungen definierten Objekt zugewiesen. Anhand einer in der Datei enthaltenen, den Punktkoordinaten zugewiesenen ID können eigenständige Objekte beim Import unterschieden werden (z. B. Höhenlinien).

Außerdem stehen noch folgende Importformate zu Verfügung, auf die hier aufgrund für diese Arbeit fehlende Relevanz nicht näher eingegangen wird:

- Atlas GIS
- MicroStation-DGN
- EDBS
- GML(UK)
- Open Street Map XML
- MapInfo
- Sicad
- WINPUT-DGM
- Haushöhenpunkte
- ASCII-Grid DTM
- ASCII-Spektren
- Fremdprogramme (u.A. Soundplan)
- Import/Export von Zugzahlenlisten
- Datenbank-Import (ODBC und XLSX)

Kapitel 7

Ansätze zur IFC-basierten Lärmberechnung

Im Folgenden werden verschiedene Ansätze untersucht, wie die IFC-Fachmodelle aus dem Projekt-CDE als Datengrundlage für eine Lärmberechnung mit der Software CadnaA verwendet werden können.

Zunächst wird eine einfache Konvertierung der Modellgeometrie in ein von CadnaA lesbares Format durchgeführt. Anschließend wird in einem alternativen Ansatz über IFC-Programmierschnittstellen auf die Modelldateien zugegriffen. Über diesen Weg kann die Modellgeometrie punktweise ausgegeben und zu CadnaA übertragen werden. Abschließend wird in einer Beispielberechnung untersucht, wie sich die importierten Geländemodelle, die sich in der Qualität der Wiedergabe des Geländes unterscheiden, auf die Beurteilungspegel auswirken.

7.1 Konvertierung der IFC Modellgeometrie

Die in IFC-Dateien enthaltenen Geometrierepräsentationen lassen sich mit unterschiedlichen BIM-Werkzeugen in verschiedene Formate konvertieren. Mit dem Open Source Programm „FZKViewer“ des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT, 2022) lassen sich IFC-Dateien beispielsweise unter anderem in DXF-, Collada- (einem XML basierendem offenen Austauschformat für 3D-Daten) und STL- (das Körper über Dreiecksflächen beschreibt) Dateien exportieren. Der Import zu CadnaA ist über diesen Weg aufgrund fehlender Kompatibilität der Austauschformate mit CadnaA jedoch nicht erfolgreich.

Eine weiteres BIM-Werkzeug, das Geometrieumkonvertierungen ermöglicht, ist das bereits erwähnte „Desite md pro“ des Herstellers „thinkproject“. In Desite kann die IFC-Geometrie in das Format SketchUp (.skp) konvertiert werden. SketchUp-Dateien können von CadnaA importiert werden (siehe [Abschnitt 6.4](#)). [Abb. 7.1](#) zeigt ein über das Format .skp importiertes Teilmodell. Es zeigt sich, dass die vorliegenden Modelldaten zu detailliert und sehr stark segmentiert sind. Wie bereits in [Kapitel 6](#) festgestellt, sind Straßen als Linien oder Polygonpunkte, und Geländedaten als Höhenlinien oder Höhenpunkte in CadnaA zu importieren. Die vorliegende IFC-Modellgeometrie muss folglich vereinfacht und in eine von CadnaA interpretierbare Form gebracht werden. Zudem muss die Information des räumlichen Achsverlaufs entweder aus der Modellgeometrie abgeleitet, oder über eine separate Datei der Software zu Verfügung gestellt werden.

Eine Möglichkeit auf die in IFC-Dateien enthaltenen expliziten, sowie impliziten Geometrierepräsentationen zuzugreifen sind die im folgenden Abschnitt beschriebenen IFC-Programmierschnittstellen.

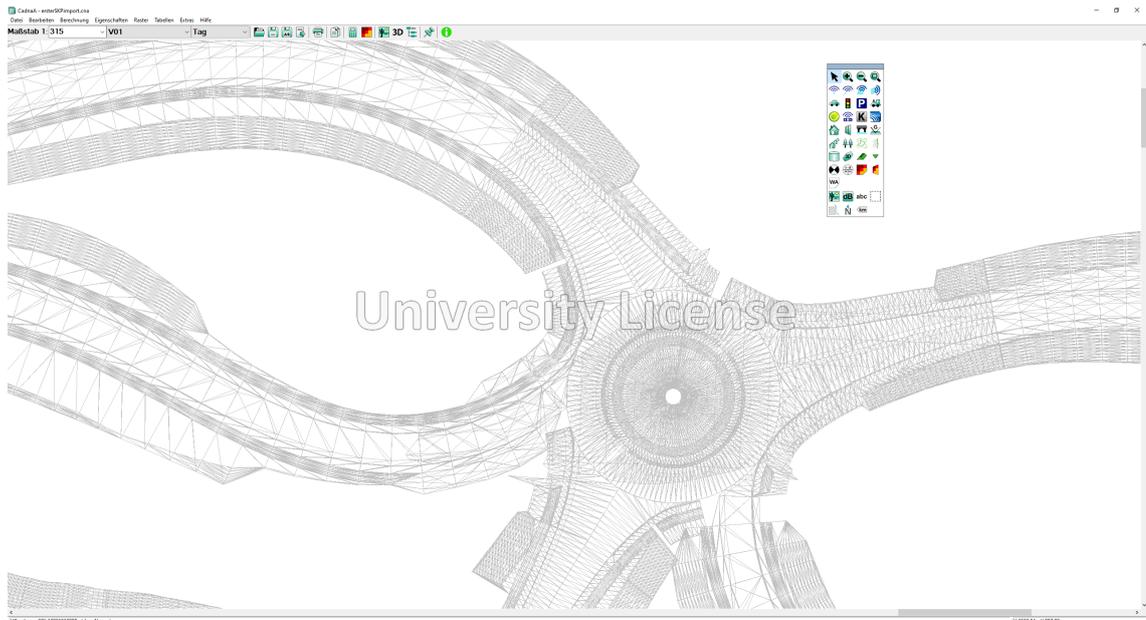


Abbildung 7.1: Modellimport im Format SketchUp zu CadnaA

7.2 IFC-Programmierschnittstellen

Mit einer zunehmenden Verbreitung von BIM im Bauwesen steigt auch die Anzahl an Softwareprodukten, die in BIM-Prozesse mit Datenaustausch auf hohem semantischen Niveau eingebunden werden müssen. Da für den Datenaustausch zunehmend das offene IFC-Format verwendet wird, gibt es eine Reihe von Bibliotheken, die den Zugriff auf das Datenschema in verschiedenen Programmiersprachen möglich machen.

Verfahren zum Lesen und Schreiben von IFC-Instanzdaten, die im STEP-Format gespeichert sind, lassen sich in die zwei Kategorien „Early-Binding“ und „Late-Binding“ einordnen. Beim Early-Binding erzeugt ein Codegenerator für jede Entität eine Abbildung in der entsprechenden Zielprogrammiersprache. Zudem werden im Codegenerator Vererbungen und Referenzen in der Zielsprache realisiert. Das Late-Binding stellt hingegen eine fest definierte Schnittstelle zum Lesen von Funktionen und Methoden der STEP-Dateien bereit. Beim Late-Binding wird, anders als beim Early-Binding, nicht für jede Entität des EXPRESS-Schemas ein entsprechendes Äquivalent in der Host-Programmiersprache geschaffen. Dieser Umstand macht das Late-Binding flexibler für Änderungen des EXPRESS-Schemas, setzt jedoch ein tiefes Verständnis des zugrundeliegenden Schemas voraus, da Auto-Codevervollständigungsfunktionalitäten von Entwicklungsumgebungen nicht funktionieren. Zudem wirken sich Schreibfehler hier nicht bereits beim Kompilieren, sondern erst zur Laufzeit des Programms aus. (AMANN et al., 2021)

Tabelle 7.1 zeigt eine Übersicht einer Reihe von Bibliotheken für IFC-Dateien in verschiedenen Formaten, nach Early- und Late-Binding Ansatz und Möglichkeit der 3D-Visualisierung. Obwohl die Bibliotheken den Zugang zu den in IFC enthaltenen semantischen sowie geometrischen Daten erleichtern, ist die Interpretation aller im Datenschema enthaltenen Geometriemodelle ([Abschnitt 4.2.5](#)) entsprechend aufwendig. Während explizite Geo-

metrierepräsentationen direkt ausgelesen werden können, besteht die Herausforderung besonders in der numerischen Interpretation der impliziten Modelle ([Abschnitt 3.8](#)). Da diese Geometrien nur durch komplexe Berechnungen vom Rechner ausgewertet werden können, gibt es auch hier Bibliotheken, die verschiedene implizite Geometrierepräsentationen in Dreiecksdarstellung umwandeln können.

Tabelle 7.1: Übersicht über verschiedene Bibliotheken für IFC-Dateien (AMANN et al., 2021)

Name	Sprache	Lizenz	STEP	IFC-STEP	ifcXML	Early-Binding	Late-Binding	3D-Visualisierung
apstex IFC Framework	Java	proprietär	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
Geometry GymIFC	C#	MIT	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
IFC Engine	C++ C#	proprietär	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
IfcDoc	C#	AGPL-3.0	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
IFC-gen	C#	MIT	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
IfcOpenShell	C++ Python	LGPL	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja
IfcPlusPlus	C++	MIT	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
JSDAI	Java	AGPL v3	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
oipExpress	C++	GPL	Ja	Ja	Nein	Ja	Nein	Nein
STEPcode	C++ Python	BSD	Ja	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein
xBIM Toolkit	C#	CDDL	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja

IfcOpenShell

Eine der in [Tabelle 7.1](#) erwähnten Softwarebibliotheken zum Zugriff auf das IFC-Datenschema ist das Open-Source Projekt „IfcOpenShell“. Das Softwarewerkzeug, welches nach einer in den IFC enthaltenen Klasse zur Oberflächenbeschreibung von Körpern benannt ist, erlaubt das Lesen, Schreiben und Modifizieren von IFC-Dateien in den Programmiersprachen C++ und Python nach dem Early-Binding Ansatz ([Abschnitt 7.2](#)). Es unterstützt die IFC-Versionen IFC2x3, IFC4 und IFC4.3 und nahezu alle darin enthaltenen Geometrierepräsentationen. Bei der internen Umrechnung zur Darstellung von expliziter Geometrie nutzt IfcOpenShell die Geometrieverarbeitungsbibliothek Open CASCADE. (IFCOPENSHELL, 2022)

7.2.1 IFC Datenverarbeitung mit IfcOpenShell und Python

Wie in [Abschnitt 7.2](#) erwähnt, unterstützt IfcOpenShell die Programmiersprachen C++ und Python. Im Folgenden wird für den Zugriff auf das IFC-Datenmodell und die Verarbeitung der Daten auf Python gesetzt. Python ist ein Open-Source Projekt, das zur freien

Algorithmus 7.1: Einfache Abfragen

```
1 python
2 import ifcopenshell
3 file = ifcopenshell.open(r"\Teilmodell_Vermessung_VM-
   Vermessung_0010.ifc")
4 file.by_type("IfcProject")
5 file.by_type("IfcSite")
6 file.by_type("IfcBuilding")
```

Verwendung (auch kommerzieller Art) für alle Betriebssysteme erhältlich ist. Es sind tausende Module und Bibliotheken verfügbar, die für vielfältige Anwendungen genutzt werden können. Zudem ist Python aufgrund der einfachen Struktur und der großen Community auch für Programmieranfänger geeignet. Eine Anleitung für die Installation von Python, IfcOpenShell und der Entwicklungsumgebung Visual Studio Code ([VSCode](#)) befindet sich in [Anhang A.2](#).

Zugriff auf Entitäten und Beziehungen

Mit IfcOpenShell kann unter anderem die Entität einer Klasse adressiert werden. [Algorithmus 7.1](#) zeigt das Vorgehen zur Ausgabe der Objekte der Klassen *IfcProject*, *IfcSite* und *IfcBuilding* der Datei *Teilmodell_Vermessung_VM-Vermessung_0010.ifc* aus dem Projekt-CDE.

Zeile 1 initialisiert Python.

Zeile 2 importiert die IfcOpenShell Bibliothek.

Wenn bis hier keine Fehlermeldungen erscheinen, war die Installation von Python und IfcOpenShell erfolgreich.

Zeile 3 öffnet die IFC-Datei (hier das Teilmodell der Bestandsvermessung) und weist sie der Variable `file` zu.

Zeile 4 sucht mit der Methode `by_type` Instanzen der Entität *IfcProject* in `file`.

Zeile 5 und **Zeile 6** adressieren analog dazu die Instanzen von *IfcSite* und *IfcBuilding*

Als Ausgabe dieser initialen Abfrage in der Eingabeaufforderung erscheinen die Positionen #18, #30, #37 der STEP-Datei, die die jeweiligen Entitäten enthalten:

```
>>> file.by_type("IfcProject")
[#18=IfcProject('1dB3LWLwf92ed8RQZm$rbP',#5,'Project',,$,$,$,$,(#24),#17)]
>>> file.by_type("IfcSite")
[#30=IfcSite('27OyPkC4vEeOmKMLXlz_jx',#5,'Default Site','',,$,#29,$,$,$,$,$,$,$)]
>>> file.by_type("IfcBuilding")
[#37=IfcBuilding('20e9tkCkjBQxQ8NF20tLh2',#5,'Default Building','',,$,#36,$,$,$,$,$,$)]
```

Abbildung 7.2: Ausgabe in der Konsole

Mit IfcOpenShell können sämtliche in einer Datei enthaltenen Entitäten und Relationen adressiert und Attribute editiert werden.

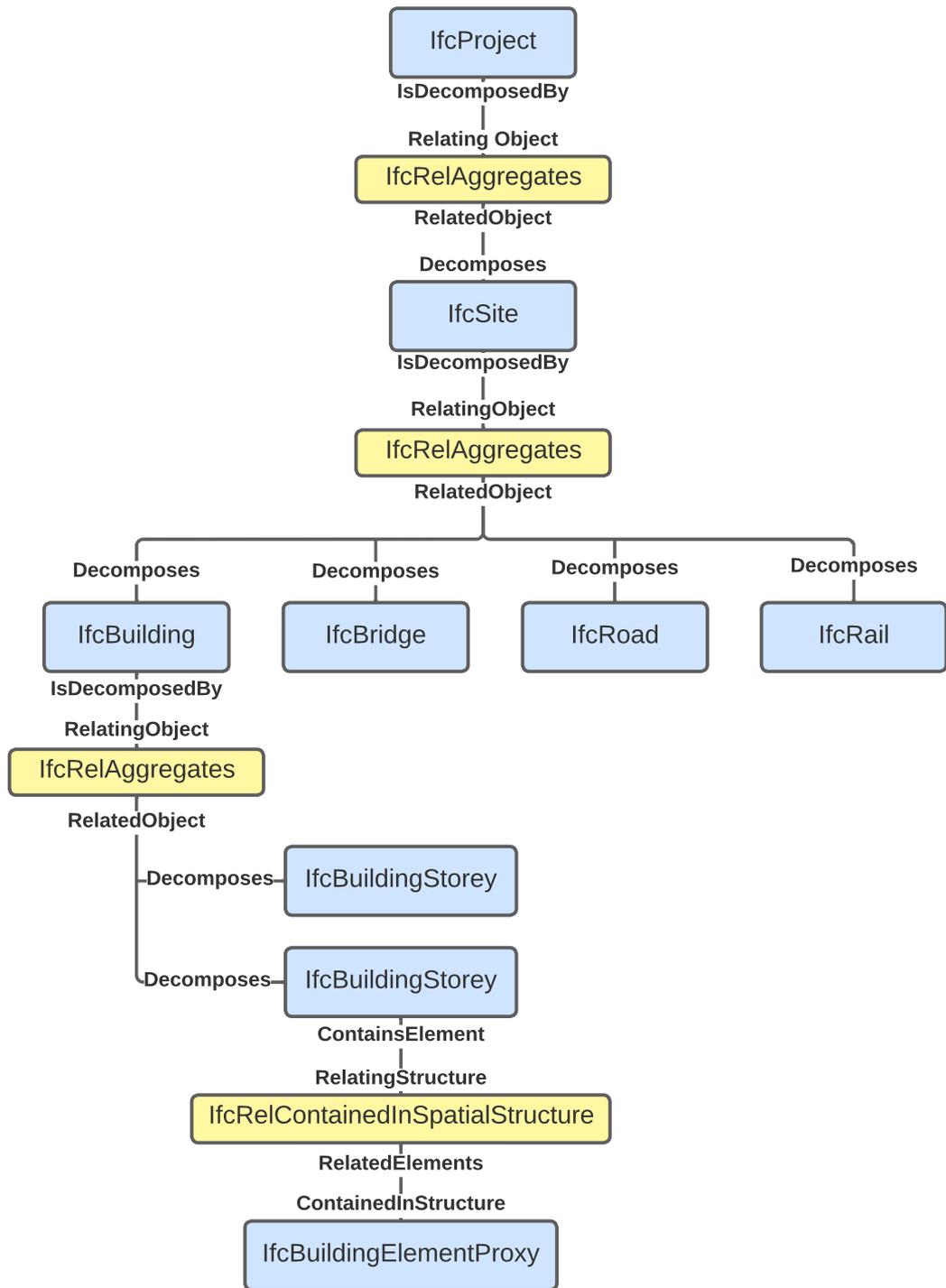


Abbildung 7.3: Räumliche Aggregationshierarchie zwischen *IfcProject* und *IfcBuildingElementProxy*

```

VARIABLES
> ifcopenshell: <module 'ifcopenshell' from 'C:\\Users\\johan\\AppData\\Local\\Programs\\Python\\Python31...
  > project: #18=IfcProject('1dB3LWLwf92ed8RQZm$rbP',#5,'Project',,$,$,$,$,(#24),#17)
    > special variables
    > function variables
    > Declares: ()
    > Decomposes: ()
    Description: None
    GlobalId: '1dB3LWLwf92ed8RQZm$rbP'
    > HasAssignments: ()
    > HasAssociations: ()
    > HasContext: ()
    > IsDecomposedBy: (#31=IfcRelAggregates...#18,(#30)),)
      > special variables
      > function variables
      > 0: #31=IfcRelAggregates('3cdEhJwwf2Uf$G9SrgwUKg',#5,'',$,#18,(#30))
        > special variables
        > function variables
        Description: None
        GlobalId: '3cdEhJwwf2Uf$G9SrgwUKg'
        Name: ''
        > OwnerHistory: #5=IfcOwnerHistory(#3,#4,$,.ADDED.,1637766233,#3,#4,1637766233)
      > RelatedObjects: (#30=IfcSite('270yPkC...,$,$,$,$,$),)
        > special variables
        > function variables
        > 0: #30=IfcSite('270yPkC4vEe0mKMLX1z_jx',#5,'Default Site','',,$,#29,$,$,$,$,$,$,$,$,$,$)
          len(): 1
        > RelatingObject: #18=IfcProject('1dB3LWLwf92ed8RQZm$rbP',#5,'Project',,$,$,$,$,(#24),#17)
          len(): 1

```

Abbildung 7.4: Ausgabe der Variablen im Debug-Modus von VSCode

Abb. 7.3 zeigt die Vererbungsstruktur von *IfcProject* zu einem *IfcBuildingElementProxy*. Die vorliegenden Teilmodelle des Beispielprojekts liegen hauptsächlich in Version 4.0 der IFC vor und verwenden deswegen noch die Struktur des *IfcBuilding* für Anlagen der Infrastruktur. Den Anlagen ist ein fiktives Stockwerk zugewiesen, auf das die Bauteile *IfcBuildingElementProxy* referenziert sind. Die Infrastruktur-Erweiterungen *IfcBridge*, *IfcRoad* und *IfcRail* kamen erst kürzlich mit Version 4.3 der IFC hinzu.

Durch die Eingabe der Folge von Attributen und Klassen können die unter einer Instanz befindlichen Objekte adressiert werden. Beispielsweise weist Zeile 2 in Algorithmus 7.2 der Variable *site* ein Grundstück zu, welches von *IfcProject* disaggregiert ist. Abb. 7.4 zeigt die Struktur, mit der *IfcSite* mit der Variable *project* in Beziehung steht. Die rot unterstrichenen Attributnamen entsprechen dem selben Pfad, den auch Zeile 2 beschreibt. Generell können mehrere Grundstücke mit einem Projekt in Beziehung stehen. Über [0] am Ende des Attributnamens wird die erste Instanz der in Beziehung stehenden Klasse adressiert. Dem Grundstück sind wiederum ein oder mehrere Bauwerke (*IfcBuilding*) zugeordnet (Zeile 3), welchen wiederum auf Stockwerke (*IfcBuildingStorey*) referenzieren (Zeile 4). Ausgehend von einem Stockwerk können die damit verknüpften Bauteile zugewiesen werden (Zeile 5).

Algorithmus 7.2: Ausgabe der Bestandteile eines Projekts über Klassenhierarchie

```
1 project = file.by_type("IfcProject")[0]
2 site = project.IsDecomposedBy[0].RelatedObjects[0]
3 building = site.IsDecomposedBy[0].RelatedObjects[0]
4 buildingStorey = building.IsDecomposedBy[0].RelatedObjects[0]
5 relatedElements = buildingStorey.ContainsElements[0].
  RelatedElements
```

Ausgabe von Höhenpunkten eines *IfcTesselatedItems*

Das in [Abschnitt 7.2.1](#) gezeigte Vorgehen zur Ausgabe von in Beziehung stehenden Objekten wird im Folgenden angewendet, um die geometrischen Repräsentationen, die mit einem Objekt referenziert sind, auszugeben. Da das DGM sprichwörtlich die geometrische Grundlage für eine Lärmberechnung darstellt, wird zunächst die in IFC-Daten des Beispielprojekts enthaltene Geländegeometrie behandelt.

Die Datengrundlage stellt die IFC-Datei des Teilmodells der Bestandsvermessung *Teilmodell_Vermessung_VM-Vermessung_0010.ifc* aus dem Projekt-CDE dar (im Folgenden als Vermessungsmodell bezeichnet). Sowie eine aus iTWO Civil exportierte IFC-Alignment Datei (im Folgenden als Planungsmodell bezeichnet). [Abb. 7.5](#) zeigt Ausschnitte aus den in den Dateien enthaltenen Geländemodellen. Das DGM des Teilmodells der Bestandsvermessung (a) enthält dabei nicht den Trassenkörper der Ausbauplanung, der im Planungsmodell (b) enthalten ist.

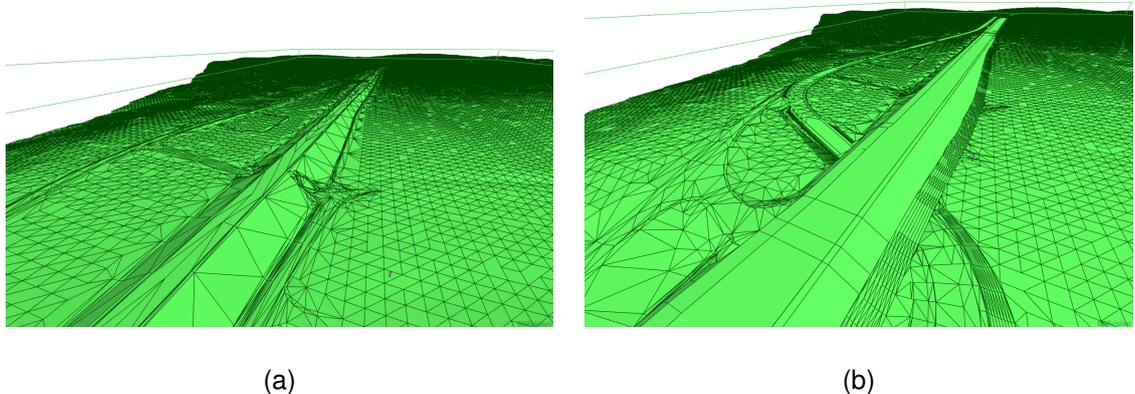


Abbildung 7.5: Tesselliertes [DGM](#) der IFC Dateien aus Bestandsvermessung (a) und Planungsdaten in iTWO Civil (b)

Das Gelände entspricht in der Modelldatei der Klasse *IfcElementAssembly* bzw. *IfcGeographicElement* die jeweils eine Subklasse des *IfcProduct* darstellen. Die geometrische Repräsentation besteht aus einem *IfcTriangulatedFaceSet* das auf eine Koordinatenliste *IfcCartesianPointList3D* und eine Indexliste, die Topologie der Vermaschung, referenziert. [Abb. 7.6](#) (a) zeigt die Datenstruktur des digitalen Geländemodells und die Grundlage seiner geometrischen Repräsentanz in Form von Punktkoordinaten.

Neben der Geometrie der Geländeoberfläche muss, aufgrund der relativen Positionierung im IFC-Datenmodell, die Transformation in absolute Koordinaten berücksichtigt werden.

Abb. 7.6 (b) zeigt die Datenstruktur zwischen *IfcElementAssembly* und dem zugehörigen Koordinatenreferenzpunkt. Eine Verdrehung des lokalen Koordinatensystems ist in den untersuchten Projektdateien nicht vorhanden.

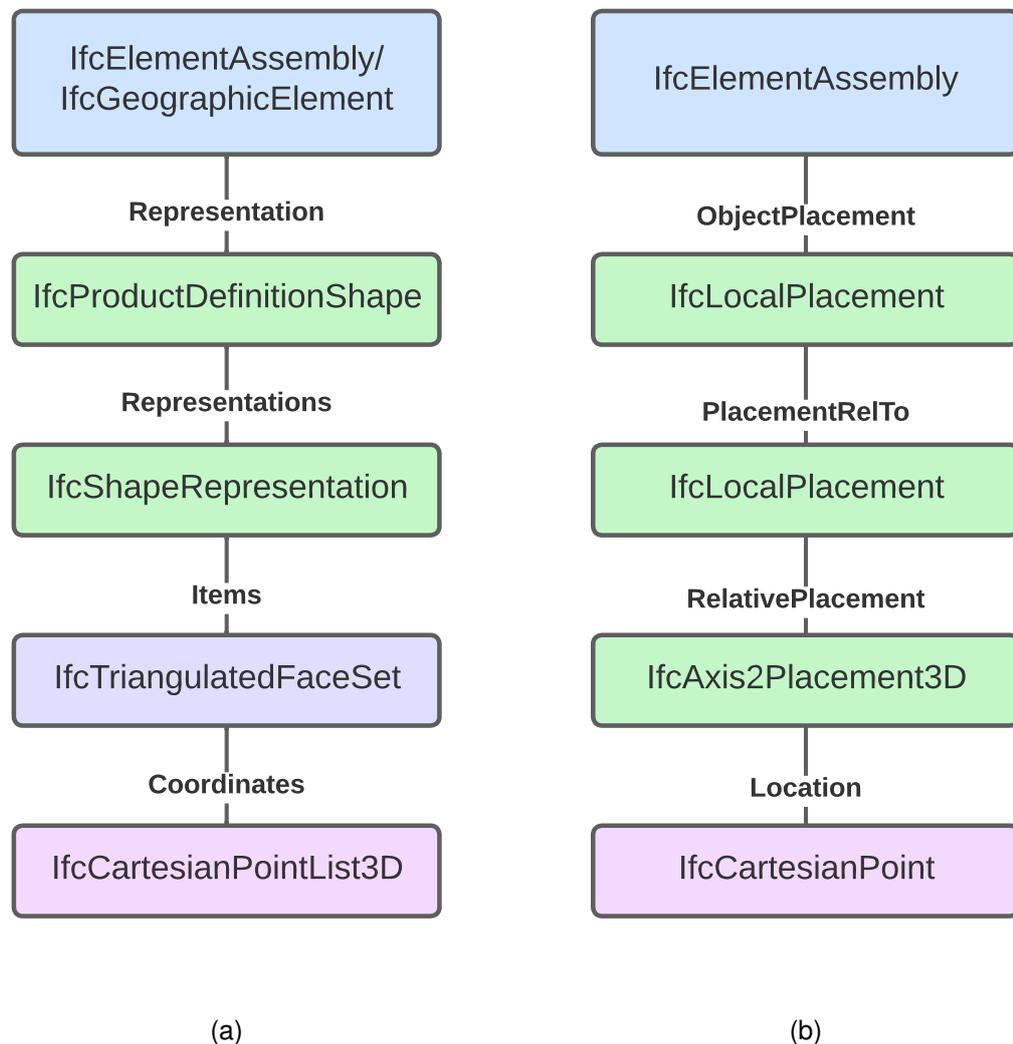


Abbildung 7.6: Aggregationshierarchie der geometrischen Repräsentation (a) und der relativen Positionierung (b) des DGMs

Algorithmus 7.3 gibt die absoluten dreidimensionalen Punktkoordinaten des, in den IFC-Dateien enthaltenen, DGMs als csv-Datei in der Form (X = Rechtswert, Y = Hochwert, Z = Höhe) aus. **Zeile 1** weist der Variable `dgm` die Entität, die die Geländeoberfläche beschreibt, zu. Die Adressierung erfolgt über den entsprechenden Globally Unique Identifier (**GUID**), einen eindeutigen Bezeichner aller Objekte in der Datenstruktur. Er stellt sicher, dass in einem Modell mit einer Vielzahl von Elementen, Objekte eindeutig identifiziert und adressiert werden können. Der **GUID** des **DGMs** kann mittels eines IFC-Viewers ermittelt werden. Über *ObjectPlacement* werden die, der relativen Positionierung des Elements zugrunde liegenden absoluten Koordinaten adressiert und der Variable `objectPlacement` zugewiesen (**Zeile 5**).

Algorithmus 7.3: Skript zur Ausgabe der DGM-Geländepunkte aus der IFC-Vermessung

```
1 import ifcopenshell
2 import csv
3 file = ifcopenshell.open(r"\Teilmodell Vermessung_VM-
   Vermessung_0010.ifc")
4 dgm = file.by_guid("0Cck21hR9Eh8bx_9Cfrzq_")
5 origin = dgm.ObjectPlacement[0].PlacementRelTo[0].RelativePlacement
   [0].Coordinates
6 points = dgm.Representation.Representations[0].Items[0].Coordinates
   [0]
7 f = open("3dPointsVermessung.csv", "w", newline="")
8 writer = csv.writer(f)
9 globalCoordinates = []
10 lenPoints = len(points)
11 lenOrigin = len(origin)
12 for i in range(lenPoints):
13     tempCoordinates=points[i]
14     for j in range(lenOrigin):
15         globalCoordinates.append(origin[j] + tempCoordinates[j])
16     writer.writerow(globalCoordinates)
17     globalCoordinates = []
18 f.close()
```

Algorithmus 7.4: Anpassungen für IFC-Alignment Datei

```
1 ...
2 file = ifcopenshell.open(r"\B299_IFC_Alignment.ifc")
3 dgm = file.by_guid("3ca7AInffE7eNWYRzr83KA")
4 origin = dgm.ObjectPlacement[0].RelativePlacement.Location.
   Coordinates
5 points = dgm.Representation.Representations[0].Items[0].Coordinates
   [0]
6 f = open("3dPointsIFCAlingment.csv", "w", newline="")
7 ...
```

Die geometrische Repräsentation des Elements stellt in diesem Fall eine explizite Koordinatenliste der Trinagulationspunkte der tessellierten Geländeoberfläche dar. In **Zeile 6** wird diese Koordinatenliste adressiert und der Variable `cartesianPointList` zugewiesen. **Zeile 7** initialisiert die csv-Datei in der die Punktkoordinaten gespeichert werden sollen. Die Schleife ab **Zeile 12** iteriert über alle Einträge der Koordinatenliste (=Anzahl der Geländepunkte) und weist jeweils eine Koordinate, die aus drei Punkten besteht, temporär der Variable `tempCoordinates` zu. Die verschachtelte Schleife in **Zeile 14** iteriert über die Koordinatenrichtungen (X, Y, Z) und transformiert die relativen Koordinaten in absolute Koordinaten. In **Zeile 16** überträgt der `writer` die Punktkoordinaten schließlich zeilenweise in die csv-Datei.

Algorithmus 7.4 ist der Ausschnitt des Skripts, der abgeändert werden muss, um analog die Geländepunkte der IFC-Alignment Datei der Planungsdaten auszugeben. Aufgrund einer abweichenden Struktur ist hier eine Anpassung bei der Adressierung des Koordinatennullpunkts (`origin`) erforderlich (**Zeile 4**).

Ausgabe von Achs-/ Polygonpunkten und Trassenparametern

Die zweite, für eine Lärmberechnung wichtige Geometrie-Komponente ist die Beschreibung der Emissionslinie, die sich bei Straßen in der Regel an der Straßenachse orientiert und von der Breite und Anzahl der Fahrstreifen der Straße abhängt. Die Querneigung einer Straße beeinflusst die Höhenlage der Emissionslinien und die Bodenreflexion der Straßenfläche (siehe [Abschnitt 2.3](#)). Zusammenfassend werden folgende Parameter der Straße benötigt:

- Explizite Angabe des dreidimensionalen Achsverlaufs (Lage und Höhe) in Punktkoordinaten bzw. Polygonpunkten
- Straßenbreite (je Stützpunkt)
- Querneigung der Straße (je Stützpunkt)

Als Datengrundlage stehen wie in [Abschnitt 7.2.1](#) zwei unterschiedliche IFC-Dateien zu Verfügung:

- (a) IFC-Alignment Datei aus den Planungsdaten exportiert aus iTWO Civil
- (b) das Teilmodell des Straßenkörpers im Ausbaubereich aus dem Projekt CDE

Die IFC-Erweiterung IFC-Alignment dient zur Beschreibung von linienhaften Bauwerken wie Straßen und Schienenwegen. Dabei wurde die bewährte Methode zur Beschreibung von Achsen über den horizontalen Verlauf und die entsprechende vertikale Lage (Gradienten) übernommen. Im Datenmodell setzen sich die 2D-Beschreibungen der horizontalen Lage *IfcAlignment2DHorizontal* und der vertikalen Lage *IfcAlignment2DVertical* zu einer dreidimensionalen Achsbeschreibung, dem *IfcAlignment* zusammen. *IfcAlignment2DHorizontal* und *IfcAlignment2DVertical* setzen sich aus Trassierungselementen wie Linien-, Kreissegmenten, Klothoiden und weiteren Bestandteilen der Vertikalen zusammen.

Im Folgenden wird die Eignung der in der IFC-Alignment Datei enthaltenen Achse des Projekts für die Datenübergabe untersucht. [Algorithmus 7.5](#) adressiert die horizontalen Segmente des Alignments und gibt beispielhaft die Parameter des ersten enthaltenen horizontalen Segments aus. Das Segment vom Entitytyp *IfcAlignment2DHorizontalSegment* beschreibt einen Kreisbogen (*IfcCircularArcSegment2D*) mit den Attributen *Radius*, *SegmentLength*, *StartDirection* und *StartPoint* als *IfcCartesianPoint*. [Algorithmus 7.5](#) erzeugt folglich die Konsolenausgabe:

```
1250.0 (Radius)
309.4670171089716 (Segmentlänge)
5.414729387339302 (Richtungswinkel)
(4520496.670678, 5370745.473644) (Einfügepunkt)
```

Algorithmus 7.5: Ausgabe horizontaler Trassierungsparameter aus IFC-Alignment Datei

```
1  ...
2  alignment = file.by_guid("0sX4cEE9v7KQUIPON_jiA")
3  horizontalSegments = alignment.Axis.Horizontal.Segments
4  verticalSegments = alignment.Axis.Vertical.Segments
5  horizontalSegment1 = horizontalSegments[0]
6  print(horizontalSegment1.CurveGeometry.Radius)
7  print(horizontalSegment1.CurveGeometry.SegmentLength)
8  print(horizontalSegment1.CurveGeometry.StartDirection)
9  print(horizontalSegment1.CurveGeometry.StartPoint.Coordinates)
```

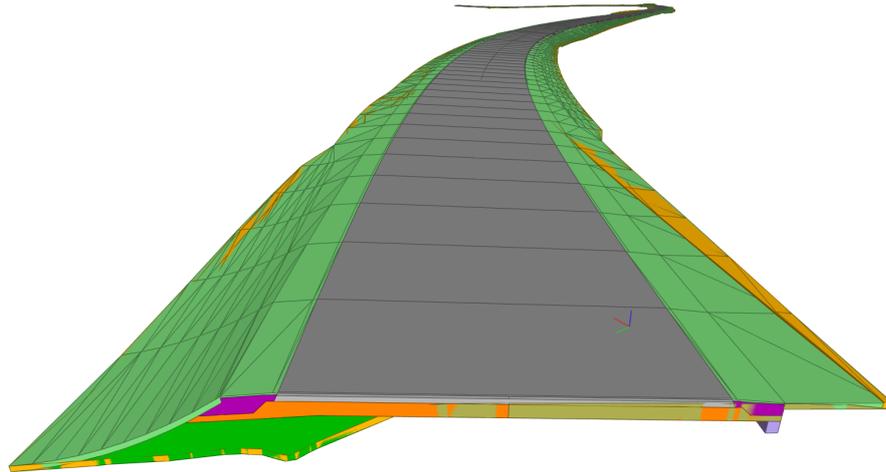


Abbildung 7.7: Teilmodell der Ausbautrasse

Die Achse ist in *IfcAlignment* also implizit beschrieben. Für die Verwendung der Achse in einer Lärmberechnung (mit CadnaA) ist jedoch eine explizite Beschreibung über Polygonpunkte erforderlich. Weitere, das Querprofil beschreibende, Parameter sind nicht im Alignment enthalten und können somit nicht ausgegeben werden.

IFC-Modell der Ausbautrasse

Das zweite, anfangs erwähnte Teilmodell enthält keine implizite Beschreibung der Straßenachse. Es besteht, wie in [Abschnitt 3.9](#) beschrieben, aus Segmenten des Trassenkörpers, die aus Querschnitten mit einem Abstand von in der Regel 5 Metern in einem Trassierungsprogramm generiert wurden. Die in [Abb. 7.7](#) dargestellte Trasse setzt sich somit aus den einzelnen Bestandteilen der Querschnittsplanung (Deckschicht, Tragschicht, Binderschicht etc.) zusammen.

Aus dem Verlauf der Straße, der durch die Geometrie der einzelnen Bestandteile explizit im Modell repräsentiert ist, können die benötigten Parameter abgeleitet werden. Der relevante Teil des Modells stellt dabei die Oberfläche der Straße, in diesem Fall eine Asphaltdeckschicht, dar. Aus jeweils zwei gegenüberliegenden Eckpunkten eines Deckschichtkörpers lassen sich Straßenbreite und Querneigung sowie die Koordinaten des

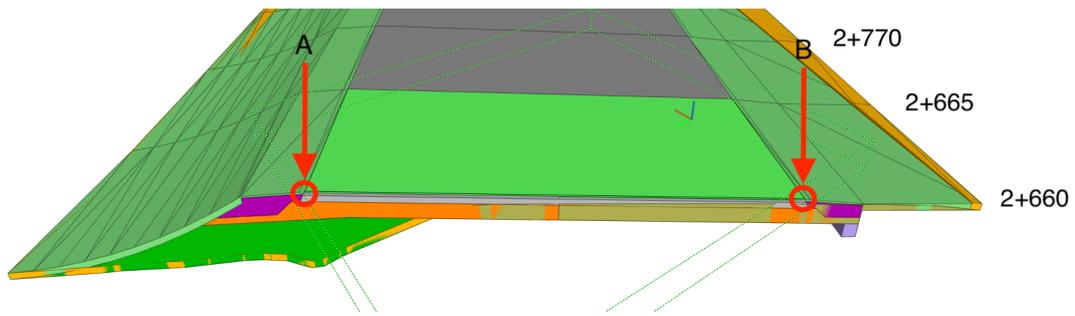
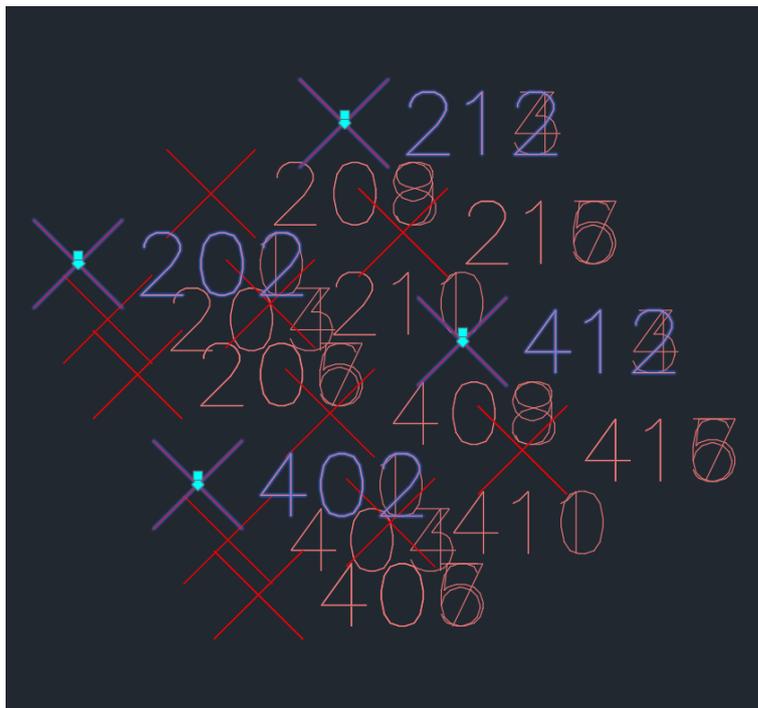


Abbildung 7.8: Relevante Eckpunkte eines Deckschichtkörpers

Mittelpunkts (Achspunkt) an dieser Stelle berechnen. [Abb. 7.8](#) zeigt exemplarisch zwei Eckpunkte *A* und *B* eines solchen Deckschichtsegments.

Die geometrische Repräsentation der Deckschichtsegmente ist in der IFC-Datei als **BRep** enthalten. Jedes Segment wird in der Regel durch 18 Punkte beschrieben. [Algorithmus B.4](#) exportiert die Punkte eines nach **GUID** definierten Elements. In Civil3D können die Punkte anschließend dargestellt werden ([Abb. 7.9](#)). Für die Berechnungen sind jeweils die vorderen oder hinteren Eckpunkte eines Segments relevant. Die Punkte müssen auf der Oberseite der Deckschicht liegen, daher werden Koordinaten einer Ecke mit den maximalen Höhenwerten verwendet. Wie in [Abb. 7.9](#) zu sehen, erfüllen die Punkte mit Index 02 und 12 diese Kriterien.



(a)

Punktnu...	Rechtswert	Hochwert	Punkth...	Nam...
200	1125.0219m	17.1418m	488.588m	
201	1125.0396m	17.1512m	488.587m	
202	1125.0396m	17.1512m	488.627m	
203	1126.2181m	14.9293m	488.537m	
204	1126.2181m	14.9293m	488.518m	
205	1127.4142m	12.7170m	488.487m	
206	1127.3966m	12.7075m	488.446m	
207	1127.4142m	12.7170m	488.447m	
208	1130.3359m	19.9705m	488.477m	
209	1130.3359m	19.9705m	488.437m	
210	1132.6964m	15.5627m	488.337m	
211	1132.6964m	15.5627m	488.297m	
212	1135.6323m	22.7898m	488.327m	
213	1135.6323m	22.7898m	488.287m	
214	1135.6499m	22.7992m	488.287m	
215	1137.9786m	18.4085m	488.187m	
216	1137.9786m	18.4085m	488.147m	
217	1137.9962m	18.4180m	488.147m	
400	1129.7934m	8.2851m	488.309m	
401	1129.8110m	8.2947m	488.308m	
402	1129.8110m	8.2947m	488.348m	
403	1131.0116m	6.0848m	488.262m	
404	1131.0116m	6.0848m	488.242m	
405	1132.2298m	3.8845m	488.215m	
406	1132.2298m	3.8845m	488.175m	
407	1132.2123m	3.8748m	488.175m	
408	1135.0789m	11.1669m	488.198m	
409	1135.0789m	11.1669m	488.158m	
410	1137.4833m	6.7830m	488.065m	
411	1137.4833m	6.7830m	488.025m	
412	1140.3468m	14.0390m	488.048m	
413	1140.3468m	14.0390m	488.008m	
414	1142.7368m	9.6814m	487.915m	
415	1142.7368m	9.6814m	487.875m	
416	1142.7368m	9.6814m	487.875m	
417	1142.7543m	9.6911m	487.874m	

(b)

Abbildung 7.9: Punkte zweier Deckschichtsegmente (Punkte mit Index 02 und 12 jeweils hervorgehoben) (a) und die zugehörigen Koordinaten (b)

Im Anhang befindet sich mit [Algorithmus B.2](#) das gesamte Skript zur Berechnung der Werte der Trasse aus der IFC-Datei mit tabellarischer Ausgabe als csv-Datei.

Algorithmus 7.6: Ausgabe in csv

	Station	X,	Y,	Z,	Fahrbahnbreite	Querneigung
1	1510.0,	4521883.931,	5370217.668,	501.346,	12.002,	0.0312
2	3260.0,	4523262.816,	5369298.540,	465.102,	11.577,	-0.0715
3	1285.0,	4521661.133,	5370249.071,	499.095,	12.002,	0.0312
4	2840.0,	4522885.103,	5369473.981,	481.641,	7.8225,	-0.0050
5	3035.0,	4523048.861,	5369363.807,	475.016,	12.012,	-0.0646
6	...	...	...	...	...	...
7						

Algorithmus 7.7: Ausgabe in csv (sortiert nach Station)

	Station	X,	Y,	Z,	Fahrbahnbreite	Querneigung
1	505.0,	4520905.346,	5370420.558,	488.198,	12.003,	-0.0360
2	510.0,	4520909.742,	5370418.176,	488.337,	12.003,	-0.0360
3	515.0,	4520914.150,	5370415.815,	488.477,	12.003,	-0.0360
4	520.0,	4520918.569,	5370413.477,	488.617,	12.003,	-0.0360
5	525.0,	4520923.001,	5370411.161,	488.757,	12.003,	-0.0360
6	...	...	...	...	...	...
7						

Für die Berechnung sollen ausschließlich Entitäten der Asphaltdeckschicht adressiert werden. Da alle Volumenkörper in der Datei als *IfcBuildingElementProxy* definiert sind, können die Deckschichtelemente nicht „by_type“ identifiziert werden. Stattdessen werden alle *Properties* der *PropertyDefinition* eines Objekts darauf geprüft, ob darin ein *IfcText* mit dem Attribut „Asphaltdeckschicht“ existiert. Falls ja, wird dieses Element in der Liste *deckschichtSegments* gespeichert. (Zeile 20 - Zeile 27)

Nun werden in einer Schleife über alle Deckschichtsegmente die folgenden Werte je Segment berechnet (Zeile 31 - Zeile 53):

- Straßenbreite (ergibt sich aus der Norm von *A* und *B*)

$$\text{Strassenbreite} = \|(A, B)\| \quad (7.1)$$

- Querneigung (entspricht der Steigung zwischen *A* und *B*)

$$\text{Querneigung} = \frac{(A_z - B_z) \times \text{Strassenbreite}}{100} \quad (7.2)$$

- Achspunkt (berechnet sich aus dem Mittelpunkt der Strecke zwischen *A* und *B*)

$$\text{Achspunkt} = \left(\frac{A_x + B_x}{2} \mid \frac{A_y + B_y}{2} \mid \frac{A_z + B_z}{2} \right) \quad (7.3)$$

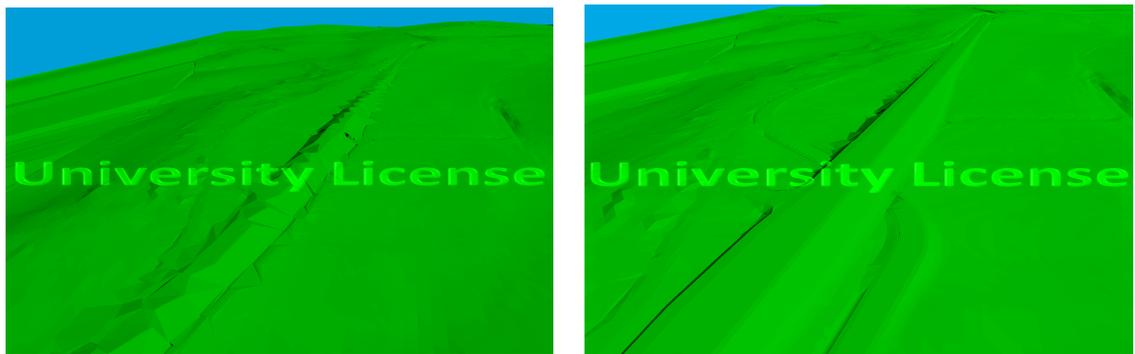
Die berechneten Werte werden im letzten Schritt zeilenweise in die csv-Datei geschrieben, sodass sich die Ausgabe [Algorithmus 7.6](#) ergibt. [Algorithmus B.3](#) sortiert die Einträge schließlich nach Stationsnummer und gibt die finale csv-Datei aus ([Algorithmus 7.7](#)).

7.2.2 Import der Daten in CadnaA

Die in den vorherigen Abschnitten gewonnenen tabellarischen Daten werden im Folgenden in CadnaA importiert und bewertet.

Höhenpunkte aus DGM

Die in [Abschnitt 7.2.1](#) ausgegebenen tabellarischen Punktlisten können in CadnaA als Höhenpunkte (ASCII-Objects) importiert werden. Vor dem Import der Datei muss in den Optionen die Art der Separierung der Werte eingestellt werden. Im Kontrollfenster kann die richtige Art der Darstellung der X-, Y- und Z-Werte überprüft werden ([Abb. 7.11\(a\)](#)). Da keine topologischen Informationen in der Datei enthalten sind, führt CadnaA eine erneute Dreiecksvermaschung der Punkte durch. In [Abb. 7.10](#) ist zu sehen, dass je nach Dichte der Punkte unterschiedliche Qualitätsniveaus der Oberflächenbeschreibung erreicht werden. Während die Dammböschung der Trasse im DGM aus den Punkten des Modells der Bestandsvermessung (a) augenscheinlich ungenau dargestellt wird, liefern die Punkte aus dem Modell der Planungsdaten (b) eine ausreichend genaue Oberflächenbeschreibung.



(a)

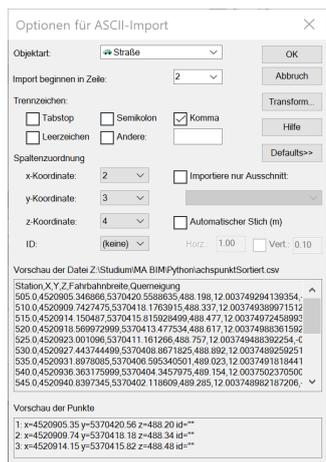
(b)

Abbildung 7.10: DGM in CadnaA aus Punkten des Vermessungsmodells (a) und Planungsmodells (b)

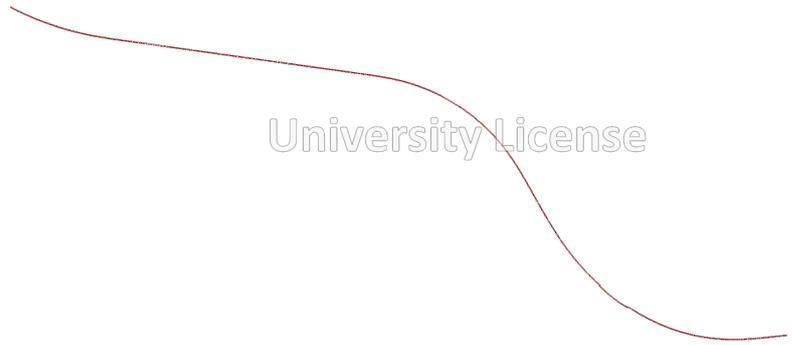
Eine Möglichkeit, die Qualität der Oberflächenbeschreibung zu verbessern, ist der Import von Bruchkanten. Bruchkanten definieren Geländekanten, die in der Triangulation als Kanten berücksichtigt werden. In IFC Dateien sind Bruchkanten über die Topologie der Dreiecksvermaschung enthalten. Einzelne Bruchkanten können daraus jedoch nicht identifiziert werden.

Import der Achspunkte

Die tabellarischen Parameter der Achse aus [Abschnitt 7.2.1](#) werden ebenfalls als ASCII-Objekte in CadnaA importiert. In den Importoptionen ([Abb. 7.11a](#)) muss dafür die Objektart *Straße* ausgewählt werden. Aufgrund der Kopfzeile beginnt der Import ab Zeile 2. Außerdem müssen die Spalten den entsprechenden Koordinaten zugeordnet werden. Ein



(a)



(b)

Abbildung 7.11: Einstellungen für ASCII-Import der Straße in CadnaA (a) und Darstellung im 2D-Grundriss (b)

Import der in der Datei enthaltenen Straßenbreite und Querneigung kann hier nicht eingestellt werden.

Nach erfolgreichem Import stellt CadnaA die Straße in der Grundrissansicht dar (Abb. 7.11 b). Über die Einstellungen der Straße kann die Straßenbreite und die Querneigung eingegeben werden. Hier existiert jedoch ebenfalls keine Importoption, sodass die Werte stützpunktweise (bei Änderung von Querneigung oder Regelquerschnitt) händisch eingegeben werden müssen.

Berechnungsmodell aus offenen Dateiformaten

Das in CadnaA überführte DGM und die Straßenachse bestehen nun vollständig aus Punktkoordinaten, die aus den IFC-Daten ausgegeben bzw. abgeleitet wurden. Zusammen mit dem LoD2 Stadtmodell im Format CityGML setzt sich die geometrische Grundlage für die Lärmberechnung ausschließlich über Verwendung von offenen Datenformaten zusammen. Abb. 7.12 zeigt die importierten Daten in der 3D-Ansicht von CadnaA.

7.2.3 Vergleich der Berechnungsergebnisse

Im Folgenden werden die in CadnaA importierten Daten anhand einer exemplarischen Schallberechnung verglichen. Zum Vergleich stehen die beiden Geländemodelle aus den IFC-Grundlagedaten (siehe Abschnitt 7.2.1). Der Vergleichsausschnitt wurde in dem Bereich gewählt, wo der Abstand der Gebäude der Gemeinde Johannesbergham zur Ausbautrasse am geringsten und damit für die Berechnung der Beurteilungspegel besonders relevant ist. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten wird die Schallberechnung jeweils mit der Achse, die aus den Deckschichtsegmenten generiert wurde, mit identischen Grundeinstellungen (DTV, RQ etc.) durchgeführt.

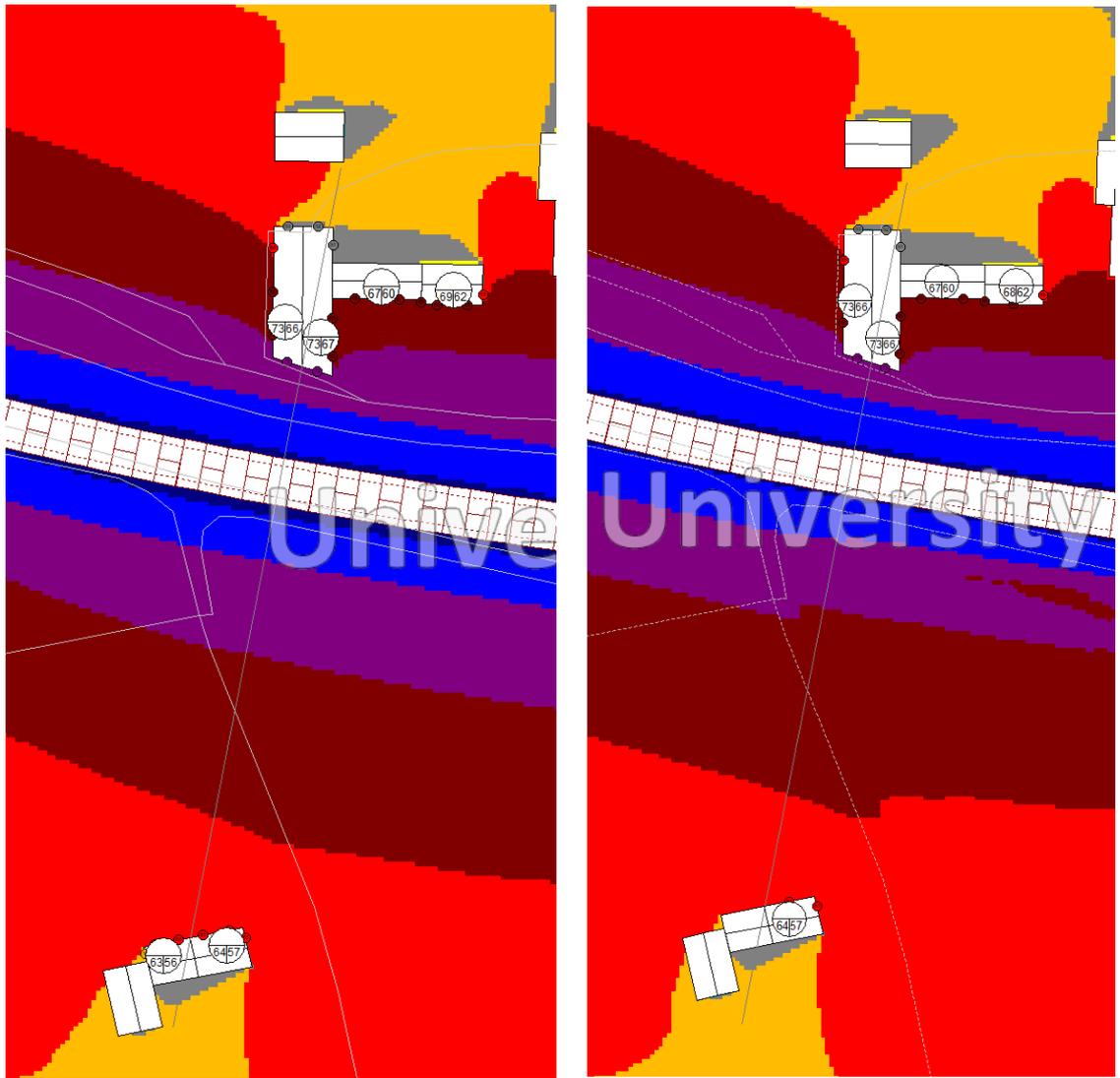


Abbildung 7.12: 3D-Darstellung des Berechnungsmodells in CadnaA mit DGM (aus IFC), Straße (aus IFC) und LoD2 Stadtmodell (CityGML)

Abb. 7.13 zeigt das Ergebnis der Rasterberechnung auf Basis des Bestands-DGM (a) und des Planungs-DGM (b). Zudem ist in Hausbewertungen der jeweilige Beurteilungspegel für Tag und Nacht, sowie der maximale Beurteilungspegel an Fassadenpunkten zu sehen. Trotz gewisser Unterschiede im Isophonen-Raster unterscheiden sich die Beurteilungspegel der Häuser in den Berechnungen nicht. Abb. 7.14 zeigt das vertikale Raster der Berechnung als Geländeschnitt mit den zwei Quelllinien über den äußeren Fahrstreifen. Es ist zu sehen, dass sich die Geländeroberfläche in (b) durch die Ausbautrasse und die angrenzende Gemeindeverbindungsstraße von der Bestandsoberfläche in (a) unterscheidet. Ähnlich wie in Abb. 7.13 ergibt sich jedoch nur ein leicht verändertes Ausbreitungsmuster.

Bewertung

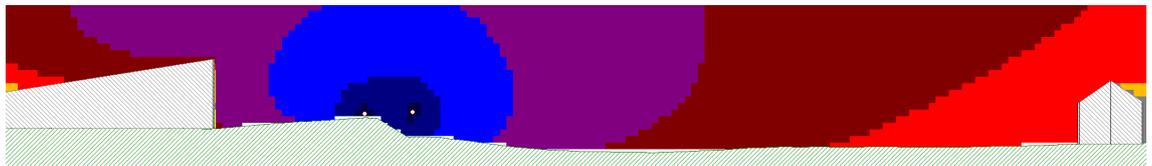
In dem begrenzten untersuchten Bereich haben die unterschiedlichen DGMs nicht zu einer Abweichung bei den berechneten Beurteilungspegeln an den untersuchten Hausfassaden geführt. Auch die in Abb. 7.10 dargestellten Unterschiede in der Qualität der Oberflächenbeschreibung durch die erneute Triangulierung haben offensichtlich eine zu vernachlässigende Auswirkung. Bei Situationen, in denen sich die Höhenlage der Straße und das umgebende Gelände stark verändert, zum Beispiel durch einen Wall, muss dessen abschirmende Wirkung jedoch berücksichtigt werden. Ferner bietet CadnaA für Einschnittslagen die Möglichkeit, die Geländeoberfläche an die Straße anzupassen. Zusammenfassend bestätigt sich die in Kapitel 6 erwähnte Empfehlung von DataKustik, dass die Genauigkeit des Geländemodells für das Berechnungsverfahren der RLS-19 eine untergeordnete Rolle spielt. Bei einer baulichen Maßnahme entstehende Abschirmungen durch Veränderungen der Geländeoberfläche (z.B. Wall, Einschnittsböschung etc.) müssen dann jedoch nachträglich modelliert werden.



(a)

(b)

Abbildung 7.13: Rasterberechnung in CadnaA mit DGM aus Bestandsvermessung (a) und DGM mit Trassenkörper der Ausbauplanung (b)



(a)



(b)

Abbildung 7.14: Vertikales Raster in CadnaA mit DGM aus Bestandsvermessung (a) und DGM mit Trassenkörper der Ausbauplanung (b)

7.3 Zusammenfassung

CadnaA verarbeitet Geländemodelle und Straßen in Punkt- bzw. Polygonform. Die Verwendung der Modelldaten über eine einfache Konvertierung in ein von CadnaA unterstütztes Format ist daher aufgrund der mit CadnaA inkompatiblen und komplexen Modellstruktur der IFC-Dateien nicht zielführend. Zudem kann die räumliche Führung der Straße über diesen Weg nicht von CadnaA abgeleitet werden.

Mittels der IFC-Programmierschnittstelle „IfcOpenShell“ kann über die Programmiersprache „Python“ auf die Datenstruktur der Modelldateien zugegriffen werden. Über diesen Weg konnten Bestandteile der expliziten Geometriepäsentation der relevanten Modellbestandteile ausgegeben werden. Dadurch wurde die benötigte geometrische Information adressiert und auf die zugrundeliegenden Punktkoordinaten reduziert.

Abb. 7.15 zeigt in einer Übersicht das Vorgehen zum Import von DGM und Achse zu CadnaA aus den IFC-Teilmodellen mittels der entwickelten IfcOpenShell-Python Skripte. Das Python-Skript „hoehenpunkte.py“ (Algorithmus B.1) gibt die Punktkoordinaten, die die geometrische Grundlage des tesselierten Geländemodells in der IFC-Datei darstellen, als csv-Datei tabellarisch aus. Der Verlauf der Straße wird über die Segmente der BRep Deckschichtkörper mit dem Skript „trassenparameter.py“ (Algorithmus B.2) abgeleitet. Dabei werden von jedem Deckschichtsegment zwei gegenüberliegende Eckpunkte adressiert und daraus der jeweilige Achspunkt, die Fahrbahnbreite und Querneigung berechnet. Zusammen mit dem CityGML-Stadtmodell bilden die extrahierten Daten die geometrische Grundlage aus offenen Datenformaten für die Schallberechnung in CadnaA.

Es hat sich gezeigt, dass eine hochgenaue Darstellung des Geländemodells im untersuchten Fall keine Auswirkungen auf die Berechnung der Beurteilungspegel an den Fassaden der Umgebungsbebauung hat. Eine Berücksichtigung der detaillierten Modellgeometrie im Geländemodell bei der Berechnung der Schallausbreitung führt zu einem vielfach erhöhten Berechnungsaufwand, meist jedoch nicht zu genaueren Ergebnissen.

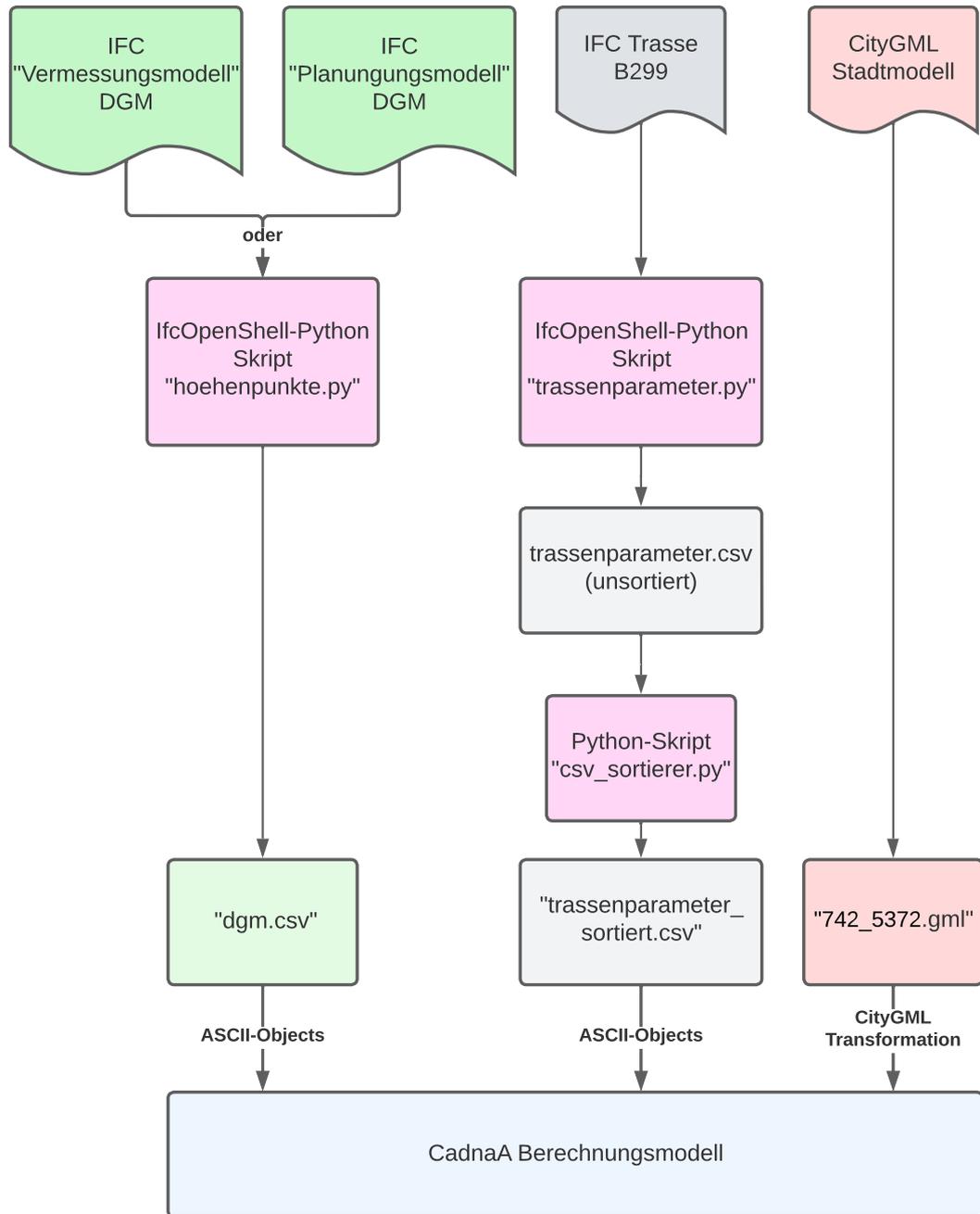


Abbildung 7.15: Übersicht der Skripte zum Import der IFC-Geometrie zu CadnaA

Kapitel 8

Beispiel einer Lärmberechnung in einem Gesamtmodell

Dieses Kapitel beschreibt die Erstellung eines Gesamtmodells des Projektgebiets mit Daten aus verschiedenen Quellen (Geodaten und Modelldaten). Anschließend wird untersucht, wie die Planungsdaten (Modelldaten) für die Schallimmissionsberechnung im Gesamtmodell genutzt werden können.

Die verwendete Software „KorFin“ ist eine 5D-Plattform mit der unter anderem Straßen in 3D geplant werden können. Die Plattform unterstützt die Generierung von dynamischen, räumlichen Gesamtmodellen für Bestand, Trassenfindung und Vorplanung, Visualisierung und Koordinierung und eine Reihe weiterer Anwendungsfälle. Schallimmissionen beispielsweise können direkt im Gesamtmodell berechnet und visualisiert werden. Das integrierte GIS erlaubt zudem die Analyse der Betroffenheit je Einwohner. (A+S CONSULT, 2022)

8.1 Erstellung eines Gesamtmodells in KorFin Model

Bevor in KorFin mit 3D-Modellen gearbeitet werden kann, ist ein Bestandsmodell des Planungsgebiets zu erstellen. Das digitale Geländemodell, welches aus Höhenrasterdaten und terrestrischen Vermessungen erzeugt und mit digitalen Orthophotos (DOPs) texturiert wird, ist das grundlegende Fachmodell. Weitere Fachmodelle des Bestandsmodells können Bebauung, Bewuchs oder Baugrund sein. Geobasisdaten werden in der Regel als essenzielle Datengrundlage ebenfalls als separates Fachmodell in das GM integriert. Die im GM angereicherten Informationen können im BIM-Informationsmodell parallel zur Planung ausgewertet werden. (BARTNITZEK & TILGER, 2021)

Digitales Geländemodell

Die Grundlage des digitalen Geländemodells des Projektgebiets bilden Vermessungspunkte (Rasterpunkte) die unter <https://geodatenonline.bayern.de/geodatenonline/seiten/bestellen> oder im Behördennetzwerk bezogen werden können. Im Rahmen der Ressortvereinbarung sind Vermessungspunkte bis zu einer Genauigkeit von 5 Metern (DGM5) enthalten. Rasterpunkte mit einer Genauigkeit von 50 Metern sind für jeden frei verfügbar. Bei Orthophotos bezieht sich die Angabe der Genauigkeit auf die Größe eines Pixels im Realmaßstab. DOP20 bezeichnet demnach ein Othofoto mit 20 Zentimetern Bodenauflösung je Pixel. Die Fotos sind in quadratische Kacheln geteilt und für die gesamte Fläche des Freistaats Bayern verfügbar.

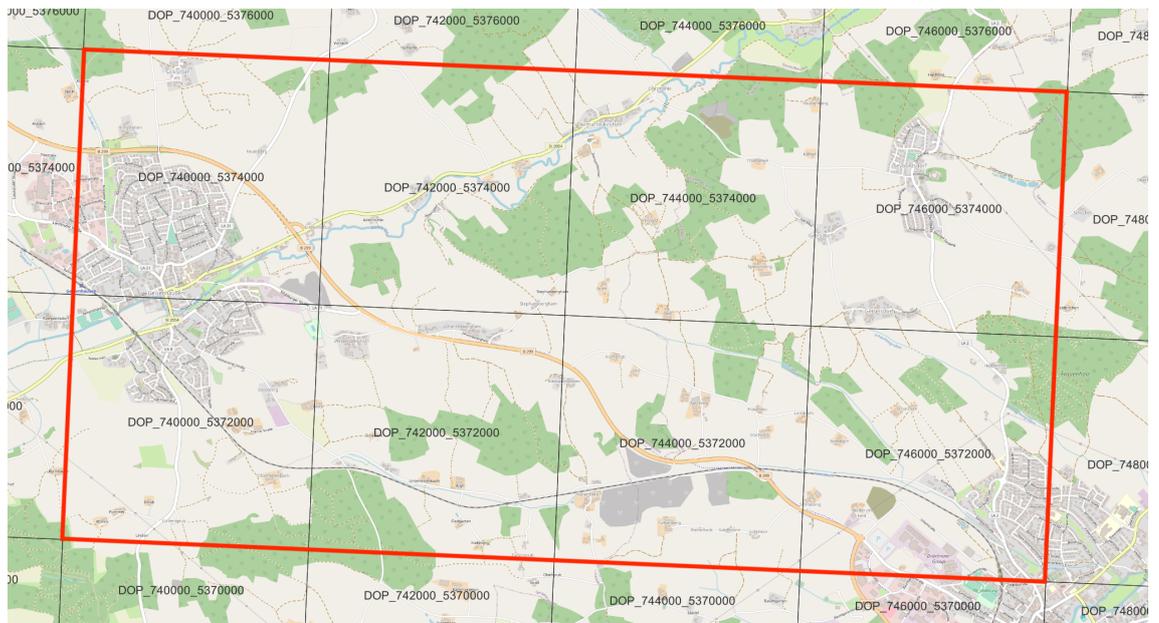


Abbildung 8.1: Definition der Fläche des **GMs** über **DOP**-Kachelgröße

Für das GM dieser Arbeit wurde ein großzügiges Projektgebiet über die Kacheln des Ausbaubereiches definiert (Abb. 8.1). Es ist auch möglich, das Projekt über eine eigen abgesteckte Fläche festzulegen und die Daten entsprechend zugeschnitten bei „BayernAtlasPlus“ herunterzuladen.

Es empfiehlt sich, die Orthophotos in das Format Enhanced Compression Wavelet (**ecw**) zu komprimieren, da die großen Rasterdateien dann weniger Arbeitsspeicher des Rechners in Anspruch nehmen. Eine frei verfügbare Software zur entsprechenden Konvertierung ist „IrfanView“. Das Vorgehen zur Komprimierung ist in **Anhang A.3** beschrieben.

Nach der Beschaffung aller Kacheln der Höhenrasterdaten und Orthophotos des Projektgebiets und entsprechender Konvertierung, kann das DGM in KorFin Model erstellt und texturiert werden.

Anschließend wird das Stadtmodell der Bestandsbebauung im Format CityGML und Flurkarten wie das **ALKIS** als `.shape` Vektordaten hinzugefügt. Die Flurkarten sind nicht kachelweise segmentiert und müssen daher zuvor (beispielsweise in „QGIS“) auf Projektgröße zugeschnitten werden. Das Vorgehen zum Zuschnitt von `.shape`-Flächen ist in **Anhang A.4** beschrieben.

Die in den Flurkarten enthaltenen Vegetationsflächen dienen als Grundlage für die Erstellung des Fachmodells der Vegetation. Dabei werden den entsprechenden **ALKIS** Flächen Baumarten in definierter Höhe und Dichte zugewiesen. Die Verteilung der Bäume in den Flächen erfolgt dann zufällig und ist daher in diesem Beispiel nur zu Visualisierungszwecken geeignet. **Abb. 8.2** zeigt das aus den Fachmodellen des Bestands in KorFin zusammengesetzte Gesamtmodell.



Abbildung 8.2: Gesamtmodell des Projektgebiets in KorFin

8.2 Lärmberechnung in KorFin

Ein wichtiger Bestandteil einer Lärmberechnung ist, wie in vorangegangenen Kapiteln erläutert, der ausbreitungsdefinierende Straßenverlauf. Da in den vorliegenden Fachmodellen des Beispielprojekts keine expliziten Achsinformationen in den IFC-Dateien enthalten sind, werden zunächst Achse und Gradiente als 0.40 bzw. 021-Datei importiert. Der Linie wird anschließend der entsprechende Regelquerschnitt (RQ11,5) zugewiesen. Sie dient fortan als Referenz für die Schallausbreitungsberechnung in KorFin. Aus Achse, Regelquerschnitt und Geländeverlauf wird automatisch ein vorläufiger Trassenkörper generiert ([Abb. 8.3](#)). Die Querneigung der Fahrbahn ist in den Achsdateien nicht enthalten, sie muss manuell zugewiesen werden.

Um zu erreichen, dass die Fachmodelle der Planung geometrisch bei der Schallausbreitungsberechnung berücksichtigt werden, müssen diese dem GM hinzugefügt werden. Sie werden als Ressourcen in KorFin angemeldet, wobei aufgrund der unterschiedlichen Referenzsysteme zwischen Vermessungs- und Planungsdaten (siehe [Tabelle 5.1](#)) eine geodätische Transformation eingestellt werden muss. Dem GM werden die folgenden Fachmodelle hinzugefügt:

- B299
- Ingenieurbauwerke 01 und 02
- Straßenausstattung
- Wegenetz
- Knoten D
- Knoten G

[Abb. 8.4](#) zeigt das aus den Fachmodellen der Planung und dem Bestandsmodell zusammengesetzte GM.



Abbildung 8.3: Aus Achse und Regelquerschnitt generierter Trassenkörper im GM



Abbildung 8.4: Aus Fachmodellen der Ausbauplanung und Bestandsmodell zusammengesetztes GM

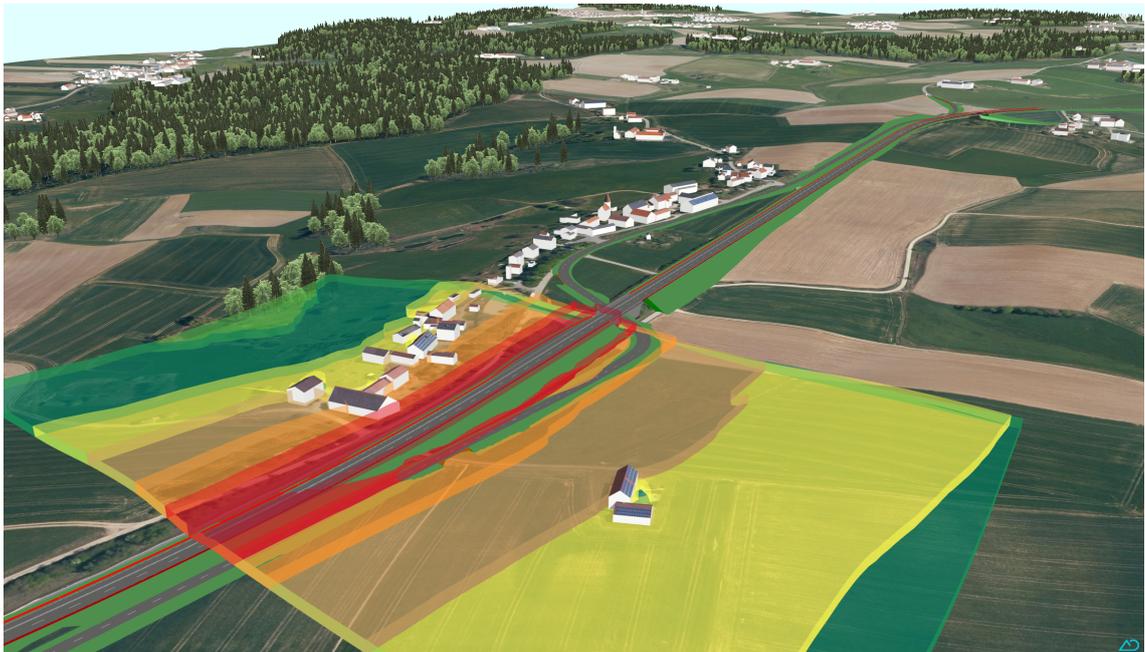


Abbildung 8.5: Fachmodell Schall 3D-Ansicht

Für die Schallberechnung wird das Fachmodell „Schall“ generiert, welches als grundlegendes Attribut die definierende Linie enthält. Außerdem können weitere Attribute wie die Berechnungsvorschrift (RLS-19), die Berechnungsaufösung und der Bereich der Berechnung (Start und Endstation) definiert werden.

[Abb. 8.5](#) zeigt das Berechnungsergebnis für einen definierten Abschnitt im 3D-Modell. Es ist zu sehen, dass, im Gegensatz zum Stadtmodell des Bestands, die Fachmodelle der Planung in der Berechnung nicht geometrisch berücksichtigt wurden. Im Bereich vor der Unterführung der Gemeindeverbindungsstraße ist zu sehen, dass die isophonen Volumen (die bis zu einer Immissionshöhe von 6m dargestellt werden) unterhalb der Dammböschung liegen. Die Referenzhöhe für die Berechnung der Ausbreitung stellt offensichtlich weiterhin die Oberfläche des digitalen Geländemodells dar. In der 2D-Ansicht ([Abb. 8.6](#)) kann der Beurteilungspegel punktgenau analysiert werden. Zusätzlich besteht auf Basis des ALKIS eine Betroffenheitsangabe je Haus.

Um die importierten IFC-Fachmodelle geometrisch bei der Berechnung zu berücksichtigen, muss im DGM eine Ausstanzung im Bereich der IFC-Modelle durchgeführt werden. Um die Ausstanzung zu realisieren, muss zunächst die Umgrenzung der IFC-Modelle im Projekt definiert werden. KorFin bietet die Möglichkeit zum Export der Umgrenzung als Polylinie in einer Textdatei an. Anschließend muss die Umgrenzung in der Modellressource als Ausstanzung hinzugefügt werden.

Nach erfolgreicher Berechnung der Ausstanzung im DGM berücksichtigt KorFin die Modelloberfläche bei der Berechnung der Schallausbreitung, wie in [Abb. 8.7](#) zu sehen. Wegen fehlerhafter Berechnung der Umgrenzung bzw. Ausstanzung aufgrund der starken Segmentierung und teilweise verkehrten Orientierung der IFC-Dateien fallen die „Inseln“

☐ Schall von Importierte Konstruktionslinie, Achse Fachmodelle\B299\Achse_B299_neu.040 A_
RLS19, Tag 6 m

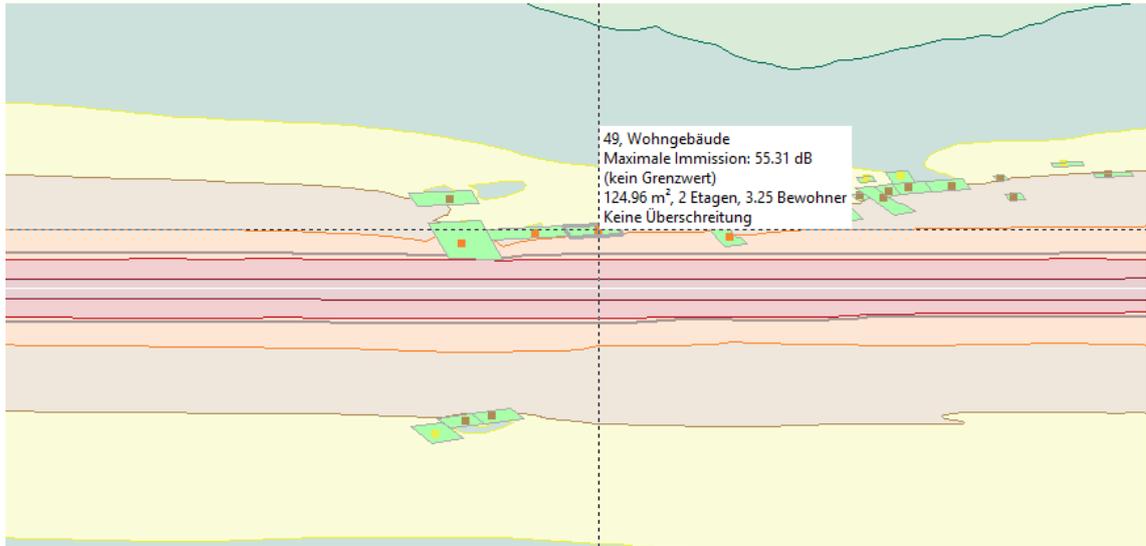


Abbildung 8.6: Fachmodell Schall 2D-Ansicht

(Einschlüsse) des DGMs weg. Zudem führen die stark zergliederten Modelldateien zu sehr langen Rechenzeiten bei der Berechnung der Ausstanzung und Schallausbreitung.

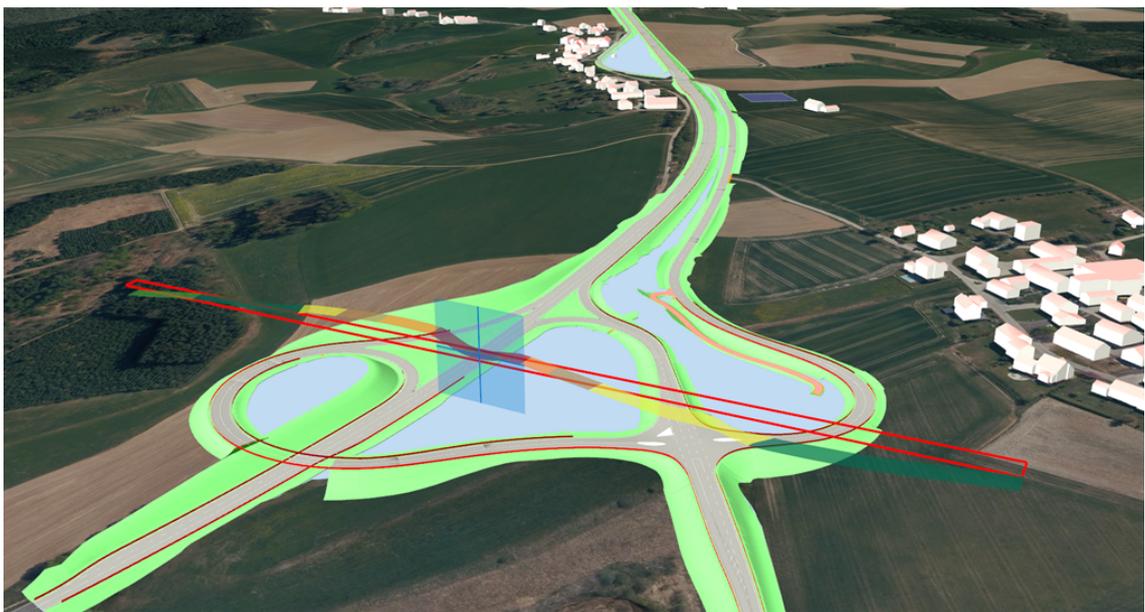


Abbildung 8.7: Schallberechnung nach realisierter Ausstanzung im DGM

Ergänzung des DGMs um Vermessungspunkte

Nach ähnlichem Vorgehen kann das DGM auch um Vermessungspunkte ergänzt werden. Dafür muss, wie bei der Ausstanzung der IFC-Dateien, eine Umgrenzung des Vermessungsgebiets vorliegen. Die Umgrenzung wird analog zum vorherigen Vorgehen im Geländemodell eingestellt. Anschließend werden die Vermessungspunkte hinzugefügt. Das Geländemodell kann somit an die Planungsgeometrie (Trassenkörper) angepasst werden. Bei einer Schallberechnung würden jetzt die im DGM integrierten Oberflächen der Ausbautrassen berücksichtigt.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

9.1 Zusammenfassung der Ergebnisse

Durch zahlreiche staatliche Initiativen sind die Weichen für eine flächendeckende Einführung der BIM-Methodik in Deutschland auch im Infrastrukturbau gestellt. Grundgedanke ist die Weiterverwendung des Modells und der enthaltenen Daten von Planung, Bau, Erhaltung und Betrieb, bis hin zum Rückbau von baulichen Anlagen. Ein Anwendungsfall ist die in Deutschland gesetzlich geregelte Berechnung von Beurteilungspegeln zur Einhaltung der Grenzwerte von Schallimmissionen bei Neubau oder wesentlichen Änderungen von Verkehrsanlagen.

Die konventionelle Methode der Lärmberechnung, die anhand des Beispielprojekts untersucht wurde, beruht auf 3D-CAD Daten, die in der Planungssoftware iTWO Civil vorliegen. Über eine Schnittstelle zu CadnaA, dem einschlägig genutzten Programm für Lärmberechnungen in der Staatsbauverwaltung, werden die Planungsdaten übertragen. Die für eine Lärmberechnung im Entwurf benötigten geometrischen Informationen bestehen aus der Geländeoberfläche, der räumlichen Linienführung der Straße inklusive Querprofilinformationen und den Umgebungsgebäuden. In CadnaA wird ein DGM auf Basis des Imports von Höhenpunkten oder Höhenlinien berechnet. Die räumliche Linienführung der Straße wird über Polygonpunkte repräsentiert.

Die Datengrundlage dieser Arbeit ist ein BIM-Pilotprojekt des dreistreifigen Ausbaus eines Abschnitts der B299 zwischen Geisenhausen und Vilsbiburg. Die Modelldaten verschiedener Fachdisziplinen sind dabei im IFC-Format in einem CDE abgelegt. Die Verwendung von offenen Dateiformaten, die mit dem Prinzip von Open BIM einhergeht, ist eine rechtliche Voraussetzung für die Ausschreibung von Bauvorhaben der öffentlichen Hand. Als offenes Datenformat hat sich dabei IFC national sowie international durchgesetzt. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung sind, in dem ursprünglich primär für den Hochbau entwickelten Format, mittlerweile auch Beschreibungen von Infrastruktur wie beispielsweise Linienbauwerken möglich. Auch für die Beschreibung der geometrischen Repräsentation von Bauteilen unterstützen die IFC eine Reihe von expliziten sowie impliziten Modellierungsverfahren. Die Vielseitigkeit des Datenformats führt jedoch auch zu einem erhöhten Aufwand bei der Implementierung von IFC-Schnittstellen in BIM-Softwarewerkzeuge. CadnaA bietet eine Vielzahl von Importmöglichkeiten, der direkte Import der IFC-Dateien ist jedoch nicht möglich. Die Konvertierung der Geometrie in ein unterstütztes Format war aufgrund der kleinteiligen und inkompatiblen Geometriestruktur nicht erfolgreich.

Eine Möglichkeit auf IFC-Instanzen über verschiedene Programmiersprachen zuzugreifen sind IFC-Programmierschnittstellen. Auf Basis der IFC-Programmierschnittstelle „IFC OpenShell“ und der Programmiersprache „Python“ wurden in dieser Arbeit Skripte entwickelt, die Polygonpunkte der 3D-Achse der Straße und weitere Parameter des Querprofils sowie Höhenpunkte des DGMs tabellarisch ausgeben. Die Höhenpunkte des DGMs wurden aus der Koordinatenliste der IFC-Instanz *IfcTriangulatedFaceSet* ausgelesen und in absolute Koordinaten transformiert. Die Informationen der Ausbautrasse wurden aus dem Fachmodell des Trassenkörpers abgeleitet. Fachmodelle dieser Art werden nach aktuellem Stand der Technik in der Regel aus Querprofilen segmentweise interpoliert. Achspunkte, Fahrbahnbreite und Querneigung wurden daher segmentweise aus Eckpunkten der Deckschichtkörper, die in der IFC-Datei als **BRep** vorliegen, berechnet. Die tabellarische Ausgabe der Skripte in Form von csv-Dateien wurde erfolgreich in CadnaA importiert und für eine Lärmberechnung verwendet.

Abschließend wurde als alternativer Ansatz eine Lärmberechnung in einem Gesamtmodell durchgeführt. Zunächst wurde aus Vermessungsdaten, Orthofotos, einem 3D-Stadtmodell und weiteren **GIS**-Daten ein Modell des Bestands erstellt. Das Bestandsmodell wurde anschließend um Achse, Gradienten und die IFC-Fachmodelle der Planung ergänzt. Auf Grundlage der importierten Linienführung der Straße und eines zugewiesenen Regelquerschnitts wurde eine Lärmberechnung nach den **RLS-19** durchgeführt. In der Ausbreitungsberechnung wurden die importierten IFC-Fachmodelle jedoch zunächst nicht berücksichtigt. Erst nach Durchführung einer Ausstanzung im Bestands-DGM wurde die Oberfläche der Modellkörper als Referenzhöhe der Berechnung erkannt.

9.2 Fazit und Einsatzgrenzen

Die Nutzung der IFC-Modelldateien des Beispielprojekts als geometrische Grundlage für eine Schallberechnung mit CadnaA ist grundsätzlich möglich. Sowohl die Geometrie der Geländeoberfläche, als auch die geometrische Repräsentation der Straße müssen dafür in eine von dem Schallberechnungsprogramm interpretierbare Form gebracht werden. Insbesondere die granuläre Struktur der Volumenkörper der Trasse, die auf klassischen Verfahren der Straßenplanung mit Querprofilen beruht, muss stark vereinfacht werden. Die entwickelten Skripte bieten die Möglichkeit, die erforderliche geometrische Information auf Koordinatenpunkte zu reduzieren, um sie anschließend in Tabellenform zu CadnaA zu importieren. Nach diesem Verfahren können die Höhenpunkte des digitalen Geländemodells und die räumliche Linienführung der Straße in Form von Polygonpunkten in die Lärmberechnungssoftware übertragen werden. Zudem können Fahrbahnbreite und Querneigung stationsweise aus dem IFC-Trassenmodell ermittelt werden. Für letztere besteht jedoch keine Möglichkeit des Imports zu CadnaA, sodass die Daten manuell eingetragen werden müssen. Damit stehen alle geometrischen Daten, die im konventionellen Prozess über iTWO Civil aus einer 3D-CAD Planungsdatei zu CadnaA übertragen wurden, mittels der Skripte auch aus verschiedenen IFC-Fachmodelldateien zu Verfügung. Beispiel-Schallberechnungen mit zwei Geländemodellen mit unterschiedlicher Genauigkeit

haben für einen betrachteten Bereich bestätigt, dass auch ein reduziertes DGM nicht zu abweichenden Beurteilungspegeln führt.

Die entwickelten Skripte sind auf die spezifische Struktur der Modelldateien des Beispielprojekts abgestimmt. Da das Schema der IFC verschiedene Geometrierepräsentationen unterstützt, können sie nicht universell für IFC-Dateien eingesetzt werden. Bei implizit beschriebener Geometrie ist eine direkte Auswertung nach dem angewandten Verfahren nicht möglich. Insbesondere mit Blick auf zukünftige liniengeführte, parametrische Verfahren der Modellbildung von Straßen ist eine abweichende Geometriestruktur vorprogrammiert. Um die komplexe Umrechnung von impliziter in explizite Geometrie zu vereinfachen existieren Softwarebibliotheken. Anknüpfend an diese Arbeit kann untersucht werden, wie die Skripte für Modelldateien mit impliziter Geometrie angepasst werden müssen. Zudem wird zukünftig in der Regel die räumliche Linienführung als IFC-Alignment vorliegen. Um das Alignment als Straßenführung zu CadnaA zu übertragen, müssen die Trassierungsparameter in eine Polylinie umgerechnet werden. Eine Möglichkeit, ein Alignment in Polygonpunkte umzurechnen und als Textdatei auszugeben, bietet beispielsweise die „TUM Open Infra Platform“ (AMANN et al., 2016).

Auch im zweiten Ansatz, der Lärmberechnung in einem Gesamtmodell mit der Software „KorFin“, konnten die Modelldaten in die Berechnung integriert werden. Da in der IFC-Modelldatei der Trasse aus dem Projekt-CDE die räumliche Beschreibung der Straßenachse (IFC-Alignment) nicht enthalten ist, mussten zudem Achse und Gradienten über separate Datenformate importiert werden. Nach einer ersten Schallberechnung hat sich gezeigt, dass die Modellkörper bei der Ausbreitung geometrisch nicht berücksichtigt wurden. Erst nach Durchführung einer Ausstanzung im DGM wurde das Trassenmodell einbezogen. Als Ergebnis werden die Isophonen der Lärmimmission dreidimensional im Gesamtmodell visualisiert. Dabei wird auch die Ausbauplanung mittels der Fachmodelle mit einer hohen Detailtreue dargestellt. Die hohe Segmentierung der Geometrie in den IFC-Dateien des Beispielprojekts hat in KorFin zu einem hohen Berechnungsaufwand bei der Durchführung der Ausstanzung und der folgenden Lärmberechnung geführt. Zudem kam es zu einer fehlerhaften Darstellung der in den Modellen eingeschlossenen Flächen des DGMs. Die importierten Fachmodelle dienten bei der Berechnung im Gesamtmodell folglich als geometrische Volumen zur Anpassung der Geländeoberfläche und zur detaillierten Visualisierung.

Neben der geometrischen Grundlage sind für eine Lärmberechnung nach den RLS-19 auch eine Reihe von semantischen Informationen wie beispielsweise die Verkehrsstärke erforderlich. In Hinblick auf den großen Vorteil der IFC, sowohl geometrische als auch semantische Informationen abbilden zu können, besteht die Möglichkeit diese Daten in Zukunft einzubinden. Um IFC als alleinige Datenquelle für eine Lärmberechnung nach den RLS-19 einzusetzen sind neben den geometrischen Informationen die Verkehrsstärke, der Straßendeckschichttyp, ggf. ein Knotenpunkttyp und der Regelquerschnitt bzw. die Lage und Anzahl der Fahrstreifen je Richtung erforderlich. Um geometrische Informationen nach dem Prinzip der entwickelten Skripte mit IfcOpenShell und Python auch in Zukunft ableiten zu können, muss in der IFC-Datei eine explizite Geometrierepräsentation

vorliegen. Bei der Integration von Fachmodellen nach aktuellem Stand der Technik in ein KorFin-Gesamtmodell mit dem Ziel, die Modelle geometrisch bei einer Lärmberechnung zu berücksichtigen, sollte die Umgrenzung der Modelldatei zur Realisierung einer Ausstanzung im DGM vorhanden sein, um langwierige potenziell fehlerhaften Berechnungen vorzubeugen.

9.3 Ausblick

Mit dem Ziel des [BMVI](#) der Schaffung eines „digitalen Zwillings“ der Bundesfernstraßen als digitales Abbild der physischen Infrastruktur und der Einführung der BIM-Methode als Regelprozess wird voraussichtlich auch die Lärmberechnung in Zukunft zu einem modellbasierten, integrierten Prozess.

Die Strategie des vernetzten 3D-Planens verwaltet dabei alle Daten vollständig in einem Gesamtmodell. Das Gesamtmodell aktualisiert sich dynamisch, da es ohne Kopien auf originale Fachdaten zugreift. Für den Austausch der Fachdaten bedarf es geeignete Datenformate und Übertragungstechnologien. (APPELT et al., 2021a)

In Zukunft wird zudem die liniengeführte parametrische Modellbildung im Straßenbau angestrebt (siehe [Abschnitt 3.9](#)). Damit entfällt die segmentweise Modellierung der Trassenkörper auf Basis von Querprofilen und wird durch die parametrische Modellbildung anhand der räumlichen Linienführung ersetzt.

Für eine vernetzte modellbasierte Lärmberechnung sollte eine Software zur Lärmberechnung über Schnittstellen zum Gesamtmodell verfügen. Für den Datenaustausch eignet sich dabei das IFC-Format, wenn alle erforderlichen geometrischen sowie semantischen Informationen enthalten sind. Zudem kann die Verbreitung aktueller und zukünftiger IFC-Versionen eine verbesserte Datengrundlage bieten. Bei Änderungen der relevanten Fachdaten im Modell aktualisieren sich dann auch die Grundlagedaten der Schallberechnung.

Anhang A

Software

A.1 Entfernung ausgewählter Körper aus IFC in Desite

Zur Entfernung der Volumenkörper Erdarbeiten des Modells müssen alle relevanten Segmente selektiert werden. Dafür in der Werkzeugleiste im Reiter **NAVIGATION** auf die Schaltfläche *Show Equal Objects* gehen und die Properties *Infra_Strecke-VA/Erbau/Erdarbeiten* und *Infra_Strecke-VA/Erbau/Oberbodenarbeiten* aktivieren.

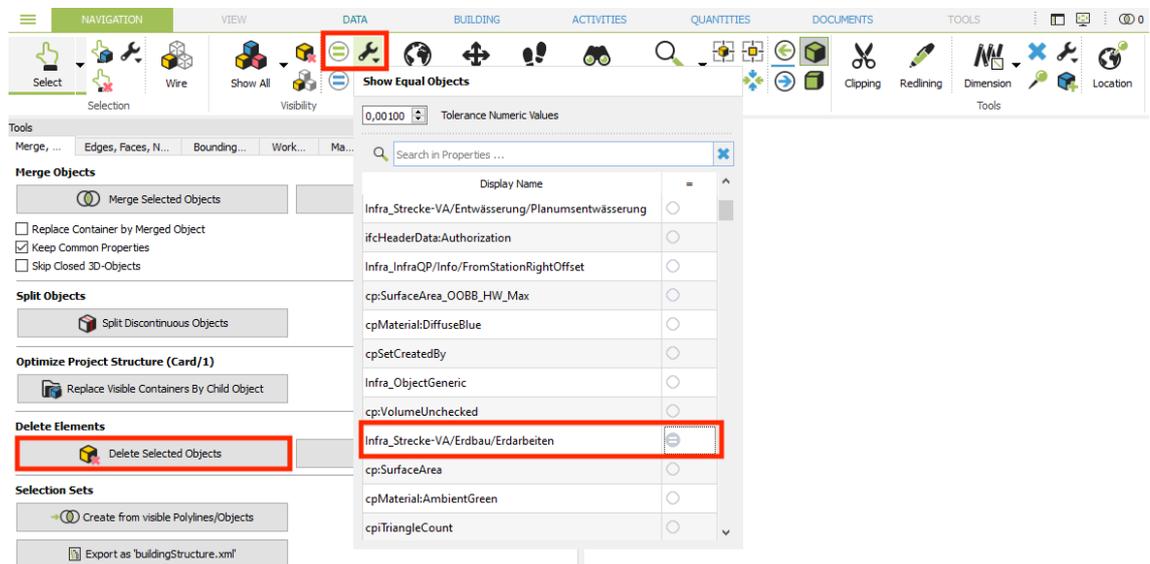


Abbildung A.1: Gleiche Objekte in Desite selektieren

Ein beliebiges Segment der Erdarbeiten selektieren und auf  klicken. Nun werden nur die Körper des ausgewählten Typs dargestellt ([Abb. A.2](#)).

Anschließend können alle Segmente selektiert und über **Tools** → **Delete Selected Objects** entfernt werden.

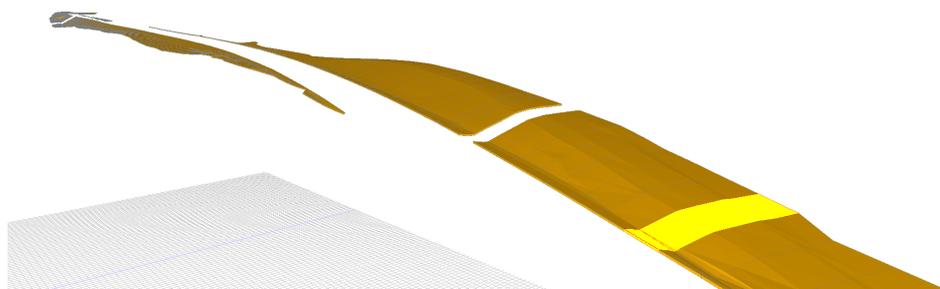


Abbildung A.2: Erdarbeiten isoliert

A.2 Installation von IfcOpenShell und Python

Um IfcOpenShell mit Python nutzen zu können, müssen beide Bestandteile auf den Rechner heruntergeladen und installiert werden.

Python ist unter folgendem Link erhältlich:

<https://www.python.org/downloads/>

Nach Öffnen der Setup-Datei sollte vor Klicken auf **Install Now** die Option "Add Python [...] to PATH" aktiviert werden (Abb. A.3).

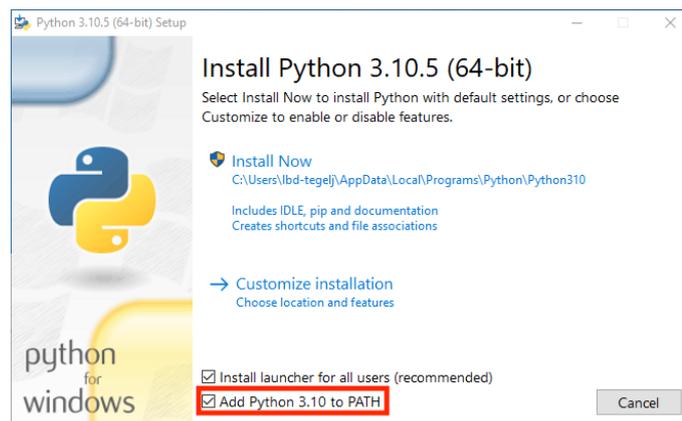


Abbildung A.3: Python Setup

Anschließend unter <http://ifcopenshell.org/python> IfcOpenShell in der für Betriebssystem und Python-Version passenden Variante herunterladen und im Ordner site-packages im Python Verzeichnis entpacken (\AppData\Local\Programs\Python\Python310\Lib\site-packages).

In der Windows-Eingabeaufforderung können jetzt die ersten Abfragen an eine IFC-Datei erfolgen.

Zum effizienten Arbeiten mit IfcOpenShell und Python empfiehlt sich die Nutzung eines Quelltext-Editors mit Syntaxhervorhebung, Debugging und Autovervollständigung. Hier wird der Open-Source Editor "Visual Studio Code" von Microsoft verwendet, der unter folgendem Link heruntergeladen werden kann:

<https://code.visualstudio.com>

Anschließend kann in Visual Studio Code die Python Extension installiert werden. Dafür in der Seitenleiste auf Extensions gehen und den Suchbegriff "Python" eingeben, die Erweiterung von Microsoft auswählen und installieren.



Abbildung A.4: Python Extension in VSCode

A.3 Orthophotos komprimieren mit IrfanView

Zur Verarbeitung von Geodaten müssen die Software sowie die verfügbaren Plugins von folgender Seite heruntergeladen werden: <https://www.irfanview.com>

Zur Komprimierung von Bilddateien IrfanView öffnen und *file* → *Batch conversion* auswählen. Anschließend das Outputformat ECW festlegen, die Bilddateien über **Add all** auswählen, einen Outputfolder wählen und mit **Start Batch** die Konvertierung starten (Abb. A.5).

Für die Georeferenz der Bilder muss anschließend die .fww Datei ins Zielverzeichnis kopiert werden.

A.4 Flächen zuschneiden mit QGIS

Um Flächen mit QGIS zuzuschneiden müssen die entsprechenden .shape Dateien zunächst in das QGIS Projekt importiert werden. In der Menüleiste ist unter *Vektor* → *Geometrieverarbeitungswerkzeuge* → *Zuschneiden* zu finden. Nach Auswählen von **Als Batchprozess starten ...** im folgenden Fenster Abb. A.6 als *Eingabelayer* die ursprünglichen Flächen und bei *Layer überlagern* das Projektgebiet auswählen (und nach unten füllen). Unter *Zugeschnitten* das Zielverzeichnis definieren. Über **Als Batchprozess starten...** wird der Zuschchnitt aller Layer gestartet.

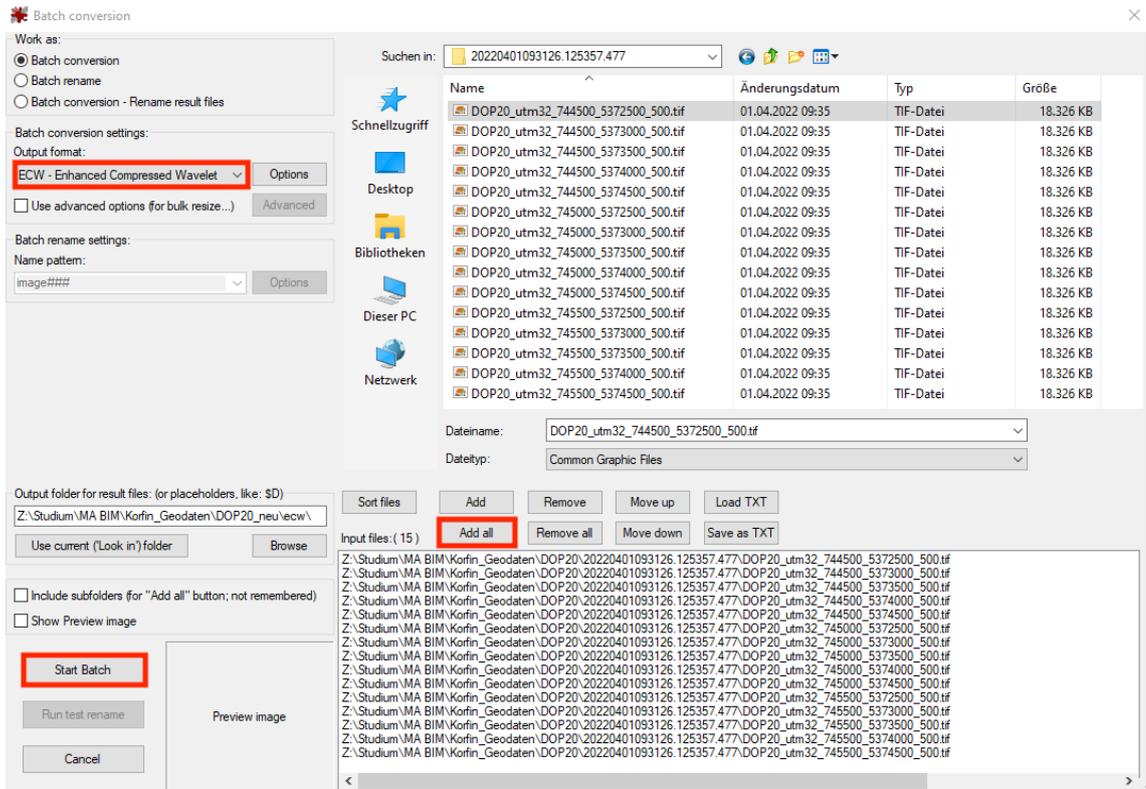


Abbildung A.5: Komprimierung von Orthophotos mit IrfanView

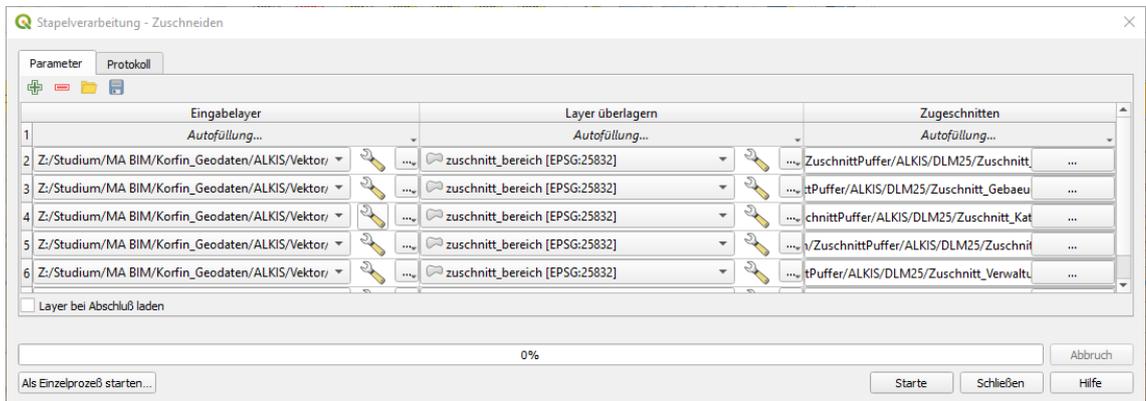


Abbildung A.6: Flächenzuschnitt in QGIS

Anhang B

Skripte

Algorithmus B.1: Ausgabe der Höhenpunkte der DGM-Triangulierung

```
1 import ifcopenshell
2 import csv
3
4 file = ifcopenshell.open(r"\Teilmodell Vermessung_VM-Vermessung_0010.
   ifc")
5 dgm = file.by_guid("0Cck21hR9Eh8bx_9Cfrzq_")
6 objectPlacement = dgm.ObjectPlacement[0]
7
8 origin = dgm.ObjectPlacement[0].PlacementRelTo[0].RelativePlacement[0].
   Coordinates
9 points = dgm.Representation.Representations[0].Items[0].Coordinates[0]
10
11 f = open("3dPointsIFCVermessung.csv", "w", newline="")
12 writer = csv.writer(f)
13
14 globalCoordinates = []
15 lenPoints = len(points)
16 lenOrigin = len(origin)
17
18 for i in range(lenPoints):
19     tempCoordinates=points[i]
20     for j in range(lenOrigin):
21         value1 = origin[j]
22         value2 = tempCoordinates[j]
23         globalCoordinates.append(value1 + value2)
24     writer.writerow(globalCoordinates)
25     globalCoordinates = []
26
27 f.close()
```

Algorithmus B.2: Ausgabe der Trassenparameter aus IFC

```
1 import ifcopenshell
2 import ifcopenshell.geom
3 import ifcopenshell.util
4 from ifcopenshell.util.selector import Selector
5 import numpy as np
6 import csv
7
8 file = ifcopenshell.open(r"\\VK_300_MOD_09_220211_B_B299.ifc")
9
10 elements = Selector.parse(file, '.IfcBuildingElementProxy')
11
12 f = open("achspparameter.csv", "w", newline="")
13 writer = csv.writer(f)
14 headline = ['Station', 'X', 'Y', 'Z', 'Fahrbahnbreite', 'Querneigung']
15 writer.writerow(headline)
16
17 elementLen = len(elements)
18 deckschichtSegments = []
19
20 for i in range(elementLen):
21     definition = elements[i].IsDefinedBy[0].RelatingPropertyDefinition.
22         HasProperties
23     definitionLen = len(definition)
24
25     for j in range(definitionLen):
26         tempDefinitionName = definition[j].NominalValue.wrappedValue
27         if tempDefinitionName == 'Asphaltdeckschicht':
28             deckschichtSegments.append(elements[i])
29
30 deckschichtLen = len(deckschichtSegments)
31
32 for k in range(deckschichtLen):
33     origin = deckschichtSegments[k].ObjectPlacement[0].PlacementRelTo
34         [0].RelativePlacement[0].Coordinates
35     points = deckschichtSegments[k].Representation.Representations[0].
36         Items[0].Coordinates[0]
37
38     name = deckschichtSegments[k].Name
39     station = name.split('-')[1]
40     float(station)
41
42     rechterPunkt = np.asarray(points[2])
43     linkerPunkt = np.asarray(points[12])
44
45     fahrbahnbreite = np.linalg.norm(rechterPunkt-linkerPunkt)
46     querneigung = (((rechterPunkt[2] - linkerPunkt[2])*fahrbahnbreite)
47         / 100)
48     achspunkt = []
49     for i in range(3):
50         achspunkt.append((rechterPunkt[i] + linkerPunkt[i])/2)
51     globalAchspunkt = []
52     for j in range(3):
53         globalAchspunkt.append(origin[j] + achspunkt[j])
54
55     row = [station, globalAchspunkt[0], globalAchspunkt[1],
56         globalAchspunkt[2], fahrbahnbreite, querneigung]
57     writer.writerow(row)
58
59 f.close()
```

Algorithmus B.3: CSV Sortierer

```
1 import pandas as pd
2 import csv
3
4 data = pd.read_csv("Z:\achsp parameter.csv")
5
6 data.sort_values(["Station"], axis=0, ascending=[True], inplace=True)
7
8 print("\nAfter sorting:")
9 print(data)
10
11 data.to_csv("achspunktSortiert.csv", encoding='utf-8', index=False)
```

Algorithmus B.4: Ausgabe aller Punkte eines Deckschichtsegments

```
1 import ifcopenshell
2 import csv
3
4 file = ifcopenshell.open(r"C:\Users\johan\Desktop\Bruchkanten\
   VK_300_MOD_09_220211_B_B299.ifc")
5
6 deckschicht = file.by_guid("3VtQHmDgHEofDVTWOT9Hz") #Segment 520-525
7
8 origin = deckschicht.ObjectPlacement[0].PlacementRelTo[0].
   RelativePlacement[0].Coordinates
9
10 points = deckschicht.Representation.Representations[0].Items[0].
   Coordinates[0]
11
12 f = open("DeckschichtPoints520-525.csv", "w", newline="")
13
14 writer = csv.writer(f)
15
16 globalCoordinates = []
17
18 lenPoints = len(points)
19 lenOrigin = len(origin)
20
21 #rechterPunkt = points[11]
22 #linkerPunkt = points[2]
23
24 for i in range(lenPoints):
25     tempCoordinates=points[i]
26     globalCoordinates.append(20 + i) #Punktnummer
27     for j in range(lenOrigin):
28         globalCoordinates.append(origin[j] + tempCoordinates[j])
29     writer.writerow(globalCoordinates)
30     globalCoordinates = []
31
32 f.close()
```

Anhang C

Digitaler Anhang

Bei der Abgabe werden dieser Arbeit in digitaler Form beigefügt:

- CadnaA Projektdateien
- Python Skripte und IFC-Dateien
 - hoehenpunkte_Vermessung.py
 - hoehenpunkte_Alignment.py
 - IFC-Vermessungsmodell (Teilmodell Vermessung_VM-Vermessung_0010.ifc)
 - IFC-Planungsmodell (B299_Alignment.ifc)
 - trassenparameter.py
 - IFC-Trasse (VK_300_MOD_09_220211_B_B299.ifc)
 - csv_sortierer.py
- KorFin Projektordner

Literaturverzeichnis

16. BImSchV [Verkehrslärmschutzverordnung vom 12. Juni 1990 (BGBl. I S. 1036), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 4. November 2020 (BGBl. I S. 2334) geändert worden ist]. (2020).
- A+S CONSULT. (2022). KorFin. *A+S Consult GmbH*. Verfügbar 20. Juli 2022 unter <https://www.korfin.de/korfin.html>
- ABUALDENIEN, J., BORRMANN, A. & KÖNIG, M. (2021). Ausarbeitungsgrade von BIM-Modellen. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 165–191). Springer Fachmedien.
- KBA. (2022, 4. April). Anzahl der Kraftfahrzeuge in Deutschland von 1960 bis 2022 (in Millionen). *Statista*. Verfügbar 3. Juni 2022 unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1837/umfrage/kfz-bestand-in-deutschland/>
- ADOBE. (n. d.). Vergleich der Dateiformate DWG und DXF. *Adobe Systems Software Ireland Limited*. Verfügbar 8. Juli 2022 unter <https://www.adobe.com/de/creativecloud/file-types/image/comparison/dwg-vs-dxf.html>
- AMANN, J., ESSER, S., KRIJNEN, T., ABUALDENIEN, J., PREIDEL, C. & BORRMANN, A. (2021). BIM-Programmierschnittstellen. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 263–290). Springer Fachmedien.
- AMANN, J., SCHÖTTL, F., SINGER, D., KERN, M., WIDNER, A., GEISLER, P., BELOW, D., HECHT, H., GUPTA, N., MUSTAFA, A., MARKIČ, Š. & BORRMANN, A. (2016). TUM Open Infra Platform 2017. <https://www.cms.bgu.tum.de/oip>
- APPELT, V., BARTNITZEK, J. & TILGER, K. (2021a). Vorlesungsunterlagen: BIM in der Verkehrsinfrastruktur, Einführung BIM I.
- APPELT, V., BARTNITZEK, J. & TILGER, K. (2021b). Vorlesungsunterlagen: BIM in der Verkehrsinfrastruktur, Einführung BIM II.
- BACH, A. & STIEHLER, D. (2021). BIM im Straßen- und Brückenbau. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 647–666). Springer Fachmedien.
- BALDWIN, M. (2019). *Der BIM-Manager: Praktische Anleitung für das BIM-Projektmanagement* (2. überarbeitete Auflage). Beuth Verlag GmbH.
- BARTNITZEK, J. & TILGER, K. (2021). Schnelle dynamische Modellgenerierung bei konkreten BIM-Anwendungen. In DVW E. V. UND RUNDER TISCH GIS E. V. (Hrsg.), *Leitfaden Geodäsie und BIM* (Version 3.0, S. 205–207).
- BIM4INFRA. (2019a). Datenaustausch mit Industry Foundation Classes (IFC). *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 5. Juli 2022 unter https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/08/BIM4INFRA2020_AP4_Teil9.pdf
- BIM4INFRA. (2019b). Handreichung BIM-Fachmodelle und Ausarbeitungsgrad. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 7. Juli 2022 unter https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil7.pdf

- BIM4INFRA. (2019c). Neutraler Datenaustausch im Überblick. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 5. Juli 2022 unter https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2019/07/BIM4INFRA2020_AP4_Teil8.pdf
- BMVI. (2015a). Aktionsplan Großprojekte. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 24. Juli 2022 unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/G/reformkommission-bau-grossprojekte-aktionsplan.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI. (2015b). Stufenplan Digitales Planen und Bauen. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 24. Juli 2022 unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI. (2016). Bundesverkehrswegeplan 2030. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 10. August 2022 unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/bundesverkehrswegeplan-2030-gesamtplan.pdf?__blob=publicationFile
- BMVI. (2021). Masterplan BIM Bundesfernstraßen V 1.0. *Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur*. Verfügbar 24. Juli 2022 unter https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/StB/bim-rd-masterplan-bundesfernstrassen.pdf?__blob=publicationFile
- BORRMANN, A., BEETZ, J., KOCH, C., LIEBICH, T. & MUHIČ, S. (2021). Industry Foundation Classes - Ein herstellerunabhängiges Datenmodell für den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 95–146). Springer Fachmedien.
- BORRMANN, A. & BERKHANN, V. (2021). Grundlagen der geometrischen Modellierung. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 35–51). Springer Fachmedien.
- BORRMANN, A. & KOCH, C. (2021). Software-Interoperabilität im Bauwesen - Hintergrund und Motivation. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 89–94). Springer Fachmedien.
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2015). *Building Information Modeling*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05606-3>
- BORRMANN, A., KÖNIG, M., KOCH, C. & BEETZ, J. (2021). *Building Information Modeling*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>
- BUILDINGSMART. (n. d.). Industry Foundation Classes (IFC) - An Introduction. *buildingSMART International*. Verfügbar 1. Juli 2022 unter <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc>
- BUILDINGSMART. (2022a). The EXPRESS Definition Language for IFC Development. *buildingSMART International*. Verfügbar 25. Juli 2022 unter https://standards.buildingsmart.org/documents/Implementation/The_EXPRESS_Definition_Language_for_IFC_Development.pdf
- BUILDINGSMART. (2022b). IFC 4.3.0.1 Documentation. *buildingSMART International*. Verfügbar 1. Juli 2022 unter <http://ifc43-docs.standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4x3/HTML/content/introduction.htm>

- CDBB. (2011). A report for the Government Construction Client Group Building Information Modelling (BIM) Working Party Strategy Paper. *cddb - Centre for Digital Built Britain*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter <https://www.cddb.cam.ac.uk/system/files/documents/BISBIMstrategyReport.pdf>
- CEN. (2020). EN17412-1:2020 Building Information Modelling - Level of Information Need - Part 1: Concepts and principles. *European Committee for Standardization*.
- DATAKUSTIK. (n. d.). CadnaA Referenzhandbuch. *DataKustik GmbH*. Verfügbar 3. Juni 2022 unter http://doku.datakustik.com/CadnaA/de_Referenz/index.html#t=CadnaA_DEU%2FProgramm_CadnaA%2FProgramm_CadnaA.htm
- DEGES. (2022). LOD-Konzept – Grundlagen. *DEGES Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs- und -bau GmbH*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter https://www.deges.de/wp-content/uploads/2020/02/BIM-LOD-Konzept_V16.pdf
- DESTATIS. (2022, 20. Januar). 2021 voraussichtlich erneut kein Bevölkerungswachstum. Verfügbar 3. Juni 2022 unter https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/01/PD22_027_124.html
- DEUTSCHE BAHN. (2022). Vorgaben zur Anwendung der BIM-Methodik - Digitales Planen und Bauen. *DB Station&Service AG*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter <https://www1.deutschebahn.com/resource/blob/1786332/088bfca0b6f36b716a39409523cb0cdf/Vorgaben-zur-Anwendung-der-BIM-Methodik-data.pdf>
- DIN. (2018). DIN EN ISO 16739-1:2018 Industry Foundation Classes (IFC) für den Datenaustausch in der Bauwirtschaft und im Anlagenmanagement - Teil 1: Datenschema. *Deutsches Institut für Normung*.
- DIN. (2019). DIN EN ISO 19650-1: Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) – Informationsmanagement mit BIM – Teil 1: Begriffe und Grundsätze. *Deutsches Institut für Normung*.
- EBERSTSHÄUSER, S., BRÜGGEMANN, T. & von BOTH, P. (2021). 3D-Stadtmodellierung: CityGML. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 243–261). Springer Fachmedien.
- EEA. (2020). Environmental noise in Europe - 2020. Verfügbar 6. Juni 2022 unter <https://www.eea.europa.eu/publications/environmental-noise-in-europe>
- FGSV. (2019). Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen: RLS-19 : Richtlinien zum Ersatz der RLS-90 mit der Verabschiedung der Änderung der 16. BImSchV (Ausgabe 2019).
- IFCOPENSHELL. (2022). IfcOpenShell the open source IFC toolkit and geometry engine. *ifcopenshell.org*. Verfügbar 7. Juli 2022 unter <http://ifcopenshell.org>
- IÖR. (2005, 20. Oktober). Deutsche Autobahnen - Entwicklung und Flächenwirkung. Verfügbar 6. Juni 2022 unter <https://idw-online.de/de/news132814>
- ISO. (2016). ISO 10303-21:2016-03 Industrielle Automatisierungssysteme und Integration - Produktdatendarstellung und -austausch - Teil 21: Implementierungsmethoden: Klartext-Kodierung der Austauschstruktur. *International Organization for Standardization*.

- JERNIGAN, F. E. (2008). *Big BIM, little bim: The practical approach to building information modeling; integrated practice done the right way!* (2. ed.). 4Site Press.
- KIT. (2022). FZKViewer. *KIT - Karlsruher Institut für Technologie*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter <https://www.iai.kit.edu/1648.php>
- MÖSER, M. (2015). *Technische Akustik*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-47704-5>
- PREIDEL, C., BORRMANN, A., EXNER, H. & KÖNIG, M. (2021). Common Data Environment. In A. BORRMANN, M. KÖNIG, C. KOCH & J. BEETZ (Hrsg.), *Building Information Modeling* (2. Auflage, S. 335–351). Springer Fachmedien.
- STATISTISCHES BUNDESAMT. (2021, 18. Juni). Länge der Autobahnen in Deutschland von 1995 bis 2020 (in Kilometern). *Statista*. Verfügbar 3. Juni 2022 unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2972/umfrage/entwicklung-der-gesamtlaenge-des-autobahnnetzes/>
- STMB. (n. d.). Verkehrsentwicklung. Verfügbar 3. Juni 2022 unter <https://www.stmb.bayern.de/vum/handlungsfelder/verkehrsinfrastruktur/verkehrsentwicklung/index.php>
- UMWELTBUNDESAMT. (2020). Lärmbelastungssituation in Deutschland [Umweltbundesamt]. Verfügbar 13. Januar 2022 unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_225-2020_laermbelaestigungssituation_in_deutschland_0.pdf
- VBI. (2016). BIM-Leitfaden für die Planerpraxis – Empfehlungen für planende und beratende Ingenieure. *Verband Beratender Ingenieure*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter https://www.vbi.de/wp-content/uploads/2019/10/VBI_BIM-Leitfaden_0916-final.pdf
- VDI. (2020). VDI-Richtlinie 2552 Blatt 1: Building Information Modeling - Grundlagen. *Verein Deutscher Ingenieure*.
- WHO. (2011). Burden of disease from environmental noise - Quantification of healthy life years lost in Europe. *WHO - World Health Organization*. Verfügbar 22. Juli 2022 unter https://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0008/136466/e94888.pdf