Maximilian Sternal | Lucian-Constantin Ungureanu | Laura Böger | Christoph Bindal-Gutsche (Hg.)

31. Forum Bauinformatik

11.–13. September 2019 in Berlin
Proceedings

Universitätsverlag der TU Berlin

Technische Universität Berlin

Maximilian Sternal | Lucian-Constantin Ungureanu | Laura Böger
Christoph Bindal-Gutsche (Hrsg.)

31. Forum Bauinformatik

FORUM BAUINFORMATIK

31. Forum Bauinformatik

11. bis 13. September 2019 in Berlin

Herausgeber*in:
Maximilian Sternal
Lucian-Constantin Ungureanu
Laura Böger
Christoph Bindal-Gutsche

Universitätsverlag der TU Berlin

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.dnb.de abrufbar.

Universitätsverlag der TU Berlin, 2019
http://verlag.tu-berlin.de

Fasanenstr. 88, 10623 Berlin
Tel.: +49 (0)30 314 76131 / Fax: -76133
E-Mail: publikationen@ub.tu-berlin.de

Diese Veröffentlichung – ausgenommen Zitate und anderweitig gekennzeichnete Teile – ist unter der CC-Lizenz CC BY lizenziert.
Lizenzvertrag: Creative Commons Namensnennung 4.0
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

Druck: Docupoint GmbH
Satz/Layout:
Laura Böger, Maximilian Sternal, Paul Merz, Amelia Städtler, Justus Dudenhöfer

Umschlagfoto:
Forum Bauinformatik | www.forum-bauinformatik.de

ISBN 978-3-7983-3104-4 (print)
ISBN 978-3-7983-3105-1 (online)

Zugleich online veröffentlicht auf dem institutionellen Repositorium der Technischen Universität Berlin:
DOI 10.14279/depositonce-8763
http://dx.doi.org/10.14279/depositonce-8763

Vorwort

Die Technische Universität Berlin ist mit dem Forum Bauinformatik seit seiner Anfangszeit eng verbunden. Bereits zum vierten Mal nach 1991, 2000 und 2010 freut sich das Fachgebiet Bauinformatik, nun gemeinsam mit dem Fachgebiet Systemtechnik baulicher Anlagen, Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen der Bauinformatik aus ganz Deutschland in Berlin begrüßen zu dürfen.

Das Forum Bauinformatik hat sich in den vergangenen 30 Jahren zu einem festen Bestandteil der aktuellen Forschung zur Digitalisierung des Bauwesens im deutschsprachigen Raum entwickelt. Es bietet dabei vor allem jungen Forschenden und Studierenden eine Plattform zur Präsentation und Diskussion ihrer Forschungsarbeiten.

In diesem Jahr dürfen wir insgesamt 51 spannende und hochwertige Beiträge vorstellen, die sich unter anderem mit den Themen Building Information Modeling, Verkehrssimulation, Visualisierung, Daten- und Projektmanagament, Optimierung und Ontologien beschäftigen. An dieser Stelle möchten wir uns bei allen Autoren, Co-Autoren und Reviewern für ihr Engagement bedanken, die das Forum Bauinformatik erst möglich gemacht haben. Ein herzliches Dankeschön auch an alle Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen der Fachgebiete Bauinformatik und Systemtechnik baulicher Anlagen, die sich mit viel Enthusiasmus und Ausdauer an der Vorbereitung und Durchführung beteiligt haben.

Berlin, September 2019

Laura Böger, Maximilian Sternal, Lucian Ungureanu, Christoph Bindal-Gutsche

Inhaltsverzeichnis

Session: Daten- & Projektmanagement

Prathap V. und Shetty S.	An approach to Open-BIM based Construction Project Management	1
M. Mellenthin Filardo	Praxisrelevante Auftraggeber-Informations-Anforderungen für Infrastrukturprojekte als Indikatoren des Einführungsgrades von BIM in Deutschland	9
C. Kreyenschmidt	Exemplary integration of machine learning for information extraction in existing Buildings	17
Danh Toan Nguyen	A knowledge-based value stream mapping simulation framework for predicting the environmental impact of the construction process	25
J. Ponnewitz und S. Schneider	Stand der Forschung zu BIM basierten Baugenehmigungsprozessen	33
J. F. Schüler und A.-H. Hamdan	Digitalisierung der Informationskette für Rückbauplanungen von Kernkraftwerken unter Berücksichtigung der BIM-Methodik	41
C. Eller, R. Irmler, T. Bittner und S. Franz	Teilautomatisierte Zusammenführung heterogener digitaler Daten aus multiplen Quellen im Rahmen der Tatortdokumentation	49

Session: Building Information Modeling

Sairah Badar	Leveraging BIM in Undergraduate Education at Disciplinary Level	57
P. Schneider-Marin und J. Abualdenien	A framework to facilitate an interdisciplinary design process using BIM	67
M. Rakić, A. Zahedi und J. Abualdenien	Adaptive minimized BIM-based communication and workflow during design phases	75
F. Stauch, Š. Jaud und D. Singer	A data model for construction pits	83
H. Hecht und Š. Jaud	TUM OpenInfraPlatform: The Open-Source BIM Visualisation Software	93
S. Esser und K. Aicher	IfcBridge Model Generation using Visual Programming	101

F. Lin, C. Kerbitz und Y. Fu	BIM based two-dimensional floor plan simulation and planning for evacuation	109
M. Rumnici und J. Abualdenien	The influence of design uncertainties in annual energy consumption	117

Session: Datenmodellierung & Ontologien

T. Kozak und A. Hamdan	Ein ontologisches Modell zur Repräsentation von Brücken	125
F. Eder, T. Euringer und M. Obergrießer	Ansatz zur automatisierten Ableitung eines objektorientieren BIM-Modells in eine relationale Datenbank	133
A. Hoffmann, T. Huyeng, M. Shi und A. Wagner	Verteilte Herstellerdatendienste zur Bereitstellung von Produktdaten im Web	141
A. Wagner, C. Nothstein, T. Rist, A. Hoffmann, T.-J. Huyeng und M. Shi	Zusammenführung modularer Ontologien zur Beschreibung parametrischer, multifunktionaler Bauprodukte in einem Semantic Web Kontext	149
M. Shi, A. Hoffmann, T. Huyeng und A.Wagner	Blockchain-based Data Synchronization for Product Catalogs in Distributed Systems	157
M. K. Seeaed und A. Hamdan	BIMification of stone walls for maintenance management by utilizing Linked Data	165
J. Werbrouck, M. Senthilvel, J. Beetz und P. Pauwels	A Checking Approach for Distributed Building Data	173
S. Franz, T. Bittner, R. Irmler, C. Eller	KI-Methoden für die automatische Anreicherung von räumlich-semantischen Tatortmodellen	183

Session: Simulation & Optimierung

J. Abualdenien und S. Pfuhl	Development of an MVD for checking fire-safety and pedestrian simulation requirements	191
F. Eickeler und J. Abualdenien	Improving pedestrian simulations with low power, high range sensor beacons	199
S. Shetty und K. Samiee	Tracking trajectories and breaking downtrajectory motions of a one-arm robot to assemble low LOD facade elements	209

A. Wellmann	Entwicklung und Integration eines Verkehrsmodells in eine Strömungssimulation zur Ermittlung von Schadstoffausbreitungen im urbanen Raum	217
F. Kremp und M. Artus	Evaluation of Sensor-Based Registration Accuracy using Head Mounted Augmented Reality Devices	225
A. Kessen und J. Grottke	Rekursive Bayesische Schätzverfahren zur smartphonebasierten Positionierung von Personen innerhalb von Gebäuden – Ein Vergleich von Unscented Kalman Filter und Partikelfilter	233

Session: Visualisierung & Bildverarbeitung

J. Krischler	Mixed Reality in der universitären Tragwerkslehre	241
K. Jahr	Über Baustellen Lernen – Wissensgewinn aus Luftbildern	249
P. Debus	Verbesserung der Risserkennung in UAS Bildern durch Fusion mehrerer Aufnahmen	257
T. Bittner und C.T. Thiele	Untersuchung des Potenzials der Unity-Engine für Entfluchtungssimulationen auf Basis der RiMEA	265
L. Nadenau und J. Martens	Evaluierung von Verfahren zur Indoor-Navigation eines humanoiden Roboters	275
S. Schürstedt und A. Geiger	Einsatz von VR-Technologien in BIM/GIS	283
T. Ilsemann, T. Potthast, P. Moritz und C. Eckert	Visualisierung stochastischer Phänomene bei einfachen strukturmechanischen Problemen mit Hilfe virtueller Realität	291

Session: Modellierung & Dateninteroperabilität

M. Block und P. Hagedorn	Durchgängige Interoperabilität in BIM-basierten Workflows durch den Einsatz von Webschnittstellen	299
J. Taraben	A model for building information management of structural inspections	307
V. Wolf und Š. Jaud	Eignung verschiedener Datenmodelle für den Austausch digitaler Modelle eines Bahnsteigs	315
P. Peralta, E.M. Mthunzi und S. Heine	A semantic model for additive manufacturing of concrete structures	323
J. Karlapudi und S. Shetty	A methodology to determine and classify data sharing requirements between OpenBIM models and energy simulation models	331

E. M. Mthunzi und H. Alsaad	Monitoring strategies for personalized heating, venti-lation, and air conditioning: A work in progress report	339
M. Polter	Workflow Engine zur Optimierung komplexer Ingenieuraufgaben	345

Session: Infrastruktur & Verkehrssimulation

A. Fehrenbach und Š. Jaud	Ein Vergleich von LoD-Konzepten im Infrastrukturbau	353
F. Pfitzner, I. Bratoev und Š. Jaud	Interactive Design of Noise Protection Walls	361
M. Mirboland	Describing road intelligent transportation systems using building information modeling	369
Simon Vilgertshofer	Unterstützung parametrischer Modellierung durch Graphersetzung: Automatisierte Erstellung von graphbasierten Modellrepräsentationen	377
P. Scheich	Analyse von Mobilfunkdaten in urbanen Regionen am Beispiel von CDR-Daten aus Mailand 2013	385
J. Wiggenbrock	Automatisierte Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen	393
N. Diekmann und C. Schiermeyer	Modellierung eines gerichteten Graphen zur Abbildung von Vorfahrtsregeln	401
M. L. Dannert und C. Schiermeyer	Graphbasierte Routensuche unter Berücksichtigung von Fahrstreifenwechseln	409

Forum Bauinformatik

1989	Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
1990	Brandenburgische Technische Universität Cottbus
1991	Technische Universität Berlin
1992	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen
1993	Technische Universität München, Fachgebiet Bauinformatik
1994	Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
1995	Universität Hannover, Institut für Bauinformatik
1996	Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bauinformatik
1997	Technische Universität Dresden, Lehrstuhl für Computeranwendungen im Bauwesen
1998	Bauhaus-Universität Weimar, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
1999	Technische Hochschule Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
2000	Technische Universität Berlin, Theoretische Methoden der Bau- und Verkehrstechnik, Institut für Bauingenieurwesen
2001	Technische Universität München, Lehrstuhl für Bauinformatik
2002	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Ingenieurinformatik im Bauwesen
2003	Universität Hannover, Institut für Bauinformatik
2004	Technische Universität Braunschweig, Institut für Computeranwendungen im Bauingenieurwesen
2005	Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl für Bauinformatik
2006	Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen
2007	Technische Universität Graz, Institut für Bauinformatik
2008	Technische Universität Graz, Institut für Informatik
2009	Universität Karlsruhe, Institut für Industrielle Bauproduktion und Entwerfen
2010	Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bauinformatik, Institut für Bauingenieurwesen

2011	University College Cork, Informatics Research Unit for Sustainable Engineering
2012	Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen
2013	Technische Universität München, Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation, Lehrstuhl für Architekturinformatik
2014	Technische Universität Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen
2015	Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Geodätisches Institut, Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme
2016	Leibniz Universität Hannover, Institut für Risiko und Zuverlässigkeit
2017	Technische Universität Dresden, Institut für Bauinformatik
2018	Bauhaus-Universität Weimar, Professur Informatik im Bauwesen
2019	Technische Universität Berlin, Fachgebiet Bauinformatik und Fachgebiet Systemtechnik baulicher Anlagen, Institut für Bauingenieurwesen

An approach to Open-BIM based Construction Project Management

Prathap Valluru[1] and Suraj Shetty[2]

[1]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Straße 31A · 01062 Dresden · E-Mail:prathap.valluru@tu-dresden.de
[2]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Straße 31A · 01062 Dresden · E-Mail:suraj_sunil_kumar.shetty@tu-dresden.de

Construction Project Management is a complex discipline in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry. The virtue of complexity in construction projects demands extensive research and efforts in formulating new organizational structures, techniques and other important methods towards the efficient management of construction activities. Moreover, there is a pressing need to devise new ways to integrate the construction management disciplines into Building Information Modelling (BIM) as BIM holds the key to a future of seamless interaction of various participants in a construction project.
Many BIM procedures are undefined today (Deutsch, 2011), because it is a new approach and the process depends on different professionals involved in the project. Randy Deutsch pointed out 12 major problems (Deutsch, 2011) included in the BIM process. One of the common problems in the BIM process is interoperability between BIM tools. To overcome these problems, there is a necessity to modify organizational structures, process optimization by using advancements in information technology. As in the process of data integration and interoperability investigation, the time schedule data is selected as project management parameters to prepare the 4D BIM model. To allow such development of 4D BIM models, its boundaries and constraints must be explored with respect to BIM. This research investigates possibilities and difficulties to integrate the Time Schedule Information (TSI) with a 3D BIM model. It also explains the current limitations in 4D BIM models in terms of exporting the modelled data in open BIM formats. Ultimately, the problem with data integration and data transferability with respect to model view denition and software compatibility are discussed in this paper.
Keywords: Building Information Modelling, Construction Project Management, 3D, 4D, Model View Definition.

1 Introduction

BIM is a process of identifying players, their requirements, their deliverables with the help of distinctive layers of analysis with interaction of policy and technology fields, generating the building data which have basic abilities to perform tasks and managing it in a usable digital format throughout its life cycle(Chuck Eastman and Liston, 2011; Succar, 2009; NIBS, 2008). In the last two decades, the main interest of BIM expanded to several AEC research domains like Construction Project Management(CPM)(Pauwels et al., 2017). However, implementation of BIM in the CPM domain is still facing many problems. For example, traditional work practices, levels of detail in project deliverables, the quality of data and the size of files(Tanyer and Aouad, 2005).

Project management is broadly divided into 10 knowledge areas(Garvin, 2000). However, the present study undertaken in this work attempts to concentrate on time management(TM)

aspects and their role in the BIM models. This study focuses on TSI which contains the essential information of TM.

As a first step in research work and also in order to have a better and clear understanding of the vast available data in the Industry Foundation Classes(IFC), the information related to TSI were gathered and categorized under 7 different labels based on the type and their purpose in TSI. As the next step towards better categorization of the data, a meta-model was devised in the form of a ow chart representing the various participating entities of TSI and their inter-relations with the aid of relational entities. With this fundamental organization of the available information, a methodology was proposed to integrate the TSI embedded in the metamodels with the 3D BIM models. In this paper TSI + 3D BIM model are considered as 4D BIM model. With the continuation of the work, the proposed BIM model development and its validation has taken place in the later stages. Finally, investigation results regarding the data quality and the interoperability obstacles in creating high-level BIM models are explained.

2 Logical meta models for construction project management data in the IFC schema

This section describes information and entities needed to represent the TSI in the IFC schema and establishes their relationship with each other using relationship entities.

2.1 Creating an openBIM meta data model for TSI by using the IFC schema

The information requirements to develop an open BIM data model for TSI are divided into 7 essential parts as mentioned below.The logical relationship between this information is shown in the figure 1.

- Work plan information,
- Work schedule information,
- Task information,
- Work calendar information,
- Resource information,
- Product information,
- Project information,

Planning, at its core, means to prioritize among various tasks by deciding on the efficient ways to execute them and also to allow the required time necessary for the process. This informa-tion is represented by the class IfcWorkPlan in IFC schema. Strictly speaking, IfcWorkPlan contains information on a set of work schedules. Scheduling provides information on dura-tion necessary to carry out each of the project tasks. An IfcWorkSchedule represents a task schedule of a work plan, which in turn can contain a set of schedules for different purposes.

The details and specifics about an identifiable piece of work and its associated tasks are contained in the task information. The task can generally pertain to the construction activity or installation of products but is not limited to these. The class IfcTask is used to represent the task information in IFC meta-dataschema. Work Calendar Information refers to the working and non-working time periods for tasks and resources. In the IFC schema, the Work Calendar Information is represented using the class IfcWorkCalendar.The IfcWorkCalendar also enables to define both specific time periods as well as repetitive time periods based on frequently used recurrence patterns.

Product Information represents the abstract information of any object in relation to its geometric or spatial context. It also represents information pertaining to non-physical items such as grid, annotation, structural actions, etc. The Product Information is represented by the class IfcProduct in the IFC schema.

The details or the information necessary to determine the costs, schedule and other impacts resulting through the usage of a resource or a product is defined in the class IfcResource. For example, the use of construction equipment or the amount of labor involved in the execution of work comes under Resource Information.

Relationship entities like IfcRelNests, IfcRelControl, IfcRelAggregates..etc are used to define objectified relationship between TSI entities.

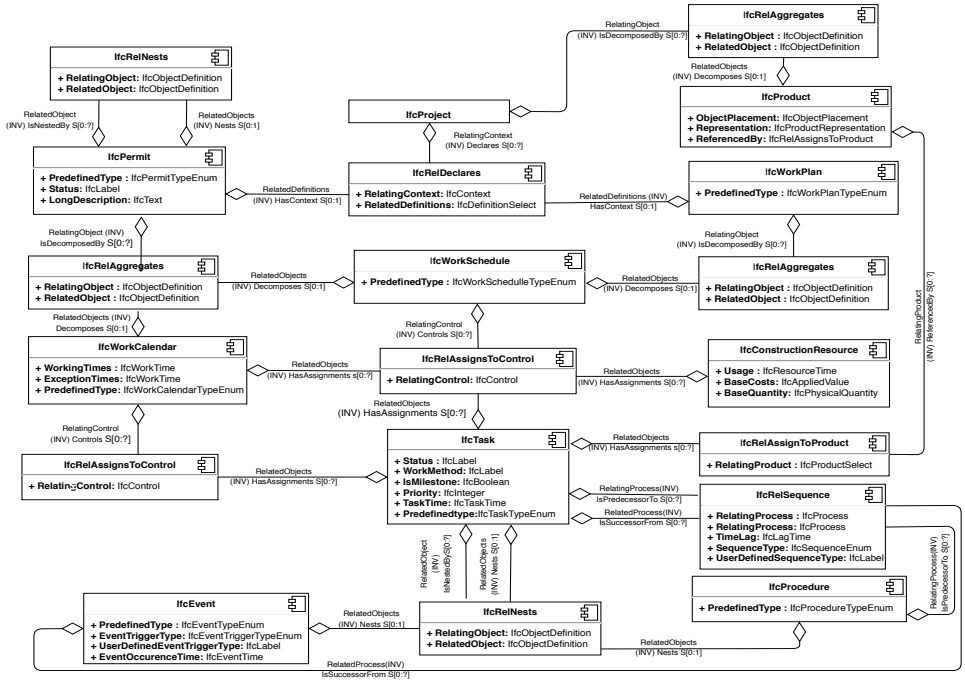


Figure 1: Logical meta data model for schedule information(TC184, 2013)

3 Methodology

The research methodology was carried out to add time and cost scheduling parameters to product information using the object-based IFC model. To achieve this the following methodology was developed. The individual steps are shown in figure 2

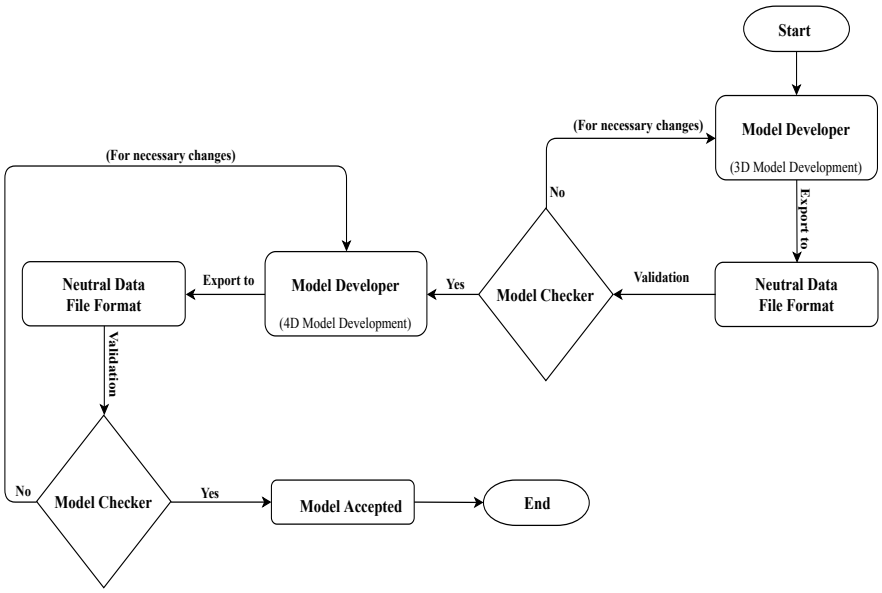


Figure 2: Methodology for 4D and 5D model development and validation

- As the first and intial step, the object based model is generated using the Model developer. The generated model is exported to a neutral format (IFC) which can be used across the software systems of other disciplines. However, before the model is exported to other software systems, the model is checked by model checkers.
- In case of any error or any incoherence regarding the quality of data, the findings are simultaneously reported by the model checker, and sent back to the native software for further modifications.
- In case of no error or quality anomalies, the object based model is imported to a 4D modelling application.There are two distinct ways to add TSI to the object based model. One way is to create tasks through software systems like SYNCHRO and AUTODESK NAVISWORKS. The other way is to import it through MS PROJECT. In this methodology the latter is chosen.
- After importing the data, the object based model is clubbed with the TSI and exported to a neutral file format.
- In the neutral file format, the validation is carried out by the model checker to find errors or discrepancies in the quality of the data. In case of errors, the findings are reported and sent to the 4D modelling application and also the native software application to resolve the errors.

- Alternatively, if the model checker validates the data in the neutral file format to be error free then the model is accepted. This model can subsequently be used across the different BIM applications.

The software applications used for model development and model validation are listed in the below table 1.

Table 1: BIM tools used for model development and model checking

Name	3D Model	4D Model
Model Developer	Revit	Synchro,MS Project, NAVISWORKS
Model Checker	Solibri	Solibri, IFCDOC
Neutral File Format	IFC	IFC

4 BIM Model Development, Validation and Result Analysis

4.1 4D BIM Model Development

A BIM model of a residential building is developed using the Revit 2019 tool. The building comprises of roof, floor, windows, rooms, doors, and railing elements along with external and internal walls.The model is converted to IFC using the export option of Revit 2019. The Model View Definition called Design Transfer View is used to transfer the information into the IFC file. With this, the base quantities and element properties contained in Revit are transferred to IFC.

The model validation is done by using the model checker Solibri. The object based data model generated using Revit is exported to the model checker in IFC format. The validation of the model data is carried out by a model checker called Solibri. The model checker essentially checks the input data which is comprised of the various elements of a structure.After validation the IFC data model is sent to the 4D modelling platform where the data is combined with time schedule information. The figure 3 depicts the 4D BIM model.

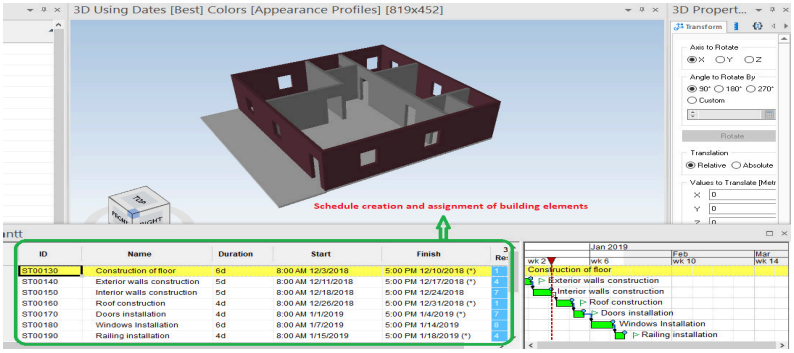


Figure 3: 4D BIM Model

4.2 BIM Model Data validation results

In 4D model development, the results analysis is carried out in two critical stages. These are: (1) data sharing stage between the 3D and 4D BIM tools and (2) the 4D model validation stage. In the first stage, the 3D BIM model data quality is checked using the model checker and then interoperability problems are addressed during the 3D model export to the 4D BIM tool. The model elements considered for the validation are roof, floor, window, door, railing, slab and wall. The data compared consists of length, width, height, area and volume parameters. The data considered for different elements had no deviation in Solibri when compared with Revit except for wall elements.

The investigation results for wall elements point out that in case length is compared across the different software tools, the deviations or the percentage error in the IFC file, Solibri, Synchro and Navisworks are the same. It can be observed that the length values are different in Revit compared to the IFC file but the area and volume values are similar. The reason behind this is that Revit measures length values from center to center and the area is calculated using the face of the wall. The length values exported to the IFC file are end to end. Thus, it is always good to use length values in IFC file to calculate the area or to verify the area values. There is absolutely no error in the measured data across the different softwares when measured with width, height, area and volume parameter.

In the second stage, the data quality of the developed 4D model has been checked. However, it was found that Solibri invalidated the 4D data model because of the absence of TSI in the model imported in Solibri. To ascertain whether Solibri invalidated the data because of the absence of time schedule information in the IFC file itself or Solibri invalidated despite importing the TSI in the 4D model, the step file generated during the export of the IFC file was checked. On examining the step file, the time schedule information was found in it. These information can be seen in the figure 4.

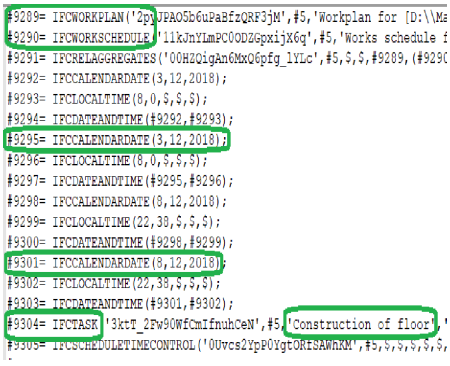


Figure 4: 4D Model time schedule information in IFC step file

Figure 5: 4D model validation using the IFC subschema

Further investigation was carried out to check if the data contained in the step file was adherent to the standards prescribed by the IFC schema, the step file data was checked against the View Definition called General Usage in the IFCDOC tool. It was found that the entities

and attributes of TSI found in the step file matched those with the prescribed View Definition called General Usage of the IFC schema. As it can be seen in figure 5, the highlighted green entities required to generate the IFC file for the validator matched with that of the General Usage defined by the IFC schema. From this, we are certain that the 4D model exported from Synchro to Solibri contains all the relevant data pertaining to TSI and no data mismatch has occurred.

Nevertheless, Solibri rendered the 4D model as invalid. To identify the underlying cause, a thorough examination of the import and export methodology of the softwares was carried out and found that these applications use Model View Definitions to filter the incoming and outgoing data. TSI is excluded from the data when applications make use of the Model View Definition(MVD). The main reason behind this is the current three MVDs (co-ordination view, reference view and design transfer view) does not contain the information related to the time schedule information. Thus it can be concluded that Model View Definition play a crucial role in importing and exporting data.

5 Conclusion

One of the objective of this work is to develop logical meta models to support usage of CPM data based on open meta-data schemes. The other being, to develop methodologies to integrate construction project management parameters into the 3D BIM models. Also, to investigate the interoperability problems during the data sharing between different discipline tools by using neutral data file formats.

The proposed methodology aimed at developing the 4D BIM model which is a combination of a 3D BIM model and TSI. The workflow in the methodology comprises of 4D model development and 4D model validation . The first stage dealing with the 4D model development resulted in a success with acceptable deviations. However, next stage dealing with exporting of the 4D model in IFC file format and the validation of the same posed challenges. Using Synchro there was a successful export of the 4D model in the IFC format.Yet, when the model was imported by the model checker, Solibri, the model was rendered invalid.

To investigate the cause, the step file of the 4D model was checked against the existing comprehensive IFC sub-schema and it was found that the contents of TSI in the IFC file matched with that of the IFC sub-schema. On further investigation, it was found that the Model View Definition used by the software applications for import and export of the data, was primarily responsible for filtering out the data and the fact that current MVDs invariably discarded the TSI. This makes the data not only invalid when it is passed on to a model checker but also when there is a necessity to use this data in other applications.

References

Chuck Eastman, Paul Teicholz, R. S. and Liston, K. (2011), *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, managers, designers, engineers and contractors*, John Wiley & Sons.

Deutsch, R. (2011), *BIM and integrated design: strategies for architectural practice*, John Wiley & Sons.

Garvin, J. (2000), 'A guide to project management body of knowledge', *Project Management Institute, Newton Square, PA* .

NIBS (2008), *United states national building information modeling standard, version 1-part 1: Overview, principles, and methodologies*.

Pauwels, P., Zhang, S. and Lee, Y.-C. (2017), 'Semantic web technologies in aec industry: A literature overview', *Automation in Construction* **73**, 145–165.

Succar, B. (2009), 'Building information modelling framework: A research and delivery foundation for industry stakeholders', *Automation in construction* **18(3):357–375**.

Tanyer, A. M. and Aouad, G. (2005), 'Moving beyond the fourth dimension with an ifc-based single project database', *Automation in Construction* **14**(1), 15–32.

TC184, I. (2013), 'iso 16739: 2013 industry foundation classes (ifc) for data sharing in the construction and facility management industries', *International Organization for Standardization (ISO)* .

Praxisrelevante Auftraggeber-Informations-Anforderungen für Infrastrukturprojekte als Indikatoren des Einführungsgrades von BIM in Deutschland

Martina Mellenthin Filardo[1]

[1]Professur Baubetrieb und Bauverfahren · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 7 · 99423 Weimar · E-Mail:martina.mellenthin.filardo@uni-weimar.de

Im Rahmen der Einführung von Building Information Modeling (BIM) in Deutschland ist die Formulierung der Anforderungen an die zu erzeugenden Daten durch den Auftraggeber – sogenannte AIAs – zu Projektbeginn erforderlich. AIAs finden in Deutschland bereits Verwendung, obwohl entsprechende Richtlinien und Vorgaben noch in Entwicklung sind. Dieser Beitrag untersucht die Einführung dieser Unterlagen anhand eines Vergleichs von in Deutschland bereits verwendeten AIAs. Die Praxistauglichkeit der erhaltenen Dokumente wurde auf Basis eines Referenzbeispiels überprüft, welches internationalen Standards entspricht und auf Mensch- und Maschinenlesbarkeit der Dokumente eingeht. Folglich werden Empfehlungen für die Formalisierung dieser Dokumente in Deutschland formuliert und ein Ausblick zu Entwicklungsmöglichkeiten und Risiken geboten.

Keywords: BIM, Auftraggeber-Informations-Anforderungen, AIA, Infrastruktur, Leistungsphase 0

1 Einleitung

Durch den vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) aufgestellten Stufenplan zur Einführung von Building Information Modeling (BIM) in Deutschland sind neu zu planende Projekte des Infrastrukturbaus entsprechend dem Leistungsniveau 1 ab 2020 zu realisieren. Die durch das Leistungsniveau 1 entstehenden Mindestanforderungen ziehen verpflichtende Dokumente wie die Auftraggeber-Informations-Anforderungen (AIA) mit sich, welche die integrale Planungs-, Realisierungs- und Betriebsmethode BIM unterstützen sollen. AIAs beziehen sich auf die Formulierung der Anforderungen an die Daten während eines Projektes – welche Daten zu welchem Zeitpunkt in welcher Detailtiefe und in welchem Format zu liefern sind – die zu Anfang des Projektes durch den Auftraggeber zu definieren sind (BMVI 2015). Um diese Anforderungen präzise formulieren zu können, muss ein gewisser Grad an Verständnis zur BIM-Methode vorhanden sein. Im Umkehrschluss kann gesagt werden, dass die Reife der formulierten AIAs als Indikator für das mit der Einführung von BIM in Deutschland verbundene Wissen gelesen werden kann.

Des Weiteren ist einer der großen Vorteile der BIM-Methode die Konsistenz der Informationen während des Lebenszyklus eines Bauwerks (Günthner and Borrmann, 2011). Diese Konsistenz kann durch die automatisierte Übernahme von Informationen wie Koordinaten, Projektinformationen, Definitionen von Level of Detail (LOD) und Level of Information (LOI)

usw. von Projektanfang an verstärkt werden. Im Umkehrschluss kann auch behauptet werden, dass nicht von Digitalisierung in Deutschland die Rede sein kann, wenn für die Durchführung eines Projektes ausschlaggebende Informationen zunächst händisch/manuell interpretiert und ein- bzw. übertragen werden müssen.

2 Vorhandene Vorschriften

Im Ausland konnten in Niederlande im Rahmen dieser Recherche wenige Ansätze zur Regulierung von AIAs gefunden werden. Im Vereinigten Königreich gibt es mehrere Bemühungen sowie Richtlinien und Vorlagen für die äquivalenten Employer's Information Requirements (EIR), da sie dort bereits in 2013 eingeführt und standardisiert wurden (Public Access Specification (PAS) 1192). Dort wird die Übereinstimmung mit dem Datenstandard Construction Operations Building Information Exchange (COBie-UK) vorgeschrieben, wodurch die EIRs zumindest teilweise maschinenlesbar sein müssen (NBS 2015).

In Deutschland befinden sich zurzeit Vorschriften zur Erstellung von AIAs und den darauf abzustimmenden BIM-Abwicklungsplänen (BAPs) noch in Entwicklung. Die voraussichtlich zum Ende des Jahres 2019 entstehende VDI-Richtlinie „2552 Blatt 10 Building Information Modeling; Auftraggeber Informationsanforderungen (AIA) und BIM-Abwicklungspläne (BAP)“ stellt zurzeit die größte nationale Hoffnung in dem Bereich dar. Sie soll Unterstützung für Auftraggeber und -nehmer liefern anhand dessen die genannten Dokumente erstellt werden sollen. Dies kann beispielsweise in Form von Checklisten geschehen (VDI 2019), wobei es sich in Zukunft noch zeigen wird ob Checklisten für die Erstellung von praxistauglichen AIAs und BAPs ausreichend sind.

Da bereits mit der BIM-Methode in Deutschland gearbeitet wird – wenn auch nicht flächendeckend – befinden sich mehrere AIA-Dokumente auf dem Markt. Diese werden nach bestem Wissen und Gewissen erstellt und für die Planung und Realisierung von Bauvorhaben verwendet.

3 Auftraggeber-Informations-Anforderungen

3.1 Ziele von AIAs

BuildingSMART definiert AIAs als „den Informationsbedarf des Auftraggebers, der als Anforderung an den Auftragnehmer beschrieben wird. Die Auftraggeber-Informationsanforderungen definieren, wann, in welchem geometrischen und alphanumerischen Detaillierungsgrad, in welchem Format, für welchen BIM-Anwendungsfall und von welchem Planer die geforderten Daten geliefert werden sollen, um die Ziele des Auftraggebers zu erreichen“ (buildingSMART e. V., 2017). AIAs beziehen sich somit eindeutig auf die zu erzeugenden Daten.

Für die Erstellung von projektspezifischen AIAs müssen sich Auftraggeber vor Projektbeginn über das Bauvorhaben Gedanken machen. Auftragnehmer hingegen müssen als Antwort darauf einen BAP erstellen, was auch eine kritische Auseinandersetzung mit dem Bauvorhaben voraussetzt. Somit haben diese Dokumente gemeinsam das risikominimierende Potenzial diverse Stakeholder während Planung, Realisierung und ggf. auch im Betrieb zu unterstützen.

3.2 Aufbau von AIAs (Referenzgliederung)

Die analysierten Dokumente aus dem deutschen Markt variieren sowohl hinsichtlich der Formulierung der Inhalte als auch von der Gliederung her sehr stark. Um die AIAs vergleichen zu können, musste zunächst ein Referenzbeispiel erzeugt werden mit dem die zur Verfügung stehenden Dokumente verglichen werden können. In diesem Zusammenhang wurde ins Ausland geschaut (siehe 2), da sich die notwendigen nationalen Standards noch in Entwicklung befinden.

Anhand der Vorlage für EIRs der Nordirischen Finanzabteilung, welche nach dem zurzeit ausgereiftesten Standard erstellt wurde (PAS 1192), konnte die in Tabelle 1 (siehe 4.1) abgebildete Referenzgliederung erarbeitet werden. Die Gliederungspunkte und Erklärungen aus der nordirischen Vorlage wurden inhaltlich und hinsichtlich ihrer Relevanz innerhalb der deutschen Bauindustrie untersucht und so formuliert, dass sie den selben Inhalt auf deutscher Sprache widerspiegeln. Die Referenzgliederung wird in drei Bereiche unterteilt:

1. Technische Anforderungen
2. Management Anforderungen
3. Kommerzielle Anforderungen

Technische Anforderungen betreffen Vorgaben zur Software, zu Datenaustauschformaten, dem Detaillierungsgrad (LOD) sowie Anforderungen an das Level of Information (LOI) sowie Level of Geometry (LOG) der jeweiligen Modelle. Mögliche technischen Randbedingungen bzw. Grenzen auf Auftraggeberseite sind an dieser Stelle zu definieren.

Unter Management Anforderungen fallen Anforderungen an den durch den Auftragnehmer zu erstellenden BIM-Abwicklungsplan (BAP), Zuständigkeiten (Rollen und Verantwortlichkeiten), zu beachtende Normen innerhalb des Projektes, Angaben zum Urheberrecht, Vorgaben zu Datentrennung und Dateinamenskonventionen, zur kontinuierlichen Sicherung der im Laufe des Vorhabens entstehenden Daten, Kollisionsprüfung, Koordination und Kollaboration. Des Weiteren sind die Gewährleistung der Modell-Integrität zu beschreiben, Angaben zu Ausbildungs- und Trainingsmaßnahmen sowie eine Strategie zu erläutern, zur verlässlichen Zustellung der für den Betrieb (Facility Management) notwendigen Informationen samt Kompatibilität von Software-Lösungen. Ein weiterer Gliederungspunkt sind die sogenannten COBie-Anforderungen in Form von ausfüllbaren Tabellen, in denen Angaben vor allem zur technischen Ausrüstung für die Wartung zu erfassen sind (Central Procurement Directorate, 2019).

Kommerzielle Anforderungen beschränken sich auf die Datenlieferung (Data Drops) sowie Projektergebnisse, den strategischen Zielen des Auftraggebers und welche Anwendungsfälle (AwF) benötigt werden, um die definierten Ziele zu erreichen.

Zusätzlich zu den Inhalten der drei Teilbereiche gehören allgemeine Projektinformationen zu den unabdingbaren Inhalten von AIAs. Da diese selbstverständlich in einem solchen Dokument enthalten sein müssen, wurden sie für den Vergleich nicht herangezogen, sondern als vorhanden vorausgesetzt.

3.3 Form von AIAs

Zur Gewährleistung einer automatisierten Übertragung der Informationen und Anforderungen eines Vorhabens sollten sowohl die Mensch- als auch die Maschinenlesbarkeit und Weiterverarbeitbarkeit von AIAs beachtet werden. Um ein AIA-Dokument maschinenlesbar zu gestalten, ist zu beachten, dass Maschinenlesbarkeit bei Fließtexten und bei herkömmlichen PDF-Dateien – die gegenwärtig gängigsten Formen der AIAs – nicht gegeben ist. Um die Lesbarkeit und ggf. die Weiterberarbeitung durch eine geeignete Software zu gewährleisten, ist zu beachten, dass die Informationen:

- in elektronischer Form und
- in strukturierter Art und Weise

verfügbar sein müssen (GovDATA - Das Datenportal für Deutschland, 2014). Verbreitete Formate sind zu bevorzugen, wenn sie einem offenen Standard entsprechen. Bewehrte Formate sind (Bundesverwaltungsamt, 2018):

- CSV
- XML
- RDF
- JSON

4 Vergleich bereits verwendeter AIAs in Deutschland

4.1 Datensammlung und Vergleich

Im Winter 2018 wurden AIAs verschiedener Einrichtungen und Unternehmen gesammelt. Auf Grund ihrer Vollständigkeit und Repräsentativität wurden sieben der gesammelten Dokumente zum Vergleich gezogen. Um keinen Rückschluss auf einzelne Institutionen zu erlauben, wurden die Dokumente anonymisiert, wobei gesagt werden kann, dass alle Dokumente sich auf Infrastrukturprojekte beschränken. Die analysierten Dokumente wurden von öffentlichen Auftraggebern direkt sowie im Auftrag dieser durch Ingenieurbüros oder Bauunternehmen zwischen 2016 und 2018 erstellt. Keins der erhaltenen Dokumente kann in der gelieferten Form durchgehend maschinell gelesen werden (Sacks et al., 2018), da wie in 3.3 genannt, für die Maschinenlesbarkeit der Dokumente eine Strukturierung der Informationen vorausgesetzt wird.

In Tabelle 11 werden die vorhandenen Dokumente (Spalten AIA 1 - 7) hinsichtlich der Übereinstimmung der aufgeführten Inhalte mit der erzeugten Referenzgliederung (linke Spalte)

verglichen. In der rechten Spalte kann abgelesen werden, wie viel Übereinstimmung je Zeile erreicht werden konnte.

Tabelle 1: Referenzgliederung für den Vergleich der AIAs aus der Praxis hinsichtlich ihrer Übereinstimmung (grün = vorhanden, rot = nicht vorhanden) mit den in der Gliederung genannten Inhalte.

Referenzgliederung	AIA1	AIA2	AIA3	AIA4	AIA5	AIA6	AIA7	Summe quer
1. Technische Anforderungen								
Software								5/7
Datenaustauschformate								7/7
Koordinatensysteme								6/7
Detaillierungsgrad, LOD								6/7
LOI, LOG								6/7
IT-Randbedingungen des AG								**1/7**
2. Management Anforderungen								
BAP								6/7
Rollen und Verantwortlichkeiten								6/7
Zu beachtende Normen								**1/7**
Urheberrecht								**3/7**
Datentrennung, -benennung								7/7
Sicherung der Daten								**2/7**
Koordination, Kollisionsprüfung								5/7
Kollaboration (CDE)								5/7
Modell-Integrität								6/7
Ausbildung, Training								**2/7**
Zustellstrategie (für den Betrieb)								**0/7**
COBie-Tabellen o. gleichwertig								**0/7**
3. Kommerzielle Anforderungen								
Data Drops, Projektergebnisse								5/7
Strategische Ziele (AG)								6/7
BIM-Anwendungsfälle								7/7
Übereinstimmung	**64%**	**50%**	**86%**	**68%**	**50%**	**50%**	**55%**	**Ø 63%**

Untersucht wurden nicht nur die Überschriften der Gliederungspunkte in den gesammelten Dokumenten, sondern auch die Inhalte dieser nach ihrer Übereinstimmung mit der Referenzgliederung.

Die Übereinstimmung wird prozentual gemessen und die Inhalte der Referenzgliederung gleich gewichtet, da davon auszugehen ist, dass nur notwendige Inhalte in den AIAs behandelt werden. Inhalte, die im Vorhinein als irrelevant oder unangemessen in einer AIA bzw. für den deutschen Markt eingeschätzt wurden, wurden nicht in der Referenzgliederung aufgenommen.

Das im Vergleich am besten bewertete Dokument erreichte überdurchschnittliche 86% Übereinstimmung während die am schwächsten bewerteten AIAs 50% erhielten. Im Durchschnitt haben die ausgewerteten Dokumente eine Übereinstimmung von 63% mit der erarbeiteten Referenzgliederung erreicht.

5 Auswertung und Ausblick

Bei dem Vergleich wurde deutlich, dass die Technischen Anforderungen in den deutschen AIAs nahezu flächendeckend betrachtet werden. Negativ fallen die Angaben zu möglichen IT-Randbedingungen durch den Auftraggeber auf, welche lediglich in einem Dokument kurz angesprochen wurden. Die Kommerziellen Anforderungen werden durchschnittlich ebenso gut behandelt.

Auffällig ist die vergleichsweise sehr niedrige Übereinstimmung der Management Anforderungen mit der Referenzgliederung. Stellenweise erreichten die ausgewerteten Dokumente in diesem Abschnitt lediglich 4 von 12 Punkten Übereinstimmung. Dies ist besonders den mangelnden Anforderungen und Vorgaben durch deutsche Auftraggeber geschuldet, insbesondere zu Urheberrechten, zu beachtenden Normen, zur durchgehenden Sicherung der Daten sowie Angaben zu Ausbildungs- und Trainingsmaßnahmen. Des Weiteren zeigen die abwesenden Strategien für die Zustellung der Bauwerksinformationen bis hin zum Betrieb sowie Angaben zu bzw. ausfüllbare COBie-Tabellen, dass der COBie-Standard in Deutschland keine Verwendung findet und dass deutsche Auftraggeber nicht lebenszyklusübergreifend arbeiten.

Eine weitere Erkenntnis bezieht sich auf den Umfang der zu erstellenden Dokumente. Dies wurde nicht nur an den unterschiedlichen Seitenzahlen deutlich (zwischen 19 und 54 Seiten), sondern auch anhand der sehr heterogenen Gliederungen dargestellt. In dem Vergleich wurden Gliederungspunkte und Inhalte festgestellt, auf die die ausgewerteten Dokumente eingehen, die in der Referenzgliederung nicht aufgeführt werden:

- Definitionen
- Abkürzungen
- Kostengliederung
- Abweichungs- und Mängelmanagement
- Digitale Bauwerksakte

Es bleibt zu prüfen, ob und um welche der gelisteten Inhalte die Referenzgliederung erweitert werden sollte.

Des Weiteren fiel AIA 3 mit 86% Übereinstimmung positiv auf. Bei näherer Betrachtung dieses Dokumentes wurde deutlich, dass obwohl die meisten verlangten Inhalte aufgeführt werden, sämtliche dieser als Fließtext formuliert wurden und somit für die automatisierte Weiterverarbeitung ungeeignet sind.

In dem durchgeführten Vergleich wurden die Inhalte der zur Verfügung stehenden AIAs auf ihre Übereinstimmung mit den in der Referenzgliederung genannten Inhalte geprüft. Auf die Form und Verständlichkeit von AIAs wird in Tabelle 2 auszugsweise eingegangen. Hier werden die Vorgaben an die Software aus einem der ausgewerteten Dokumente entnommen (linke Spalte) und mit Anforderungen an die Software in strukturierter Art und Weise gegenübergestellt (rechte Spalten).

Tabelle 2: Gegenüberstellung der Anforderungen an die Software einer herkömmlichen AIA in unstrukturierter Form (links) mit einer strukturierten Form (rechts).

Unstrukturierte Form (Auszug aus einer der gesammelten AIA)
Datenaustausch- und Datenübergabeformate
„Die Auswahl von adäquater Software, z.B. für die 3-dimensionale, geometrische Modellierung der […] bleibt dem beteiligten AN überlassen. Sie muss jedoch für den gewählten Datenaustausch geeignet sein. Die verwendete(n) Software-Lösung(en) unter Angabe der Version sind mit dem AG und dem Objektplaner […] abzustimmen […].“

Strukturierte Form (beispielhaft)	
Datenaustausch- und Datenübergabeformate	
Software	Frei
Anforderungen	Geometrische Modellierung
	Attribute (Bereicherung der Geometrie mit Informationen)
Datenaustausch	IFC
Angaben BAP	Gewählte Software
	Version
Abzustimmen mit	Objektplaner

Durch die exemplarisch dargestellte strukturierte Aufbereitung von Inhalten kann eine automatisierte Übertragung von Anforderungen und Informationen über mehrere Lebenszyklusphasen hinweg ermöglicht werden.

Gelten die aus der Praxis gesammelten und ausgewerteten AIAs als Indikatoren für den Fortschritt der Einführung von BIM in Deutschland, zeigt sich anhand der Ergebnisse, dass diese besonders unregelmäßig und stellenweise nur mit begrenzter Fachkenntnis abläuft (siehe AIA 2 und 5, die keine Vorgaben zur Software machen, oder AIA 6 und 7, die keine Data Drops vorsehen). Insbesondere Themen, die mit Management Anforderungen verbunden sind, werden in den ausgewerteten Dokumenten größtenteils (siehe Tabelle 1) nicht in der vorgesehenen Tiefe oder dem Umfang behandelt, was zu lückenhaften Dokumenten führt. Darüber hinaus ist der reibungslose Informationsfluss in der aktuellen Form (siehe Beispiel in Tabelle 2 linke Spalte) nicht gewährleistet, da ein Großteil der Informationen, wie bereits erwähnt, individuell interpretiert und händisch übertragen werden müssen.

Hoffnung auf Besserung besteht, wenn die erwartete Richtlinie VDI 2552 Blatt 10 die nötige Unterstützung liefern kann und auch entsprechend akzeptiert, umgesetzt und ausgebaut wird.

In einem nächsten Schritt werden die gesamten Inhalte der ausgewerteten Dokumente in Anlehnung an Tabelle 2 strukturiert aufbereitet, auf Vergleichbarkeit und Tiefe der Formulierungen untersucht. In einem weiteren Schritt ist eine AIA basierend auf den ausgewerteten Ergebnissen zu entwickeln und innerhalb eines (an-)laufenden Projektes zu evaluieren.

Literatur

buildingSMART e. V. (2017), ‘Buildingsmart-projektgruppe "grundlagen für aia und bap“’.
URL: *https://www.buildingsmart.de/kos/WNetz?art=News.show&id=704*

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015), ‘Stufenplan digitales planen und bauen’.
URL: *https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplandigitales-bauen.pdf?__blobp̄ublicationFile*

Bundesverwaltungsamt (2018), ‘Leitfaden Anforderungen an die Daten (Anhang 2)’.
URL: *https://www.bva.bund.de*

Central Procurement Directorate (2019), ‘Employer’s information requirements for building information modelling (bim)’.
URL: *https://www.finance-ni.gov.uk/publications/procurement-guidance-note-0315-building-information-modelling-bim*

GovDATA - Das Datenportal für Deutschland (2014), ‘Die zehn open-data-kriterien der sunlight-foundation’.
URL: *https://www.govdata.de/documents/10156/18448/GovData_Open-Data-Kriterien_der_Sunlight_Foundation.pdf/dca8fea08e044de085312bc3e8d4abc0*

Günthner, W. and Borrmann, A., eds (2011), *Digitale Baustelle innovativer Planen, effizienter Ausführen: Werkzeuge und Methoden für das Bauen im 21. Jahrhundert*, VDI-Buch, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.

Sacks, R., Eastman, C. M., Lee, G. and Teicholz, P. M., eds (2018), *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers*, third edition edn, Wiley, Hoboken, New Jersey.

Tina Pringle (2015), ‘Technical support - employer’s information requirements’.
URL: *https://toolkit.thenbs.com/articles/employers-information-requirements*

VDI-Fachbereich Bautechnik (n.d.), ‘Vdi 2552 blatt 10: Building information modeling; auftraggeber informationsanforderungen (aia) und bim-abwicklungspläne (bap)’.
URL: *https://www.vdi.de/richtlinien/details/vdi-2552-blatt-10-building-information-modeling-auftraggeber-informationsanforderungen-aia-und-bim-abwicklungsplaene-bap*

Exemplary integration of machine learning for information extraction in existing buildings

C. Kreyenschmidt

Institute for database-oriented engineering · Jade University of applied science · Ofener Strasse 16 · 26121 Oldenburg Germany · e-mail: christian.kreyenschmidt@jade-hs.de

The developments in object recognition and machine learning are expected to make significant contributions in the survey of the existing building stock and building components. The paper describes some exemplary integration and the challenges of extracting information by object recognition in image or video data sets for existing building stock. The ultimate aim of a machine learning (ML) algorithm is the recognition of objects and semantic information extraction for the further planning process. A lot solutions are already in progress to support engineers in their decision. In the material industry the method of machine vision in combination with machine learning has already be successfully applied for the sorting and classification of material. Many of these developments could be transferred to existing building material classification. Damage mapping and evaluation is already supported by machine learning methods to assist responsible engineers in their damage assessment. This paper considers advantages and possibilities of the implementation of machine learning algorithms. Some pre-trained networks are useful for applications and goals in the information extraction of existing building stocks. Another big challenge is how to handle the evaluation of the algorithm results and how to improve the predictions according to the existing methods.

Keywords: machine learning, object detection, damage mapping, image supported, material classification, existing building

1 Introduction

1.1 Motivation

For the modern planning process of construction BIM (Building Information Modeling) is indispensable. In addition to the planning and execution phases, the facility managers of the buildings benefits from the utilization of information generated in earlier phases. The German and European markets are characterized by existing construction. From 2000 to 2018 the average value of construction costs was around 70% in the existing residential construction. The average value of non-residential construction in the similar period was around 60%[1] . Many of the findings and reference projects in terms of BIM are related to the new construction (BIMiD-Konsortium (2017)) (Helmus (2018)). To benefit from BIM-planning for existing buildings it is necessary to combine and automate the acquisition of information with the geometrical survey. This would allow the initial planning uncertainties to be reduced and the planning process to get safer (Dimitrov and Golparvar-Fard (2014)), especially for existing

[1] Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung

buildings. Today, the geometric survey of buildings can be done faster and with high accuracy via a laser scan. The attribution of components is still strongly influenced by the manual additions in the model. The synonym for this approach can be defined as a scan-to-BIM process. This paper describes preliminary experiential applications for ML for the attribution assignment of existing buildings. ML is an area in computer science and is partly dedicated to pattern recognition in the field of image analysis (Simon, 2019).

1.2 Basic idea

The main focus of this paper are own experiments as well as their relation to the scientific state of the art. The experiments are a preliminary work for future research, which consists information recognition, -extraction and -transfer for timber structures in existing buildings. Besides the acquisition of the data, the automated evaluation of the results is a challenge in the creation of machine learning algorithms for this field. The procurement and qualitative preparing of training data is often very labor-intensive because large datasets must first be checked for accuracy and consistency (Spencer Jr et al. (2019)). For some applications the evaluation of results can be supported by additional sensors (Beckman et al. (2019)). A number of efficient implementations of a wide range of ML algorithms are ready to use for own developments. The spectrum of ML algorithms is wide and Fig. 1 provides an over-view of algorithm categories and their field of application.

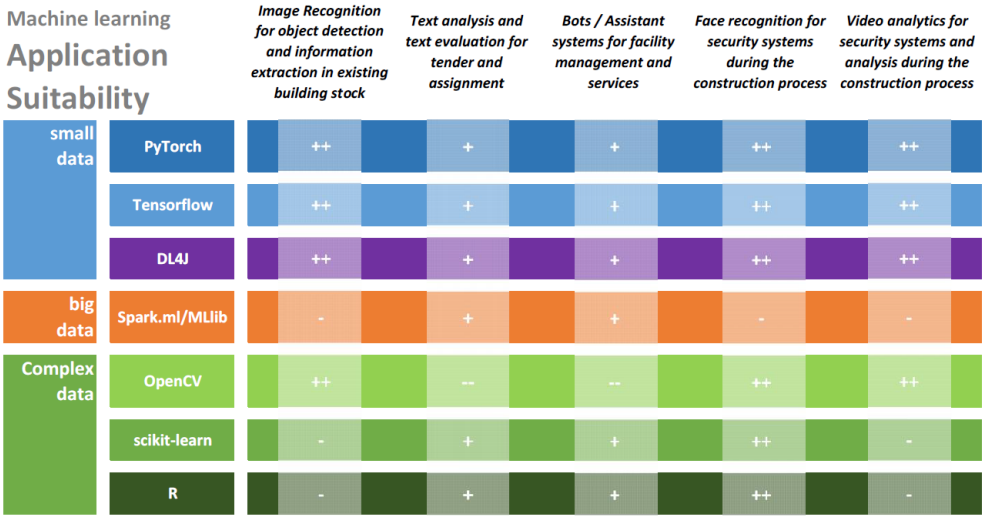


Abbildung 1: Application suitability matrix (Source: Own presentation, (adapted and extended based on: it-novum.com))

2 Fields of application

In the following sections, three early experiments are documented that serve as preliminary preparations and tests for a material and construction classification planned in future work.

2.1 Material classification

In an experimental research the viability of ML algorithms for the classification of facade architecture attribute assignment of building materials was explored. The question is, how to use ML tools to help provide building informations at a very early planning process. The final aim is the generating construction and material attributes via ML methods in combination with the image dataset from a laser scan. The structure recognition from the point cloud is left out in this example but will be included in later research stages. In the first step, the recognition of individual structures and construction methods from given image data is sufficient. The result of this analysis is an evaluation of the applicability of the algorithm to the problem domain and its performances, i.e. what features are recognized and correctly classified.

The experiment was implemented using Python and Tensorflow[2]. The images for this example were downloaded from free repositories on the World Wide Web. The image stock evaluation has been created in manual assessment. To enlarge the image stock the images were subsequently duplicated by mirroring, rotating and filtering following the setup described in (Frochte (2019)). This enlarged the image stock by factor six. The effects between the original and the enlarged image stock on algorithm accuracy were not evaluated. The evaluation where made with test images on a workstation. An application for smartphones was created for the evaluation. The results of the smartphone app is shown in Fig. 2. Four facade architectures were trained:

- masonry — dataset = 946 pics (5.676 pics)
- plastered facade — dataset = 714 pics (4.284 pics)
- weather boarding — dataset = 544 pics (3.264 pics)
- vertical weather boarding — dataset = 392 pics (2.352 pics)

The results of the images 2a, 2b and 2c shows that the algorithm is already well performing and recognize the right façade architecture. But in some cases the result is unclear and unexpected, as shown for example in Fig. 2.d. To achieve higher accuracy the image datasets needs to be increased with significantly more images. A practical application can only be created if algorithms are able to detect and classify all building materials and can allocated detected attributes in the image.

[2] tensorflow.org/

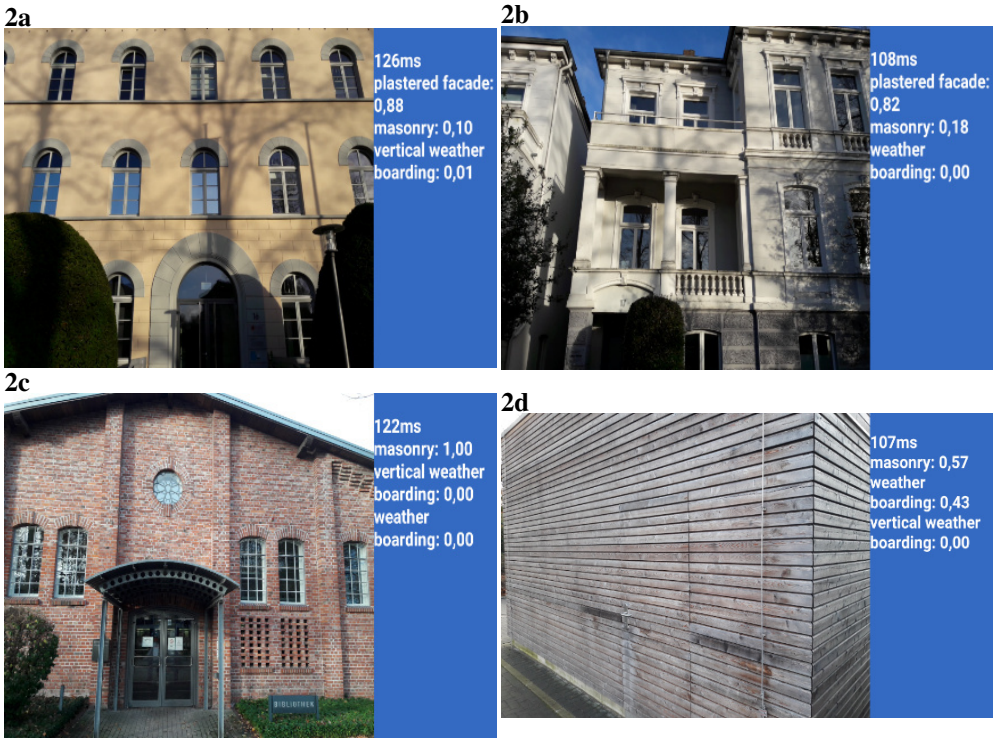


Abbildung 2: Detection of different facade architecture (Source: Own presentation)

The methods of ML are already used in the wood industry today. For example when it comes to sorting and classification of wooden lamellas or beams. The company FinScan[3] founds its classification on a pure image-based sorting by previously trained algorithms.

2.2 Object detection

It is not necessary to create new algorithms for use in practical applications. Pre-trained networks can extract interesting information from image data sets. In the following section experiments are documented that were carried out on the basis of existing panorama image data sets of a mobile indoor scan and extraction of semantically information. The aim of this application is the automatic or at least semi-automatic detection of objects in an image database. The image database for this example comes from the indoor mapping of the Jade University of Applied Science in Oldenburg. The main building was scanned in 2016 for an indoor map using a mobile scanning unit. In this procedure the entire interior of the university was surveyed by a laser scan. A point cloud of the building geometry and a panorama image dataset on a previously defined path approximately every 80cm were generated. Each panorama image consists of 6 individual images which are stitched into one panorama image. The result of this indoor map are similar to popular applications like Google Street View. The purpose of the mapping was to set up a guidance system for the university. The aim of the experiment was to test which information could be extracted from this data by using pre-

[3] `finscan.fi`

trained image recognition algorithms in order to take advantage of the increasing amount of such indoor panoramic data sets. The object recognition in the existing image database could be useful, for example, to take inventory lists of facility management. Early approaches of other researchers have already been used to train algorithms for detecting doors (Chen et al. (2014)).

For the recognition project the YOLO[4] (You only look once) (Redmon et al. (2016)) algorithm with the pre-trained weights of yolov3 was used. Due to its fast processing speed of up to 30 frames per second (FPS), the algorithm can also run in real-time e.g. on a webcam feed and is pre-trained for the recognition of 300 object types (Rastegari et al. (2016)).

Some results represented in Fig. 3 show a scene from the first floor of the main building. It is a student workstation consisting of two tables and four chairs. The evaluation of the first Fig. (3b) shows that the algorithm recognizes only one table because the two tables were put together and the algorithm might see just one table from this perspective. In the same scene from a different perspective (3c) the algorithm recognizes only three chairs but two tables.

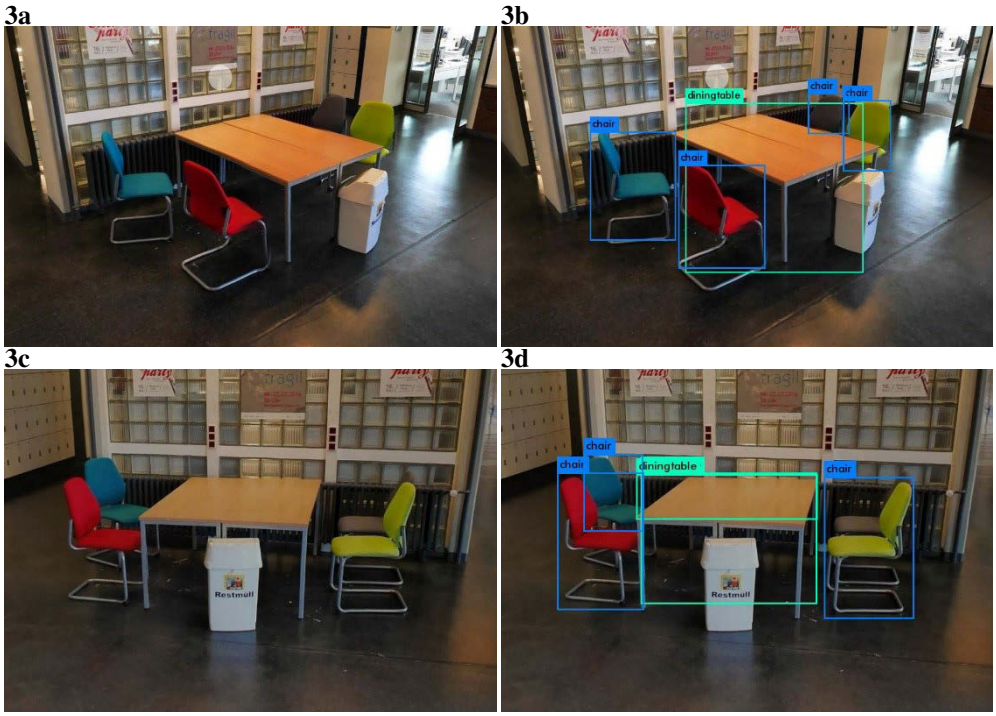


Abbildung 3: Object detection in image dataset (Source: Own presentation)

To evaluate the whole scene 30 different panorama images with their perspectives of the student workstation are needed in which the objects can be seen and analyzed. The evaluation of the 30 images shows that the algorithm is able to detect the four chairs in 9 images an the two tables in 12 images. In 4 images, the algorithm working properly and detect 2 tables

[4] pjreddie.com

an four chairs. For this example we used the parameter of 0.1. This means the algorithm shows only objects when the algorithm is certain for more than 10% about what is detected. The challenge for a practical application is the explicit location of the detected object in a three-dimensional space and the evaluation of the different results. If we analyze the whole dataset we will count a lot of object multiplicity because the same objects are present in different images. Using the point cloud of the indoor map is an possible solution approach for the object localization and counting process.

2.3 Damage localization and assessment

A third experiment in the area of damage mapping is still in progress. The experiment aims at the image-based classification of wood pest's infestation on the basis of timber worm damage patterns, timber perforations or decomposition processes in existing buildings. The application is targeted at building owners as well as executor on the construction site because to better assess structural damage caused by wood pests. Not every type of pest damages need to for action. The challenge is that the determination of the kind and severity of pests by analyzing the variable characteristics which is very complex and usually needs an expert opinion. Even human experts are not always sure about the pest type and a subsequent recommendation of actions. If a solution would be able to achieve approximate results, knowledge and estimations could be very helpful for experts and construction companies.

4a **4b**

Abbildung 4: 4a: holes of the tabby wood bug, 4b: boletus destructor (Source: holzfragen.de)

We assume that the image datasets for this purpose poses a great challenge. Although we were able to collect a small amount of wood damage through collaboration with wood pest experts, the data sets are not enough to work out the visually clear criteria needed to train ML algorithms. Next to the very heterogeneous structure of the wooden components and its typical categorization we also have to generate geometrical contexts. For example, the size of perforation and distance inside a pattern does tell a lot about the type of wood bug. These parameters could only be obtained with additional image information about its distance between image and object. Therefore, we have to combine the ML process with geometrical data.

In the area of damage mapping ML approaches are currently on the rise. In the near future this will help in the detection of efflorescence and spalling in masonry walls (Wang et al.

(2019)) or concrete surfaces (Beckman et al. (2019)) and in the inspection of structures that are difficult to access, such as sewers (Li et al. (2019)) or the detection of rust spots on steel bridges (Liao and Lee (2016)). An important topic is the assessment and inspection of concrete structures and their characteristics. In the field of bridge inspection images are generated by drone surveying or terrestrial high-resolution digital images (Li et al. (2017)) have a great potential for structural health monitoring. The images are evaluated by ML algorithms and locate where anomalies in the structure are detected (Hallermann et al. (2018)). The results are used by the expert structural engineer to inspect only at selected areas and not the entire bridge.

3 Summary and Conclusion

The integration of machine learning methods will allow new applications in fields of construction. The quality of detection and classifications will be further improved and the methods can be adopted with feasible effort. Common inspection and evaluation tasks currently done manually by architects and civil engineers will be semi-automated, with better results (Vogt (2019)). The work to develop new applications is shifted from developing algorithms to provide data because the usability of the ML algorithms are controllable for engineers. So the greatest demand is the acquisition of the data and the evaluation of the results. Future applications will be able to combine analyze of images with semantic information such as load estimations. Such applications support the human inspection of existing building structures and especially in this field of construction a lot expertise is necessary to reduce the repair and restoration resources and improve the planning process (Davoudi et al. (2018)).

Literatur

Beckman, G. H., Polyzois, D. and Cha, Y.-J. (2019), 'Deep learning-based automatic volumetric damage quantification using depth camera', *Automation in Construction* **99**, 114–124.

BIMiD-Konsortium (2017), 'Bimid-leitfaden'.

Chen, W., Qu, T., Zhou, Y., Weng, K., Wang, G. and Fu, G. (2014), Door recognition and deep learning algorithm for visual based robot navigation, *in* '2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)', IEEE, pp. 1793–1798.

Davoudi, R., Miller, G. R. and Kutz, J. N. (2018), 'Data-driven vision-based inspection for reinforced concrete beams and slabs: Quantitative damage and load estimation', *Automation in Construction* **96**, 292–309.

Dimitrov, A. and Golparvar-Fard, M. (2014), 'Vision-based material recognition for automated monitoring of construction progress and generating building information modeling from unordered site image collections', *Advanced Engineering Informatics* **28**(1), 37–49.

Frochte, J. (2019), *Maschinelles Lernen: Grundlagen und Algorithmen in Python*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.

Hallermann, N., Helmrich, M., Morgenthal, G., Schnitzler, E., Rodehorst, V. and Debus, P. (2018), 'Uas-basierte diagnostik von infrastrukturbauwerken: Teil einer digitalen instandhaltungsstrategie', *Bautechnik* **95**(10), 720–726.

Helmus, M. (2018), 'Bim-leitfaden für den mittelstand'.

Li, D., Cong, A. and Guo, S. (2019), 'Sewer damage detection from imbalanced cctv inspection data using deep convolutional neural networks with hierarchical classification', *Automation in Construction* **101**, 199–208.

Li, G., Zhao, X., Du, K., Ru, F. and Zhang, Y. (2017), 'Recognition and evaluation of bridge cracks with modified active contour model and greedy search-based support vector machine', *Automation in Construction* **78**, 51–61.

Liao, K.-W. and Lee, Y.-T. (2016), 'Detection of rust defects on steel bridge coatings via digital image recognition', *Automation in Construction* **71**, 294–306.

Rastegari, M., Ordonez, V., Redmon, J. and Farhadi, A. (2016), Xnor-net: Imagenet classification using binary convolutional neural networks, *in* 'European Conference on Computer Vision', Springer, pp. 525–542.

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A. (2016), You only look once: Unified, real-time object detection, *in* 'Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition', pp. 779–788.

Spencer Jr, B. F., Hoskere, V. and Narazaki, Y. (2019), 'Advances in computer vision-based civil infrastructure inspection and monitoring', *Engineering* .

Vogt, M. (2019), An overview of deep learning and its applications, *in* 'Fahrerassistenzsysteme 2018', Springer, pp. 178–202.

Wang, N., Zhao, X., Zhao, P., Zhang, Y., Zou, Z. and Ou, J. (2019), 'Automatic damage detection of historic masonry buildings based on mobile deep learning', *Automation in Construction* **103**, 53–66.

A knowledge-based value stream mapping simulation framework for predicting the environmental impact of the construction process

Danh Toan Nguyen[1]

[1]Department of Construction Industry · University of Kassel · Mönchebergstr.7 · 34125 Kassel · E-Mail: dtnguyen@student.uni-kassel.de

In order to predict the environmental impact of construction process such as greenhouse gas, waste generation and big energy and water consumption, it is needed to develop a sustainable construction strategy within the planning stage. An obvious difficulty is the lack of reliable data to estimate environmental impacts at the early stage of the project. Many studies have used the technical specifications of construction machinery provided by the manufacturer, or the average emission norms issued by the standard sets, and assumptions. However, to estimate the environmental impact in a more accurate way, it is necessary to consider the data from the previous project, the specific construction conditions, and the actual state of the construction equipment usage. This paper proposes a methodology framework to predict the environmental impacts of the construction process. A knowledge-based value stream mapping framework is developed by improving the value stream mapping tool base on data from the previous project, then using hybrid simulation to assess alternative processes with enhanced construction activities. An application of this method for earthwork process is also analyzed in this paper.

Keywords: Knowledge base, lean, value stream mapping, hybrid simulation

1 Introduction

The construction phase causes serious environmental pollution in a short time and in concentrated locations. Emissions from construction processes contribute up to 40% of total CO2 emissions from non-transferable mobile sources (EPA, 2006). Reducing construction emissions is critical to achieve a sustainable environment. Traditional emission reduction methods in the construction industry focus on the selection of construction materials (Chowdhury et al., 2010) in the design phase, while less emphasis on emissions related to construction process, in particular on-site construction. However, researchers have in recent years realized the importance of the construction stage in reducing carbon emissions (Chou and Yeh, 2015). Lean production principles have been proven to reduce waste and improve process performance in highly complex development and production environments. Value Stream Mapping (VSM) is a commonly used as a comprehensive analysis and visualization tool to illustrate the main processes, and their operations, together with lead times, buffers and information flows. To further enhance the tool, the US Environmental Protection Agency (EPA) recommends incorporating of environmental considerations into VSM thus presenting environmental impact in addition to traditional lean aspects (US EPA, 2007). In order to use VSM tools, it is necessary to obtain the data of the production process. At the planning stage, the state mapping must be based on many assumptions and the experience of the planner. This often

leads to shortcomings and inaccuracies. This paper aims a methodology to predict the environmental impacts of the construction process. Firstly, a knowledge base will be developed to store and deliver the necessary data for assessing environmental impacts. The data will be gained from previous projects of the construction contractor. The data acquisition focuses on the actual operation state and the working cycle of construction machinery and equipment. Secondly, the available knowledge based value stream mapping will lead the construction activities to add value to the special customer "Environment". Finally, a hybrid simulation framework will be proposed to facilitate the integration of the knowledge base outputs and the VSM as inputs for process simulation. The combination between alternative processes as well as different resources will enable the choice of enhanced construction activities.

2 Knowledge-based value stream mapping

2.1 Environmental metrics of value stream mapping

VSM is an effective tool to analyze and improve the flow of materials and information within an organization (Romero and Arce, 2017). A value stream is defined as all the actions, both value added and non-value added in the process. Because VSM usually focuses on mapping and analyzing material flow and information of production process, so the construction phase activities should be divided into single construction processes suitable for VSM applications. Each single process can be seen as a flow of construction resource.

Using the work breakdown system, the execution of a construction project is broken-down and subdivided into unit construction processes with inherent logical relationships. Each single process is an elementary object that can then be mapped and analysed in detail by VSM tool to identify and calculate the environmental impact, which can then be aggregated for the overall construction process.

The conventional VSM methodology does not account for environmental performance, most of which are in regards to time (cycle time, lead time, change-out time, etc.). By incorporating the capability to capture environmental performance visually, VSM method can be extended to environmental-value stream mapping (E-VSM). Environmental metrics are used to evaluate the performance of a construction project from environmental perspective (Faulkner and Badurdeen, 2014). Based on the review conducted, environmental metrics must be selected in such a way that evaluation of environment is being performed. The selected metrics must be relevant to the construction process and all metrics should fit in a map to visually depict the performance state.

Table 1: Selected environmental metrics

Environmental metrics	Units	Meaning
GHG emission	Kg	Emission of construction machinery, equipment and vehicle
Water consumption	Liters	Water consumption in eathwork, concreting works, etc..
Material waste	Kg	Amount of material wasted in comparison with the amount needed
Auxiliary material	Kg	Auxiliary material consumption in construction process
Energy waste	Liters	Amount of energy wasted in comparison with the amount needed

It is clear that construction operation is to combine machinery, equipment, materials and workers in a certain way to perform a specific construction task, for example earthwork, rebar work, formwork, concrete work, etc.. Therefore, the main environmental impact of this phase include greenhouse gas emission (GHG) of construction machinery and equipment, the waste of material and energy, water consumption, auxiliary material consumption. These indicators can be seen as environmental metrics of construction phase (Table 1).

2.2 Knowledge-based value stream mapping simulation framework

During the planning phase, since no construction activities have been carried out in site, it is impossible to collect actual data to accurately calculate the environmental impact parameters of the construction process. Most of researches have used the technical specifications of construction machinery provided by the manufacturer, or the average emission norms issued by the standard sets, and assumptions. Thus, the result cannot consider the uncertain or stochastic character of construction processes (Zhang, 2014). Although construction projects have individual characteristics, they can vary in the architecture, scale, location and function, but if they have the same construction structure, they can be relatively considered as a combination of a number of construction processes which have similar technique and sequence. In fact, to specialize in construction, each contractor often performs a specific type of construction such as reinforced concrete structures, steel structures, etc.

The implementation of the same construction processes in different projects makes the contractor experienced and well-grounded to identify the appropriate data to use in planning for new projects. Besides, unlike with manufacturing, attributes of each construction activity have no constant values. Therefore, in the planning phase they should be expressed in the form of distribution in order to reflect the variability of the construction process. In this case, using a simulation tool will be very helpful to take into account the uncertainties or randomness of construction processes.

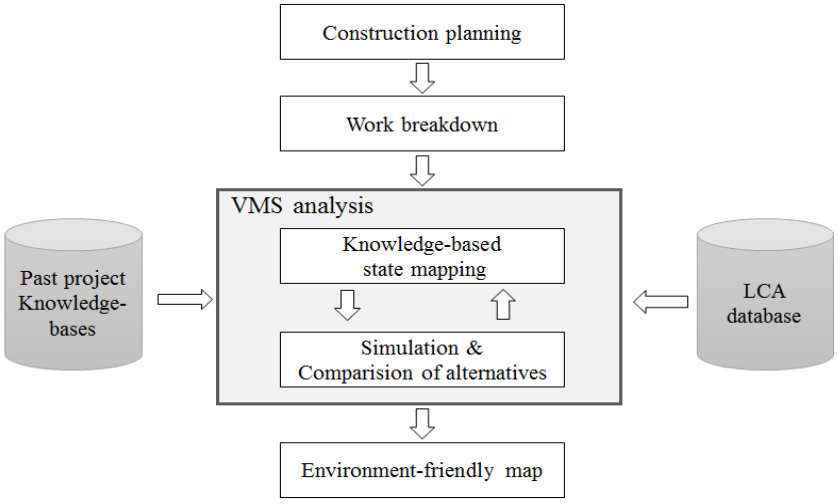


Figure 1: Knowledge-based value stream mapping simulation framework

A framework in this paper to predict the environmental impact by using lean principles, a knowledge base and witthin a simulation tool in planning phase, see on Figure 1. In this framework, the knowledge base state map will be improved based on the current state map of the VSM tool. It aims to create a clear picture of the construction process as a sequenece of tasks outline the environmental indicators proposed in Table 1 to determine which activities have environmental impacts. After that, simulation tools will be used to calculate different alternatives and make appropriate decision to choose an environment-friendly map.

The knowledge captured from past project need to be stored in a centralized database which users can access. This database will be set up as a relational database with tabes representing project information and necessary data for environmental metric assessment. An example of a relational database is shown on Figure 2. Relational database schemas are very flexible; individual relationships and tables can be added, modified, and removed without disturbing the rest of the schema.

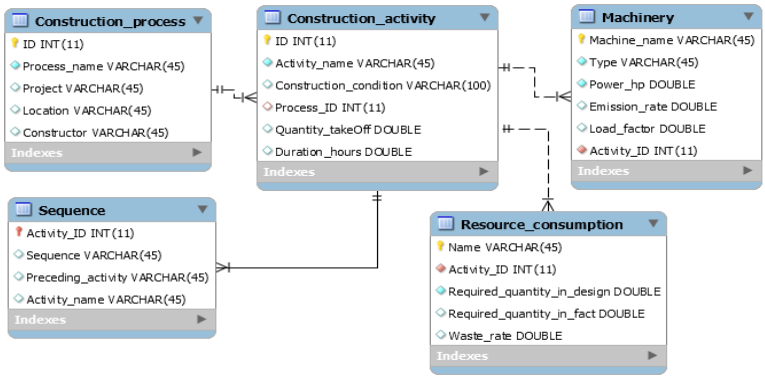


Figure 2: Database

3 Application analyses for earthwork process

To demonstrate the performances of the proposed method, an example of predicting the construction emissions of a simple earthwork process is illustrated. The earthwork includes excavation and move, executed by excavators and off-highway trucks.

3.1 Knowledge capture and reuse

Most approaches for estimating construction emissions are based on the NONROAD model (Epa, 2010)

$$\boldsymbol{E = EP \times OT \times ER \times LF} \tag{1}$$

where E = emissions; EP = engine power (hp); OT = operation time (h); ER = emissions rate ($g \cdot hp^{-1} \cdot h^{-1}$); and LF = load factor.

The engine power and emission rate mainly rely on the properties of equipment, whereas the operation time and especially the load factor are correlated to both of the properties and usage patterns of equipment.

To estimate exactly the emissions from an operational perspective, the operation time and especially the load factor should reflect the application characteristics of each piece of equipment. An excavator has four activities include dig, swing full, load and swing empty. Each activity has different load factor and operation time, so the emission of the excavator should be calculated for each activities. The challenge in emissions assessment is how to choose the appropriate load factor of machinery. Load factor also affects the fuel consumption of machine through equation (2):

$$\boldsymbol{FCR = BSFC \times EP \times LF} \tag{2}$$

where FCR = fuel consumption rate; and BSFC (lb. $hp^{-1}.h^{-1}$) = brake-specific fuel consumption for measurement of engine efficiency provided by EPA (EPA, 2010).

The fuel consumption rate is obtained by dividing the fuel consumption of the equipment by the activity duration. To investigate the load factors based on equation (2) needs to measure the fuel consumption and duration of each item of equipment at each activity during its duty cycle on site such as swing empty, dig, swing full, and load of an excavator.

After collection samples of the load factor for each type of equipment at each activity, based on the frequency distribution (or histogram) of the measured load factor, the minimum, most-likely, and maximim values of the load factor are estimated, and then the triangular distribution is determined to describe the load factor. For example, the triangular distribution-represented load factor (0.65, 0.75, 0.85) for the excavator at dig. The triangular distribution is regarded to be a simplistic and effective description of an input variable (input modeling) for simulation tool if the minimum, most-likely, and maximim of the input variable can be estimated through field measurement or knowledge and experience (Banks and Carson, 2005).

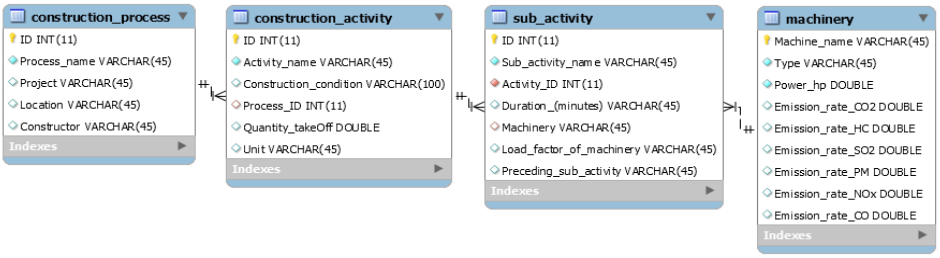


Figure 3: Earthwork database

Result Grid | Filter Rows: | Export: | Wrap Cell Content:

Sub_activity_name	Activity_name	Construction_condition	Duration_minutes	Machine_name	Type	Power_hp	Emission_rate_CO2	Load_factor_of_machinery
Dig	Excavation	Clay soil and medium density material	triangular(0.45,0.6,0.75)	CAT 5110B L(2005)	Excavator	689	324.222	triangular(0.65,0.75,0.85)
Swing_fill	Excavation	Clay soil and medium density material	triangular(0.15,0.3,0.45)	CAT 5110B L(2005)	Excavator	689	324.222	0.55
Load	Excavation	Clay soil and medium density material	uniform(0.1,0.3)	CAT 5110B L(2005)	Excavator	689	324.222	0.6
Swing_empty	Excavation	Clay soil and medium density material	triangular(0.15,0.25,0.35)	CAT 5110B L(2005)	Excavator	689	324.222	0.45
Load	Move	moving on temporary road	NULL	CAT 773E(2007)	Truck	670	324.222	0.2
Haul	Move	moving on temporary road	triangular(10,13,16)c	CAT 773E(2007)	Truck	670	324.222	triangular(0.45,0.6,0.75)
Dump	Move	moving on temporary road	uniform(1,2)	CAT 773E(2007)	Truck	670	324.222	0.65
Return	Move	moving on temporary road	triangular(9,11,13)	CAT 773E(2007)	Truck	670	324.222	0.5

Figure 4: Example of an earthwork process data

Contractors often use their existing machines in many different projects with the same operator level. Therefore, the load factor of machines in previous projects can be used for new similar projects. All of the necessary data was saved in a relational database (Figure 3). The users can query the database and quickly access the relevant knowledge, information about

the project where this knowledge was generated, the contributor, project team etc. Figure 4 shows an example of specific information of construction activities of the earthwork process.

3.2 Knowledge-based state map of earthwork process

A simple earthwork comprises of two main processes which are cut and move. In the planning phase, predicting the emission of earthwork needs necessary indicators such as the number of equipments, technical specifications of equipment, moving distance, the soil density. The load factor and duration of each item of every equipment at each activity during its duty cycle can be taken based on knowledge bases created from previous projects. If the construction conditions in new projects and past projects such as the density of soil, machinery, the operator's level are similar, these data are taken the same from knowledge bases. On the contrary, there should be adjusted to select the proper data to suit new situations. After decomposing each process into individual activities and take appropriate data from knowledge bases, a state map is created (Figure 5).

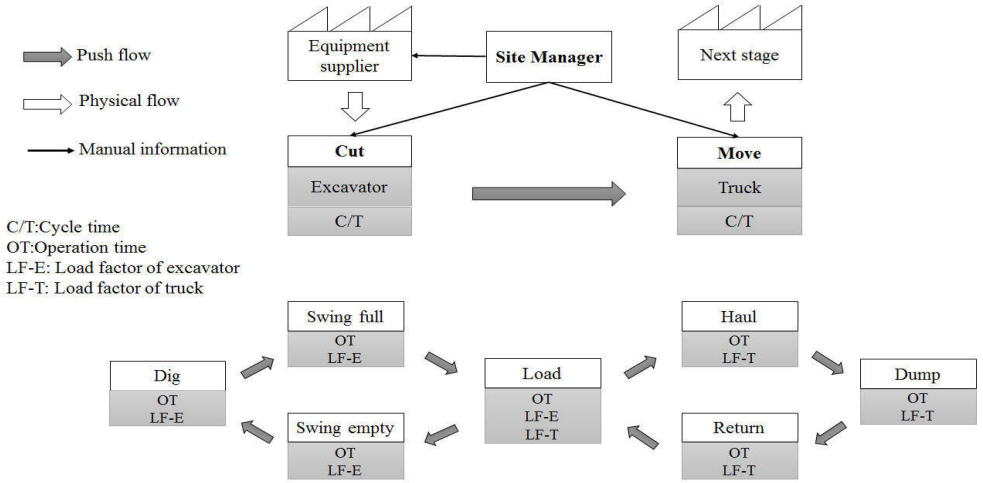


Figure 5: Knowledge-based state map of earthwork

3.3 Hybrid simulation model for emissions prediction

The range of simulation techniques is very wide, there are three main approaches: agent-based simulation (ABS), system dynamics (SD) and discrete event simulation (DES). Even though it is possible to model most real life systems using one of these simulation approaches, increasing level of complexity will often require significant improvisation of the selected simulation approach (Swinerd and McNaught, 2012). In this study, an ABS–SD approach was selected and implemented using the simulation software AnyLogic. It can be helpful to predict system behaviour by incorporating both inductive and deductive approaches (bottom-up and top-down approaches, respectively).

ABM is an essentially decentralized and individual-centric approach. The main building blocks of ABM are state-charts. Those are mainly composed of states which are linked by transitions. They are used to represent the possible states of an agent and to define the relationships between them (Jabri and Zayed, 2017). In the earthwork operations model, the de-

fined agent types are excavator and truck (Figure 6.a, b). The agent excavator has two variable: *cutQuantity* and *counter*. The cut quantity represents the quantity of soil to be cut. The variable counter is used to monitor the progress of earthwork.

Different types of transitions to go from a state to another exist in AnyLogic. The first action to happen is through the internal transition triggered by timeout in the *Idle* state of the excavator. An internal transition simply triggers an action, with ist timeout is one second. The action is the execution of a function that compares their *cutQuantity* variable to the earthwork quantity parameter. If both are equal, it means that the earthwork has been fully completed. If not, a message is sent to the excavator to reflect that an excavator has already been sent to work site, which changes the excavator's state into *CallingTruck*. The internal transition in the CallingTruck state repeatedly calls a function that evaluates whether there are trucks in the state *Idle*. If so, truck's state becomes in the state *Load* and the excavator's state changes to *Working*. In the working state, an excavator has 4 sub-states include *Dig*, *SwingFull*, *Load* and *SwingEmpty*, these states were changed by timeout transition with duration take from the knowledge base. Using a condition transition executes a function to compares the *cutQuantity* variable to the truck's capacity. If the two are equal, it means that the truck is full, the excavator's state return *Idle* state and truck's state change to *MovingFull*. Timeout transition still uses to change truck's state to *Unload, MovingEmpty* and *Idle*, respectively. Duration of each moving state depends on the distance between the cut area and dump area.

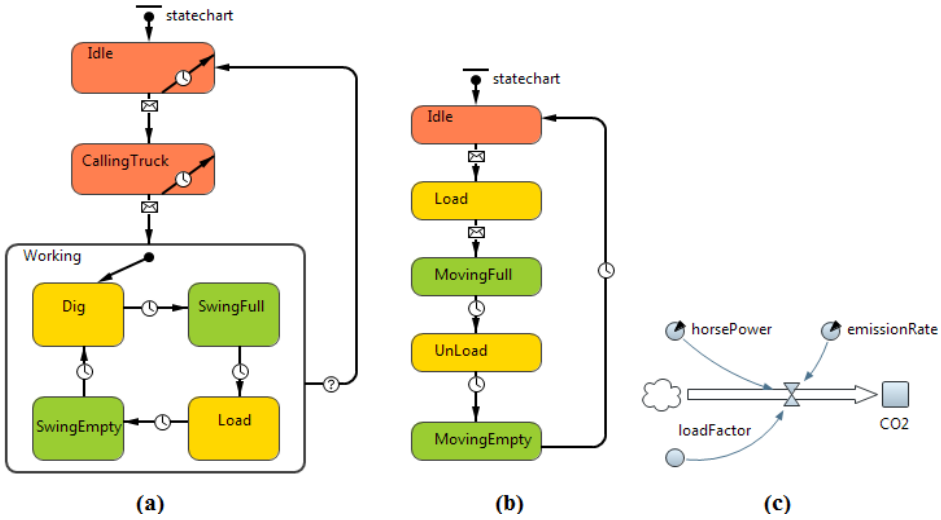


Figure 6: State chart of excavator (a), truck (b) and emission prediction (c)

The interaction between these two state-charts results in a simulation model representing earthwork operations. In order to calculate the emission of this process, SD has been utilized to combine with ABS. SD is grounded in systems of differential equations and a SD model is made up of stocks, flows, and auxiliary variables that are inter-connected. To use equation (1) in the flow element, two parameters of horsepower and emission rate and a dynamic variable load factor were added for both truck and excavator actors. All input data can be obtained by inserting queried tables from relational database, such as the example table in Figure 4 into the Anylogic software. In this way, the emission of the earthwork process will be calculated according to the execution time (Figure 6.c).

4 Conclusion

This paper is part of ongoing research to develop a knowledge-based lean management methodology to improve the sustainability in construction processes. This study provides a framework for quantitatively forecasting the emissions from a construction process in the planning phase. The value stream mapping tool was improved by adding environmental metric and creating a knowledge-based state map, then using a hybrid simulation tool for calculating the emission. Still needed research steps for the targeted method are: 1) research to an effective way to collect the data such as load factor and operation duration of machinery in the previous project; 2) research how to adjust the data from knowledge base if the construction conditions in the new project are very different from the previous project; 3) research to integrate knowledge bases, lean principle and simulation tool in a single virtual environment.

References

Banks, J., Carson, J.H., 2005. Discrete Event Simulation System. Building 27, 560p.: ill.

Chou, J.S., Yeh, K.C., 2015. Life cycle carbon dioxide emissions simulation and environmental cost analysis for building construction. J. Clean. Prod. 101, 137–147. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.04.001

Chowdhury, R., Apul, D., Fry, T., 2010. A life cycle based environmental impacts assessment of construction materials used in road construction. Resour. Conserv. Recycl. 54, 250–255. https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2009.08.007

Epa, 2010. Nonroad Engine Population Estimates Nonroad Engine Population Estimates.

EPA, 2010. Exhaust Emission Factors for Nonroad Engine Modeling - Spark - Ignition. Environ. Prot. Agency.

EPA, C.A.A.A.C., 2006. Recommendations for Reducing Emissions from the Legacy Diesel Fleet. US Environ. Prot. Agency.

Faulkner, W., Badurdeen, F., 2014. Sustainable Value Stream Mapping (Sus-VSM): Methodology to visualize and assess manufacturing sustainability performance. J. Clean. Prod. 85, 8–18. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.042

Jabri, A., Zayed, T., 2017. Agent-based modeling and simulation of earthmoving operations. Autom. Constr. 81, 210–223. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.06.017

Romero, L.F., Arce, A., 2017. Applying Value Stream Mapping in Manufacturing: A Systematic Literature Review. IFAC-Pap. 50, 1075–1086. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2017.08.385

Swinerd, C., McNaught, K.R., 2012. Design classes for hybrid simulations involving agent-based and system dynamics models. Simul. Model. Pract. Theory 25, 118–133. https://doi.org/10.1016/j.simpat.2011.09.002

US EPA, 2007. The Lean and Environment Toolkit. Prevention 96.

Zhang, H., 2014. Discrete-Event Simulation for Estimating Emissions from Construction Processes. J. Manag. Eng. 31, 1–10. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000236.

Stand der Forschung zu BIM-basierten Baugenehmigungsprozessen

Judith Ponnewitz[1] und Sarah Schneider[2]

[1]Professur Baubetrieb und Bauverfahren · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 7a
99423 Weimar · E-Mail: judith.ponnewitz@uni-weimar.de

[2]Professur Baubetrieb und Bauverfahren · Bauhaus-Universität Weimar
E-Mail: sarah.schneider@web.de

Die Digitalisierung in der Baubranche und insbesondere Building Information Modeling (BIM) erfahren derzeit große Aufmerksamkeit. Unterschiedliche Bereiche des Gebäudelebenszyklus werden betrachtet, unter anderem auch die Einbindung baugenehmigungsrelevanter Aspekte und Prozesse. Die Abläufe und die Kommunikation in und mit den Baugenehmigungsbehörden sind gegenwärtig als traditionell zu bezeichnen. Nur wenige Forschungsaktivitäten zum Thema BIM-basierte Baugenehmigungsprozesse sind bekannt. Eher fokussieren diese Forschungsansätze verschiedene andere Schwerpunkte bzw. tangierende Themen, wodurch eine Abgrenzung und Strukturierung schwierig ist, aber zur Eingrenzung des Standes der Forschung zum Thema notwendig ist. Ziel ist es einen Status quo zum Thema BIM-basierte Baugenehmigungsprozesse aufzuzeigen. Dafür dient eine internationale Literaturrecherche. Eine systematische Vorgehensweise bei der Recherche als auch bei der Analyse schaffen die Möglichkeit einen Überblick zum Thema zu erstellen. Die Ergebnisse dienen dazu, zu kategorisieren und Abgrenzungen zu tangierenden Forschungsthemen zu erarbeiten. Weiterhin gibt die Analyse Aufschluss über mögliche Forschungslücken in diesem Bereich. Für die Durchführung der Literaturrecherche wird eine Systematik entwickelt und vorgestellt. Nach der Beschreibung und Kategorisierung der Ergebnisse erfolgt die Diskussion bezogen auf das Thema BIM-basierter Baugenehmigungsprozesse. Potenzielle Ansatzpunkte für konkrete Forschungsaktivitäten werden ebenfalls aufgezeigt.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Building Permit Process, Building Permit Procedure, Building Permitting

1 Einleitung

Die Methodik des Building Information Modeling (BIM) zählt in der Bauindustrie zu den zukunftsweisenden Innovationen, die einen umfangreichen Wandel in gängige Arbeitsweisen des Bauwesens herbeigeführt haben. Dabei steht die Anwendung von BIM-Technologien für Produktivitätssteigerung durch frühzeitige Fehlererkennung und Vorbeugung im Vordergrund (Borrmann et al., 2015). Die Möglichkeiten der Effizienzsteigerung und der Kostenreduktion mittels BIM-Technologie im Genehmigungsprozess stellen eine gegenwärtige Alternative zum konventionellen Prozess dar. Daher ist die Untersuchung des

Stands der Forschung zu BIM-basierten Baugenehmigungsprozessen relevant für ein zukunftsorientiertes Handeln und gibt Anlass für diesen Beitrag.

BIM-Technologien unterstützen einen intensiveren Informationsaustausch und eine kontinuierlichere Abstimmung in dem vielschichtigen Prozess der Planung und Realisierung eines Bauwerkes. Dabei wird die bis dato vorgenommene Art des Informationsaustauschs revolutioniert (Borrmann et al., 2015). Mittels BIM kann theoretisch jeder Verantwortliche auf relevante Informationen zugreifen, diese teilen und weiterverarbeiten (BMVI, 2015).

Für die Anwendung BIM-basierter Baugenehmigungsprozesse ist vor allem die Automatisierung von Prüfungen relevant, was auch als Model Checking oder Automated Code Compliance Checking bezeichnet werden kann (Nawari, 2018). Um eine Automatisierung herbeizuführen, ist es notwendig, Prozesse in Teilelemente zu gliedern (Etscheid, 2018), wodurch sich eine explizite Suche nach den Prozessen zur Feststellung einer Baugenehmigungsfähigkeit begründet. Hierbei gilt es allerdings die Einbeziehung der Rechtswissenschaften im Sinne des Ermessens und der individuellen Einzelfallbetrachtung zu beachten. In Deutschland werden die Rahmenbedingungen für Abläufe in der öffentlichen Verwaltung mittels des Verwaltungsverfahrensgesetzes vorgegeben. Mit der Novellierung von 2018 wurden Inhalte in Bezug zur Digitalisierung ergänzt. So besagt § 35a, dass Automatisierungen in der Verwaltung zulässig sind, sofern die Entscheidungen kein Ermessen implizieren (VwVfG, 2018).

Mit Hilfe einer internationalen Literaturrecherche wird ein Überblick zum Literaturbestand BIM-basierter Baugenehmigungsprozesse generiert. Die Fragestellungen im Hinblick auf die Ergebnisse sind: (1) Wieviel und welche Art von Literatur existiert zu dem Thema BIM-basierte Baugenehmigungsprozesse? (2) Welche untergeordneten Themenfelder werden beleuchtet? (3) Welche Rolle spielen behördeninterne Prozesse in dem untersuchten Material? und (4) Inwieweit werden die Aspekte des Ermessens und der subjektiven Individualentscheidung aufgegriffen?

2 Methodik der Literaturrecherche

Die internationale Literaturrecherche dient der Beschaffung von Primär- und Sekundärliteratur zu dem Thema BIM-basierte Baugenehmigungsprozesse. Der Recherche liegt ein im Vorfeld erstellter Ausführungsplan zu Grunde der im folgenden Unterkapitel näher erläutert wird. Aufbauend auf den Ausführungsplan (Kapitel 2.1) erfolgte die Durchführung der Recherche (Kapitel 2.2)

2.1 Ausführungsplan für die systematische Literaturrecherche

Für die systematische Literaturrecherche wird im ersten Schritt ein Ausführungsplan erstellt, um ein wissenschaftlich nachvollziehbares Ergebnis zu erzielen. Der Ausführungsplan dient der Erarbeitung einer geeigneten Suchstrategie. Die systematische Literaturrecherche gliedert sich in die Arbeitsabschnitte Literatursuche, Literaturauswahl und Literaturbeschaffung. Auf die Literatursuche wird im Folgenden genauer eingegangen.

Die **Literatursuche** beinhaltet die Suchstrategie. Um einen internationalen Überblick des Literaturbestands zu BIM-basierten Baugenehmigungsprozessen zu generieren wird eine

Datenbanksuche gewählt. Auswahlkriterien für die Datenbanken sind, dass sie internationale Literatur zur Verfügung stellen und dem Kontext der Literaturrecherche entsprechen. Für die Schlüsselwörter wird auf derselben Grundlage die Entscheidung getroffen englische Schlüsselwörter zu verwenden. Demnach erfolgt eine Übersetzung und Synonymsuche, die mit einer Freitextsuche und der Testung von Trunkierungen und Booleschen Operatoren erweitert wird. Eine Anpassung an die Datenbank-spezifischen Richtlinien für die Verwendung von Schlüsselwörtern erfolgt später innerhalb der jeweiligen Datenbanksuche.

2.2 Durchführung der Recherche

Die Durchführung der systematischen Literaturrecherche orientiert sich am Ausführungsplan und beginnt mit der **Datenbankauswahl**. Die Auswahl der Datenbanken erfolgt mit Hilfe des Datenbank-Informationssystems (DBIS) der Universitäts-Bibliothek Weimar. Die Datenbankauswahl wird an Hand verschiedener Kriterien, wie dem Fachbereich, der Datenbankart und der Kurzbeschreibung der Datenbank getroffen. Auf diese Weise ist es möglich aus dem Bestand des DBIS 19 Datenbanken als für die Literaturrecherche geeignet zu identifizieren. Mittels Stichprobenanalyse und Auswahlkriterien, wie der von der Datenbank zur Verfügung gestellten Dokumentenart, kann die Auswahl auf sechs Datenbanken reduziert werden. Bei den ausgewählten Datenbanken handelt es sich um TIB - Leibniz-Informationszentrum Technik und Naturwissenschaften Universitätsbibliothek, Taylor & Francis, Scopus, ScienceDirect, Emerald Insight und Civil Engineering Database. Abbildung 1 zeigt die Trefferquote innerhalb der einzelnen Datenbanken. Es ist nicht auszuschließen, dass die übrigen Datenbanken ebenfalls relevante Ergebnisse erzielen würden.

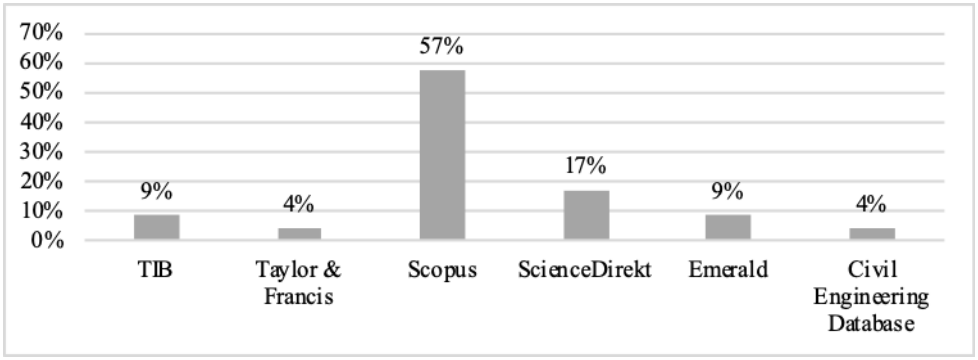


Abbildung 1: Auswertung der Trefferquote innerhalb der einzelnen Datenbanken

Die **Schlüsselwortauswahl** beinhaltet 166 passende Schlüsselwortkombinationen, die in den geeigneten Datenbanken getestet wurden. Die Schlüsselwortauswahl erfolgt allgemein, ohne die bestimmten Datenbankrichtlinien zur Auswahl zu beachten. Diese kamen erst in den schlussendlich ausgewählten Datenbanken zur Anwendung. Dieses Vorgehen ermöglicht einen gleichen Ausgangspunkt in der Vorauswahl. Anhand gemittelter Trefferquoten jeder möglichen Schlüsselphrasenkombination innerhalb der einzelnen Datenbanken werden die endgültigen Schlüsselphrasen für die Recherche ausgewählt. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt der prozentualen Gesamtauswertung der Schlüsselwörter hinsichtlich der

relevanten Literaturresultate. Die endgültige Wahl fiel auf die Phrasen *Building Information Modeling and building permit process* und *Building Information Modeling and building permit**.

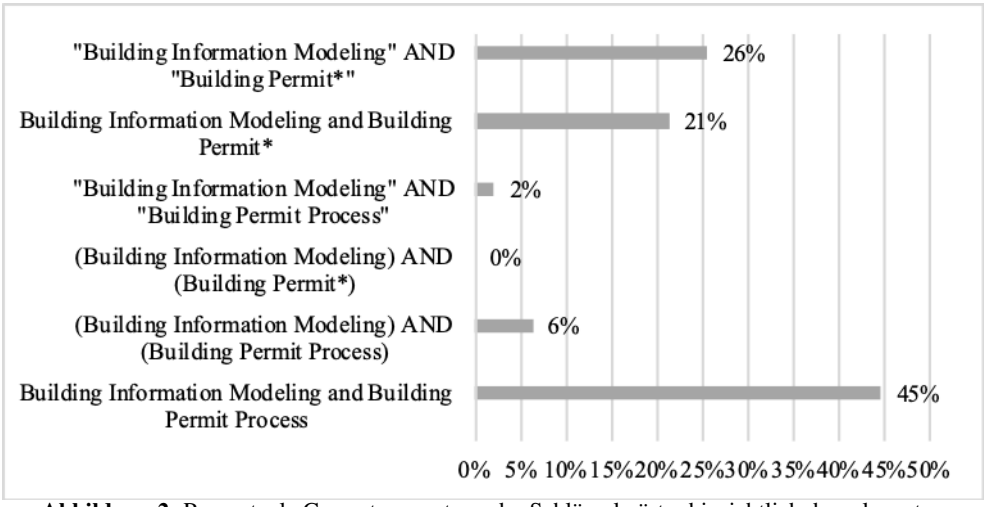


Abbildung 2: Prozentuale Gesamtauswertung der Schlüsselwörter hinsichtlich der relevanten Literaturresultate

Die **Literaturauswahl** erfolgt durch die Datenbanken zur Verfügung gestellten, 322 Abstracts sowie der Suchkriterien. Die ausgewählte Literatur musste sowohl den Umstand *BIM-basiert* wie auch *Baugenehmigungsprozess* enthalten. War dies der Fall, wurde sie im Verlauf als „relevante Literatur" bezeichnet und für die weitere Untersuchung des Inhalts ausgewählt. Des Weiteren erfolgen die Relevanzeinstufungen „teilrelevant (kein Genehmigungsverfahren enthalten)", „teilrelevant (kein BIM enthalten)", „nicht relevant", „nicht bewertbar" und „möglicherweise relevant" für alle anderen Abstracts. Abbildung 3 gibt einen Überblick der verschiedenen Relevanzeinstufungen, die für alle Datenbanken insgesamt getroffen werden können. Die hohe Anzahl der relevanten Literatur begründet sich unter anderem mit häufigen Titeldopplungen zwischen und innerhalb der Datenbanken.

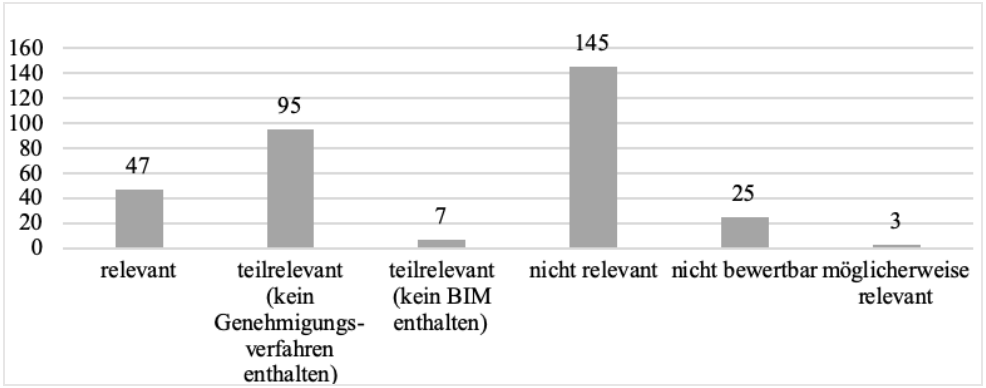


Abbildung 3: Relevanzeinstufung der betrachteten Forschungsbeiträge

3 Ergebnisse

Nach der Literaturrecherche erfolgt die inhaltliche Auseinandersetzung mit den Forschungsbeiträgen, die während der Recherche als relevant eingestuft wurden (siehe auch Abbildung 3). Dabei sind die Titeldopplungen innerhalb der Datenbanken abzuziehen. Diese Forschungsbeiträge werden im folgenden Kapitel vorgestellt und analysiert, um schließlich die eingangs beschriebenen Forschungsfragen zu beantworten.

3.1 Vorstellung der Literatur

Bei der beschriebenen Recherche konnten sechs Forschungsbeiträge als relevant eingestuft werden. Dazu kommen acht weitere Forschungsbeiträge, die aus einem Forschungsprojekt koreanischer Universitäten stammen. Insgesamt werden aus den 47 als relevant eingestuften Forschungsbeiträgen, abzüglich der Titeldopplungen, 14 Forschungsbeiträge identifiziert und analysiert. Stellvertretend für die koreanischen Forschungsbeiträge, die aufeinander aufbauen, wird für diese Beiträge nur der aktuellste Forschungsbeitrag dargestellt (Tabelle 1, Nr. 7). Demzufolge werden sieben Forschungsbeiträge näher beleuchtet. Diese werden in Tabelle 1 aufgelistet. Die Tabelle beinhaltet Titel, Publikationsjahr, Autoren, angegebene Schlagwörter und Herkunftsland der Forschungsbeiträge.

Die Forschungsbeiträge werden nach folgenden Schwerpunkten untersucht und zusammengefasst: Ziele, Herkunftsland, Art des Dokuments, verwendete Softwareelemente sowie Art des an das Amt übergebenen Materials.

Die **Ziele** der Forschungsaktivitäten entsprechen vor allem der Effizienzsteigerung und der Kostenreduktion. Außerdem werden die Themen Kooperation und Kommunikation genannt.

Die verwendeten **Softwareelemente** beziehen sich neben der allgemeinen BIM-Technologie oftmals auf GIS-Technologien, CAD-Anwendungen und zentrale Datenbanken. Bei der **Art des an das Amt übergebenen Materials** handelt es sich, dem Thema entsprechend, um ein BIM-Modell. Darüber hinaus wird der Austausch von Formularen und anderen Daten thematisiert.

Dass das Thema international Aufmerksamkeit erfährt, bestätigen die **Herkunftsländer**. Diese sind Schweiz, Kanada, USA, Ägypten, Kuweit, Korea und Taiwan. Dabei wurden vorrangig Zeitschriftenaufsätzen, Beiträgen in Tagungsbänden sowie Konferenzberichten als **Art der Dokumente** identifiziert.

Tabelle 1: Vorstellung der untersuchten Forschungsbeiträge

Nr.	Name	Jahr	Autor	Schlagwörter	Herkunfts-land-
1	A knowledge-based automated development permit process in the housing indus-try	2006	Al-Hussein, M.; Kumar, J.; Sharma, V.; Mah, D.	Construction operations, Residential property, Laws, Deductive databases, Au-tomation	Kanada

[2]	Building Information Modeling acceptance and read-iness assessment in Taiwanese architectural firms	2017	Juan, Y-K.; Lai, W-Y.; Shih, S-G.	Building Information Modeling (BIM), Building permit review process, Architectural firms, Organizational readiness, Technology acceptance, Artificial neural network (ANN)	Taiwan
[3]	Requirements for establishing an information system to manage issuing building permits	2017	Mahrous, M.; Wahed, A.	Information system, GIS, Local authority, Building permits	Ägypten
[4]	The Role of BIM in Simplifying Construction Permits in Kuwait	2017	Nawari, N. O.; Alsaffar, A.		Kuwait
[5]	Digital Construction Permit: A Round Trip Be-tween GIS and IFC	2018	Chognard, S.; Dubois, A.; Benmansour, Y.; Torri, E.; Domer, B.	GIS, BIM, IFC, Conver-gence of GIS and BIM, Digital building permit, GIS-BIM round trip	Schweiz
[6]	A building permit system for smart cities: A cloud-based framework	2018	Eirinaki, M.; Dhar, S.; Mathur, S.; Kaley, A.; Patel, A.; Joshi, A.; Shah, D.	Building permit, Data analy-tics, Data mining, Recommender system, Urban planning, Cloud computing, Smart city	USA
[7]	Visual language approach to representing KBimCode-based Korea building code sentences for automated rule checking	2018	Kim, H.; Lee, J-K.; Shin, J.; Choi, J.	Visual language, BIM (Building Information Modeling), Korea Building Act, Building permit, De-sign assessment	Korea

3.2 Beschreibung der Themenschwerpunkte

Schwerpunkte und tangierende Themen im Bereich einer BIM-basierten Baugenehmigung lassen sich grundsätzlich in zwei Hauptkategorien aufteilen: (a) formelle Aspekte und (b) materielle Aspekte. Die Untersuchungen gehen teilweise ineinander über.

Formelle Aspekte stellen sich durch das Ziel, die Rahmenbedingungen für eine verbesserte und reibungslose Durchführung der Baugenehmigungsprüfung, dar. Die Korrelation von BIM mit anderen Anwendungen wie Geoinformationssystemen (GIS) oder Cloud-Technologien stehen hier im Vordergrund. Der Datenaustausch, in Form von Formaten oder Übertragungsmöglichkeiten, ist hier als Themenschwerpunkt zu bezeichnen. Darunter zählt ebenfalls die Einbindung von Datenbanken.

Materielle Aspekte fokussieren dagegen die inhaltliche Prüfung von baugenehmigungsrelevanten Belangen. Das betrifft vorrangig das Automated Code Compliance Checking und das damit verbundene Übersetzen der Gesetzestexte in eine computerinterpretierbare Spra-

che. Bei diesem Ansatz kommen nur klar definierte Gesetzestexte in Frage. Juristische Auslegungsmethoden, herbeigeführt durch unbestimmte Rechtsbegriffe, können nicht vollautomatisiert werden. Dagegen spricht die Maßgabe der Einzelfallbetrachtung.

Darüber hinaus untersuchen die Forschungsansätze verschiedene Teilbereiche, die den behördeninternen Prozessen vorgelagert sind. So werden beispielsweise Werkzeuge für die Planung des Entwurfsverfassers vorgestellt, welche der Erstellung der Baugenehmigungsunterlagen dienen. Die Benutzerfreundlichkeit der Anwendungen wird sowohl bei den formellen als auch bei den materiellen Aspekten thematisiert. Teilweise spielt die Anwendung der BIM-Methodik oder BIM-Werkzeugen eine untergeordnete Rolle.

3.3 Identifikation des Forschungsbedarfs

Bei der Recherche konnten keine Publikationen gefunden werden, die die eigentlichen **behördeninternen Teilprozesse** sowie **Entscheidungsprozesse** beleuchten, die nach Etscheid (2018) für eine Automatisierung notwendig sind. Weiterhin gibt es keine hinreichende Beschreibung, wie mit subjektiven Aspekten umgegangen werden kann und welche BIM-basierten Möglichkeiten in diesem Bereich existieren. Die Forschungsansätze setzen sich vorrangig mit quantitativen Anfragen auseinander, die aus formeller oder materieller Sicht begründen. Die Analyse und Einbindung subjektiver Individualentscheidungen bleiben unbeachtet.

4 Fazit und Ausblick

An dieser Stelle erfolgen eine abschließende Stellungnahme zu den Ergebnissen dieses Beitrags sowie ein Ausblick zum weiteren Vorgehen zu diesem Forschungsansatz.

4.1 Fazit

Der Umfang des veröffentlichten Literaturbestandes zum Thema BIM-basierte Baugenehmigungsprozesse ist als gering zu bezeichnen. Geeignete Suchphrasen wurden in sechs Fachdatenbanken angewendet. Von 322 betrachteten Abstracts konnten nur ca. 5 % als relevant eingestuft werden.

Im formellen Sinne fokussieren Forschungsansätze vor allem auf den Datenaustausch und die Verbindung zu anderen Technologien wie Cloud-Lösungen und der Anwendung von GIS. Im materiellen Sinne ist der Schwerpunkt das Automated Code Compliance Checking, welches stets die Übersetzung der computerinterpretierbaren Gesetzestexte voraussetzt. Obwohl Prozesse abgebildet wurden, gehen diese nur zweitrangig bzw. mit einem untergeordneten Fokus in die Untersuchungen ein. Es besteht Forschungsbedarf auf dem Gebiet der Prozessanalyse. Die Betrachtung des Ermessens und der Einzelfallentscheidung auf Seiten der Baugenehmigungsbehörde ist gegenwärtig nicht Gegenstand der Untersuchungen.

4.2 Ausblick

Um die Baugenehmigungsprüfung zu optimieren und zu digitalisieren, ist es essenziell alle damit zusammenhängenden Grundlagen zu verstehen. Zu den Grundlagen gehören vor allem die Prozesse, die die Feststellung der Baugenehmigungsfähigkeit und die verbunde-

nen Entscheidungen aufzeigen. Auf diese Weise können auch subjektive Aspekte und weitere Umweltfaktoren, die eine Entscheidung beeinflussen, aufgenommen werden.

In Anbetracht des §35a VwVfG scheint, zumindest in Deutschland, eine vollautomatisierte Baugenehmigungsprüfung nicht umsetzbar. Das Ermessen und die Auslegung sind Instrumente der Rechtswissenschaft und können nicht umgangen werden.

Zukünftig kann es demnach nur das Ziel sein, ein manuelles, aber dennoch modellorientiertes System zu entwickeln. Um eine Transparenz von Entscheidungen zu gewährleisten, ist es notwendig, Handlungsalternativen, Umweltfaktoren und Ziele in die Baugenehmigungsprüfung aufzunehmen.

Literatur

Al-Hussein, M., Kumar, J., Sharma, V., Mah, D., 2006. A knowledge- based automated development permit approval process in the housing industry. In: Engineering, Construction and Architectural Management, S. 209-457.

Borrmann, A., König, M., Koch, C., Beetz, J., 2015. Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis, Wiesbaden, Springer Verlag.

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, 2015. Stufenplan Digitales Planen und Bauen – Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken, https://www.bmvi.de/blaetterkatalog/index.html?catalog=230208#page_1, zuletzt aufgerufen am 29.01.2019.

Chognard, S., Dubois, A., Benmansour, Y., Torri, E., Domer, B., 2014. Digital Construction Permit: A Round Trip Between GIS and IFC; In: Smith, D. (Hrsg.) Advanced Computing Strategies for Engineering, S. 287-306.

Eirinaki, M., Dhar, S., Mathur, S., Kaley, A., Patel, A., Joshi, A., Shah, D., 2018. A building permit system for smart cities: A cloud-based framework; In: Computers, Environment and Urban Systems; S. 175-188.

Etscheid, J., 2018. Automatisierungspotenziale in der Verwaltung. In: R. Mohabbat Kar, B. E. P. Thapa, & P.Parycek (Hrsg.), (Un)berechenbar? Algorithmen und Automatisierung in Staat und Gesellschaft, S. 126-158.

Kim, H., Lee, J.-K., Shin, J., Choi, J., 2019. Visual language approach to representing KBimCode-based Korea building code sentences for automated rule checking; In: Journal of Computational Design and Engineering, S. 143-148.

Juan, Y.-K., Lai, W.-Y., Shih, S.-G., 2017. Building information modeling acceptance and readiness assessment in Taiwanese architectural firms; In: Journal of Civil Engineering and Management, S. 356-367.

Nawari, N.-O., 2018. Building Information Modeling – Automated Code Checking and Compliance processes. Boca Raton, CRC Press.

Nawari, N. O., Alsaffar, A., 2017. The Role of BIM in Simplifying Construction Permits in Kuwait; In: Volz (Hrsg.) AEI 2017, S. 855-866.

VwVfG, 2018. Verwaltungsverfahrensgesetz. Neugefasst durch Bek. v. 23.1.2003 I 102; zuletzt geändert durch Art. 5 Abs. 25 G v. 21.6.2019 I 846.

Wahed, A., Mahrous M., 2017. Requirements for establishing an information system to manage issuing building permits; In: HBRC Journal, S. 83-88.

Digitalisierung der Informationskette für Rückbauplanungen von Kernkraftwerken unter Berücksichtigung der BIM-Methodik

Johannes Frank Schüler[1] and Al-Hakam Hamdan[2]

[1]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden · E-Mail: johannes_frank.schueler@tu-dresden.de
[2]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden · E-Mail: al-hakam.hamdan@tu-dresden.de

Zur Realisierung eines digitalisierten Planungsprozesses für den Rückbau von Kernkraftwerken wird ein Konzept zur Anwendung eines cyberphysikalischen Systems vorgestellt. Dieses nutzt die RFID-Technologie zur Identifikation und Ortung der einzelnen abgebauten Elemente. Die benötigten Informationen werden innerhalb des Systems zentral über ein 3D-Modell verwaltet, das unter Verwendung des Building Information Modeling (BIM) neben der Gebäudegeometrie auch noch weitere semantische Daten beinhaltet. Zu beachten ist, dass in gegenwärtiger BIM-Software eine beliebige Zerstückelung der Bauteilrepräsentationen zu einem Semantikverlust führt. Um diesen zu umgehen, werden für die Tragwerksnachweise der Reststruktur zunächst vollständige Bauteile virtuell entfernt. Anschließend erfolgt die Zuordnung der mit RFID-Tags versehenen Bauteile zu ihren im Modell demontierten Repräsentationen. Unter Verwendung des Multimodell-Ansatzes werden während des gesamten Abbauprozesses die einzelnen Datenelemente unterschiedlicher Modelle miteinander verlinkt, wodurch eine computergestützte Verarbeitung und Interpretation in einer heterogenen Datenumgebung unterstützt wird. Eine Aktualisierung zuletzt passierter RFID-Gates für jedes Bauteil wird ebenfalls unterstützt. Durch eine gezielte Abfrage im Multimodell ist die Ausgabe der für die Materialflussplanung benötigten Informationen möglich.

Keywords: BIM, Rückbauplanung, Multimodell, ICDD, Kernkraftwerk

1 Einleitung

1.1 Motivation und Zielsetzung

Weltweit zählte die Internationale Atomenergie-Organisation im August 2017 über 600 Reaktoren und circa 300 kerntechnische Anlagen, die bisher abgeschaltet worden sind (GRS, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH (n.d.)). Erfolgreich zurückgebaut sind erst wenige. Der Planungsaufwand für ein einziges Kraftwerk fällt durch die Größe der Anlagen sehr umfangreich aus. Hinzu kommt die aufwändige Dokumentation und Nachverfolgung des abgebauten Materials und der hierfür erforderlichen Prozesse. Für jedes Bauteil

muss nachgewiesen werden, wo es abgebaut wurde, ob es kontaminiert ist, wie die Kontamination entfernt worden ist, ob es danach wirklich kontaminationsfrei ist und welche Bearbeitungsschritte durchlaufen wurden (BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016)). Um das enorme Auftragsvolumen seitens der ausführenden Unternehmen fachgerecht, sicher und nach dem neusten Stand der Technik bewältigen zu können, ist eine digitale Prozesskette der gesamten Rückbauprozedur notwendig. Dazu sind die vorherrschenden Rückbauprozesse zu untersuchen und zu verknüpfen. Durch deren Digitalisierung sollen eine fehlerfreie Planung, ein erleichtertes Controlling sowie eine reibungslose Ausführung und Dokumentation ermöglicht werden, da die computergestützte Verarbeitung der Planungsdaten schneller erfolgen kann. Die Prozesskette des Rückbaus soll direkt an die im Lebenszyklus verwendeten BIM-Daten aus Planung, Ausführung und Betrieb eines Objektes anknüpfen.

1.2 Stand der Technik

Untersuchungen zu einer cloudbasierten Variante eines RFID-Trackingsystems wurden bereits von Chen et al. (n.d.) durchgeführt. Dabei lag der Schwerpunkt auf dem Logistiksystem, bei welchem die Identifikationsträger konstant ohne menschliche Hilfe ausgelesen und verändert werden, indem beispielsweise ein sensor-basiertes Transportfahrzeug zum Einsatz kommen sollte. Im Gegensatz dazu hat Yanagihara et al. (n.d.) sich besonders auf das Projektmanagement mit der COMARD-Software (Computer Systems for Planning and Management of Reactor Decomissioning) konzentriert. Hier werden für jeden Arbeitsschritt die voraussichtliche Arbeitszeit und Strahlungsdosis berechnet. Iguchi et al. (n.d.) baut darauf auf und versucht zusätzlich mittels 3D-Modellen, Bauteildatenbanken und Virtual-Reality-Simulationen einen optimierten Rückbauablauf zu ermitteln. Dieses erweiterte System nennt sich DEXUS und wird speziell beim Rückbau des japanischen Kernkraftwerkes Fugen eingesetzt. Das Konzept des RFID-Trackings sowie das digitale Prozessmanagement bringen einzeln einen hohen Mehrwert im Kernkraftwerksrückbau. Würde man diese beiden Konstrukte zusätzlich addieren, könnte sich die Nutzbarkeit und Effizienz erneut steigern.

2 Digitalisierungskonzept

Building Information Modeling beschreibt den Prozess zur Erschaffung, Änderung und Verwaltung eines digitalen Gebäudemodells mittels entsprechender Softwarewerkzeuge (Bormann et al. (2015), S.4). Dabei ist die Digitalisierung der Daten unabdingbar. Des Weiteren gehört die Verlinkung der Datenmodelle und damit auch deren Interoperabilität zur BIM-Arbeitsweise Scherer and Schapke (2014). Dies ist essenziell für eine fehlerfreie Kommunikation unter den beteiligten Gewerken. Durch die Bereitstellung aller notwendigen Informationen mittels einer Verknüpfung der einzelnen Datenmodelle wird eine fachübergreifende Bearbeitung ermöglicht. Idealerweise werden bereits digitalisierte Informationen aus vorangegangenen Lebenszyklusphasen eines Bauwerkes verwendet. Die einzelnen Digitalisierungsschritte, von der Ausgangssituation bis zum fertigen Konzept, werden in den folgenden Unterkapiteln dargestellt.

2.1 Datenquellen

Da zum Zeitpunkt der Errichtung deutscher Atomkraftwerke die BIM-Methodik noch nicht angewandt wurde, liegen keine semantischen Modelle aus der Planungsphase der Anlagen in einem maschinenlesbaren Format vor. Vereinzelt wurden durch die Betreiber 2D-Pläne oder sogar 3D-Modelle rein geometrischer Natur im Nutzungsverlauf erstellt. Dies erschwert die digitale Planung während der Endphase im Lebenszyklus eines Gebäudes. Daher ist es in den meisten Fällen erforderlich, im Rahmen eines mehrstufigen BIMification-Prozesses (Scherer and Katranuschkov (2018)), neue vollständige Modelle anhand aufgenommener Daten des existierenden Gebäudes zu erstellen, beziehungsweise Modelle, die lediglich die Geometrie einer Konstruktion wiedergeben, zu BIM Modellen mittels Element-Annotation auszuarbeiten. Dies ist oftmals an erhöhte Kosten und Aufwand gebunden, ermöglicht hierfür aber eine computergestützte Verarbeitung und Verwaltung der Daten in späteren Planungsphasen, die zu finanziellen oder aufwandstechnischen Ersparnissen führen können. Es soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass für die weitere Bearbeitung ein ausführliches BIM-Modell vorliegt, das alle für die Rückbausimulation relevanten Daten erfasst. Anhand dieser Informationen kann unter Einhaltung der technischen und normativen Bedingungen ein Rückbaukonzept erstellt werden. Des Weiteren soll es möglich sein, Informationen während der Abbauarbeiten zu ändern oder zu ergänzen. Vorrangig kommt dies bei der Zuordnung der RFID-Tags zu den zu verfolgenden Bauteilen zum Einsatz, aber auch wenn Strahlungswerte nach einer Dekontamination aktualisiert oder Elemente in mehrere Teilelemente zerlegt werden müssen.

2.2 Simulationsablauf

Zur Simulation eines Rückbaus ist es erforderlich einzelne Bestandteile von Bauteilrepräsentationen im BIM-Modell zu entfernen. Allerdings ist eine Zerlegung von BIM-Objekten ohne einhergehenden Semantikverlust mit gängigen Software-Tools derzeit nicht möglich. Wird etwa eine Wand in mehrere Teilelemente zerlegt, verliert das Bauteil seine semantischen Zuordnungen und wird als Volumenkörper deklariert. Damit wäre es bspw. bei der Erstellung des Tragwerkmodells nicht mehr als tragendes Element aus dem Architekturmodell zu identifizieren. Außerdem ist es möglich, ohne statische Überprüfung anzunehmen, dass beim Entfernen eines Teilelementes das zugehörige Bauteil nicht mehr tragfähig ist. Demzufolge erspart dies, nach jedem abgebauten Element das BIM-Modell in ein Tragwerksmodell zu mappen und einen Tragwerksnachweis mittels Statik-Software zu erbringen. Die einzelnen Bauteile müssen aber auch in sich selbst tragfähig und damit lager- bzw. transportfähig sein. Dazu werden diese gesondert aus dem Modell exportiert und berechnet.

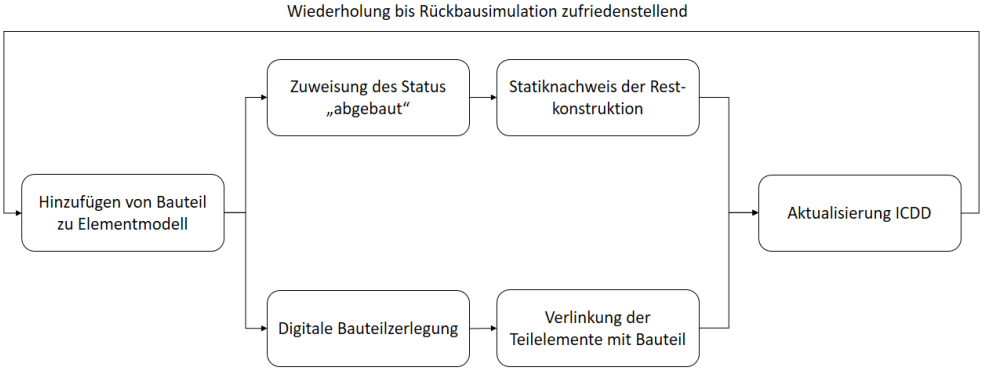


Abbildung 1: Konzept der digitalen Bauteilzerlegung für eine Rückbausimulation des Atomkraftwerks

Nachdem das Restgebäude statisch berechnet wurde, können nun die abgebauten Bauteile verarbeitet und digital zerlegt werden. Hierfür ist es notwendig, dass die Teilelemente ihren Ursprungselementen zugeordnet werden können. Dies erfolgt mittels Verlinkung der beiden Elemente in einem Multimodell (Fuchs and Scherer (2017)). Dabei filtert man zunächst die in der Simulation entfernten Bauteile inklusive der notwendigen Parameter über einen Algorithmus aus dem BIM-Modell heraus und überführt diese in ein separates Modell zur Repräsentation von Teilelementen. Wird innerhalb dieses Modells ein Teilelement erstellt, so wird parallel dazu eine Verknüpfung zum dazugehörigen Bauteil generiert und in einem Linkmodell als referenzierbarer Link abgespeichert. Zusätzlich wird jedes Teilelement mit einem RFID-Tag ebenfalls in einem separaten Linkmodell verknüpft. Außerdem wird jedem Bauteil durch einen booleschen Parameter namens „Abgebaut“ im BIM-Modell der Zustand im Rückbau zugewiesen. Dies kann z.B. in den Industry Foundation Classes (IFC), einem standardisierten BIM-Format durch Verwendung des Entitätstyps „IfcProperty“ realisiert werden. Mittels entsprechender Filterabfragen können somit alle abgebauten Bauteile ausgeblendet bzw. in einem neuen Teilmodell entfernt werden. Die Referenzierung der zu verlinkenden Daten erfolgt hierbei über einen eindeutigen Identifikator (in der Regel die ID bzw. GUID) des Objekts. Das Multimodell wird nach ISO/DIS 21597-1[1] als „Information container for data drop“ (ICDD) erstellt. Hierbei werden die Linkmodelle als Ontologien in RDF/XML serialisiert, wodurch eine Verarbeitung mit Semantic Web Technologien wie z.B. Abfragen mittels der „Semantic Protocol and RDF Query Language“ (SPARQL) ermöglicht wird.

Während der Simulation sollen aus der jeweiligen Gesamtbauteilgeometrie mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen eine effiziente Zerlegung im Hinblick auf die zu nutzenden Gebinde und der Minimierung von Trennflächen erreicht werden. Durch vorgeplante Zerkleinerung der kontaminierten Materialien entstehen Einsparungen von Behältern, Transportvolumen, Verfüllmaterialien, Werkzeugverschleiß und Aero- beziehungsweise Hydrosolbildung. Neben dem offensichtlichen Kostenvorteil entsteht damit ein zusätzlicher Sicherheitsgewinn für das Personal.

In der Ausführung soll zu jedem Element im Multimodell ein Zerlegevorschlag gespeichert werden. Nach der Demontage eines Teilelementes wird dieses in ein dafür vorgesehenes

[1] `https://www.iso.org/standard/74389.html`

Transportbehältnis gepackt. Das Gebinde wird dann über einen realen RFID-Tag verfolgt. Die Tag-ID und eventuell abweichende Informationen müssen dann über ein Handlesegerät eingetragen werden. Die aktuelle Position durch das letzte RFID-Gate samt Zeitstempel ist ein ständig zu aktualisierender Datensatz, welcher automatisiert aktualisiert wird.

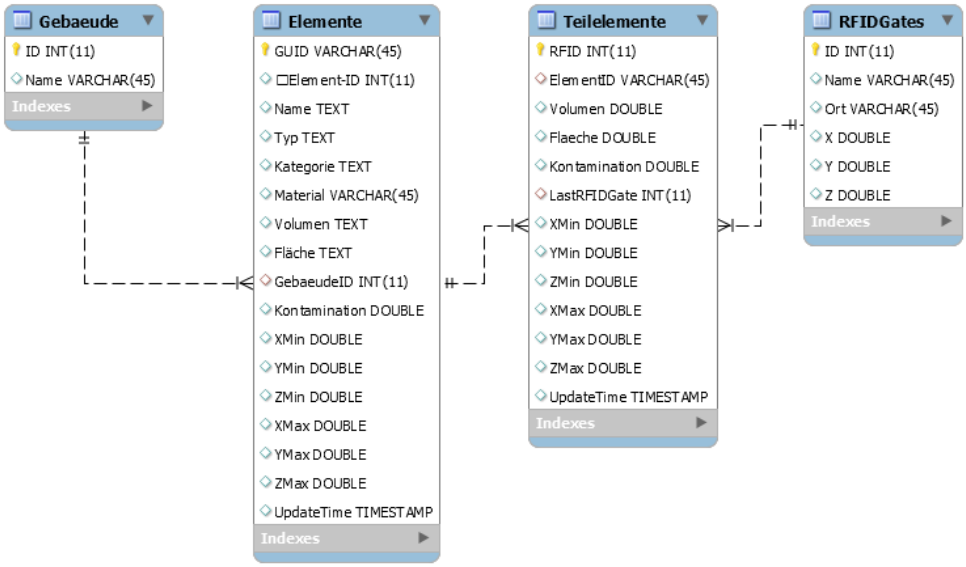


Abbildung 2: Struktur der zu verlinkenden Elemente in Linkmodell (exemplarische Ansicht in rel. Datenbank)

Die benötigten Daten für die Materialflussplanung können anschließend durch gezielte Abfragen aus dem Multimodell in das Materialflussplanungsprogramm übergeben werden. In diesem muss zuvor das Reststoffbehandlungszentrum modelliert worden sein. Anhand der Wertstromanalysen kann eine Änderung der Abbaureihenfolge, Lagerflächen, Durchsatzstärken usw. vorgenommen werden, um bei einem erneuten Simulationslauf verbesserte Ergebnisse zu erhalten.

Während des realen Rückbauprozesses müssen in regelmäßigen Abständen die tatsächlichen Fortschritte gespeichert werden, um diese als Sicherungskopie der Dokumentation beizufügen. Gleichzeitig sollten diese Arbeitsstände mit der Ausgangssimulation abgeglichen werden. Bei zu großen Differenzen können dann Maßnahmen ergriffen werden, um den Ablauf wieder zu optimieren. Alternativ kann auch ausgehend vom veränderten Zustand eine Simulation durchgeführt werden, um Prognosen für den neuen Ablauf zu treffen.

3 RFID-Tracking

Vor der eigentlichen Entwicklung des cyberphysischen Systems erfolgt zunächst die Ermittlung aller Randbedingungen. Hinsichtlich der Prozesse beim Rückbau von Atomkraftwerken fällt dabei der Einfluss der Kosten für Datenträger auf. Denn während des Rückbaus entstehen

unzählige Bauteile, welche identifiziert werden müssen. Es sind preiswerte Marker vonnöten, welche im Idealfall wiederverwendet werden können. Gleichzeitig sollte das System flexibel und skalierbar sein, um sich auf die ständig wechselnden Umstände einstellen zu können. Der Identifikationsvorgang soll so schnell wie möglich ablaufen, um Zeit und damit Kosten zu sparen. Eine Automatisierung ist von großem Vorteil, da diese sowohl Datensicherheit als auch die Einsatzfähigkeit in Bereichen mit hoher Dosisleistung mit sich bringt. Das Identifikationsmerkmal sollte trotz der auf einer Baustelle üblichen Einflüsse von Wasser, Dreck und Staub auslesbar sein.

Optische Identifikationssysteme, wie z.B. QR- oder Barcodes besitzen einen klaren Kostenvorteil gegenüber den elektrischen, denn die Erstellung eines optischen Datenträgers aus bedrucktem Papier oder Folie ist wesentlich günstiger als ein Transponder mit einer Platine Martin (2017). Trotzdem ist bei der Wahl des Trackingsystems die RFID-Technologie die aktuell zu präferierende Lösung. Aufgrund einer anpassungsfähigen Datenaufnahme, welche ohne Sichtkontakt und Personal auskommt. Dabei ist das gleichzeitige Erfassen mehrerer Objekte, sogar bei individueller Ausrichtung, in einem Senderadius von 10 Metern möglich. Die Fehlerquote ist hierbei sehr gering, da bei der elektronischen Datenübertragung eine Routine zur Überprüfung der fehlerfreien Datenübertragung angewandt wird. Außerdem kann das System auch an für Menschen gefährlichen Orten zum Einsatz kommen. Die Informationen können sicher im Inneren eines Schutzgehäuses aufbewahrt werden und sind folglich auch nach einer Oberflächendekontamination noch auslesbar. Bei Änderungen des Speicherinhaltes muss kein neues Etikett erstellt werden, sondern es kann ein schnelles Umschreiben per Handgerät erfolgen, wodurch eine Wiederverwendung der Transponder ermöglicht wird. Nachteilig wirkt sich die Absorption oder Reflektion der Bauteile auf das RFID-Signal aus. Um diese Effekte so gering wie möglich zu halten, werden UHF-Transponder benötigt, welche eine eigene Energieversorgung voraussetzen und damit teurer und in ihrer wartungsfreien Einsatzdauer begrenzt sind. Die momentan forcierte Verbesserung der Batterietechnologie und ein zu erwartender Anstieg an Personalkosten machen die Nutzung der Transponder aber immer rentabler Lolling (2003). Der RFID-Trackingprozess der beim Rückbauablauf von Atomkraftwerken zum Einsatz kommen soll ist in Abb. 3 dargestellt.

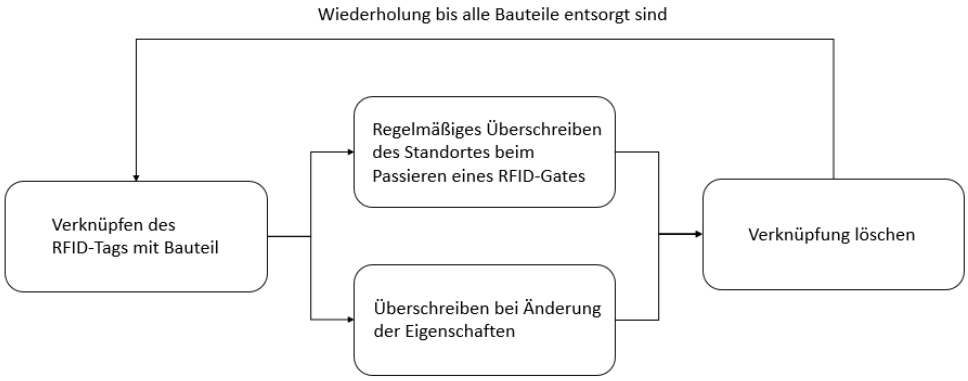


Abbildung 3: Prozessablauf des RFID-Trackings

Problematisch ist die Befestigung der Identifikationsmittel, die nicht auf der Oberfläche der

Bauteile möglich ist, da diese bei der Dekontamination vollständig gereinigt werden müssen, was zu einer Zerstörung der Datenträger führen würde. Bauteile mit sehr hoher Aktivität werden ferngesteuert zerlegt und sofort in dafür vorgesehen Gebinde eingeschlossen, sodass eine direkte Befestigung keinen Sinn ergeben würde. Eine praktikable Lösung wäre daher die Markierung der Bauteile an ihren Handhabungsboxen oder Gebinden. Das eigentliche Tracking der Bauteile ist nicht ortsgenau realisierbar. Eine GPS-Ortung ist innerhalb von Gebäuden nicht fehlerfrei möglich und nicht praktikabel, da die Empfängermodule im Vergleich zu den restlichen Identifikationsmarken besonders teuer sind. Erst beim Überlandtransport außerhalb des Betriebsgeländes kann das Transportfahrzeug mittels Zuordnung der Transponder zum Fahrzeug-GPS-Tracker verfolgt werden. Innerhalb des Kernkraftwerksgeländes werden verschiedene Zonen eingerichtet, welche nur durch RFID-Gates erreicht werden können. Beim Wechsel in eine andere Zone wird durch das jeweilige Tor die Position über einen automatischen Eintrag in der Datenbank erneuert. Die RFID-Transponder bleiben in ihrer Funktion auch durch die radioaktive Strahlung unbeeinflusst. Dies bewies das Argonne National Laboratory in einem Forschungsversuch mit verschiedenen RFID-Tags Chen et al. (2008). Diese befanden sich in einer Kunststoffhülle und beinhalteten zusätzlich einen Siegelsensor und Platz für weitere Messeinrichtungen wie ein Dosimeter oder GPS-Empfänger. Auch die Firma Alphasource nutzt erfolgreich RFID Tags in Kernkraftwerken bei ihrem Produkt RFID-Toolsaver zur Nachverfolgung von Werkzeugen Alphasource (2018).

4 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe des vorgestellten Simulationskonzeptes kann der Rückbau schon in der Planungsphase iterativ optimiert werden und ist notfalls auch während der Ausführung anpassbar. Das Trackingsystem ermöglicht die automatisierte Dokumentation der Aufenthaltsorte der Bauteile und lässt Informationsabfragen und -änderungen über einen RFID-Tag am gewählten Objekt zu.

Durch die Analyse der vorhandenen Datenquellen und Softwaresysteme wurde eine Strategie zur virtuellen Simulation eines Rückbauprojektes erstellt. Dabei musste vor allem die Interoperabilität der einzelnen Programme untereinander berücksichtigt werden, wodurch die Notwendigkeit einer Verlinkung mittels Multimodell ermittelt wurde. Das Konzept konnte nach erfolgreicher Erprobung in die zuvor erstellte Prozesskette des konventionellen Rückbaus von Kernkraftwerken integriert werden. Diese entstand durch Verknüpfen der einzelnen Arbeitsbereiche und Genehmigungsschritte. In die digitalisierte Prozesskette floss gleichzeitig die Anwendung des gewählten Trackingsystems ein.

Die Digitalisierung des Rückbaus von Gebäuden ist gerade beim Umgang mit Gefahrenstoffen von großem Vorteil für Mensch und Natur. Denn es wird mehr Sicherheit bei der Verwertung der belasteten Bauteile ermöglicht, da durch ein Identifikationssystem jederzeit der genaue Herkunfts- und Lagerort bestimmt werden kann. Das Konzept des Trackings durch RFID-Tags ist durch seine Skalierbarkeit für unterschiedlichste Projektgrößen einsetzbar. Neben der Unempfindlichkeit gegenüber Dreck und Wasser, kann die Datenaufnahme automatisiert stattfinden, wodurch die Fehleranfälligkeit und die Anzahl an erforderlichem Personal minimiert wird.

Des Weiteren ist eine bessere Planung im Vorfeld möglich, welche sich auch problemlos an unvorhergesehene Zwischenfälle im Bauablauf anpassen lässt. Das BIM-Modell wird nicht nur digital begleitend zurückgebaut, sondern kann schon in der Planungsphase simuliert wer-

den. Über einen iterativen Änderungsprozess wird die Optimierung des Ablaufes ermöglicht. Eine Anknüpfung an bestehende BIM-Daten ist aufgrund des Alters vieler Kernkraftwerke noch nicht möglich. Aber auch die direkte Nutzung neu erstellter Modelle fällt schwer, da die Kompatibilität verschiedener proprietärer Datentypen nicht immer gegeben ist.

Literatur

Alphasource (2018), 'Rfid nuclear solutions'.
URL: *http://www.rfidnuclear.com/*

BMU, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2016), *Leitfaden zur Stilllegung, zum sicheren Einschluss und zum Abbau von Anlagen und Anlagenteilen nach § 7 des Atomgesetzes, RS Handbuch 3-73*, Bundesanzeiger Amtlicher Teil, Bonn.

Bormann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2015), *Building Information Modeling - Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Chen, K., Hanchung, T. and Lui, Y. (2008), *Development of the RFID system for nuclear materials management*, Eigenverlag, Argonne.

Chen, Y.-C., Sun, H.-M., Chen, R.-S., Yeh, J.-h., Fan, X. and Chou, I.-H. (n.d.), 'Intelligent radioactive waste process cloud-based system for nuclear power plant decommissioning'.

Fuchs, S. and Scherer, R. (2017), 'Multimodels - instant nd-modeling using original data', *Automation in Construction* (75).

GRS, Gesellschaft für Anlagen und Reaktorsicherheit gGmbH (n.d.), 'Stilllegung kerntechnischer anlagen, 2. auflage'.

Iguchi, Y., Kanehira, Y., Tachibana, M. and Johnsen, T. (n.d.), 'Development of decomissioning engineering support system (dexus) of fugen nuclear power station'.

Lolling, A. (2003), *Identifikationssysteme in der Logistik: Übersicht und praxisorientierte Auswahl*, Praxisrteihe Logistik, Band 10, Hussverlag, München.

Martin, H. (2017), *Transport- und Lagerlogistik : Systematik, Planung, Einsatz und Wirtschaftlichkeit, 10. Auflage*, Springer Vieweg, Wiesbaden.

Scherer, R. and Katranuschkov, P. (2018), 'Bimification: How to create and use bim for retrofitting', *Advanced Engineering Informatics* (38).

Scherer, R. and Schapke, S.-E. (2014), *Informationssysteme im Bauwesen 2 - Anwendungen*, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg.

Yanagihara, S., Sukegawa, T. and Shiraishi, K. (n.d.), 'Development of computer systems for planning and management of reactor decommissioning'.

Teilautomatisierte Zusammenführung heterogener digitaler Daten aus multiplen Quellen im Rahmen der Tatortdokumentation

Christian Eller[1], Robert Irmler[2], Timo Bittner[1] und Steffen Franz[2]

[1]Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · TU Darmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt ·
E-Mail: insitu@iib.tu-darmstadt.de

[2]Kriminaltechnisches Institut · Bundeskriminalamt · Äppelallee 45 · 65203 Wiesbaden ·
E-Mail: kt24-insitu@bka.bund.de

Im Zuge des Forschungsvorhabens INSITU wird die Optimierung der Strafverfolgung anhand der Unterstützung bzw. Ergänzung bestehender Prozesse mittels digitaler Methoden untersucht. In Zusammenarbeit mit der Polizei gilt es dabei, Tatorte sowie die zugehörigen Dokumentationsergebnisse anhand von mobilen Endgeräten ganzheitlich zu erfassen und in ein verknüpftes, räumlich-semantisches Tatortmodell zu überführen. Der vorliegende Beitrag betrachtet daher Möglichkeiten für die vollständige digitale Erfassung und Verarbeitung aller Informationen eines Tatorts. Hierfür wird unter anderem die Eignung der von Google entwickelten ARCore-Plattform untersucht, um per Mobilcomputer vor Ort Bereiche und Spuren zu erfasst und räumlich zu referenzieren. Ziel ist es, unter Einbeziehung einer solchen Technologie verschiedenste digitale Daten aus unterschiedlichen Quellen in einem ganzheitlichen und vollumfassenden Tatortmodell (teil-)automatisiert zusammenzuführen.

Keywords: Tatortdokumentation, Datenverarbeitung, Augmented Reality, Prozessoptimierung

1 Einleitung

Nach einem Anschlag, Einbruch oder anderweitigen Verbrechen wird im Rahmen der polizeilichen Tätigkeiten der Tatort erfasst und dokumentiert. Die Anforderungen an diese Arbeit sind hoch, es gilt generelle Belange der Strafverfolgung, einen möglichst zeitnahen Abschluss ohne Qualitäts- und Informationsverlust sowie individuelle Aspekte einer jeden Auffindesituation zu beachten. Während digitale Technologien bereits für bestimmte Arbeitsschritte eingesetzt werden, sind die derzeitigen Systeme meist auf die Bedürfnisse einzelner Akteure oder bestimmter Anwender spezialisiert und damit nicht universell für die allgemeine Tatortbefundaufnahme nutzbar. Hier setzt das Forschungsvorhaben INSITU an: In Zusammenarbeit mit der Polizei wird erforscht, wie Vorgänge bei der Tatortdokumentation sowie die zugehörigen Ergebnisse anhand von mobilen Endgeräten ganzheitlich erfasst und in ein vernetztes, räumlich-semantisches Tatortmodell überführt werden können. Hierbei gilt es, an bestehende Prozesse anzuknüpfen, um die Strafverfolgung zu optimieren und um zusätzliche Möglichkeiten zu erweitern. So sollen für bislang analog zu erhebende Daten bzw. Vorgänge, bspw. mit Stift und Papier händisch angefertigte Skizzen zur räumlichen Dokumentation vor Ort, Alternativen geschaffen werden. Dies geschieht mit mobilen Endgeräten

wie Smartphones und Tablets. Die auf diese Weise erfassten Daten sollen anschließend (teil-)automatisiert aufgearbeitet und mit anderen Informationen zusammengeführt werden. Als Resultat entsteht ein räumlich-semantisches Tatortmodell, das als zentrales Element der weiteren Bearbeitung des Strafverfolgungsverfahrens dient. Um hier eine systemunabhängige und vernetzte Arbeitsweise zu ermöglichen, sollen die vor Ort erfassten Daten in einer Webapplikation für die Auswertung zugänglich gemacht werden. Die Umsetzung dieser in Abbildung 1 dargestellten Zusammenhänge wird in diesem Beitrag in Verbindung mit Tech-nologien wie ARCore und WebGL hinsichtlich der generellen Machbarkeit einer solchen Herangehensweise untersucht.

Abbildung 1: Kernbereiche des INSITU-Systems

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Für eine multimodale Vor-Ort-Beschreibung von räumlich-semantischen Daten und dem daraus resultierenden Tatortmodell sind mobile Lösungen gefordert. Weiterhin müssen die Verarbeitung bzw. Aufbereitung im Zuge der Strafverfolgung über eine Anbindung an bestehende Prozesse und Arbeitsweisen gewährleistet sein. Entsprechend wird zunächst die Verwendung mobiler Endgeräte wie Smartphones im Bereich der Aufnahme untersucht. Die so erfassten Informationen gilt es anschließend mit anderen Daten zusammenzuführen. Für einige ausgewählte Bereiche sind bereits heute (Mobil-)Computer und verschiedene forensische bzw. verwaltende Softwareprogramme im Einsatz. Für die anschließende Auswertung soll außerdem die bestehende Infrastruktur berücksichtigt werden, ohne dabei zu viele Anforderungen an Hardwarekomponenten oder Betriebssysteme zu stellen, wodurch es sich im Rahmen des Vorhabens anbot, eine Webanwendung zu entwickeln.

Bezüglich der Mobilcomputer und der Tatortdokumentation vor Ort ist eine eigene App angedacht, welche die Beamten unter anderem bei der Erfassung der Tatortgeometrie, der räumlichen Dokumentation sowie der multimodalen Beschreibung, aber auch bei der Zusammenarbeit und Datensynchronisation unterstützt. Gezielte Elemente sollen weiterhin über Möglichkeiten für die Auswertung und Feedback vor Ort optimiert werden. Bereits Ramabhadran (2007) zeigte Wege, auf mobilen Endgeräten schriftliche Notizen direkt in digitaler Form zu erstellen und anschließend als digitales Dokument (z.B. PDF) weiterhin zu nutzen. Ziel war es, einzelne Prozesse zu beschleunigen, maschinenverständlich zu arbeiten und Probleme wie unleserliche Handschrift zu umgehen. Zudem konnten Informationen wie GPS-Daten automatisch mit aufgenommen werden.

Mit der Ausreifung der in Verbindung stehenden Technologien können mittlerweile über die einfache maschinenlesbare Textdokumentation hinaus verschiedene Medienformate (z.B. Fotos, Videos, Sprachaufzeichnungen) genutzt werden. Werden diese Möglichkeiten mit neuartigen Methoden wie z.B. der Augmented Reality (AR) kombiniert, kann neben der umfangreichen semantischen Beschreibung auch eine Verortung der Informationen im dreidimensionalen Raum erfolgen. Hierbei werden unter dem Begriff der Visual Inertial Odometry (VIO) Methoden zusammengeführt, die die Position und Orientierung eines Systems bestimmen. Über die Verbindung visueller Informationen (des Kamerabildes) mit Sensordaten des Smartphones (Inertial Measurement Unit, kurz IMU) können dabei Rückschlüsse auf räumliche Koordinaten und Bezüge zueinander gezogen werden. Mithilfe von Ansätzen wie dem Prinzip des Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) können räumliche Datenpunkte aufgenommen und miteinander verknüpft werden. Ähnlich einem 3D-Scan, wie es Marcin et al. (2017) und Dustin et al. (2016) als mobile Lösung im Kontext der Spurensicherung beschreiben, können moderne AR-Technologien somit Punktwolken in geringerer Auflösung verknüpft mit Bilddaten erstellen. Darüber hinaus bietet dort vorgestellte Lösung die Möglichkeit diese Punkte über die Koordinate und RGB-Werte hinaus mit weiteren Daten zu verknüpfen. Dies können im einfachen Fall mit dem mobilen Endgerät aufgenommene Informationen wie Videos, Bilder, Sprachaufnahmen, Textnotizen etc. sein oder auch Aufnahmen, die extern erstellt werden, wie Aufnahmen einer Digitalkamera, 360°-Aufnahmen oder Laserscans. Über die hier erläuterten Ansätze soll die Möglichkeit gegeben werden, heterogene digitale Daten aus multiplen Quellen zusammenzuführen. Dabei unterscheiden sich Art und Umfang der Daten für jeden Tatort und können unter den unterschiedlichsten Umständen in verschiedenen Kombinationen auftreten. Im Folgenden wird daher die räumlich-semantische Spuraufnahmen durch das mobile Endgerät in Verbindung mit ARCore, dem AR-System von Google (Google, 2019a), betrachtet. Dies dient der Erfassung der räumlichen Zusammenhänge und erlaubt die (teil-)automatisierte Zusammenführung der zuvor erwähnten heterogenen Datengrundlage. Diesbezüglich soll z.B. in Verbindung mit der Spuraufnahme an einem Tatort eine Punktwolke angebunden werden, die im weiteren Verlauf der Strafverfolgung geometrische Informationen vorhält und gleichzeitig eine Möglichkeit für die beständige Visualisierung darstellt. Um große Datenmengen performant darzustellen und unterschiedliche Informationen in räumlichen Bezug zu setzen, bieten sich verschiedene Webtechnologien an. Huang und Wang (2017) zeigten, dass mit der Technik der Web Graphics Library (WebGL) auch große 3D-Punktwolken performant im Browser dargestellt werden können. Devaux et al. (2012) demonstrierten die interaktive Visualisierung verschiedener Datenquellen im Browser, indem sie Punktwolken, Bilder und Modelle in ein Ansichtsfenster einfügten. Über die Verwendung von WebGL konnte die Installation zusätzlicher Software vermieden werden. Für die Anbindung an den BIM-Prozess und den Import von 3D-Gebäudemodellen wiesen Xu et al. (2016) einen Weg über das offene Datenformat IFC auf, wodurch die Modelle im Webviewer angezeigt werden können. Das Potenzial, die multimodale Dokumentation in einer Kombination von mobilen Endgeräten mit AR und eine Webanwendung basierend auf WebGL umzusetzen, ist somit grundlegend gegeben.

Gegenwärtig finden bei der Polizeiarbeit in Deutschland wie zuvor erwähnt einige Systeme Anwendung, die als Insellösung für ausgewählte Anwender dienen. Dies reicht von groß angelegter Software für die Fahndung oder auch Vorgangsbearbeitung (Hemmerling and Kendzia, 2018) bis hin zu stark individualisierten und fokussierten Lösungen wie z.B. einer

App für die Unfallaufnahme im Saarland (Kutsche, 2017). Da es jedoch keine einheitlichen, verbindlichen Vorgaben gibt, nicht einmal für die weiter reichenden Fahndungs- und Vorgangsbearbeitungssysteme, verwenden die Polizeien in den unterschiedlichen Bundesländern und in diversen Bereichen eine Vielzahl verschiedener Anwendungen. Aus diesem Grund ist die so entstandene IT-Landschaft von „Eigenentwicklungen, Sonderlösungen, Schnittstellen, unterschiedlichen Dateiformaten und Erhebungsregeln“ (BMI, 2018) geprägt. Einen konsistenten und geregelten Austausch gibt es bislang nicht. Hier soll im Rahmen des Programms „Polizei 2020“ Abhilfe geschaffen werden, indem die polizeiliche Informationsarchitektur neugeordnet wird (BMI, 2018). Einer der Ansatzpunkte ist der XML-basierte Standard „XPolizei“, über den ein einheitlicher Datenaustausch unter Beachtung von Belan-gen wie Zugriff bzw. Abruf, Datenschutz und Informationsqualität ermöglicht werden soll.

3 Das räumlich-semantische Tatortmodell

An dieser Stelle setzt das INSITU-System an. Zunächst sollen im Rahmen der Erfassung (Aufnahme vor Ort per mobiler App) eine multimodale Datenaufnahme und eine räumliche Dokumentation auf dem Mobilcomputer ermöglicht werden. Neben der Dokumentation semantischer Informationen, bspw. der Beschreibung eines gesicherten Objekts inklusive Annotationen per Notiz, Foto oder auch mittels Video- und Audioaufnahme, erfolgt zudem die Aufnahme einer räumlichen Referenz mittels einer x,y,z-Koordinate zu allen erfassten Daten. Zu diesem Zweck wird für jeden Tatort ein lokales Koordinatensystem angelegt, welches anschließend bei der Zusammenführung der Daten für die Erstellung des vernetzt-digitalen Tatortmodells genutzt werden kann. Dieses kann später bei der Auswertung (per Webanwendung) im Zuge interaktiver Visualisierungsmöglichkeiten, Such- und Filterfunktionen sowie der Erstellung von Protokollen und Berichten für die Auswertung räumlich-semantischer Zusammenhänge herangezogen werden (vgl. Abbildung 1 und Abbildung 2).

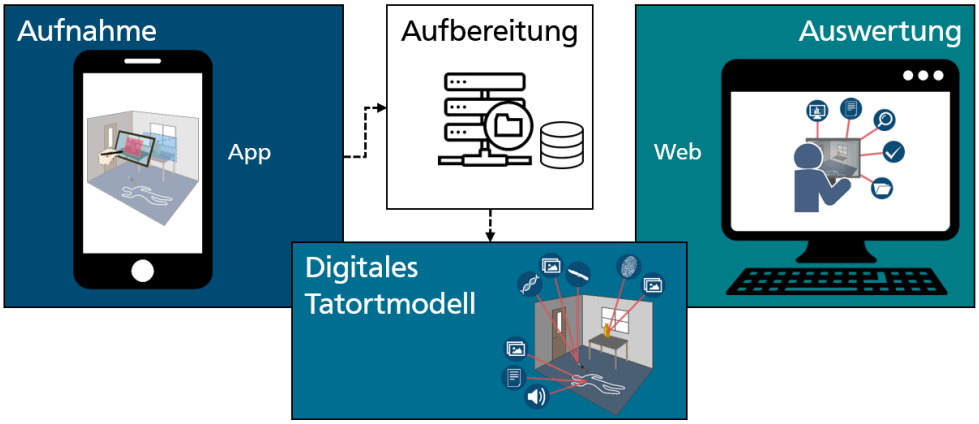


Abbildung 2: Mobile Applikation und Desktopanwendung im Kontext der Kernbereiche

Übergreifendes Ziel ist es dabei, die Vorgänge innerhalb des INSITU-Systems nahtlos in vorhandene Abläufe zu integrieren bzw. diese zu erweitern, um sowohl bereits existierenden als auch künftigen Ansprüchen zu genügen. Dies beginnt mit der Tatortdokumentation, in deren Zuge verschiedenste Aspekte erfasst werden müssen. In der Regel werden die

vorliegenden Zusammenhänge zunächst in einer groben Tatortgeometrie erfasst, die sich dann z.B. bei einem Wohnungseinbruch in die unterschiedlichen Räume und optional in weitere Asservierungsbereiche untergliedert. Schließlich werden Asservate bzw. Spuren aufgenommen. Im Sinne der Unterstützung durch Mobilcomputer kann dabei im Hintergrund automatisch eine Vergabe von Asservierungsnummern nach vorgegeben Schemata erfolgen. Aufgrund der automatischen Verarbeitung durch das mobile Endgerät können dabei nicht nur Fehler wie bspw. eine doppelte Vergabe von Nummern vermieden werden, sondern es wird auch eine eindeutige Zuordnung von Asservaten und Spuren mittels Universally Unique Identifier (UUID) und eine räumliche Referenzierung in Verbindung mit den zuvor erwähnten Sensoren des Mobilcomputers vorgenommen. Die Menge der aufzunehmenden Daten wird maßgeblich von Art und Größe des Tatorts beeinflusst, bei einem Kfz-Delikt bspw. müssen keine Räume erfasst werden. Ein weiteres Beispiel für die Notwendigkeit flexibler Vorgehensweisen sind Außentatorte.

Gleichzeitig mit der Verarbeitung der direkt zu hinterlegenden Informationen erfolgt die weiterführende räumlich-semantische Verknüpfung der einzelnen Datenpunkte. Über die aus Translation und Rotation ermittelte Position des mobilen Endgerätes erfolgt unter Verwendung von ARCore eine Eintragung in das lokale kartesische Koordinatensystem des Tatortmodells. Anhand der relativen x,y,z-Werte, die sich auf einen zuvor definierten, gemeinsamen Ursprung beziehen, können außerdem räumliche Beziehungen der Objekte untereinander hergestellt werden. So lassen sich bei der anschließenden Auswertung bspw. alle Objekte eines bestimmten Typs filtern, die im Wohnzimmer aufgenommen wurden. Gleichermaßen kann aus den Koordinaten, die im Zuge der Erfassung eines Raumes angelegt wurden, ein Grundriss und ein einfaches 3D-Modell generiert werden. Dies dient insbesondere der interaktiven Visualisierung, könnte später aber auch für zusätzliche Funktionen wie z.B. einen IFC-Export genutzt werden. Darüber hinaus können aber auch semantische Zusammenhänge automatisch hergestellt und beim Zusammenführen der Informationen im Rahmen der weiteren Arbeit genutzt werden. Dies reicht von einfachen direkten Verknüpfungen (Foto X zeigt Asservat Y) bis hin zu komplexen Verbindungen, die detaillierte Auswertungsmöglich-keiten in Form von Such- und Filterfunktionen mit sich bringen (Erstellen einer Lichtbild-mappe aller Fotos, die von einer bestimmten Person in einem Zeitraum von Spuren eines spezifischen Typs gemacht wurden). Derartige automatisierte Vorgänge bedeuten eine im-mense Zeitersparnis und reduzieren das Risiko, Fehler zu machen oder etwas zu übersehen.

Die räumlich-semantische Vernetzung des Tatortmodells erfolgt somit über die mit ARCore erfassten Koordinaten, den von der App vergebenen zuvor erwähnten UUID sowie weitere Abläufe, die bei der Tatortdokumentation durchgeführt und durch den Mobilcomputer unterstützt werden. Hierzu zählen unter anderem ein automatisch erstellter Verlauf des gesamten Verfahrens, der für sämtliche Aktionen einen Zeitstempel sowie den jeweiligen Benutzer hinterlegt. Dies schafft zum einen Nachvollziehbarkeit hinsichtlich der Beweismittelkette (Chain of Custody) und ermöglicht zum anderen eine konsistente und einheitliche Datenerfassung und -haltung. Dies ist insbesondere beim Mehrbenutzerbetrieb, dem kollaborativen Arbeiten mit mehreren Endgeräten für eine adäquate Datensynchronisation unabdinglich. Ferner können damit personenbezogene oder zeitabhängige Such- und Filterfunktionen verwendet werden. Auch hier ist durch die entsprechende Übertragung der Daten an die Desktopanwendung der Vorteil der digitalen Vorgehensweise unmittelbar ersichtlich: Über die räumlichen und semantischen Informationen können alle Objekte zueinander in Beziehung gesetzt werden. In dem daraus resultierenden vernetzten Tatortmodell kann aber nicht nur

die multimodale Beschreibung aus dem Endgerät, sondern auch heterogene Daten aus anderen Quellen verarbeitet und dargestellt werden. Dazu zählen bspw. hochauflösende Fotos digitaler Spiegelreflexkameras, meist mit zusätzlichen Geräten aufgenommene Punktwolken bzw. Scans oder auch 360°-Aufnahmen des Tatorts. In Verbindung mit den geometrischen Informationen und den multimodalen Annotationen in Form von Bildern, Videos, Audioaufnahmen und Texten entsteht so ein ganzheitliches, semantisch angereichertes Tatortmodell, welches vollumfänglich die relevanten Zusammenhänge der Tatortarbeit nachvollziehbar darstellt. Verschiedene Visualisierungsmöglichkeiten wie Grundrisse, Ansichten und Schnitte sowie der WebGL-Viewer mit einer vollwertigen dreidimensionalen und interaktiven Darstellung der digitalen Daten bieten nach der Zusammenführung weitreichende Funktionen zum Anzeigen, Suchen und Filtern sowie Auswerten. Um dieses Konzept zu veran-schaulichen, wird im folgenden Abschnitt das Vorgehen anhand eines ausgewählten Beispiels im Rahmen einer generellen Machbarkeitsbetrachtung exemplarisch erläutert.

4 Anwendungsbeispiel und Funktionstest

Zur Demonstration und Durchführung eines ersten Funktionstests wurde eine Android-App (Android Version 8.1+, Kompatibilität mit ARCore erforderlich (Google, 2019b)) und eine Webanwendung mittels MEAN-Stack (MongoDB, Express, Angular, Node.js) umgesetzt. Die App wurde auf den Smartphones Google Pixel 2 sowie Samsung Galaxy Note 9 installiert und verwendet, die Webanwendung wurde mit den Browsern Firefox und Chrome getestet. Für das Anwendungsbeispiel wurde exemplarisch ein Tatort in einer Wohnung dokumentiert. Mit den mobilen Endgeräten wurden in Verbindung mit der INSITU-App räumlich-semantische Informationen aufgenommen. Mit Hilfe der AR-Anwendung konnten Räume, Bereiche sowie Datenpunkte erfasst bzw. gesetzt werden. Zu diesen Punkten wurden zudem einige Annotationen in Form von Fotos, Videos, Textnotizen, Zeichnungen und Sprachaufnahmen hinzugefügt. Diese Annotationen wurden dabei erfolgreich direkt mit dem räumlichen Datenpunkt der ausgewählten Spur oder auch automatisiert mit dem Standpunkt des Benutzers verknüpft. Über die Nearby-Technologie von Google (2019c) konnte die Datensynchronisation in Echtzeit ohne Internet-Anbindung über mehrere mobile Endgeräte umgesetzt werden. Mit dem zuvor erläuterten Vorgehen wurde der gesamte Tatort kollaborativ erfasst und in Form einer JSON-Datei exportiert. Importiert in die Datenbank der INSITU-Webanwendung stehen die Daten somit der Webanwendung zur Verfügung, zusätzlich werden Medien wie Bilder und Videos in einer einheitlichen Struktur abgelegt. Als externe Datenquelle wurde eine Punktwolke von einem Raum aufgenommen und im Zuge der Nachbearbeitung mit zwei Referenzpunkten versehen. Analog wurden in der App zwei Passpunkte erzeugt (vgl. Abbildung 3). Mittels Überlagerung und der daraus abgeleiteten Koordinaten-transformation wurden die Daten automatisch zusammengeführt, eine nachträgliche manuelle Feineinstellung ist dank der Funktionen der Anwendung ebenfalls ohne Fachkenntnisse bezüglich der Verarbeitung von Punktwolken möglich. Dieser Ansatz ließe sich zudem auf andere Daten übertragen und könnte künftig mit anhand der automatisierten Erkennung von Fixpunkten (QR-Codes, Spurentafeln o.ä.) erweitert und vereinfacht werden.

Nach der Zusammenführung konnte das räumlich-semantische Tatortmodell im Webviewer betrachtet und aufgrund der interaktiven Visualisierung für die Auswertung genutzt werden. Im in Abbildung 3 gezeigten Anwendungsfall wurde eine Gegenstandsspur ausgewählt. Diese wird dann farblich hervorgehoben, der Fundort sowie umliegende Bereiche im

Grundriss näher angezeigt und im Zusammenhang stehende Informationen wie Fotos und Sprachaufnahmen in der Detailansicht (s. Abbildung 3 rechts unten) aufgelistet. Mit üblichen Interaktionen wie dem Bewegen der Kameraperspektive, dem Ein- bzw. Ausblenden von bestimmten Datenpunkten oder Objekten sowie Detailansicht eines ausgewählten Elements wurden vorerst alle Anforderungen an den ersten Test erfüllt. Filter- und Suchfunktionen sind in Teilen umgesetzt und werden im weiteren Verlauf des Vorhabens um die Bedürfnisse der Endanwender ergänzt. Die zusammengeführten Daten konnten in der Webanwendung systemunabhängig und ohne Installation zugänglich gemacht werden.

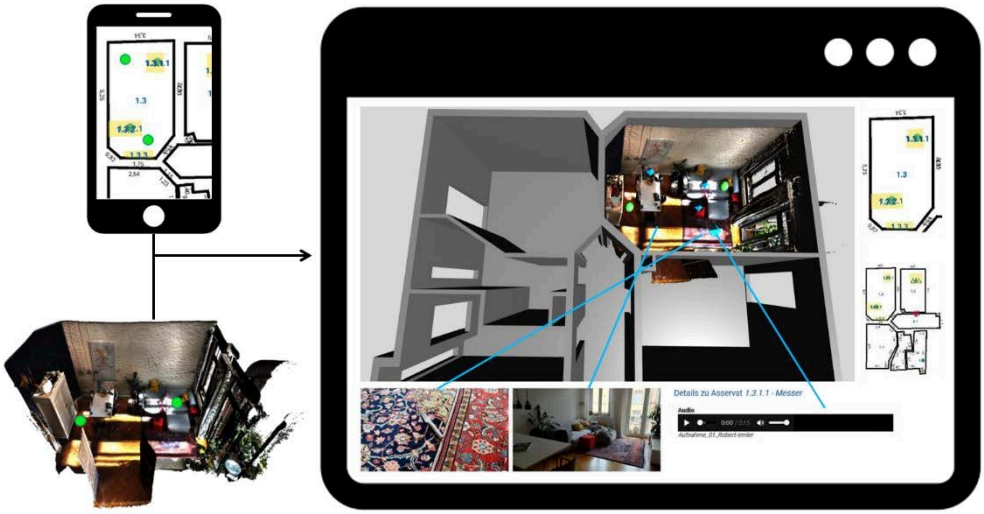


Abbildung 3: Visualisierung des räumlich-semantischen Tatortmodells im Webviewer

5 Fazit und Ausblick

Es konnte jeweils eine Demonstrationsanwendung für die App- und Web-Komponenten des INSITU-Systems umgesetzt werden, welche die grundsätzlichen Funktionalitäten aufzeigt und das (teil-)automatisierte Zusammenführen von heterogenen Daten aus multiplen Quellen im Rahmen der Tatortdokumentation ermöglicht. Die Datenaufnahme in Verbindung mit ARCore sowie den Standardfunktionen des mobilen Endgeräts und der Datenaustausch über die Nearby-API konnten erfolgreich implementiert und in Echtzeit kollaborativ vor Ort eingesetzt werden. Dabei werden automatisiert Teile des räumlich-semantischen Tatortmodells direkt vor Ort erzeugt, welches im Nachgang durch die Einbindung weiterer Daten um zusätzliche Elemente angereichert wird. Diese Erkenntnisse können dank der Entwicklung eines performanten Viewers mithilfe von WebGL für die Auswertung genutzt werden. Die Webanwendung ermöglicht Interaktionen in Form von Filter- und Suchfunktionen und stellt die zusammengeführten Informationen eines Tatorts vollumfänglich dar. In einem einfachen Anwendungsfall konnte das Zusammenspiel von App und Web und der Nutzen in den relevanten Bereichen der Strafverfolgung veranschaulicht und erfolgreich getestet werden.

Im weiteren Verlauf des Projekts werden zusätzliche (teil-)automatisierte Möglichkeiten zur Anbindung von heterogenen Daten untersucht, z.B. mithilfe von KI/ML-Methoden. Im Bereich der Aufnahme werden weitere maschinengestützte Verfahren evaluiert, z.B. die Aufnahme und semantische Anreicherung von Punktwolken direkt auf dem mobilen Endgerät. Perspektivisch können derartige Innovationen in der Praxis einen erheblichen Mehrwert für die Polizeiarbeit darstellen, da alle benötigten Informationen multimodal und vernetzt erhoben werden, wodurch sie exakt auf bestimmte Fragestellungen zugeschnitten verarbeitet und extrahiert werden können. In Absprache mit den Endanwendern wird in Zukunft die Funktionalität angepasst und erweitert.

Literatur

BMI, 2018. Programm “Polizei 2020”. Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat. URL http://www.bmi.bund.de/DE/themen/sicherheit/nationale-und-internationale-zusammenarbeit/polizei-2020/polizei-2020-artikel.html?nn=10391826

Devaux, A., Brédif, M., Paparoditis, N., 2012. A web-based 3D mapping application using WebGL allowing interaction with images, point clouds and models, in: Proceedings of the 20th International Conference on Advances in Geographic Information Systems - SIGSPATIAL ’12, Redondo Beach, California, p. 586. https://doi.org/10.1145/2424321.2424422

Dustin, D., Liscio, E., Eng, P., 2016. Accuracy and Repeatability of the Laser Scanner and Total Station for Crime and Accident Scene Documentation. ACSR Journal.

Google, 2019a. ARCore Overview - ARCore. Google Developers. URL https://developers.google.com/ar/discover/

Google, 2019b. Supported Devices - ARCore - Google Developers. URL https://developers.google.com/ar/discover/supported-devices

Google, 2019c. Nearby - Google Developers. URL https://developers.google.com/nearby/

Hemmerling, A., Kendzia, L., 2018. Millionen Datensätze und Millionen Kosten: Thüringer Polizei führt neue Software ein | MDR.DE. URL https://www.mdr.de/thueringen/neue-polizei-software-comvor-100.html

Huang, J., Wang, J., 2017. 3D Visualization of Point Clouds Using HTML5 and WebGL, in: Proceedings of The 7th International Conference on Computer Engineering and Networks — PoS(CENet2017), Sissa Medialab, Shanghai, China, p. 64. https://doi.org/10.22323/1.299.0064

Kutsche, K., 2017. Nur noch einmal eingeben - App für Unfallaufnahme, Interview mit Professor Peter Loos. Süddeutsche Zeitung. URL https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/app-fuer-unfallaufnahme-nur-noch-einmal-eingeben-1.3700563

Marcin, A., Maciej, S., Robert, S., Adam, W., 2017. Hierarchical, Three-Dimensional Measurement System for Crime Scene Scanning. J. Forensic Sci. 62, 889–899. https://doi.org/10.1111/1556-4029.13382

Ramabhadran, A., 2015. Forensic Investigation Process Model For Windows Mobile Devices. Security Group - Tata Elxsi.

Xu, Z., Zhang, Y., Xu, X., 2016. 3D visualization for building information models based upon IFC and WebGL integration. Multimed. Tools Appl. 75, 17421–17441. https://doi.org/10.1007/s11042-016-4104-9

Leveraging BIM in Undergraduate Education at Disciplinary Level

Sairah Badar[1]

[1]Dessauer Institut für Baugestaltung HS Anhalt · Seminarplatz 2a · 06846 Dessau · E-Mail: sairah.badar@hs-anhalt.de

Integartion of building information modeling (BIM) in architectecture, engineering and construction (AEC) education is a contemprary challenge for academia. Various approaches have been adopted to integrate BIM in academia of which interdisciplinary approach simulating the real world BIM working environment is considered the most suitable approach to prepare the future professionals to work in a collaborative enviroment. But the implementation of interdisciplinary approach requires cooperation and collaboraion among respective faculties or universities which poses multiple institutional and bureaucratic challenges in achieving these collaborations. Under the circumstances a discipline level scenario must be engineered to leverage BIM in academia. This study explores various approaches to integrate BIM in academia in order to find a strategy to impart interdisciplinarity in BIM education at single dicipinary level. A critical evaluation of various theoretical and practical approaches from literature is conducted in order to find an approach to modify current bachelor study programs of architecture. It suggests a three phased approach to incorporate BIM in curriculum to fashion a multidisciplinary working enviroenment within a sigle discipline. Although this study focus on BIM-enabled education with respect to architecture programms but strategy can be replicated for educational programms from other AEC disciplines.

Keywords: Building information modeling (BIM), BIM in Academia

1 Introduction

1.1 Background

Incorporation of information technology has manifested itself in virtual working environment called building information modeling (BIM). Building information modeling (BIM) has been defined by many scholars and institutions in various ways. It has been recognized as a product - a three dimensional building model embedded with visual and non-visual construction data inside - and as a process based on a parametric modeling Sabongi et al. (2009) which facilitates efficient construction process Bozoglu (2016) and reduces the wastage in construction supply throughout the process Kocaturk and Kiviniemi (2013). A representative description of BIM is presented by NIBS as follows; “a digital representation of physical and functional characteristics of a facility that serves as a shared knowledge resource for information about a facility forming a reliable basis for decisions during its life cycle from inception onwards.” National Institute of Building Sciences (2018). In short BIM can be described as creation and management of digital building models for extraction of construction data of a facility or building to understand the physical and functional aspects of a building before and after its construction.

1.2 Building Information Modeling in Academia

Building information modeling is a modern working methoic based on virtual working environment requiring skills different from the traditional working practices in construction industry. Skillfull professionals to work in a BIM environment is still a challenge in its adoption to its full extent Azhar et al. (2010). Under the circumstances the educational institutions play a key role in preparation of skillfull workforce Lee and Hollar (2013). In order to keep pace with technological development in construction industry higher educational institutions in AEC have to integrated BIM in curriculum Sacks and Barak (2008). Many universities have tried to leverage BIM in academia but only few have succeeded Bozoglu (2016) while others are still struggling Yan (2010) partly or entirely.

Literature identifies various reasons faced by academia in integrating BIM in curriculum. Spatial constraints in curriculum for additional courses, ambigous course structure for BIM related curriculum Sabongi et al. (2009) insufficient teaching resources,lack of knowledgeable academic staff to teach BIM Becerik-Gerber et al. (2011) and lack of motivation from academic staff to integrate BIM in courses Barison and Santos (2010) due to lack of technical BIM related knowledge, information technology (IT) infrastructure installation are fundamental challenges.

1.3 BIM Competencies and their Integration in Academia

BIM cometencies have been defined in various context in literature. BIM teaching should focus on three elements, technical skills (software tools), conceptual skills (management processes) and psychological and social skills (project tream oriented skills) Kymmell (2007). While many other scholars have described them in a rather discipline oriented context e.g. BIM modeling, analysis and collaboration skills Barison and Santos (2010).

Barison and Santos (2010) identified three main approaches for imparting BIM competencies in array of courses - a single or stand alone subject, in a design studio and in an interdisciplinary course. The stand alone course to teach BIM focuses on teaching BIM through a BIM software application Hjelseth (2015). This approach is not considered ideal by many scholars for multiple reasons. A single course induction lacks any follow-ups in the curriculullum therefore skills lerant through such courses are not retained by students Gier and Ms (2015). Secondly it causes a segregation of curriculum from the core courses Wu and Issa (2013). Moreover it does not prepare the students for collaborative working environment challeges of BIM Sabongi et al. (2009). Another widespread approach is to integrate BIM in an existing course which Lee and Hollar (2013) considers as the most practicle approach for high quality of knowledge. Integration of BIM within the core curriculm is an attempt which is considered effective and closer to the industry expectation from the graduates. But it has its own challenges of adoption, while it requires an upgradation in classroom equipment and infrastructure Clevenger et al. (2010) . Third approach is considered the most effective by introducing collaborative interdisciplinary courses among related faculties from AEC to teach the students BIM collaboration process among the project participants Barison and Santos (2010). Facilitation of multi-diciplinary approach of inclusion BIM in curriculum requires a break away from specialized and copartmentalization nature of study programms. Although

multidisciplinary collaboration is signigficant in successful completion of AEC projects yet there is not an accepted model for the multidiciplinary collaboration. After having various pedagogical models tried, educaors are now shifting theier focus from teachin BIM as a software package towards development of problem solving skills in BIM education Wu and Issa (2013).

1.4 Theoretical Suggestions to Integrate BIM in Academia

A vast research has been conducted to integrate BIM in academia and variants of three leveled course structure has been proposed by many scholars. Kymell suggests a three-phased plan to impart BIM copmetencies among students. In first two years individual modelling and anlysis skills can be introduced. Which then can be followed with teamwork and collaboration while in the last year actual project collaboration with industry partners can be taught Kymmell (2007). Barison and Santos (2010) translate Kymmel's into a similar approach by integration of BIM in digital graphic trepresenattion (DGR) course at first stage (BIM Modeler), at second stage into design studio course (BIM Analyst) and at third stage into construction management courses (BIM Manager). Kocaturk and Kiviniemi (2013) suggest a gradual integration of BIM within curriculum rather than an "add and stir" approach with a connection to the rest of the curriculum. Author outlines two phases of integrating BIM first is the modeling and represeantation and the other is collaboration. Yan (2010) suggests an incremental BIM skills development modeling in first year, simulation in second year, building analysis skills in third year and customization skills in 4th year.

1.5 Research Questions

Within this perspective it is inevitable to devise an approach to integrate BIM in individual discipline yet covering its disciplinary and interdisciplinary aspects in AECO study programs. This resaerch focuses in devicing a course outline for architectural study program which not only imparts subject related modeling and analytical related BIM competencies but also collaboration skills required for working among stakeholders from different disciplines. For the purpose this resaerch article poses following questions:

1. Relevant to BIM competetncies outlined in literature, what is Status quo of BIM in higher education of architecture in Germany against the prevalent trends identified in literature?
2. How can these approaches be combined and or rearranged to impart BIM competancies in undergraduate architecture education in Germany?

2 Research Methodology

Building information technology is a recent technology in construction industry therefore its role in education is yet not fully understood Clevenger et al. (2010) and lacks of empirical research on the subject. In the light of this limitation an exploration into the subject will be done. Essential competencies for working in a BIM environment and proposed approaches for their integration in education, identified in literature, form the basis of this

research. Which then facilitates an understanging the status qou of level of integration of in undergraduate architecture courses and for proposing a course outline for undergraduate architecture education.

A list of german institutions offering architectural courses at bachelor level has been obtained from German Academic Exchange Service (DAAD) official website. According to which 54 institutions including both universities and universities of applied sciences offer bachelor programs in architecture in Germany. In order to choose the sample institutions from entire population two variants of non-probabilty sampling – judgement and convenience sample - have been adopted. Judgement sample is a type of sample that is selected based on the opinion of some expert while convenience sampling is a sampling method in which sample is drawn from a part of the population that is close to hand.

For a sample choice from architecture courses using judgement sample,frame is set to choose three institutions from the top graded institutions offering realted bachelor courses in German higher education institutions. As there are numerous grading criterias and portals for such lists. Lists of ten best universities have been identified from two online portals (for this study www.studying-in-germany.org and www.timeshighereducation.com). The list on the basis of convenient sampling method has been shortend to three institutions offering bachelor courses in architecture namely, Technical University Munich, Technical University Stuttgart and KIT Karlsruhe. For an adequate representation of entire population also those institutions are included which are not highly graded on grading portals. For the purpose convenience sampling menthod has been adopted to choose the institutions with which researcher is or has been academically attached either as a teaching staff or a student. Within this framework bachelor courses from Jade university of applide sciences Oldenburg and Anahlt university of applied sciences Dessau have been taken for study. Data has been acquired from online module handbooks to study course contents taught at these institutions. Content analysis has been used as a method to analyze data and then recommendations have been proposed accordingly.

3 Results

3.1 Profile of BIM-Enabled Courses in Architecture Curriculum

Curriculum of sample architecture study programs is designed to impart competencies in following subject area:

1. architecture design;
2. theory of desin and architecture;
3. history of art and architecture;
4. city and regional planning;
5. building construction;
6. construction planning and management;

7. design and layout;
8. miscellanous;
9. elective courses.

Table 1 shows a distribution of these courses and position of BIM related courses within bachelor study programs of architecture.

Table 1: Curriculum Profile of B.Arch. Courses & Induction of BIM related Courses in Sample Universities

Uni.	Sem.	Arch. Design	Theo. of Design & Arch.	History of Art & Arch.	City & Regional Plan-ning	Building Const.	Const. Plann. & Manag.	Design & Arch. Repres.	Miscell.	Electives
Anhalt University	I	X	X	X		X		X		
	II	X	X	X		X				
	III	X	X	X	X	X				
	IV	X	X	X	X	X				
	V	X		X		X				
	VI	X	X			X		X	X	X
	VII	X	X							X
	VIII	X								X
Jade University	I	X	X	X		X				
	II	X	X	X		X				
	III	X	X	X		X				
	IV	X	X	X			X			
	V	X	X	X		X		X		X
	VI	X				X				X
KIT	I	X	X	X		X		X		
	II	X	X	X		X		X		
	III	X	X	X	X	X	X	X		
	IV	X	X	X		X			X	
	V	X	X	X		X			X	X
	VI	X		X		X			X	X
Tech. University Munich	I	X	X	X		X		X	X	
	II	X	X			X		X		
	III	X	X	X		X	X	X		
	IV	X	X				X			
	V+VI		Semester Abroad							
	VII	X		X		X		X		X
	VIII			X		X		X		X
Tech. University Stuttagrt.	I	X		X	X	X		X	X	
	II	X		X	X	X		X	X	
	III	X	X			X				
	IV	X	X			X		X	X	
	V+VI		Semester Abroad							
	VII	X								X
	VIII	X								X

3.1.1 Anhalt University of Applied Sciences

Anhalt university offers three BIM related courses within architectural study program. Two of these courses are offerd in first and second semesters combined with architecture design studio. Both courses aim to teach technical or modeling skills with a BIM tool for digital graphic representation (DGR). Initially two dimensional drafting is taught in first semseter which then is followed by three dimensional modeling and architectural modeling in second semester. Third courses is offered in sixth semester and focuses on teaching geometrical data modeling along with alpha-numerical data attribution.

3.1.2 Jade University of Applied Sciences

Architecture department at Jade University offers two courses in combination with architecture design studio in third and fourth semesters. The courses aim to impart digital graphic representation (DGR) knowledge with a computer aided drafting (CAD) application. Both courses are integrated with architecture design studio to enable students to present their architectural ideas. The course offered in third semster focuses on two deimensional drafting and image editing techniques while the course placed in fourth semester extends the application of CAD in three dimensional modeling.

3.1.3 Karlsruhe Institue of Technology (KIT)

Karlsruhe institute of technology offers an array of courses to impart wide range of BIM competencies through comulsory and elective courses. On one hand it offers stand alone software based courses to assist students in digital and graphic representation (DGR) for their ongoing architectural studio projects. While on the other hand it introduces CAD within subjects for presentation and formulation of conceptual ideas in respective context.

3.1.4 Technical University Munich

Technical university Munich offers three BIM related courses, one of which is compulsory while others are elective courses.Course offered cover modeling , analysis and collaboration aspects of BIM competencies. Focus of compulsory course offered in third semester – digital modeling - lies in the exploration of digital tools to support design and planning process by using computer aided architctural design (CAAD) software. Students learn through BIM application data modeling, management and collaboration. While the module - digital prototyping - imparts skills not only for the development and creation of architectural models but also data validation and process related tasks in building information modeling. The module is based on building three types of skills namely, modeling, technical and process related to impart principles of the digital process chain.

3.1.5 Technical University Stuttgart

Technical university Stuttgart offers the widest range of BIM related courses during architecture studies. It offers stand alone software based course for two and three dimensional and digital graphic representation (DGR) at early stages of architecure studies. At later stage, in fourth semester, the subject is strengthened with numerous BIM related courses to use potentials of BIM to its fullest (see Table 2). At this stage BIM-related courses are taught for modeling, analysis and collaboration purposes as stand alone BIM courses and also integrated within architecture design studio and other subjects. Moreover it integrates CAD within two subjects i.e. building fabrication and city planning courses.

Table 2: BIM – Enabled Courses offered in sample universities

	Anhalt University	**Jade University**	**KIT**	**TU Munich**	**TU Stuttgart**
Sem. I	**Arch. Design - CAD I** 2-Dim. Drafting		**Computer Applications** 3-Dim. Modeling		**Geometry & CAD** DGR
	Integrated in Course		Stand Alone Course		Stand Alone Course
Sem. II	**Arch. Design - CAD II** 3-Dim. Modeling +Arch. Modeling		**Surveying** CAD supp. Surveying		
	Integrated in Course		Integrated in Course		
Sem. III		**Graphic Representation & Design III-CAD I** 2-Dim. Drafting		**Digital Modeling** Modeling, data Management & Collboration	**CAD with Fabrication** Modeling + Build. Techniques
		Integrated in Course		Stand Alone Course	Integrated in Course
Sem. IV		**Graphic Representation & Design IV-CAD II** 3-Dim. Modeling + Arch. Modeling			**Computer Based Information Modeling I**
					Stand Alone Course
					Computer Based Information Modeling II
					Stand Alone Course
					Computer Based Architectural Design I
					Stand Alone Course
					Computer Based Architectural Design II
		Integrated in Course			Stand Alone Course
Sem. V					
Sem. VI	**CAD / BIM** Arch. Modeling. + Alpha Num. Attributes				
	Stand alone Course				
Sem. VII					
Sem. VIII					
Elective Courses			**Application of Geometry** DGR	**Digital Architectural Design** Modeling + Analysis	**CAD with City Planning**
			Stand Alone Course	Stand Alone Course	Integrated in Course
			Design & Planning Methods CAD supp. Urban Design	**Digital Prototype** Integrated Design	
			Integrated in Course	Stand Alone Course	
			Computer Applications Visualization & Representation		
			Integrated in Course		

4 Discussion and Conclusion

The study shows that integration of BIM in undergraduate architectural courses in Germany is far from ideal situation. None of the sample institution has integrated BIM throughout its curriculum rather the courses are fragmented and non-related to each other. By enlarge the

courses are designed to impart modeling skills under the heading of digital graphic representation (DGR) courses. These courses are designed to teach CAD or CAAD software applications with no direct association to other subjects. These courses focus on two-dimensional drafting and three dimensional building models largely for visual representation without an intent to extract non visual building data from these models.However in some cases analytical and collaborative skills are also integrated into course leraning outcomes (see Table 2). Only two of three appraoches identified in literature – stand alone course and, integration in an existing subject– have been adopted in sample study programs while multidisciplinary approach is lacking entirely.

As many scholars suggest a multi-phased approach to integrate BIM in curriculum. It is advisable to adopt a similar three staged approach to incorporate BIM in a bachelor study program of architecture. At first stage, comprising of first two years of study program, it is essential to impart BIM basic concepts and building modeling skills with a BIM tool either within architecture design studio or within digital graphic representation (DGR) courses. It will not only familiarize the students with BIM tool but also facilitate their handling with digital models. Building construction and construction management courses which are fundamental to architecture study programs, till now have been ignored in interating BIM in curriculum can play a significant role in imparting analytical and collaborative skills among the students. These skills can be introduced to students in third year of study program. At this point of their training the students have sufficient knowledge about building behaviours and construction techniques. Which then can be utilized for the development of analytical skills in BIM perspective. For the purpose excercises with appropriate BIM tools can be replaced by exercise done by hand for these courses. Through these analytical exercises students can on one hand virtually observe behaviour of their design, while on the other hand they can leran interoperabiloty and collaboration among different kinds of information models. Which in turn can create a collaborative learning environment for different subject related data without any collaboration to other faculties and institutions. Third stage of including BIM can comprise of elective courses , either offerd in fifth semster or in later semsters, which solely focus on real life project participation from industry partners from architecture field with an objective to learn project execution in virtual environment.

Although this research has solely focused on studying the issue for architectural studies but it can be replicated for related disciplines. The same guidelines can be employed to explore the situation of BIM in civil engineering courses. Moreover it can also be extended for BIM conforming subject related course formulation for each discipline.

References

Azhar, S., Sattineni, A. and Hein, M. (2010), Bim undergraduate capstone thesis: Student perceptions and lessons learned, *in* 'Proceedings of the 46th ASC Annual Conference, Boston, MA'.

Barison, M. B. and Santos, E. T. (2010), Bim teaching strategies: an overview of the current approaches, *in* 'Proc., ICCCBE 2010 international conference on computing in civil and building engineering'.

Becerik-Gerber, B., Gerber, D. J. and Ku, K. (2011), 'The pace of technological innovation in architecture, engineering, and construction education: integrating recent trends into the curricula', *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* **16**(24), 411–432.

Bozoglu, J. (2016), 'Collaboration and coordination learning modules for bim education', *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)* **21**(10), 152–163.

Clevenger, C. M., Ozbek, M., Glick, S. and Porter, D. (2010), Integrating bim into construction management education, *in* 'EcoBuild Proceedings of the BIM-Related Academic Workshop', Vol. 8.

Gier, D. M. and Ms, P. (2015), 'Integrating building information modeling (bim) into core courses within a curriculum: a case study', *International Journal of Engineering Research and General Science* **3**(1), 528–543.

Hjelseth, E. (2015), Integrated approaches for implementing building information modelling (bim) in engineering education, *in* 'Interdisciplinary education in a connected world, 8th International Conference on Engineering & Business Education (ICEBE) at Østfold University College, Fredrikstad, Norway'.

Kocaturk, T. and Kiviniemi, A. (2013), 'Challenges of integrating bim in architectural education. in ecaade 2013: Computation and performance–proceedings of the 31st international conference on education and research in computer aided architectural design in europe'.

Kymmell, W. (2007), *Building Information Modeling: Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations (McGraw-Hill Construction Series): Planning and Managing Construction Projects with 4D CAD and Simulations*, McGraw Hill Professional.

Lee, N. and Hollar, D. A. (2013), Probing bim education in construction engineering and management programs using industry perceptions, *in* '49th ASC Annual Int. Conf. Proc., California Polytechnic State Univ., San Luis Obispo, CA', pp. 467–476.

National Institute of Building Sciences (2018), 'National bim guide for owners'.
URL: *https://www.nibs.org/page/nbgo*

Sabongi, F. J., Arch, M. et al. (2009), The integration of bim in the undergraduate curriculum: an analysis of undergraduate courses, *in* 'Proceedings of the 45th ASC Annual Conference', Citeseer, pp. 1–4.

Sacks, R. and Barak, R. (2008), 'Impact of three-dimensional parametric modeling of buildings on productivity in structural engineering practice', *Automation in Construction* **17**(4), 439–449.

Wu, W. and Issa, R. R. (2013), Bim education for new career options: an initial investigation, *in* 'BIM Academic Workshop, Washington, DC. US, 11th January'.

Yan, W. (2010), Teaching building information modeling at undergraduate and graduate levels, *in* 'Proceedings of the 28th Conference eCAADe', pp. 97–106.

A framework to facilitate an interdisciplinary design process using BIM

Patricia Schneider-Marin[1] and Jimmy Abualdenien[2]

[1]Institute of Energy Efficient and Sustainable Design and Building· Technische Universität München · Arcisstr. 21 · 80333 München · E-Mail:p.schneider@tum.de
[2]Chair of Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstr. 21 · 80333 München · E-Mail:jimmy.abualdenien@tum.de

A formalized building design process assumes that the design process is essentially linear with increased detailing of the design without essential changes or loops back to earlier design variants. BIM models follow this logic, i.e. they are used as if the model is increasingly detailed but not changed. However, the building design process is becoming increasingly an interdisciplinary, iterative process to account for the numerous legal and client requirements such as sustainability, fire safety, structure, etc. To facilitate this process, BIM models should include an indication of the maturity of the overall building model and the reliability of the included information.

Our work introduces the Building Development Level (BDL) concept as a measure to formalize the maturity of an entire BIM model. It is used at the beginning of the design process as a framework for the design team to define consultants' requirements on the model for analyses to be performed. The BDL structure is linked to the design process by first outlining the formalized design stages of different countries and subsequently showing how BDL provides a more precise subdivision of the traditional early design phases.

The concept is applied to a case study, showing the potential of a BIM process in combination with the BDL concept allowing for an extended analysis.

Keywords: Building Development Level (BDL), Level of Development (LOD), interdisciplinary design process, sustainable design, early design phase analysis

1 Introduction

Buildings provide us with a controlled environment where we can live and work in sheltered conditions. To construct them and the related infrastructure we use a large share of natural resources and to heat and cool indoor environments we consume unsustainable amounts of fossil fuels and and globally emit about 19 % of global greenhouse gas emissions (Lucon et al., 2014). However, there is a great potential for improvement in the building sector for more efficient use of materials and energy. To realize this potential, it is essential that building projects are diligently developed under environmental aspects in an interdisciplinary process. Especially in early planning phases designers have the opportunity to put a building project on a more environmentally friendly path, often without a long-term economic disadvantage (Schneider-Marin et al., 2019).

The introduction of Building Information Modeling (BIM) offers a chance for the building industry to enrich the design process with additional information as a basis for design decisions. The information a BIM model contains can and should be used in early design phases

to analyse the design's qualities with regard to the related disciplines such as structural engineering, life cycle engineering etc. As the early design phases focus on the whole building rather than single components, the BIM model's information content that can be extracted with a defined certainty needs to be known. Currently, to define the information content of building components, the term level of development (LOD) is used. As this term should per its definition (BIMForum, 2019) not be used for the entire model, it cannot be used to define overall model requirements for analyses.

2 BIM in the design process

2.1 Formalized Definitions of the Design Process

Internationally, the Architectural Design Process is either linked to a fee structure for architects and engineers or to the respective contracts. Table 1 and table 2 show the definition of design stages in different countries. Only early design stages are listed, for this work defined to be the design stages before construction documents are prepared.

Two important facts can be seen at first glance: Firstly, a definition of the phase preceding actual design services, e.g. the definition of the general strategy of a project, is only included in the UK and in Switzerland. In other countries, architects and engineers are not involved at this stage per the official documents. In reality, there should be and often is a designer involved in the strategic definition even though fees for this work are undefined.

Table 1: Formalized early design stages of buildings 1

Country	**UK**	**USA**	**Germany**	**Switzerland**
Title	RIBA plan of work	American Institute of Architects	Scale of Fees for Services by Architects and Engineers	SIA 102: Structure for Architects' Services and Fees
Source	(Sinclair, 2013)	(AIA-TN, 2018)	(Springer, 2013)	(SIA, 2014)
Latest version	2013	no formalized version	2013	2014
Purpose	organization of building projects	defining architects' scope	defining fees	defining fees
Phase 0	Stage 0: Project Definition			Strategic Planning
Phase 1	Stage 1: Preparation and Brief	Step 1: Programming (Deciding what to build)	Service Phase 1: Basic Evaluation	Pre-Studies
Phase 2	Stage 2: Concept Design	Step 2: Schematic Design Rough Sketches	Service Phase 2: Preliminary Design	Project Development Preliminary Project
Phase 3	Stage 3: Developed Design	Step 3: Design Development	Service Phase 3: Design Draft	Project Development Building Project

Table 2: Formalized early design stages of buildings (continued)

Country	**Austria**	**France**	**Belgium**
Title	Fee Information Architecture	The Complete Assignment	Architect's Tasks Project Stages
Latest version	2008	2017	2017
Source	(BAIK, 2008)	(*Contrat mission complète*, 2018)	(*L'architecte et ses missions*, 2017)
Purpose	Definition of services	Definition of architects' tasks	Definition of tasks and stages
Phase 0			
Phase 1	Project Preparation	Preliminary Studies	Preliminary Studies
Phase 2	Design Phase: Preliminary Design	Pre-project Studies	Schematic Pre-project
Phase 3	Design Phase: Design Draft	(Project Studies after Construction Documents)	Detailed Pre-project

Architects therefore can be faced with a completed strategy although their input would have been valuable and could have led to a more efficient and sustainable concept. Also, information about alternative solutions considered can become lost in the process. Secondly, it is evident that the design process is divided into three stages of continuing precision. The design process per these definitions is essentially linear with increased detailing of the design without essential changes.

Generally, the official definitions are of rough granularity as they cover a wide range of project types. On the positive side, this means that there is flexibility in the exact subdivisions of the early stages of design. But this can also have the negative effect of communication problems between architects and engineers due to differing expectations as to when information has to be communicated and if it has to be final and precise.

2.2 Designing with BIM models

BIM models follow the linear logic of the design process, i.e. they are used as if the model is increasingly detailed, subsequently reaching milestones. Currently, the most common term classifying the stage of detailing is the American BIM Forum's "level of development" (LOD) (BIMForum, 2019) which indicates the level of geometric and semantic maturity of individual building components, but explicitly not the overall building maturity.

However, the building design process is becoming increasingly an interdisciplinary, iterative process to account for the numerous legal and client requirements such as energy efficiency, fire safety, structure, etc. This iterative process is not linear but involves multiple design loops, especially when requirements are contradictory, such as energy efficiency favoring a light construction for better thermal insulation versus sound proofing for which heavier construction materials would be advantageous. To arrive at the best synthesis taking into account consultants' analyses it is vital to agree on the quality of the information exchange within a team.

To facilitate this process, BIM models lack an indication of the maturity of the overall building model, describing the expected elements to be present, indicating how far design decisions are final or if the building design and its elements are still in flux and contain uncertainty. Also, project-specific flexibility and a framework for early stage analysis should be provided to allow an interdisciplinary process.

3 Building Development Levels

3.1 BDL definition

To allow for clear guidelines in early design phases and a framework for interdisciplinary design, we introduced a new concept, Building Development Level (BDL) (Abualdenien & Borrmann, 2019), to describe the overall building refinement in five levels (BDL 1 - 5), as can be seen in figure 1. BDLs subdivide the design process into intermediate stages with BDL 2 and 3 allowing for a two-stage analysis and decision process during the preliminary conceptual design, and BDL 4 and 5 during the more developed draft design. The exact information content and related design vagueness can be varied between projects and should be agreed on as part of the project definition at the very beginning of the design process.

Overall, the BDL concept provides a framework for consultants to communicate their requirements for analysis and the exactness of the results of analyses, thereby facilitating communication between architects and engineers.

3.2 BDL in the interdisciplinary process

The interdisciplinary process relies on close communication between architects and engineers to enhance design concepts by engineering input and vice versa (König et al., 2009). In order to arrive at sustainable design solutions, consultants in various fields provide their expertise. This expertise needs to be coordinated in such a way that input is dealt with simultaneously and not one after another as a linear design process would imply. Otherwise it could happen that decisions are based on one field that would be very unfavorable from another standpoint. For example, the structural engineer's analysis might advise for concrete to be used as a structural material for exterior walls whereas the energy consultant favors a curtain wall to avoid thermal bridges and provide flexibility for the size and position of openings. Both analyses happen at BDL 3 after the general volume has been agreed on and the advantages and disadvantages of each solution can be evaluated.

The BDL provides some room for flexibility tailored to the individual project. For example, the legal framework often asks for a certain number of car parking places. If the site is easily large enough to provide these above ground, the detailing of the site around the building can be decided on in BDL 4 or 5. Otherwise, underground parking or a layout of the parking lot needs to be included at BDL 2 as it influences the shape of the building. Another example is the presence of development plans asking for certain materials or finishes. In one past case study (Lang and Schneider, 2017), the development plan required plaster finish of the facades, therefore starting from BDL 1 the exterior walls already included this information.

4 Application

4.1 The sample project

Our sample project is the FTmehrHaus of Ferdinand Tausendpfund GmbH in Regensburg, Bavaria. It is a three-storey office building on a large site that houses also the company's building material storage. Despite the size of the site, only a small choice of buildable area was available for the office building because of logistics and parking requirements. There were also floor area and cost requirements and the idea to test different exterior wall materials on the project.

As shown in figure 1, multiple design variants are explored during each of the design stages and evaluated to support making informed decisions towards the design intentions. Accordingly, as the project goal is to develop a sustainable building, life cycle assessment (LCA) was performed in conjunction with energy and structural calculations and fire safety considerations to evaluate the variants. The decisions taken in each BDL are taken into consideration and preserved for the subsequent BDL.

4.2 BDL in the design process

In the process leading to the completion of BDL 1, the consultants receive information about the site, the functions and floor area of the building, the building footprint and legal and client requirements. In turn, they complete the requirement set, e.g. the energy consultant works with the client to agree on a desired energy standard, the fire safety consultant adds performance criteria and the life cycle engineer provides his evaluation framework and goals, in our case to minimize the use of non-renewable primary energy and greenhouse gas emissions.

To arrive at a model of BDL 2, several variants investigating possible building volumes are generated. All are checked for compliance with the BDL 1 information, e.g. the gross floor area or the building footprint. To consider these variants for analysis, they have to comply with the BDL 2 geometry and information requirements: To perform an energy analysis they contain all exterior surfaces (at a defined vagueness) and interior zoning. In addition to this information, the life cycle engineer needs the energy engineer consultant's output and information about the general material concept. The fire safety consultant provides information about the respective building classes based on the building's volume and use information. The analyses are performed based on the provided BDL 2 models and provide a basis for decisions. Here, the most compact shape is chosen, as it provides the best energy and life cycle performance and is of building class 3, having less strict fire safety requirements. This decision is stored and the respective BDL 2 model is used for further detailing.

Starting from this BDL 2 model, variants for floor plates and internal space configurations are added, such that also a structural analysis is enabled. The structural engineer provides several options for each variant, which are then evaluated by the other consultants. Following the BDL concept enables this process to happen smoothly, as it is clear that only the additional information needs to be considered, such as the position of interior structural elements, e.g. floor slabs, walls, columns.

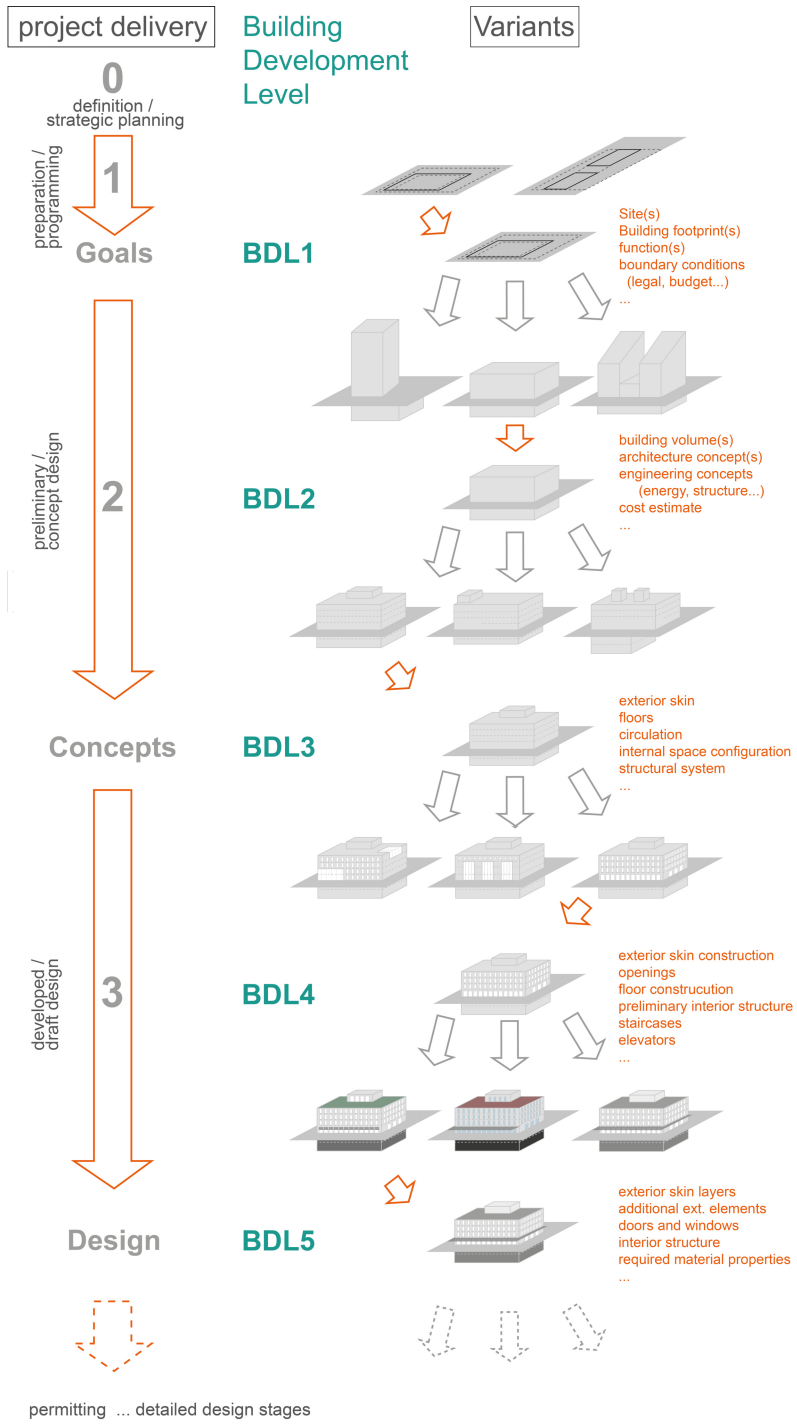


Figure 1: Project delivery and BDL

Compliance with the BDL 2 model entails the interior space configuration to reflect the zoning from the previous phase. If these do not match, the BDL 2 model has to be reconsidered. In reality, this happens frequently and is part of the nature of an interdisciplinary design process. The advantage of using the BDL concept is that these loops happen at the earliest possible moment avoiding late changes due to non-compliance with earlier project agreements or assumptions.

The BDL 3 model will contain more detailed information about the exterior skin, the structural system and vertical and horizontal circulation. The latter is primarily analyzed by the fire safety consultant to ensure compliance with existing regulations. Once all consultants have provided their input, a BDL 3 model is agreed on. The central vertical circulation with one core and a 3-storey layout with continuous floor plates is chosen.

The BDL 3 model is further developed and varied by adding material information and openings in the exterior skin, detailing the structural system by providing geometry according to the structural concept and adding stairs and elevators. All consultants analyze the models in parallel and determine if their requirements are met. The structural engineer and the energy consultant are in our case advising against very large openings. The fire safety consultant determines that his requirements are met by each variant and also provides feedback about possible detailing challenges in case of the use of combustible materials for the exterior walls. The LCA engineer evaluates the different options for the exterior wall construction determining that the wall type wood frame emits the least greenhouse gases at a small margin if the entire life cycle including the use phase is considered. The BDL 3 model with the most regular facade is chosen to provide equal conditions on each floor. For the exterior wall, the three different wall types to be tested are chosen.

For BDL 5, an exterior roof cover for the ground floor is added, as well as exterior wall layers with material group information (e.g. concrete, insulation, plaster), interior and exterior doors and windows are varied based on the BDL 4 model. As this is the last early design stage model, all information allowing for the permitting process to begin has to be contained.

5 Conclusion and future work

BDL offers a framework to facilitate communication in the interdisciplinary design process as requirements for analyses can be communicated at the beginning of the design process. Architects and engineers agree on certain elements to be included in the model for analyses to happen. If any of the earlier stage agreements are not met at a later stage, the design loop has to go back to the respective earlier BDL enabling changes to be evaluated more quickly and easily. BIM levels of development can be used as a basis, as they determine the maturity of elements contained in the model. BDL adds to this by defining which elements have to be present at which BDL and thereby provides an easy to understand concept for all consultants defining the overall maturity and exactness of the model and provides a framework for collaboration. The case study is used to illustrate the BDL concept in more detail and provide examples for collaboration between the architect and engineering consultants.

Our future work will apply the BDL concept during design processes to collect data and feedback and adjust the concept accordingly. Additional analyses will be performed, including life cycle costs and sound proofing. Definitions of design vagueness at each BDL will be tested, such that differences in analysis results for different variants can be more clearly distinguished. The BDL will be used as a basis to enable information included in a model of higher BDL to be transferred to models of alternative designs of lower BDL's.

6 Acknowledgements

We gratefully acknowledge the support of the German Research Foundation (DFG) for funding the project under grant FOR 2363. We thank Ferdinand Tausendpfund GmbH for providing their office building FTmehrHaus as a sample project.

References

AIA-TN (2018), 'Design to construction - understanding the design and construction process', **URL:** *https://www.aiaetn.org/find-an-architect/design-to-construction/* Accessed: 2018-10-09.

BAIK (2008), *Honorarinformation Architektur*, BIK Verlagsgesellschaft mbH, Wien.

BIMForum (2019), 'Level of development specification *lod* specification part i & commentary', **URL:** *https://bimforum.org/lod/* Accessed: 2019-01-11

Contrat mission complète (2018), **URL:** *https://www.architectes.org/maisons-individuelles-contrats-guide-et-annexes#*

König, H., Kohler, N., Kreissig, J. and Lützkendorf, T. (2009), *Lebenszyklusanalyse in der Gebäudeplanung*, Detail Green Books, München.

Lang, W. and Schneider, P. (2017), *Gemeinschaftlich nachhaltig bauen (Forschungsbericht der ökologischen Untersuchung des genossenschaftlichen Wohnungsbauprojektes wagnisART).*

L'architecte et ses missions (2017), **URL**: *https://www.ordredesarchitectes.be/fr-be/publications* Accessed: 2018-10-09

Lucon, O., Ürge-Vorsatz, D., Zain Ahmed, A., Akbari, H., Bertoldi, P., Cabeza, L. F., Eyre, N., Gadgil, A., Harvey, L. D. D., Jiang, Y., Liphoto, E., Mirasgedis, S., Murakami, S., Parikh, J., Pyke, C. and Vilarino, M. V. (2014), 2014: *Buildings In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Schneider-Marin, P., Dotzler, C., Röger, C., Lang, W., Glöggler, J., Meier, K. and Runkel, S. (2019), *Design2Eco.Lebenszyklusbetrachtung im Planungsprozess von Büro- und Verwaltungsgebäuden - Entscheidungsgrundlagen und Optimierungsmöglichkeiten für frühe Planungsphasen, Fraunhofer IRB.*

SIA, ed. (2014), *SIA 102 Ordnung für Leistungen und Honorare der Architektinnen und Architekten*, SIA, Zürich.

Sinclair, D., ed. (2013), *RIBA plan of work 2013 Overview*, RIBA, London.

Springer (2013), *HOAI 2013-Textausgabe / HOAI 2013-Text Edition (Honorarordnung für Architekten und Ingenieure vom 10. Juli 2013, Official Scale of Fees for Services by Architects and Engineers dated July 10th, 2013, Springer Fachmedien Wiesbaden.*

Adaptive minimized BIM-based communication and workflow during design phases

Marija Rakić, M.Sc.[1], Ata Zahedi, M.Sc.[2], and Jimmy Abualdenien, M.Sc.[3]

[1,2]Chair of Architectural Informatics, Department of Architecture · Technical University of Munich · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: ata.zahedi@tum.de

[3]Chair of Computational Modeling and Simulation, Department of Civil, Geo and Environmental Engineering · Technical University of Munich · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: jimmy.abualdenien@tum.de

The final design of a building is a result of the joint efforts between many experts within the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry. Building Information Modeling (BIM) aims to streamline this collaboration while allowing all parties to access the relevant data. For example, if an engineer cannot perform analysis due to a missing value, he/she must wait for the responsible architect to specify it. Different values get defined in different project stages. Level of Development (LOD) describes maturity of the BIM model. BIMForum[1], the US chapter of buildingSMART International, defines six LOD levels and specifications of which information each level provides (*Level of Development Specification*, 2019). However, it does not take into consideration the information fuzziness. Therefore, a research project EarlyBIM has developed a multi-LOD meta-model that "explicitly describes the LOD requirements of each individual building component type taking into consideration the possible uncertainties." (Abualdenien and Borrmann, 2019)

Due to the fragmented nature of the AEC industry, there is great potential for a machine-readable communication protocol. BIM Collaboration Format is mostly used based on the textual comments, which the architect in the aforementioned example would be able to act upon. However, a computer could not understand this comment and analyze it for future references. With this in mind, our research group designed an adaptive minimized communication protocol and a ticketing system, in which only the computer-readable information on existing issues is exchanged. (Zahedi and Petzold, 2019)

This paper presents a plugin for Autodesk Revit using the principles of the aforesaid communication system and multi-LOD meta-model. The plugin compares a model to the requirements specified in the multi-LOD meta-model, visualizes all the missing values, and offers a way of integrating them into the Revit model. The changes to the model are logged and can be viewed using an external tool, such as a custom database combined with a web interface.

Keywords: BIM, Adaptive minimized communication, Computer-Readable Protocol, LOD

1 Introduction

Many different experts from the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry have to work together to create a final version of a model of a building. The model has to go through many iterations of feedback, testing and improvements in order to reach a

[1]`https://bimforum.org`

stage where it is ready for construction. For these iterations to happen, data needs to be passed from one stakeholder to another, for example from an architect to a structural engineer. Unfortunately, this exchange is not always a seamless process. Architects have their own set of software tools; engineers of different specialization have different software applications for their field-specific analysis. Last but not least are clients that have to maintain the building after the design and construction phases are done, since the maintenance is the longest part of the building's life cycle. The data exchanged needs to be understood by the receiving side. In other words, experts who receive it should be able to import it into the tools they use. Prior to an existence of a standard format for data exchange and its wide use, a lot of data needed to be re-input manually, since the software tools use different formats. With every exchange cycle, the probability that someone re-input incorrect data increases. After a significant number of iterations, the model is finalized and the construction begins. If a problem occurs somewhere along the way and it is discovered late in the design phase or during the construction, it might be very expensive to fix and the estimated project duration might be exceeded. Eventually, a construction is finalized and the model is handed over to the building owner.

Building Information Modeling (BIM) is a 3D model-based process which addresses the need for a unified workflow process that enhances the aforesaid collaboration. BIM specifies a use of a common exchange format - Industry Foundation Classes (IFC). IFC is a vendor independent data model and a file format, defined by ISO specification and developed to ease interoperability in the AEC industry.

2 Related Work

Abualdenien and Borrmann (2019) argue that Level of Development (LOD) does not provide enough information. For example, some building elements must be more detailed than others from the beginning of the project. A single LOD value that would describe the entire BIM model is not appropriate in this case. For this reason, the authors proposed a multi-LOD meta-model which specifies LOD, as defined by BIMForum, on a component type base and takes into consideration the information uncertainty. By doing so, they tried to address the following questions: how to have more than one LOD per model, how to take into consideration fuzziness of the data, and how to manage different design variants. The authors focused on the meta-model's influence on the design decisions made in the project's early phases. Abualdenien and Borrmann utilized some well-known standardized concepts, such as IFC and its *PropertySet* mechanism which allows for a dynamic extension of the model, and *buildingSmart Data Dictionary* which guarantees that everyone uses the same term for the same IFC entity, regardless of the branch of the AEC industry they come from or the language they speak (*buildingSMART Data Dictionary*, 2019).

Zahedi and Petzold (2019) proposed an adaptive minimized communication protocol. This protocol would be a computer-readable set of messages that architects and engineers exchange during the process of assuring that the BIM model is ready for construction. The authors also tackled the fact that it is difficult to make decisions in the early stages of the project due to insufficient information. Zahedi and Petzold proposed a *Feedback* function which would be exchanged between an architect and an engineer communicating the model

flaws. This function accepts multiple input parameters, making it adaptive to different scenarios. The parameters are *actionType* which specifies an action that should be taken with respect to the model and its existing flaw, *optionGroupID* which allows for multiple suggested values to be grouped together, *GUID* which uniquely identifies a building component, *aLODx*, *objectID*, *propertyID*, all referring to the multi-LOD meta-model (Abualdenien and Borrmann, 2019); finally, *value*, and *rating*. Not even partial models would have to be exchanged, but only small messages - therefore the minimized protocol.

3 Autodesk Revit plug-in

Autodesk Revit is a Building Information Modeling software available for Windows operating system. It provides a lot of built-in functionalities to architects and engineers. Nonetheless, it allows this set of available features to be easily extendable by having a plugin-based architecture. There are three ways to extend existing Revit functionalities: building a *Macro*, an *External Command* which is executed on a button click, or an *External Application* which starts and ends with Revit. We developed the plug-in in form of an External Application using C# as a programming language. An External Application allows us to customize ribbon tabs and ribbon panels, and so we created a *TUM* panel under *Add-Ins* tab. A panel can contain one or more buttons. Our panel contains only one button named *Compare to Multi-LOD model*, as shown in Figure 1. Behind the scene, this plug-in facilitates an exchange of messages similar to the *Feedback* function, defined by Zahedi and Petzold (2019), between an architect and an engineer.

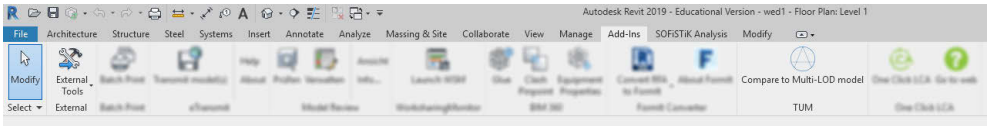


Figure 1: Add-ins tab with many panels, including the one called TUM

3.1 An example scenario

An architect creates a model of a building using Autodesk Revit. At some point, he/she needs to know what an engineer thinks of the current model. The architect starts the plug-in by clicking on *Add-Ins* and then *Compare to Multi-LOD model* button under the *TUM* panel. Next, they request an analysis of the current model by choosing an engineer to be responsible for running this analysis, deciding whether the engineer should create options for the missing values or not, and picking a deadline for the analysis.

Upon receiving a request, an engineer checks whether the model contains all the data needed to successfully perform an analysis. They do so by comparing the model against a list of specifications stored in a form of a multi-LOD meta-model. In case the model does not comply with all the requirements, it is considered incomplete for the purpose of analysis. Hence, the engineer creates a list of tasks that the architect has to solve before the analysis could be run, and sends this list back to the architect.

A task specifies that a Revit element is missing a:

- *property*, e.g. a task specifies that the *Wall* does not have a *Thermal Transmittance* property, or
- *value*, e.g. a task specifies that the *Wall* does not define the value of its *Thermal Transmittance* property.

This list of tasks is presented in a table-like structure to both the engineer who ran the analysis and the architect who requested it. Figure 2 presents the list of tasks the architect sees.

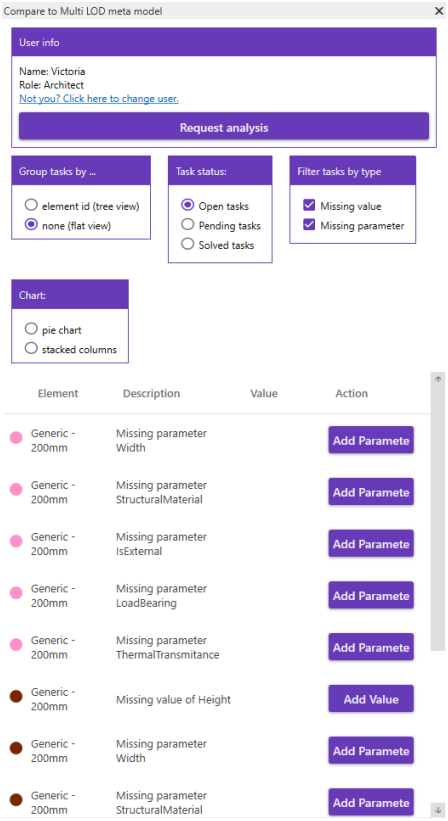


Figure 2: A list of Tasks specifying missing parameters and parameter's value

Every row holds information on a single task. There are four columns:

- *Element*, showing the Revit element's name,
- *Description*, showing whether the element is missing a parameter or a value,
- *Value*, showing a suggestion created by an engineer or a value input by an architect, and

- *Action*, allowing an engineer to input a suggestion, or an architect to either input a value themselves, or accept or decline a value that has been suggested by the engineer.

Clicking either *Add Parameter* or *Add Value* button, a new window opens and asks the architect to input the value. There are different types of parameter's values; inputting each of them requires a different interface. The following types are supported in the current implementation of the application:

- material, with interface for inputting a value as shown in Figure 3,
- numerical, with interface for inputting a value as shown in Figure 4, and
- boolean, with interface for inputting a value as shown in Figure 5.

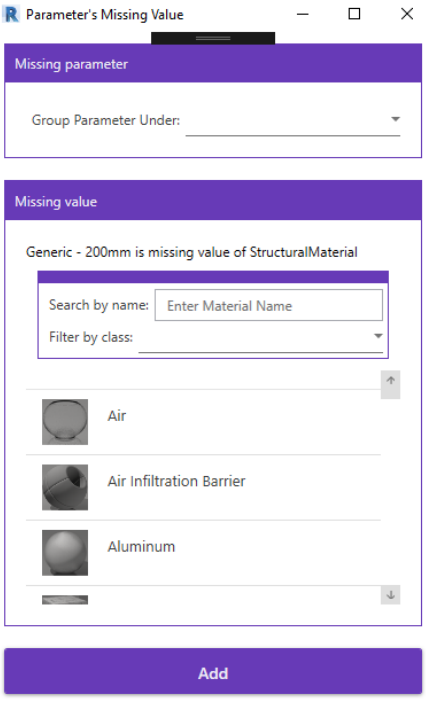


Figure 3: A missing parameter of type Material

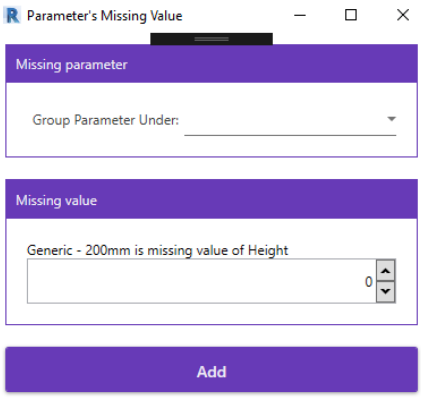


Figure 4: A missing parameter of type Number

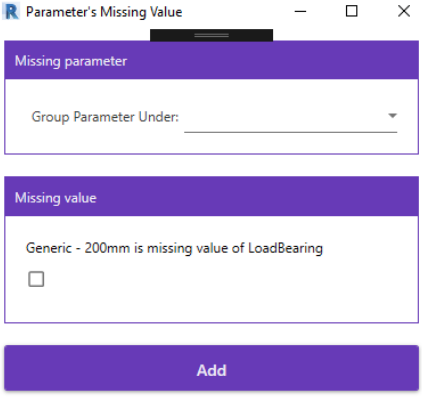


Figure 5: A missing parameter of type Boolean

Figure 6: Different types of a missing parameter

In case a task specifies a missing parameter, the architect has to decide which group to place the newly created parameter in. For this, they use the upper box as seen in Figures 3, 4

and 5. In case a task specifies a missing value, the window for inputting it is very similar to the ones shown in Figures 6, except that the upper box is removed. Since the parameter already exists, it is already places under a certain group, so it makes no sense to specify this information again. Depending on the data type, a different field for inputting the missing value is presented, in the same way it is presented for the missing parameter.

In the case a type of a parameter's value is material, a user can scroll the list of available materials and select the desired one, as shown in Figure 3. The user also has an option to quickly access the desired material by either searching by its name or filtering all materials by class. Revit users are used to having these features: search by name and filter by class. We wanted to offer them the same user experience in our application.

Another way of creating a new value is when an architect asks an engineer to suggest one or multiple values for the missing element. The window where an engineer inputs a suggestion for a missing value is identical to the window where an architect creates a missing value; in case of a missing parameter, the window is very similar to the window where the architect creates a missing parameter, except for the box that defines the *Group parameter under* option. Since it is completely up to the architect how they will organize information on the model of the building within Revit, the engineer does not suggest this value.

After a suggestion has been created, it is removed from the list of *open* tasks and placed into the list of *pending* tasks. After the engineer has created the suggestion, they can no longer take any action, but wait for the responsible architect to either approve or decline this value.

The architect has an option to accept or decline the suggested value by clicking on the purple circle with a check mark or a green circle with an x mark, respectively, as seen in Figure 7. If the parameter is missing, the architect still has to decide under which group to place it. In the case of multiple suggestions per missing value, when the architect accepts one, all the others are automatically declined.

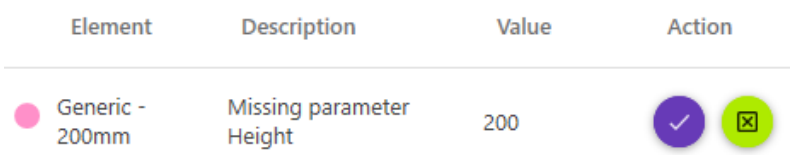


Figure 7: An architect can see a suggested value and buttons to accept or decline it

After a task has been *solved*, it is placed on the list of *solved* tasks. To switch between lists, the user clicks the desired button under the *Task status* box, as shown in Figure 2.

The user has an option to view some simple reports on the progress of solving tasks. The current version of the application implements two chart views: a *Pie chart*, which presents the ratio of *open* tasks per Revit element, and a *Stacked columns*, which represents the ratio of *open* and *solved* tasks for each Revit element.

After the architect has input all the values that the engineer has previously specified as needed, the architect informs the engineer of this event by requesting the analysis again. Now the

engineer can check that the Revit model contains all information they need to run the analysis successfully. After this is verified, they inform the architect that the analysis has been run successfully.

3.2 Implementation

The plug-in is a Windows Presentation Foundation (WPF) application was developed with the following third-party libraries:

- Json.NET[2] is a „popular high-performance JSON framework for .NET“, as per the authors' definition. It is an open source library used to serialize and deserialize JSON data.
- RestSharp[3] is a „simple REST and HTTP API Client for .NET“, as per the authors' definition.
- Extended WPF Toolkit™[4] is a free and open source collection of WPF controls, provided under the Microsoft Public License. It seems to still be popular, even though it is no longer actively developed. This could be due to the lack of the alternatives.
- Material Design In XAML[5] is a User Interface (UI) library. Including the library gives the application a modern look and feel. Material Design In XAML is easy to integrate into the project using NuGet, a package manager for .NET framework. However, using this plug-in in the Revit application is not a straightforward process, due to a specific way in which Revit loads frameworks and libraries its plug-ins require. A small „hack“ was required in order to make the library work: including both *MaterialDesignThemes.Wpf* and *MaterialDesignColors* namespaces to the code-behind of the home page and instantiating any object from both of these namespaces. This insures that both assemblies are loaded correctly.
- Live Charts[6] is a „simple, flexible, interactive & powerful data visualization for .Net“, as per the authors' definition. It is a free and open source library that offers many different charts out-of-the-box. Same as with *Material Design In XAML*, including the library also required a small „hack“. The *LiveCharts* namespace was included in the code-behind and a method to handle the chart's click event listener was implemented (with an empty body).

4 Conclusion and Future Work

A Level of Development (LOD) defines how precise the entire BIM model is during each stage of the project duration. There are research attempts to define a more granular approach. The multi-LOD meta-model, for example, assumes that different elements can have different levels of detail, as per the EarlyBIM research project (Abualdenien and Borrmann, 2019).

[2] `https://www.newtonsoft.com/json`
[3] `http://restsharp.org`
[4] `https://github.com/xceedsoftware/wpftoolkit`
[5] `http://materialdesigninxaml.net/`
[6] `https://lvcharts.net/`

BIM Collaboration Format is an open file format for exchanging comments and reporting potential flaws of a BIM model. A TUM research group proposed a new way of communication, one which acts as an adaptive minimized communication protocol and a ticketing system. This is materialized in a form of an HTTP communication server and an existing relational database used to store relevant aspects of this communication.

We implemented a plug-in as a proof of concept of the aforementioned communication protocol used directly within Revit, to avoid the need for a separate communication application that users would have to switch to. The same concepts could be added to any other BIM authoring tool which allows for retrieving information of an existing BIM model and changing it through an API. Using C# and WPF, we created an application that allows an architect to request a new analysis from an engineer. To check whether the model is complete and ready for an analysis, the multi-LOD meta-model is used. The current version of the plug-in simply searches for a parameter declared as mandatory by its name, as specified in multi-LOD meta-model, regardless of the parameter's semantics or geometry. After attempting to run the analysis, if it turns out that the engineer cannot evaluate the model because it is incomplete, this information is communicated back to the architect who requested the analysis with a list of tasks to be completed before the analysis can be run successfully. The architect can create those missing values themselves or ask for value suggestions from an engineer, and the engineer can suggest one or multiple options. Only an architect can make changes to the Revit model, therefore they are responsible for accepting or declining a suggested value(s).

Due to the time limitations, some features were left as future work. Firstly, an existing Revit model could be compared against more multi-LOD meta-model requirements, not just the one that specifies whether a parameter with a given name is mandatory. Next, a communication protocol anticipates more possible actions, not just a missing parameter and a parameter's missing value. The entire element could be created, updated or marked for deletion through the use of the plug-in. Lastly, the plug-in checks whether walls comply with the multi-LOD meta-model requirements. Therefore, the code is very „wall-specific“ in some places. In the future, the application could cover all the Revit elements.

References

Abualdenien, J. and Borrmann, A. (2019), 'A meta-model approach for formal specification and consistent management of multi-lod building models', *Advanced Engineering Informatics* **40**, 135–153.

buildingSMART Data Dictionary (2019), `http://bsdd.buildingsmart.org`. Accessed: 2019-07-09.

Level of Development Specification (2019), `https://bimforum.org/lod/`. Accessed: 2019-07-09.

Zahedi, A. and Petzold, F. (2019), Adaptive minimized communication protocol based on bim, *in* '2019 European Conference on Computing in Construction'.

A data model for construction pits

Felix Stauch[1], Štefan Jaud[2], and Dominic Singer[3]

[1]Implenia Schweiz AG · Industriestraße 24 · 8305 Dietlikon · E-Mail: felix.stauch@implenia.com
[2]Chair for Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: ga24yuk@mytum.de
[3]Implenia Schweiz AG · Husacherstraße 3 · 8304 Wallisellen · E-Mail: dominic.singer@implenia.com

Modelling construction pits is time consuming and error prone. Information must be entered explicitly and checked manually. Data models are used to describe elements of a certain domain and relationships between them. To improve the modelling process a data model for construction pits has been developed. It captures foundation engineering structures and enables automatic model generation. The data model is implemented as C# class library and the resulting Building Information Modeling (BIM) models are generated using a plugin for Autodesk Revit. Based on the data model, knowledge based engineering (KBE) was introduced to support the modelling process, namely the Rete algorithm. Real-world tests were conducted, where the supported modelling process proved superior to traditional human design regarding design times and quality.

Keywords: construction pits, BIM, data models, knowledge based engineering

1 Introduction

BIM is changing and disrupting the architecture, engineering and construction (AEC) industry. The method has proven to be successful and has many advantages for all stakeholders. The BIM model is the heart of the method. Model quality defines the geometric and the informational detailing. In order to assure model quality, model checks are usually made in the planning and construction process.

Compared to other domains in the AEC industry the modelling process in foundation engineering is time consuming and error prone. Minor changes in the design can lead to high modelling efforts. The information in a model has to be defined and later checked explicitly by the designing engineer. Using a data model will improve these processes.

With a more efficient and intuitive modelling process the designing engineer is able to explore more variants and design an overall better solution. This leads to the following question: Can the modelling process for construction pits be supported by expert systems and if so, are there measurable advantages?

Using data models will help support the modelling process. Knowledge is implemented within the data model and allows its users to access and use the implicitly embedded knowledge. Furthermore, the instance of the data model is checked against a set of rules using an expert system. Since currently there is no data model for foundation engineering, a first step is to develop one.

The domain of construction pits within the domain of foundation engineering is very suitable as a proof of concept. Construction pits have no aesthetic requirements and are functional.

Their design is derived from the external constraints such as geology, water conditions and depth. They are composed of a combination of single elements. The amount of geometricly different elements is quite low and can be developed as a parametric element catalogue.

This paper begins with an overview of the related work that has been done. After a general introduction to the work done in the fields of parametric design and automated model generation the topics of data models and knowledge-based engineering (section 3) are described more thoroughly. In section 4 the case study of construction pits includes an overview of construction pit elements (subsection 4.1) and their relations (subsection 4.2) as well as the developed data model. A discussion can be found in section 5 followed by conclusions in section 6.

2 Related Work

Currently, many topics in the field of automated generation of models are already being applied in the construction industry. A basis for this are parametric components. Parametric components allow the user to control the geometry of the component via individual parameters (Shah and Mäntylä, 2019). This automates the modification process of the part. Geometric properties such as the length of a component can be modified via parameters. The basis for parametric components is the mapping of the geometry as a result of dependencies and conditions. In contrast to saving explicit geometry, where all coordinate points of the geometry are saved, saving parametric geometry saves implicit graph to create the geometry. When creating parametric components, construction knowledge about the components is required. Park (2011) describes how design knowledge can be anchored in a parametric object catalogue and thus shared with many users.

This implicit graph contains procedural steps, which describe the individual steps to be performed to obtain the resulting geometry. The inter dependencies of the components are mapped in a system of equations. According to Schultz et al. (2017), these dependencies consist of distances, angles or one of the following geometric conditions: coincident, co-linear, tangential, horizontal, vertical, parallel, perpendicular, or fixed. The system of equations is then solved by a geometric constraint solver (GCS) and the component is created (Fudos and Hoffmann, 2004). If the system of equations is not solvable, this indicates non-logical procedural steps.

By combining several parametric components, a partially automated model generation is implemented. In civil engineering this has already been already applied by the use of scripts. Software solutions such as Grasshopper for Robert McNeel and Associates Rhino[1] or Dynamo for Autodesk Revit[2] offer visual programming language (VPL) interfaces for creating such scripts. According to Ritter et al. (2015), VPLs are a simple way to customise solutions. By creating scripts, components are placed automatically according to certain rules, e.g. along a defined route. This automation is repeated any number of times with different input values. If the boundary conditions are the same, the result remains the same.

[1] https://www.rhino3d.com/
[2] https://www.autodesk.com/products/revit/overview

Another application for semi-automated model generation is the post-modelling of two-dimensional planning documents. In the transition from conventional to BIM-based planning, the recognition of components and information in two-dimensional plans is interesting. Komorowski and Berkhahn (2004) present a neural Kohonen network, which serves the classification of components in plans. A model is then generated from the information obtained.

Vilgertshofer and Borrmann (2018) describe the automatic generation of a segment tunnel using graph theory. The aim is to support and automate the detailing of components with the help of a graph. The individual components are represented as nodes in a graph. In order to achieve a higher level of detail, a node in the graph, which represents a part of the entire component, is replaced by a subgraph. By rewriting the graph the primary rough model is refined step by step.

With the help of previous knowledge about the domain, the automatic model generation is implemented. This approach is summarised under the term knowledge-based modelling or expert system. The functionality and architecture of an expert system is described in Tripathi (2011).

3 Data models & knowledge-based engineering

Data models are used to store and organise data. A data model consists of entities and their relationships. An entity can have different attributes. Conditions and relationships can be checked within a data model. Since data is stored in a structured way, it allows to use KBE.

Data models for certain domains already exist in the AEC. Many authoring software use non-standard and native formats for storing BIM models. Not only the individual geometric elements are captured, but also the relationship to other geometric and non geometric elements. The industry foundation classes (IFC) ISO 16739 (2018) are an open and standardised format, which represents many entities and associations of building construction. The IFC model contains implicit knowledge. For example in the spatial structure of IfcWindow: a window is located within a wall. In the course of further standardisation in the construction industry, the IFC format is also extended (*IFC-Bridge - IFCINFRA*, 2019).

An example of the relationships between the components used in a construction pit is found in a bored pile wall. A bored pile wall consists of several bored piles. Since each bored pile is individually produced and documented, this granularity is indispensable. The individual bored piles are present in the model. However, the context of the bored piles is derived from the bored pile wall. The distance of the individual bored piles along the wall axis is defined by the axis distance. A change in the axis distance results in a change in the number of bored piles in the retaining wall. This information can not be derived from the individual bored pile, it becomes available in the context of the bored pile wall. This is only one of many examples of topological relationships of objects used in construction pits.

The acquisition of an construction pit in a data model offers enormous advantages for the creation, modification and testing of models. Furthermore, it is a first step towards a future partial or full automatic model generation. With automatic model generation, all boundary

conditions are recorded in a machine-readable way, in addition to the rules of technology (standards, ...). An optimal solution for the construction pit is then derived from the boundary conditions. In order to implement this, however, preparatory work still has to be done. A first step is the investigation of KBE, a branch of artificial intelligence. KBE refers to expert systems that access a knowledge database to solve complex problems. Expert systems consist of several components. In Singer (2014) an exact explanation of the individual components is given.

The extensive and interdisciplinary expert knowledge is recorded in a knowledge database. The knowledge needs to be transformed into a set of rules. This transformation usually works with the help of a knowledge transformer. The knowledge transformer does not possess domain-specific knowledge, but is able to map the rules within the knowledge-based system.

An automated alternative to manual knowledge transformation is the development of a knowledge acquisition interface. The knowledge acquisition interface replaces the knowledge transformer by automatically acquiring and transforming knowledge into rules. An automated acquisition of new knowledge is essential for the future administration of the knowledge database. The advantages are presented in Vlaanderen (1990). The interface should be intuitive and user-friendly. A VPL offers these features and can help transform knowledge into rules. In Ritter et al. (2015) the abstract representation is mentioned as an advantage of a VPL for persons without programming knowledge.

4 Case Study: Construction Pits

By the year 2050, 68 % of the world's population is projected to live in urban areas (*World Urbanization Prospects: The 2018 Revision*, 2018), making space a valuable asset. To create more, buildings do not only rise higher above the ground, but also reach deeper into the soil, relying on deep construction pits. Construction pits protect the construction from the surrounding ground and water, as well as they transfer loads. The planning and construction of construction pits is a complex task that combines competencies from various disciplines. Construction pits have no aesthetic aspect and are functional. The solution is derived from the various external constraints such as geology, final depth or water conditions.

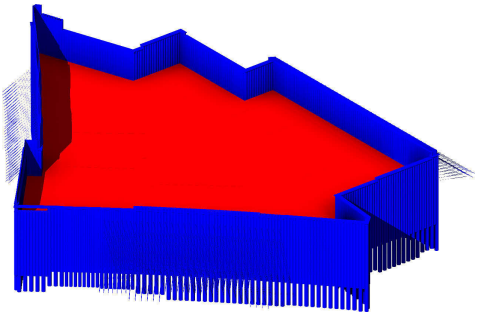


Figure 1: Foundation (red) and sheeting (blue)

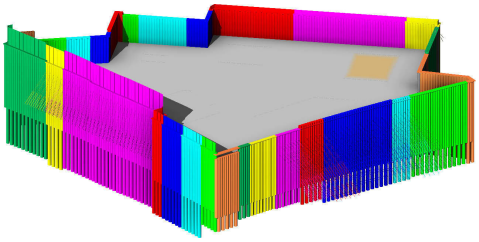


Figure 2: Different cross section types colour coded

A construction pit can be divided into foundation and sheeting (see Figure 1). Only the components of the sheeting were considered in this work. The sheeting consists of a combination of different components. Since the components do not vary excessively in form and function, the requirements are defined in a standardised way. Appendix 1 of *BIM in ground engineering* (2017) contains a list of objects in foundation engineering. The construction components (e.g. anchor, pile, ...) are combined and thus form the BIM model of the construction pit. The small number of components used in foundation engineering offers an optimal prerequisite for creating an object catalogue. In addition, the creation and management of such an object catalogue is greatly simplified by the standardised requirements on geometry and properties of the components.

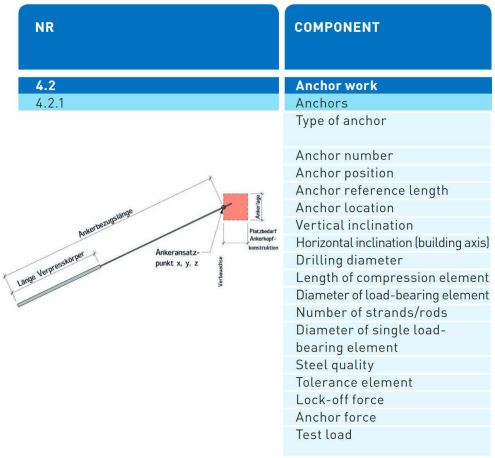


Figure 3: Example: Anchor work and its associated properties from *BIM in ground engineering* (2017)

4.1 Objects

Six types of retaining walls were investigated in this work. In the future a more extensive examination will be possible. The structure of the combination of individual components as well as the classification into sheeting and foundation will not change. Table 1 lists the six types of retaining wall considered and two typical combinations in foundation engineering, also displaying the individual components required. The individual components are not part of the data model, but are visualised using the modelling software. The components exist in Implenia[3]'s object catalogue and could be used for this work. The data model is shown in Figure 5. The dark blue entities were treated in this paper. This is a pitfall-specific BIM data model.

[3] `https://www.implenia.com/`

Lagging wall	- Beam - Bracing - Beam base
Pile wall	- Pile
Sheet pile wall	- Sheet
Slurry wall	- Slurry wall barrette
In-situ wall	- Shotcreting wall - Anchor
Anchorage layer	- Anchor
Combination: Pile wall & anchorage layer	- Pile - Anchor
Combination: Lagging & pile wall	- Beam - Bracing - Pile

Table 1: Investigated components

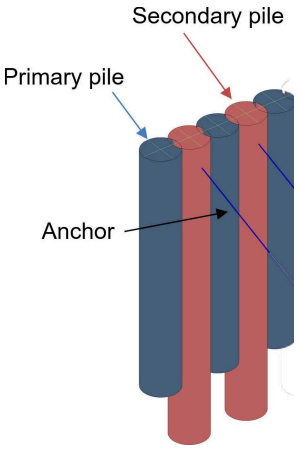


Figure 4: Visualisation of pile wall & anchorage layer

4.2 Relationships

As seen in Figure 2, the sheeting contains several elements of the cross section entity. As shown in Table 1, each cross section can consist of a combination of different retaining wall types. From the entity retaining wall, the subtypes anchorage layer, in-situ wall, lagging wall, pile wall, sheet pile wall and slurry wall inherit attributes and extend them. In Figure 4, the individual elements of an anchored pile wall were generated in the modelling software based on the design parameters from the data in the data model. The generation routines and data model were implemented in C#. A user interface was build, which resulted in a plugin for Autodesk Revit.

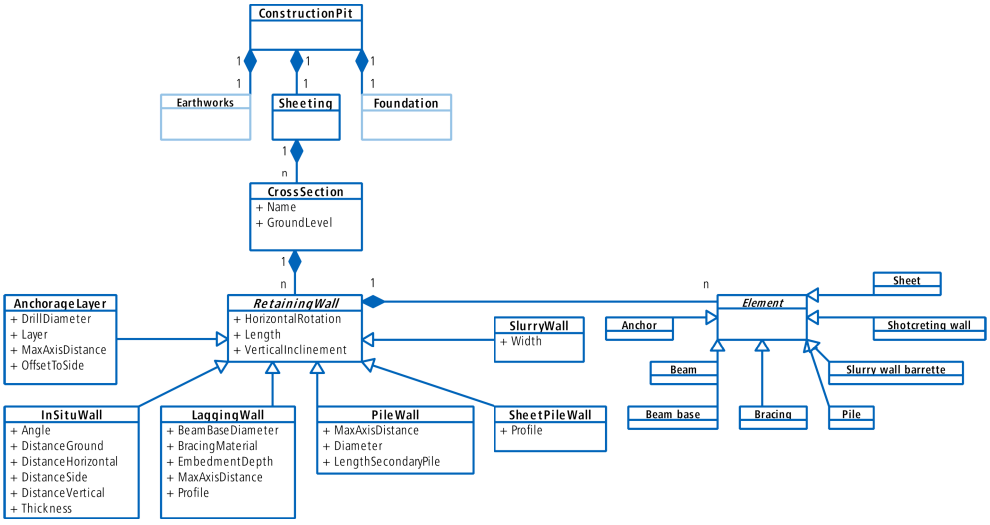


Figure 5: Developed data model for construction pits (Stauch, 2019)

5 Discussion

For the implementation, the components of the foundation engineering were first examined. Here a restriction was made and not all components, but a selection of sheeting components was selected. The investigation was mainly concerned with the topological structure of the components. An investigation of the component requirements, their structure and parametric has already been carried out at Implenia and has been incorporated into the existing object catalogue. Likewise, requirements for the information in the model are already described in *BIM in ground engineering* (2017). As a result of the investigation, a data model has been developed which maps the topological structure (subsection 4.2). This data model was implemented as a class library and the model generation from the data model was developed. The expert system was implemented based on the Rete algorithm. The Rete algorithm is described in Forgy (1990) and is a pattern matching algorithm. For the implementation the open-source solution NRules[4] was used.

In order to create a comparability between the model quality an objective evaluation method was presented. This method is derived from the intended use cases and the errors in the model. With the help of this evaluation method it was possible to make a comparison between the model quality of a model with and without support. In addition to the model quality, the modelling speed was also measured in order to determine an indicator of the time required.

The result of the comparison between a supported modelling and without it shows a significant increase of the modelling speed. The models are modelled up to five times faster. This results in models of the same or better quality. In the future, the use of a more complex, real model would have to be investigated. This makes it possible to observe to what extent subsequent changes in the design affect the modelling process. The support of the modelling process could bring enormous advantages in the administration of the changes to a section. The use of knowledge-based methods is possible and useful. The chosen algorithm is suitable for this. The required data is also implemented in the data model and is used for testing. The refinement of the rule set is possible by translating explicit, but above all implicit knowledge into further rules. To simplify the acquisition of knowledge, the possibility of a rule definition with visual programming language should be investigated.

For the investigation, only a small part of knowledge about the domain of foundation engineering could be recorded in the knowledge database. In the future it should be further investigated how knowledge can be captured and formalised. In particular, knowledge from design rules and regulations is usually already formally recorded and explicitly available. Such knowledge has already been examined in Luo and Gong (2014). A further investigation of automated model generation on the basis of boundary conditions is also interesting. In the long run, an automatic testing and adaptation of components to their boundary conditions would be interesting. For this purpose, however, they must be machine-readable.

[4] `http://nrules.net`

6 Conclusions

Data models are used to model knowledge. Knowledge is mapped in the data model's entities, attributes and associations. Expert systems are able to check a data model against a set of rules. This process supports the user by automatically checking entered data against a rule set. Additional knowledge is made available in the form of a rule set.

For the domain of foundation engineering a case study has been done, to prove that a data model can be developed and checked against a rule set. Objects and relationships of construction pits have been modelled in a data model. Knowledge from the domain was mapped in the data model. The data model was implemented as C# library. From an instance of the data model a BIM model can be derived using a modelling software. The necessary functions to interpret the data model have been implemented. The model generation can be done semi-automatic. Modifications of the construction pit can be done on the data model and then imported and updated in the BIM model.

6.1 Acknowledgements

The authors would like to thank Implenia[5] for their support.

References

BIM in ground engineering (2017), Federal Department of Ground Engineering - German Construction Industry Federation.

Forgy, C. (1990), 'Rete: A fast algorithm for the many pattern/many object pattern match problem', *Expert Systems* pp. 324–341.

Fudos, I. and Hoffmann, C. (2004), 'A graph-constructive approach to solving systems of geometric constraints', *ACM Transactions on Graphics* **16**.

IFC-Bridge - IFCINFRA (2019).
URL: *http://ifcinfra.de/ifc_bridge/*

ISO 16739 (2018), Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema, Standard ISO 16739-1:2018, International Organization for Standardization, Geneva, CH.
URL: *https://www.iso.org/standard/70303.html*

Komorowski, S. and Berkhahn, V. (2004), *Neural networks in the re-engineering process based on construction drawings*, Proceedings of the Xth international conference in computing in civil engineering, ICCCBE.

Luo, H. and Gong, P. (2014), 'A bim-based code compliance checking process of deep foundation construction plans', *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications* **79**, 549–576.

[5] `https://www.implenia.com/`

Park, J. (2011), 'Bim-based parametric design methodology for modernized korean traditional buildings', *Journal of Asian Architecture and Building Engineering* **10**, 327–334.

Ritter, F., Preidel, C., Singer, D. and Kaufmann, S. (2015), *Visuelle Programmiersprachen im Bauwesen*, Proceedings of the 27th Forum Bauinformatik, TUM.

Schultz, C., Bhatt, M. and Borrmann, A. (2017), *Bridging qualitative spatial constraints and feature-based parametric modelling: Expressing visibility and movement constraints*, Advanced Engineering Informatics.

Shah, J. and Mäntylä, M. (2019), 'Parametric and feature-based cad/cam : concepts, techniques and applications', *SERBIULA (sistema Librum 2.0)* .

Singer, D. (2014), *Entwicklung eines Prototyps für den Einsatz von Knowledge-based Engineering in frühen Phasen des Brückenentwurfs*.

Stauch, F. (2019), *BIM im Spezialtiefbau - Einsatz wissensbasierter Methoden zur Verbesserung der Modellqualität und Steigerung der Modellierungsgeschwindigkeit*.

Tripathi, K. (2011), 'A review on knowledge-based expert system: Concept and architecture', *IJCA Special Issue on Artificial Intelligence Techniques-Novel Approaches Practical Applications* **4**.

Vilgertshofer, S. and Borrmann, A. (2018), Supporting feature-based parametric modeling by graph rewriting, *in* 'Proc. of the 35nd ISARC 2018', Berlin, Germany.

Vlaanderen, M. J. (1990), *Automated Knowledge Acquisition for Expert Systems: an overview*, Erasmus MC: University Medical Center Rotterdam.

World Urbanization Prospects: The 2018 Revision (2018), United Nations Department of Economic and Social Affairs.
URL: *https://population.un.org/wup/Publications/Files/WUP2018-KeyFacts.pdf*

TUM OpenInfraPlatform: The Open-Source BIM Visualisation Software

Helge Hecht[1] and Štefan Jaud[1]

[1]Chair for Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · Germany · E-Mail: helge.hecht@tum.de & ga24yuk@mytum.de

The backbone of building information modeling (BIM) processes and exchanges are digital models which contain the relevant design and production data. Thus, the quality of models being exchanged is of utmost importance to ensure transparency and avoid ambiguities. There are many BIM model viewers available on the market, being proprietary or open, free or costly. Nevertheless, the current BIM software landscape lacks open-source solutions providing user and developer friendly, versatile application programming interfaces (APIs) for management of BIM data up-to-date. TUM OpenInfraPlatform (OIP) is a open-source C++ software which provides format independent data visualisation and inspection tools. OIP supports the whole programming process – from early-binding class generation to complex computations during geometry generation, visualisation and import/export functionality for various data formats. This paper presents the architecture of the framework and more importantly the rationale behind it. It should serve as a reference to everybody interested to join the cause.

Keywords: BIM, visualisation, Open Source, C++

1 Introduction

In the current developments in the architecture, engineering and construction (AEC) industry, building information modeling (BIM) is steadily replacing and enriching traditional computer aided design (CAD) practises (Borrmann et al., 2017). BIM methods promise to remove the need for blue-prints altogether, since digital representations of designed assets will become the end delivery of projects. These BIM models contain the relevant design and production data needed for a successful completion of a construction project. As such, they represent the backbone of BIM processes and provide a single source of truth to all stakeholders.

Following these developments, it is clear that the quality of models being exchanged is of utmost importance. Clear definitions and standards are crucial in order to validate the models being exchanged between project partners. The digital models are encoded in many different ways and one of the most prominent open standards currently available are the industry foundation classes (IFC) (ISO, 2013). Visualisation of these digital models would allow for easy error detection and verification. Moreover, the responsible actor checking these models needs to maintain independent work flows from other stakeholders and proprietary software solutions. Supporting various data formats eases communication and collaboration of different parties.

Various contributors at the Chair of Computational Modeling and Simulation (CMS) of the Technische Universität München (TUM) have been developing an open-source software suite

named TUM OpenInfraPlatform (OIP) for half-a-decade now (Amann et al., 2019) [1]. It is royalty-free, vendor-neutral software that fulfils the requirements stated above. It bases its internal data model on the IFC standard and provides visual representation of the BIM model. This paper provides an update on its architecture and functionality from the recent rework of its whole code-base.

The paper is structured as follows. In this section a short introduction to the topic of BIM visualisation is presented. Next section provides an overview over similar software suites available on the market and lists their different advantages and disadvantages over OIP. In section 3 the architecture of OIP with its different components and functions is described.

2 Related Works

There are some similar tools available on the market which are listed below with their web-page and responsible party.

CodeSynthesis XSD by Code Synthesis Tolls CC. URL: `https://www.codesynthesis.com/products/xsd/`.

FreeCAD by opensourceBIM. URL: `https://www.freecadweb.org/`.

FZK Viewer by Karlsruhe Institute of Technology (KIT). URL: `https://www.iai.kit.edu/1302.php`.

IFC Engine by RDF. URL: `http://rdf.bg/`

IfcKit by buildingSMART International (bSI). URL: `https://github.com/buildingSMART/IfcDoc/tree/master/IfcKit`.

IfcOpenShell by opensourceBIM. URL: `http://ifcopenshell.org/`.

IFC Query by Bauhaus University Weimar. URL: `http://ifcquery.com/`

IFC Quick Browser by GEM Team Solutions. URL: `http://www.team-solutions.de/2003/07/25/ifc-quick-browser/`

Solibri Model Viewer by Solibri. URL: `https://www.solibri.com/`.

Tekla BIMsight by Trimble. URL: `https://www.tekla.com/tekla-bimsight/`.

xBIM by Lockley et al. (2017). URL: `http://docs.xbim.net/`.

We list the meta-data of these products and projects in Table 1 together with OIP for comparison. Is the software or library open-source, does it provide a viewer of the geometry, does it provide an application programming interface (API) and in which programming language, can it be used cross platform (Windows, Unix), is it an early-binding approach and if so, to which IFC versions is it applicable. This list is by no means exhaustive, however all important open-source projects which passed the prototype stage are listed. It is trivial that all open-source software libraries provide an API.

[1] All code is published on Bitbucket and is versioned with HG: `https://bitbucket.org/tumcms/openinfraplatform/src/default/`

Table 1: An overview of the software suites similar to OIP.

Software	Open-source	Geometry Viewer	API	Language	Cross Platform	Early bind	IFC version
Code Synthesis	✓	✗	✓	C++	✓	✓	any
FreeCAD	✓	✓	✓	C++, Python	✓	✓	2x3, 4
FZK Viewer	✗	✓	✗	–	✗	✓	2x3 – 4x2
IfcEngine	✗	✗	✓	C++, C#	✓	✗	any
IfcKit	✓	✗	✓	C#	✗	✓	2x3, 4
IfcOpenShell	✓	✗	✓	java, python	✓	✓	2x3 – 4x1
IFC Query	✓	✓	✓	C++	✓	✓	2x3 – 4
IFC Quick Browser	✗	✗	✗	–	✗	✗	any
Solibri Model Viewer	✗	✓	✓	java	✗	✓	2x3 – 4x1
Tekla BIMsight	✗	✓	✓	java	✓	✓	2x3, 4
XBim	✓	✓	✓	C++,C#	✗	✓	2x3 – 4x1
OIP	✓	✓	✓	C++	✓	✓	any

3 TUM OpenInfraPlatform

OIP relies solely on IFC as its internal data model and other formats are converted to IFC since it is a powerful and global open standard in the AEC industry. To visualise the data, the possibly complex and abstract geometric representations used in IFC are converted to simple surfaces by the geometry converter. These meshes are then displayed in an interactive 3D viewport within the graphical user interface (GUI). The underlying rendering engine is based on the BlueFramework, an open-source library also developed by TUM [2].

The software uses CMake as build system to provide user friendly dependency management and a modular framework architecture. Settings required for the compilation process are specified in CMake during project configuration to ease collaboration and code portability for different platforms or system configurations. OIP is divided into the following parts: (i) the early-binding generator, (ii) the GUI, (iii) the core components, and (iv) the additional plugin modules. These are explained in detail in the following sections and an overview is presented in Figure 1.

The core components include the internal data representation as well as the converter for import and export operations for different data formats such as Objekt Katalog Straße (OKSTRA) or LandXML. The internal data representation is implemented in an early-binding approach, modelling all objects specified in IFC in a C++ library. This mapping is automated by the early-binding generator since implementing all classes manually is time consuming and merely a replication of performed work since all required information is contained within the

[2] All code is published on Bitbucket and is versioned with HG: `https://bitbucket.org/tumcms/blueframework/src/default/`

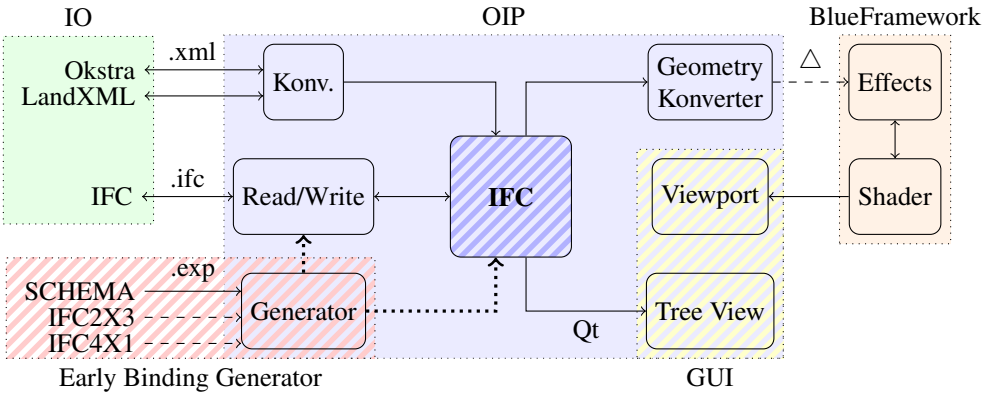


Figure 1: Overview of the different components of OIP.

schema specification. While the early-binding generator could also be used as a standalone tool, it is integrated into the framework.

3.1 Early-Binding Generator

The early-binding generator parses an EXPRESS schema specification and translates it into C++ classes which mirror the classes specified in the EXPRESS language. The schema file is processed using a Yacc and Bison parser to generate a corresponding meta-model representation in C++. This in-data model is then used to generate the early-binding IFC C++ classes, creating a bijective mapping between EXPRESS and C++.

Since both languages use different concepts and structures, expressing a specification modelled in EXPRESS within the domain of C++ can be quite challenging. To remain as close to the original formulation as possible while following an early-binding approach, we introduced an intermediate layer written in C++ which models the language rules of EXPRESS. The main reasoning behind this is the discrepancy between the basic types of both languages and the need for a common set of base functionality for all classes to ease usage as well as reading from and writing to files. These classes are the backbone for the final model implementation. The generator also produces the classes for reading and writing IFC files.

While C++ only distinguishes very basic built-in types (`char`, `int`, `float`, `double` and `bool`) and user-defined types, EXPRESS includes more abstract built-in types like lists and strings and has two mutually exclusive categories of user-defined classes (ISO, 2004). The C++ standard library (STL) provides some similar higher level functionality which extends the built-in types. Despite being a library of user-defined classes and functions they're considered part of the language standard and are supported by all compilers and platforms.

A central aspect of EXPRESS is the distinction between types and entities. They make up the user-defined classes in EXPRESS. Types can merely exist as attributes of entities while entities are *standalone* objects which are referenced by their ID in the scope of the model.

The attributes of entities can be types and references to entities. Since types have no ID, they are *composed* in the attributes while entities are *aggregated* - they are not owned but referred to by the respective entity (Sebesta, 1996). All entity attributes can be *optional* (ISO, 2004). This concept of optionals and references can be modelled in C++ using `std::optional` and `std::weak_ptr` respectively. A user defined type can be (i) a built-in type, (ii) a restricted type, (iii) a container-type, (iv) a select, (v) or an enumeration. The first category comprises simple wrappers like `IfcInteger` which could be expressed by a `typedef` or `using` directive. Restricted-types are types having `WHERE` clauses mapping the object to a condition which has to evaluate to `true`. An example would be the `IfcPositiveInteger`, which is an `IfcInteger` restricted to positive numbers. Note that EXPRESS lacks the concept of unsigned arithmetic types. A container-type is a set, list, array or bag of types. It has to be kept in mind that a container-type is different from a built-in container of types – compare `IfcCartesianPointList` and `IfcCompoundPlaneAngleMeasure`. The enumeration type is – similar to its C++ equivalent – a named value out of a fixed size collection.

Besides the `WHERE` clauses, all of these concepts have corresponding elements in C++ or the STL. Most user-defined types in EXPRESS are merely wrappers of built-in types. Implicitly converting these wrappers to their underlying types makes additional interface layers to other APIs redundant and gives access to the C++ STL functionality. We therefore implemented this concept by defining a template class `ValueType<T>` which has an attribute of type `T` – the underlying type – and defines implicit conversion and assignment operators as well as reading and writing. In order to provide string as well as IO operations, the enumeration type is implemented as a template class `EnumType<enum>` derived from `ValueType<enum>`, inheriting all implicit operators and defining some additional functionality. The built-in container types are implemented as sub-classes of the C++ STL containers with additional functionality to model the concept of cardinality restriction from EXPRESS. Container-types are derived from these and implement the common `TYPE` interface for string and IO operations.

While these concepts are relatively easy to express in C++ because of their simple and well defined form, select types are more complex. A `SELECT` as specified in EXPRESS is a `TYPE` in the sense of not having attributes or an ID while being one out of a set of types and/or entities. The reasoning behind this becomes more clear considering the aspect that the `SELECT` is a `TYPE` that can hold a type or a reference to an entity, not the entity itself. Selects are used quite often to combine variants of a specification with multiple spatial dimensions, i.e `IfcGeometricSetSelect` is a `IfcPoint`, `IfcCurve` or `IfcSurface` (ISO, 2013). They can be modelled in various ways and have no clear counterpart in C++. It strongly resembles the idea of unions, which provide different ways of accessing the same physical address in memory through members with different names and types. A more sophisticated version of unions called *variant* is provided by the boost library (David Abrahams, 2004). It was included in the C++ standard with C++17. The `variant` is a template class with variable sized template arguments where the actual contained value can be queried and accessed at runtime. The `std::variant` class makes error handling and type checks possible which isn't the case for unions. We implemented the select as specialisation of `ValueType` holding a `boost::variant` to inherit the common `TYPE` interface, to make use of the functionality provided by the boost library and to remain in the C++14 language standard (David Abrahams, 2004).

All classes described in an IFC schema specification inherit from their representative intermediate layer class and from their base classes as described in the specification. To allow for runtime type inspection (RTTI), an additional library called visit_struct is used. It is based on macros which inject RTTI functionality into non trivial classes and provides a uniform interface for accessing the types and names of attributes and functions.

3.2 Geometry Generation

The IFC specification includes descriptions for object geometries which can be used to visualise the model (ISO, 2013). The complexity of geometry descriptions ranges from simple Boundary representation (BRep) object to complex mathematical operations like extrusions along spline curves. These representations have to be converted to a simple triangle mesh in order to be visualised with a rendering engine. The implementation in OIP of this conversion process is based on carve, a geometry kernel like OpenCASCADE [3]. It implements a unified interface for all IFC specifications since the geometric entitities and types aren't subject to large changes in different versions of IFC.

3.3 Visualization

The GUI of OIP is implemented with Qt. It is platform independent, comes with a visual programming tool to design widgets in .ui files and includes a wide range of preset user interface (UI) elements which can be connected using a signals and slots system. Each element emits signals upon interaction which can be bound to C++ functions prefixed with the `Q_SLOT` macro as callbacks. The UI includes a tree structured view window to inspect IFC models in a textual manner. It mimics the behaviour of the IfcQuickBrowser software. The textual representation is useful to display non geometric entities within the model such as properties and relations. The tree based layout makes navigating through the file structure and the dependencies between entities intuitive.

The triangulated geometric representations contained in the model are displayed in an interactive viewport in the application's main window. The viewport is implemented using the QViewport class provided by Qt to embed the continuously rendered image in the application. Interactions like mouse movement or clicks can be captured to trigger callbacks, similar to the signals and slots system. Even though Qt provides a rendering engine using OpenGL, we developed a custom library, the BlueFramework.

BlueFramework is a 3D graphics rendering engine API written in C++. The main concept is the implementation of the high level `IEffect` interface. Custom rendering effects are created by sub-classing `IEffect` and implementing the interface functions for initialisation and drawing. All required operations such as data transfer are implemented in the base class. It provides intuitive functions to supply the index and vertex buffers as well as other resources like textures. Rendering simple shapes like lines, points or triangles without complex shading can be done easily using the `VertexCache` effect classes.

The `IEffect` interface API is implemented on top of multiple rendering backends which

[3] `https://www.opencascade.com/`

The `IEffect` interface API is implemented on top of multiple rendering backends which can be switched during runtime. No changes to the code implementing the visualisation are necessary to switch from DirectX to OpenGL as long as the shaders used by the effect are supplied for both backends.

3.4 Additional Modules

Additional functionality for processing data from other domains is provided through a plugin module system. Each module encapsulates it's own dependencies and interfaces to the OIP core API and user interface. The plugins which should be included can be selected during project generation in the CMake GUI. Import and Export modules for standards other than IFC are implemented manually and therefore only cover specific parts of the whole standard. Creating a tool for automatic generation of conversion functions for different standards

Point Clouds are large collections of 3D point data and are used for construction or infrastructure monitoring and maintenance. A single cloud can contain multiple millions of points including additional information like colour or surface normals. OIP uses the CloudCompare open-source project to represent and handle point cloud data while providing additional functionality built on top of the base API (Girardeau-Montaut, 2012). It supports reading and writing the native CloudCompare binary data format as well as the open LAS format. Visualisation of point clouds and other related objects like octrees is also implemented using the BlueFramework.

LandXML is a standard used to describe infrastructure models. They can be imported and are converted into a corresponding representation in the internal IFC based data model. LandXML uses similar structures to describe horizontal and vertical alignments as IFC enabling loss less conversion between both formats (Amann and Borrmann, 2015). The OKSTRA standard follows a similar pattern as LandXML. Due to the large scope of OKSTRA, only a small subset related to alignments is converted into IFC and visualised (Amann et al., 2014). Both IFC and OKSTRA have linked data specifications of the standards using the web ontology language (OWL) (Jakob Beetz, 2018; Pauwels et al., 2017; Beetz and Borrmann, 2018). OIP supports writing IfcOWL for Ifc4x1 and parts of OkstraOWL in turtle and rdf format.

4 Conclusions

This paper presents the OIP software developed at the TUM. We provide an overview over currently available free software tools which support IFC and compare them to the OIP. We explained the rationale behind our early binding implementation and the mapping between EXPRESS and C++. A lot can still be done in the area of continuous integration. This includes a better modular architecture and dependency management. The software toolkit has large potential for being developed as a platform independent application due to utilising Qt and BlueFramework for visualisation and boost to extend the C++ STL. Current developments are dedicated towards implementing an automated generation of a super-set of multiple IFC specifications to create a unified interface for conversion of geometric representations.

References

Amann, J. and Borrmann, A. (2015), Creating a 3d-bim-compliant road design based on ifc alignment originating from an okstra-accordant 2d road design using the tum open infra platform and the okstra class library, Technical report, Technische Universität München.

Amann, J., Flurl, M., Jubierre, J. R. and Borrmann, A. (2014), An alignment meta-model for the comparison of alignment product models, *in* 'Proc. of the 10th European Conference on Product & Process Modelling', Vienna, Austria.

Amann, J., Schöttl, F., Singer, D., Kern, M., Widner, A., Geisler, P., Below, D., Hecht, H., Coetzee, C., Duckerschein, L., Schill, R., Werner, M., Böckle, M., Gupta, N., Mustafa, A., Markič, Š. and Borrmann, A. (2019), 'Tum open infra platform 2019'.
URL: *https://www.cms.bgu.tum.de/oip*

Beetz, J. and Borrmann, A. (2018), Benefits and limitations of linked data approaches for road modeling and data exchange, *in* I. F. C. Smith and B. Domer, eds, 'Advanced Computing Strategies for Engineering', Springer International Publishing, Cham, pp. 245–261.

Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2017), *Building Information Modeling – Technology Foundations and Industry Practise*, Springer International.
URL: *https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-92862-3*

David Abrahams, A. G. (2004), *C++ Template Metaprogramming: Concepts, Tools, and Techniques from Boost and Beyond*, Addison-Wesley Professional.

Girardeau-Montaut, D. (2012), *CloudCompare: User's Manual for version 2.1*.
URL: *www.cloudcompare.net*

ISO (2004), Industrial automation systems and integration – Product data representation and exchange – Part 11: Description methods: The EXPRESS language reference manual, Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH.

ISO (2013), Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries, Standard, International Organization for Standardization, Geneva, CH.

Jakob Beetz, André Borrmann, J. A. (2018), Linked data: Analyse von einsatzmöglichkeiten von verbundenen informationen (linked data) und ontologien und damit befassten technologien (semantic web) im bereich des straßenwesens, Technical report, Technische Universität München, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.

Lockley, S., Benghi, C. and Černý, M. (2017), 'Xbim.Essentials: A library for interoperable building information applications', **2**(20), 473.
URL: *http://joss.theoj.org/papers/b23bed93a0377b4f4317d0583b4d2c5e*

Pauwels, P., Krijnen, T., Terkaj, W. and Beetz, J. (2017), 'Enhancing the ifcowl ontology with an alternative representation for geometric data', *Automation in Construction* **80**, 77 – 94.
URL: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580517301826*

Sebesta, R. W. (1996), *Concepts of Programming Languages (3rd Ed.)*, Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., Redwood City, CA, USA.

IfcBridge Model Generation using Visual Programming

Sebastian Esser[1] and Korbinian Aicher[1]

[1]Chair of Computational Modeling and Simulation · Technical University of Munich · Arcisstraße 21 · 80333 Munich · E-Mail: sebastian.esser@tum.de

Methods and concepts of Building Information Modeling (BIM) are increasingly used in infrastructure projects. However, suitable data structures are still missing to store and exchange model data in an appropriate spatial and asset-specific context. With the IfcBridge schema extension, the vendor-neutral data format Industry Foundation Classes (IFC) now includes classes for bridge structures. This paper presents approaches to export IfcBridge models using existing authoring tools. To overcome the lack of the required spatial context for bridges, a visual programming language is chosen to extract and assign additional knowledge to a bridge model. The data gained from visual programming provides the base for the export into the new IFC 4x2 standard.

Keywords: BIM, Infrastructure, IFC4x2, IfcBridge

1 Exchange of Digital Bridge Models

1.1 Problem Statement

The use of modern digital methods can be recognized across all domains in the Architecture, Engineering, and Construction (AEC) industry. Although concepts of Building Information Modeling (BIM) are already in use for projects of different size, developments for traffic related domains and their assets are not as advanced yet. Civil infrastructure assets like roads, railways, bridges and tunnels require new concepts for geometric representations, procedural methods to describe object positions, and additional object types and assemblies.

To improve data exchange scenarios for infrastructural assets, the non-profit organization buildingSMART International (bSI) is working on extending its data format Industry Foundation Classes (IFC). IFC is a standardized product model that had been highly adopted by several vendors to exchange digital models of buildings and civil infrastructure. Until version IFC 4, the data structure was primarily focused on the needs of building constructions. With IFC 4x1, essential concepts for linear construction sites were introduced which now build the basis for asset-specific extensions like IfcBridge, IfcRoad, IfcRail and IfcTunnel (Borrmann et al., 2017). The latest published version IFC 4x2 now includes additional classes for modeling and exchanging bridges, and has currently the status of a candidate standard.

One of the general challenges in BIM is the objective to improve data exchange scenarios and to deploy already gained knowledge to other involved parties. Thus, standardized data models are essential to serve the requirements of both, domain-specific as well as cross-domain use

cases. However, there is always an assessment between standardization and flexibility. On the one hand, such models must have fixed concepts to make sure, every application interprets the delivered data in the same manner. On the other hand, engineers and architects in the AEC industry mostly design unique items, which causes the need of an appropriate flexibility inside a data model for individual exchange scenarios.

The integration of novel concepts always takes a while until software vendors provide native export and import interfaces and get certifications for them. However, it is essential to test such schema extensions and their compliance to existing (proprietary) data models as early as possible. In this paper, a case study proves the capabilities of an existing tool chain to create and deploy bridge models. It shows the interaction with the new spatial structure introduced by the latest IFC version 4x2 and discusses optimization potential in the applications used in the case study.

1.2 Objectives

This paper presents and analyses an existing workflow to design bridge models using a proprietary tool chain. These bridge models are then tested if they comply with the IfcBridge data model. Since each step in a life cycle of a bridge requires individual data, an enormous amount of applications exist, which are suitable for individual requirements, phases and use cases. Therefore, the IFC interface developed in case study is sufficient for various design stages and can be reached by several data sources.

In the case study, we have used several applications from the software vendor Autodesk. With InfraWorks, an engineer can evaluate different conceptual designs of roads and bridges, and perform impact simulations in large-scale environments. The BIM-authoring tool Revit was initially tailored for modeling buildings, and, therefore, has powerful functions for load-bearing structures and related details (e.g., reinforcement design, connection between components, etc.). With the visual programming environment Dynamo, engineers can extend and automate recurring tasks in Revit. During the case study, Dynamo is used prepare bridge models from InfraWorks. Neither InfraWorks nor Revit have a native IfcBridge interface yet. Thus, we developed an innovative Dynamo library containing nodes to interact and export bridge models into the new IFC 4x2 standard. Besides this, Dynamo can be used to extend the data quality of the bridge models (e.g., setting additional material properties). Although a proprietary tool chain is used, our developed services are flexible enough to interact with third-party models as well.

The elaboration is structured as follows: Section 2 gives an overview of basic conventions for schema extensions. In Section 3, we show a possible tool chain to generate bridge models and export them into IfcBridge models. Section 4 explains the implementation framework. Section 5 presents the outcomes and possible shortcomings in the chosen tool chain to generate IFC models that are compliant to the IfcBridge schema. Section 6 discusses additional requirements to improve the resulting IFC models in geometric and semantic aspects.

1.3 Related Work

Modeling concepts for bridges or other structural assets for infrastructural purposes were already an important topic before the IfcBridge project. Singer (2014) presented approaches to model bridges based on existing knowledge. At the same time, bSI started with first projects to develop basic concepts for civil infrastructure, which resulted in the schema version IFC 4x1 (Amann et al., 2014). Often called "IfcAlignment", this extension defines fundamentals for all upcoming civil infrastructure extensions.

Markič (2017) summarized several proposals for IfcBridge extensions, which were taken into account during the international standardization project. Borrmann et al. (2019) gave an overview about the toolchain and project management during the IfcBridge project.

2 Fundamentals for new IFC Extensions

The ongoing projects IfcBridge, IfcRoad, and IfcRail pose a significant challenge since a common standard is to be developed at the end. For different asset types, similar concepts should be used for modeling and exchanging related objects. At the same time, domain-specific demands must be also taken into account. Thus, the Common Schema Committee is working on issues, which are related to multiple projects (e.g., geotechnical structures and earthworks, cross section representations, level crossings between several traffic assets). A set of fundamental rules define concepts, which every asset-specific extension should follow. The overall goal is to reach a harmonized data model, which will most likely result in the next major version IFC 5.

Prototypical test implementations can help to verify whether data structures of existing applications are able to support novel concepts in data models that are tailored for cross-vendor data exchange scenarios.

3 Prototypical IfcBridge Export-Interface

In the following study, the authors discuss a prototypical implementation of an IfcBridge export module in established BIM authoring applications. The aim is to test the capacity of existing data sources to setup and edit bridge models. Besides that, the developed framework should help users to get a better understanding of IFC concepts using a visual programming language for user interactions (Preidel et al., 2017).

3.1 Workflow and Methodology

There is currently no application that provides an engineer with all the tools for a BIM-based process. Instead, there is typically a set of applications used along with a project execution. Each of those has individual functions helping the engineer to fulfill the required task like designing and checking models or perform simulations on them.

The individual content of a data exchange scenario is dependent on the subsequent use of the resulting model. For this reason, IFC provides the concept of Model View Definitions (MVDs). An MVD defines a subset of the complete IFC data schema and prepares a model for a defined use case. Well-known MVDs from previous versions are the Reference View (RV) and the Design Transfer View (DTV) (See et al., 2012). RV exchange scenarios use explicit boundary representations, whereas DTV models aim to contain procedural geometric representations for subsequent modeling and editing (Trzeciak and Borrmann, 2018).

For IfcBridge, an additional MVD "Alignment-based Bridge Reference View (Bridge-ARV)" defines the placement of components along a given alignment curve and requires new procedural geometry types describing extrusions with varying cross sections (Borrmann et al., 2019).

3.2 Application for Conceptual Design and Model Refinements

Our case study considers two main design phases: the conceptual design and variant analysis in a large-scale rendering tool and design refinements in conceptual models during a detailed design phase. Data handover scenarios can be requested by several parties during both phases using a vendor-neutral data model. Figure 1 shows several model states during such a workflow.

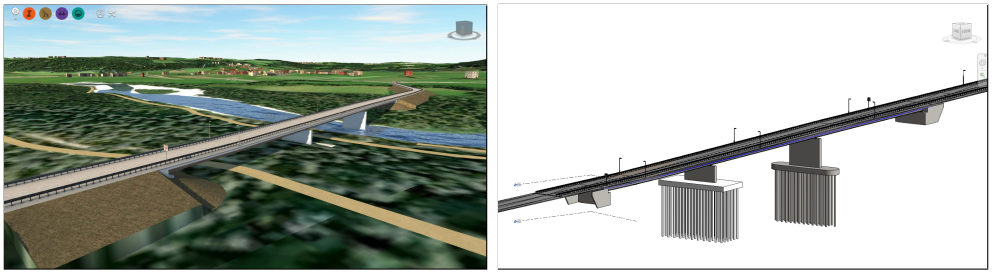


Figure 1: Conceptual Road Design in InfraWorks (left) and exported Bridge in Revit (right)

3.3 Conceptual Design

The conceptual design of infrastructure assets can be carried out in large scale rendering tools to directly receive a scenic impression of the desired design. Autodesk InfraWorks 2020 provides various tools for this phase. Such applications allow users to make quick changes on the models and directly see the results within the virtual environment. (Autodesk, 2019)

InfraWorks provides a proprietary interface to the well-established BIM authoring tool Autodesk Revit. It is used to transfer the conceptual design of a bridge into a Revit project.

3.4 Design Refinement

Revit is intended for design improvements and to add additional parameters to components. It is a powerful tool for the detailed design of load-bearing structures, especially concrete and steel constructions. In the case study, Revit is used in version 2020.0.

Most of the BIM authoring tools currently available on the market were not developed to model infrastructural assets like bridges or tunnels. Thus, many vendors provide plugin solutions for bridge structures in the context of a BIM-based workflow (SOFiSTiK, 2018) (Allplan, 2019).

The authoring tool Revit organizes all components in families. Categories aggregate several families, whereas a family itself can have specific family t ypes. A lthough I nfraWorks provides a proprietary interface to Revit, all received bridge components are only received as 'DirectShape' geometries and are mapped into a generic component type. For some components, the type cannot be identified. To overcome this issue, the common classification system *UniClass* is used. This work-around requires the engineer's knowledge since he has to add the classification codes m anually. However, it makes the approach more flexible and adaptable. By using an independent classification systems, bridge models from various authoring sources can be processed. In the last years, lots of developers and researchers have actively worked on design workflows in environments of various scales (Obergriesser, 2016).

4 Data Extraction and IFC-Export

Existing BIM authoring tools typically arrange building components in grids, levels, and spaces. This approach stays in contrast to the spatial structure of IfcBridge splitting the whole bridge in bridge parts. Additionally, components of civil infrastructure assets are often positioned along an alignment curve. To overcome the lack of these essential concepts in Revit, the visual programming language Dynamo is used to extract and prepare data for the desired IfcBridge export.

4.1 User Interaction

In a first step, Dynamo is used to group elements of similar types. These results are passed into our *IfcBridgeToolKit* library, which contains nodes to setup an IFC model and insert elements into it. Figure 2 demonstrates the use of our nodes by an example of bridge girders.

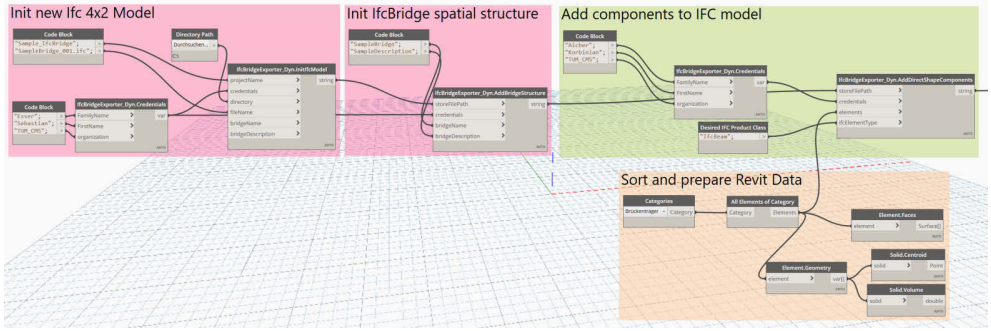


Figure 2: User Interaction between Dynamo and the IFC Model

Each interaction with the IFC model might be triggered by a new responsible designer belonging to an individual domain. IFC is capable of such scenarios providing an owner history concept. Therefore, each node with transactions on the IFC model requires credential data as an input.

4.2 Implementation Architecture

The implementation follows object-oriented principles and has a modular structure. Figure 3 presents an extract of our architecture.

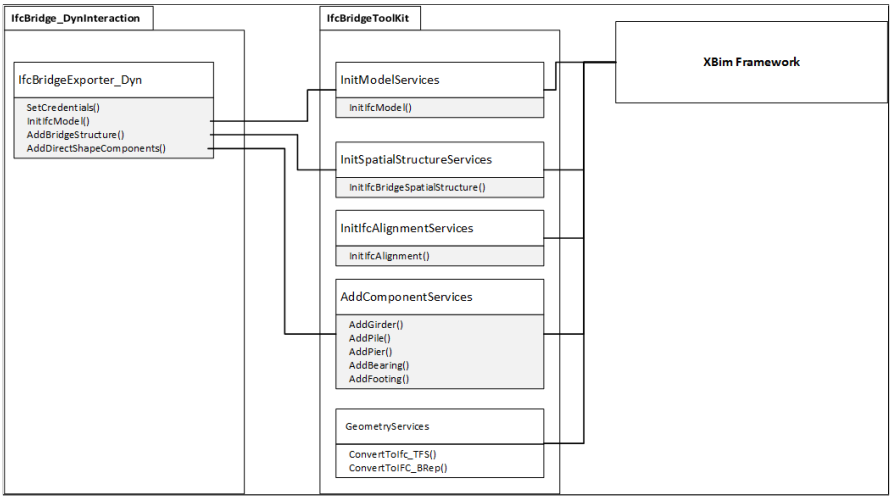


Figure 3: Implementation Architecture

The package *IfcBridge DynInteraction* manages the user interaction with Dynamo processes. Besides public accessible methods, additional private methods and classes prepare Revit-related data to interact with our toolkit framework. In consequence, the library *IfcBridgeToolKit* is decoupled from any Autodesk related references or data types. The toolkit itself provides methods to insert groups of IFC instances into an IFC model. Any interactions with the IFC model are realized using the early-binding framework *xBIM* (*xBIM Toolkit*, 2019).

5 Results

With the presented tool chain, we are now able to deliver IfcBridge models in the context of a Cartesian Coordinates based Reference View. The existing tools provide suitable functions for the conceptual design and refining components in later project phases. Figure 4 shows the resulting IFC model in the FZK viewer (Karlsruher Institut für Technologie, 2019).

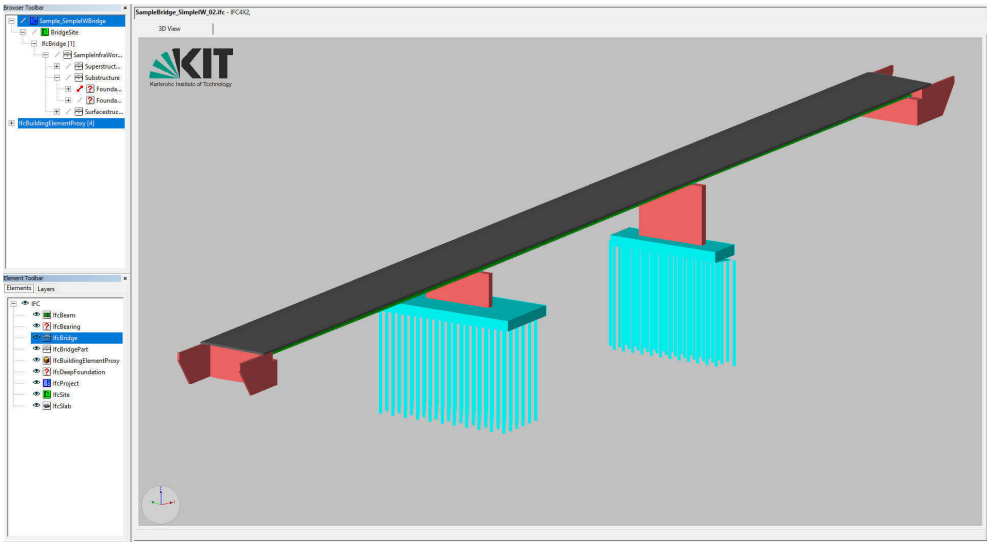


Figure 4: Resulting IFC Model in the FZK-Viewer

6 Discussion

The case study has successfully shown the tested tool chain to provide proprietary bridge models in a vendor-neutral representation. The use of a visual programming language enables a broad range of users to get a deeper understanding of the technical behavior of and to quickly change the resulting IFC content. However, improvements and less flexibility is required to implement and provide legally binding interfaces. Although it was possible to export models in a coordinate-based RV, the implementation of alignment-based models is not realized yet since no alignment curve was present in the models. However, the chosen implementation architecture can be extended for such requirements.

7 Conclusion and Outlook

In this paper, we presented an innovative approach to generate IfcBridge models. As shown in the case study, established tools build a robust base for future import and export interfaces. In the next steps, the resulting models should be tested against the official MVD definitions using MVDXML. Additionally, many engineering and consulting companies have developed own Dynamo codes for bridge design tasks. Thus, a connection between the IfcBridge-nodes and their custom codes can gain many benefits. Finally, cross-domain interfaces are of high importance to reach the overall goal: to improve the quality of collaboration.

References

Allplan (2019), 'Allplan bridge: Brücken parametrisch planen, einfach und präzise in 4d'. https://www.allplan.com/de/produkte/bridge/ [Accessed: 2019-05-21].

Amann, J., Jubierre, J. R., Borrmann, A. and Flurl, M. (2014), An alignment meta-model for the comparison of alignment product models, *in* 'eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2014', Vienna, Austria, p. 351ff.

Autodesk (2019), 'Infraworks features: Infrastructure planning and design software'. https://www.autodesk.com/products/infraworks/features [Accessed: 2019-05-21].

Borrmann, A., Amann, J., Chipman, T., Hyvärinen, J., Liebich, T., Muhic, S., Mol, L., Plume, J. and Scarponcini, P. (2017), IFC Infra Overall Architecture Project Documentation and Guidelines, Technical report.

Borrmann, A., Muhič, S., Hyvärinen, J., Chipman, T., Jaud, S., Castaing, C., Dumoulin, C., Liebich, T. and Mol, L. (2019), The IFC-Bridge project – Extending the IFC standard to enable high-quality exchange of bridge information models, *in* '2019 European Conference on Computing in Construction'.

Karlsruher Institut für Technologie (2019), 'KIT - FZKViewer'. https://www.iai.kit.edu/1648.php [Accessed: 2019-02-13].

Markič, Š. (2017), IFC-Bridge: Previous Initiatives and Their Proposals, *in* '29. Forum Bauinformatik', Dresden, pp. 12–19.

Obergriesser, M. (2016), Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung, Dissertation, Technical University of Munich.

Preidel, C., Daum, S. and Borrmann, A. (2017), 'Data retrieval from building information models based on visual programming', *Visualization in Engineering* **5**(18), 1–14.

See, R., Karlshoej, J. and Davis, D. (2012), An Integrated Process for Delivering IFC Based Data Exchange, Technical report.

Singer, D. (2014), 'Entwicklung eines Prototyps für den Einsatz von Knowledge-based Engineering in frühen Phasen des Brückenentwurfs'. Master's Thesis, Technical University of Munich.

SOFiSTiK (2018), 'SOFiSTiK Bridge Modeler: Parametrisches Modellieren von Brücken in Autodesk Revit 2019', *Ernst & Sohn* **Sonderausgabe BIM, November 2018**.

Trzeciak, M. and Borrmann, A. (2018), Design-to-design Exchange of Bridge Models using IFC: A Case Study with Revit and Allplan, *in* '12th European Conference on Product and Process Modelling', Copenhagen, Denmark.

xBIM Toolkit (2019). http://docs.xbim.net/ [Accessed: 2019-02-12].

BIM based two-dimensional floor plan simulation and planning for evacuation

Fangzheng Lin[1], Carsten Kerbitz[2], and Yunyi Fu[3]

[1]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden · E-Mail: fangzheng.lin@tu-dresden.de
[1]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden · E-Mail: carsten.kerbitz@tu-dresden.de
[1]FRILO Software GmbH · Behringstraße 45 · 01159 Dresden · E-Mail: fu.yunyi@frilo.de

Building Information Modelling (BIM) is nowadays a popular topic among civil engineers. However, BIM application goes still not intensive enough in terms of depth and width. For crowd simulation and escape road planning, either software or program takes the advantage of 2D floor plans for simulation execution. The information of 2D floor plans is supposed to be involved in BIM models for example an Industry Foundation Classes (IFC) model containing 3D spatial information of building objects. Nevertheless, this kind of data swapping is barely seen, hence worth to be studied and automated to accelerate the preprocessing process instead of building 2D models in simulation software from scratch. This paper proposes a methodology of mono-directional data mapping from an IFC model to its 2D floor plans. A further development demonstrates two kinds of implementation scenarios: a) Converting the relevant data in IFC models into a crowd simulation software; b) Calculating escape roads based on the filtered data from an IFC model. The data structure of corresponding objects in IFC models are studied for the above-mentioned two objectives, which also broaden the extension of BIM application.
Keywords: Building Information Modelling, Industry Foundation Classes, crowd simulation, escape road, building floor plan

1 Background

Building Information Modelling (BIM) brings the possibility to filter and process geometry data and useful parameters directly from a building model. The relevant research work about BIM based 3D modelling from 2D has covered a plenty of files, for instance new design system development (Glunz et al. (2017)), facilities management (Wang et al. (2013)), knowledge management (Lin (2014)). Actually, 2D building floor plans are able to be applied in copious situations from building design via crowd simulation, to escape road planning for fire/hazard protection. For smaller objects, rescue route detection is carried out with the help of manual calculations based on building regulations, which is time-consuming and ultimately results with high tolerances. Passenger flow simulations providing more accurate information about requirements for rescue route lengths and widths are carried out for larger objects, but significantly cost-intensive. Therefore, it is meaningful to develop a method to realize a more convenient and effective pre-processing workflow, so that the efficiency of evacuation oriented simulation and planning for both smaller and larger projects can be increased.

2 IFC Objects for 2D Simulation

If engineers try to convert a 3D IFC model to 2D plans, not all spatial building elements in the 3D Industry Foundation Classes (IFC) model are of concern. Considering the features of 2D plans, the major essential building elements are walls, columns, stairs and doors. Besides, spaces as an abstract concept of building element and windows working as exits in some circumstances can also be taken into account. The data categories in 3D-to-2D convention from the above-mentioned corresponding building elements consist of geometry, location and properties. Since the IFC standard supports a comprehensive description of building projects, these three categories involved in the IFC standard as well are analyzed respectively in this section.

2.1 Geometric Representation

In order to establish a 2D building plan, the geometric information of walls, columns, doors, spaces and sometimes windows in an IFC model are required. In terms of the data structure defined by the IFC standard, the classes *IfcShapeRepresentation*, *IfcBoundingBox* and *IfcGeometricCurverSet* are normally utilized to represent the geometry of building elements (Fig. 1).

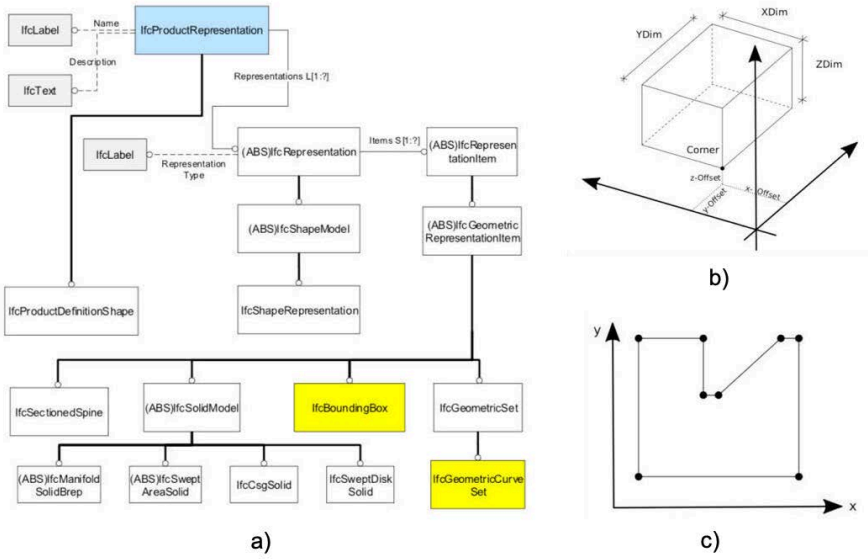


Figure 1: a) Data structure of IfcShapeRepresentation; b) Geometry of IfcBoundingBox; c) Geometry of one IfcPolyline

By means of *IfcShapeRepresentation*, establishing the geometry of a building element starts with a local axis on an endpoint of this element, this endpoint serves as the original point of the axis. Then there is a path line, which indicates the thickness, along the local ground plane. The thickness value is stored in the attribute depth of *IfcExtrudedAreaSolid*.

IfcBoundingBox provides another kind of philosophy of generating geometry. Each component has its own local coordinate system *IfcCartesianPoint* specifies the local offset of the bounding box's outgoing vertex to the origin of the component's local coordinate system. The class *IfcCartesianPoint* contains three attributes of the type *IfcPositiveLengthMeasure*, whereby the offsets in x-, y- and z-directions are given as floating-point number. The bounding box is clamped parallel to the axes of the local coordinate system. For cu-boid components such as a wall, a rectangular support or a wall opening, the bounding box is sufficient as a geometry descriptive class.

Spaces are bodies that contain a volume through a floor plan and an extension in height. A description of the bounding box is obvious, but not favorable in all cases, since it does not sufficiently accurately map the geometry of a non-rectangular floor plan. Therefore, in addition to the reference to the bounding box, a reference to the class *IfcGeometricCurveSet*, which refers to a list of at least one or more two- or three-dimensional points (*IfcPoint*) and curves (*IfcCurve*), is used for the plan view. A subclass of *IfcCurve* is *IfcPolyline*, which creates a polyline by listing at least two *IfcCartesianPoint* points. In , only x and y coordinates are given, so that only the floor plan is shown here.

2.2 Locations and Properties of Building Elements

Fig. 2 a) demonstrates the data structure corresponding to object placement in the IFC standard. In the class *IfcAxis2Placement3D*, which is referenced directly by *IfcLocalPlacement* in three-dimensional spaces, all attributes describing offsets are specified. With the reference to *IfcCartesianPoint*, the offsets from the referenced to the own coordinate system in the x-, y- and z-directions are mapped parallel to the corresponding axis directions of the referenced local coordinate system.

If the reference to another coordinate system exists, this kind of referencing is done directly to an object of the class *IfcLocalPlacement*. From there, the offsets of the own local coordinate system are specified either to another coordinate system of objects or to the global coordinate system. The class *IfcLocalPlacement* contains an obligatorily reference *RelativePlacement* and an optional one *PlacementRelTo*. Fig. 2 b) shows the relationship between the locations and the *RefDirection* in relation to two coordinate systems. For the *RefDirection*, only the rotation on the x-y-plane is displayed, because an inclination in this work does not have to be considered and also does not occur in the IFC example file. The angle α results from the coordinates given in *IfcDirection* for the *RefDirection*. By specifying the *ObjectPlacement*, it is thus possible to set the position and direction of the local coordinate systems of all objects in relation to a global coordinate system.

Beside geometric representation and location description, the IFC data structure offers the possibility of assigning a component or object largely freely chosen properties as well. These properties can be some material parameters (e.g. fire resistance or heat permeability), business data (e.g. purchase price or guarantee), and object statues such as a window or a door open ought to be open or closed under certain circumstances.

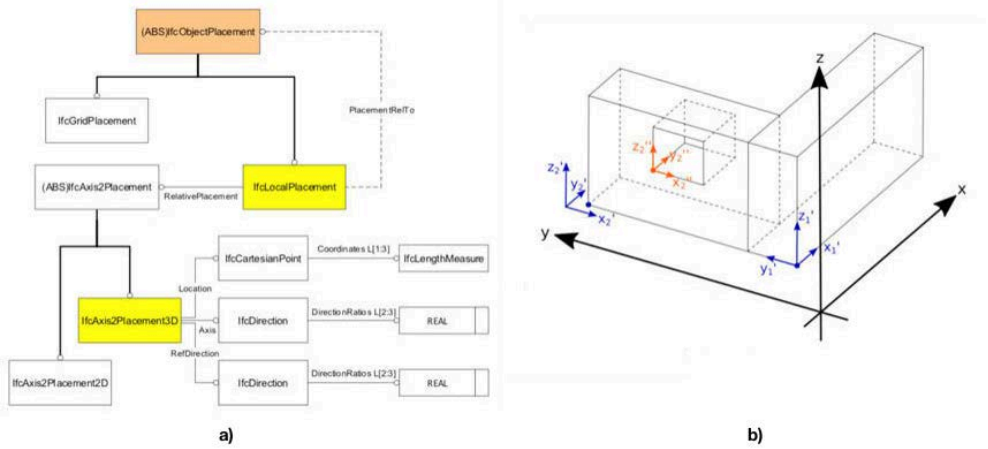


Figure 2: a) Data structure of location representation in the IFC standard; b) Relationship between global and local coordinate systems

3 Theories of Escape Road Planning

3.1 Dijkstra-Algorithm

A proven algorithm for solving the shortest path problem is the so-called Dijkstra algorithm, named after its inventor, Dutch mathematician and computer scientist E.W. Dijkstra. For a given seed node S (Fig. 3), this algorithm calculates the shortest path to all subsequent nodes in an edge-weighted graph. The evaluation of the edges must always be positive. The Dijkstra algorithm works on the principle that from a currently visited node i, the shortest distance (after edge weighting) to an adjacent node j is always selected. In this case, the entire path from the start node S to this adjacent node j is determined. If there is a shorter path from the starting node S to another node k elsewhere in the graph, this path will first be examined. This ensures that the path to a node is always the shortest. As long as one path to a node j (or k) is the currently shortest, node j (or k) is marked as "visited". Once visited, the node will never be visited again since the shortest path has already been found. As a result, the minimum distances of all nodes presented in the graph are obtained. The Dijkstra algorithm always finds the optimal solutions, i.e. the shortest path found is actually the shortest existing path in a graph. It fulfills all requirements for a shortest path algorithm within the scope of escape route determination.

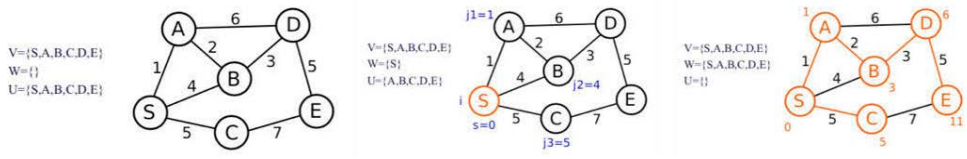


Figure 3: Process of Dijkstra-algorithm

3.2 Graph from Grid with Structured Nodes

To generate a graph from building floor plans, the nodes are distributed in an equidistant, rectangular grid over the floor plan. As edges, the direct paths between the nodes are searched, but only the connections to the direct "grid neighbors" are checked for collisions with other elements. Using the grid method, all points of a room are recorded and evaluated with the accuracy of the grid spacing. Regardless of some odd geometry, the point located farthest from a defined node is always found.

Nodes lying outside the floor plan or on a wall element can already be excluded before the edges are determined. This makes it possible to reduce the computing time, in particular if floor plans are not rectangular and many nodes are outside the floor plan. For this, both the wall elements and the floor plan must be present as a closed polygon.

Then check the nodes for direct connections between them. Only potential connections to each of the eight direct neighbors of a node are examined, as a complete investigation would entail a significantly higher computational effort. For the examination, a distance from the parent node to the neighboring node is generated and checked whether it is cut by a wall element of the floor plan. Otherwise, there is a direct path where the edge is generated. Since the size of the entire grid is known, the edge can also be weighted immediately in accordance with the distance between these two nodes. For horizontally or vertically adjacent nodes, the distance is indicated by α, to the diagonally adjacent nodes $\sqrt{2\alpha^2}$. If the route discontinues, there is no direct route and no edge generated or the value 0 is entered into the adjacency matrix (in the case of adjacency lists, no value is entered, which means that no edge exists). When all potential connections from all nodes have been examined, the adjacency matrix or adjacency list is completed, and the examination can be successfully executed. Based on this adjacency data, the shortest path from a given starting node to all other nodes can then be calculated by means of a suitable algorithm.

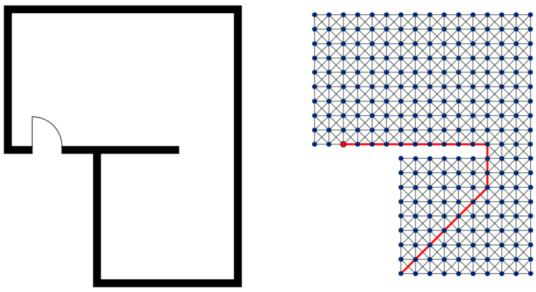


Figure 4: Calculating the shortest route by means of grid with structured nodes

The most highlighting advantage of creating the graph from grid with nodes is that it actually finds every location having the longest path to a defined output. The accuracy of these shortest paths depends on the selected grid spacing. The paths longer than 60 cm should not be chosen, otherwise paths through narrow door openings could not be found. Basically, disadvantages lie in the increased computational effort in the phase of grid establishment, since in this case a large number of nodes and edges must be examined. In addition, this

method provides approximate results, which result from the indirect route guidance. Through the grid, paths are only possible horizontally, vertically or at 45° angle. Depending on the geometry of the space, however, it may be more favorable to run between two more distant nodes at a different angle, which is not taken into account by this introduced method. For obtaining more accurate results from such complicated computing, the approach therefore still needs to be optimized.

4 Case Study

4.1 Crowd Simulation

In the first case study, the IFC model of a small two-floor house is utilized. From the 2D floor plans, the arrangements of two floors are settled differently. The IFC model is exported from BIM software. According to the requirement from schema and data format of the input files of commercial crowd simulation software *crowd:it*, all two-dimensional essential data related to floors with two floor files with walls, stairs and room from the IFC model are filtered out and recognized.

Due to the top level composited simply with roof slabs, an empty output for the roof is in data mapping neglected. Hence, as a result, the elements in other two levels are effectively exported and displayed in the graphic user interface of *crowd:it* without loss of information. Fig. 5 a) shows the original IFC model and its two floors. The two 2D floor plans parsed und visualized by crowd:it for further crowd simulation are demonstrated in Fig. 5 b)

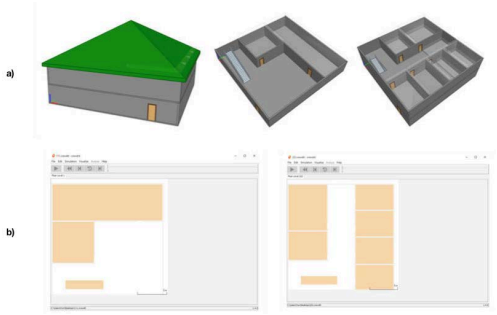


Figure 5: a) The IFC model of the building in case study for crowd simulation; b) Visualization of two floor plans in crowd:it

4.2 Escape Road Planning

The implemented example in this case study is a three-story office building having an "L-shaped" ground plan with the gross surface area of 646 m^2 per floor. The maximum dimensions in each of the two main directions are about 31.5 m. There are two necessary stairwells at the ends of the building, where there is access to each floor. The ground floor is designed with two more direct exits also considered as emergency exits of this story.

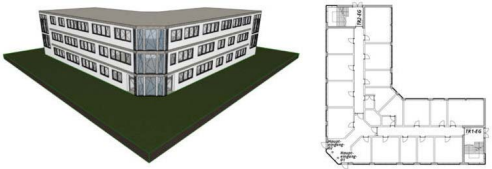


Figure 6: The IFC model of the building for escape road planning and the 2D plan of its ground plan

As part of the evaluation, the influence of the nodal distances on the computation time is evaluated on the basis of the example object. 0.90 m is chosen as the maximum distance, since a larger value would have led to the distance being greater than the door openings wide, so that certain rooms cannot be reached. At a distance of less than 0.3 m, the computer's main memory is used up and the calculations could not be performed well. Accordingly, the grid mode is limited to node distances between 0.3 m and 0.9 m. Under this condition, the calculation process receives benefice from an efficient processing duration caused by the chosen optimal nodal distance interval.

Fig. 7 shows the graphical output of the escape route determination with a grid node spacing of 0.42 m (left) and 0.45 m (right). It implies that the escape route at a node spacing of 0.45 m is similar to that at a distance of 0.50 m, while the escape route at a node spacing of 0.42 m the point farthest from the two staircases is located in a different room. If individual escape routes are considered to be the same emergency exits at different node distances, then the significant differences can be discovered. At a distance of 0.42 m, for example, the maximum escape route length is 20.02 m, while at the distance of 0.50 m it is only 17.33 m. With the consideration of lengths at all distances, the total maximum escape route length among distances is always around 20 m. It can be interpreted that the convergence tendency has appeared in the results, so that a finer node distribution with node distance less than 0.42 m is not necessary.

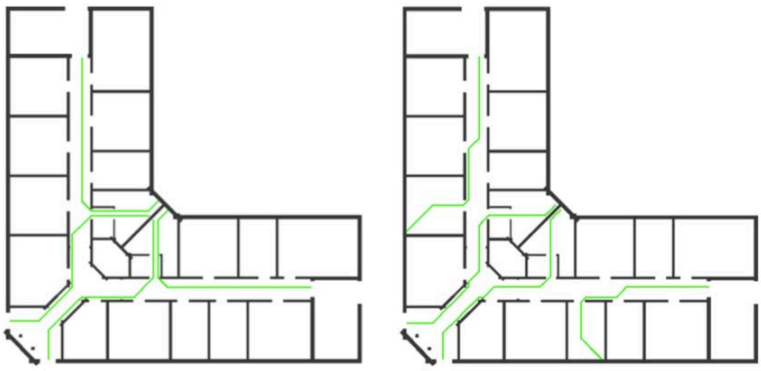


Figure 7: calculated escape roads (in green) on the ground floor based on the grid with node distance 0.42 m(left) and 0.45 m(right)

5 Conclusion

BIM models enrich the intension and extension of the concept 3D building models. Divers sorts of information can be achieved from one. The work in this paper digs the potential of 3D-to-2D data swapping. Hereby, the data structure referring to representation of building element geometry, location and properties in the IFC standard are analyzed. As an industry-oriented implementation, the automation of data exchange from an IFC model to an input file for crowd simulation software *crowd:it* has been accomplished. Based on the software readable input files generated from the given IFC model, the crowd simulation is feasible to be executed. This research also completes the exploration of data mapping from a BIM model to the bottom algorithms, where the extracted 2D information of the given building is utilized to support generating the grid models for escape road determination. Beside data exchange, the impacts of node density on computing duration and accuracy are discussed.

So far, the properties of building element filtered out from IFC models are not fully compatible in *crowd:it* yet. In addition, the developed algorithm for escape road determination works merely specific for the presented building model in case study, a more generic functionality deserves to be researched. The both above-mentioned shortcomings are supposed to be improved in the future work.

References

Biggs, N., Biggs, N., Norman, B. and Press, C. (1993), *Algebraic Graph Theory, Cambridge Mathematical Library*, Cambridge University Press.

Glunz, B., Pearson, W. and Munoz, A. (2017), 'Method and system for creating 3d models from 2d data for building infor-mation modeling (bim)'.

Lilis, G.N. amd Giannakis, G. and Rovas, D. (2017), 'Automatic generation of second-level space boundary topology from ifc geome-try inputs', *Autom. Constr. 76* p. 108–124.
URL: *https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.08.044*

Lin, Y.-C. (2014), 'Construction 3d bim-based knowledge management system: a case study', *J. Civ. Eng. Manag. 20* p. 186–200.
URL: *https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801887*

Russell, J. and Cohn, R. (2012), *Dijkstra's Algorithm*, Book on Demand.

Wang, Y., Wang, X., Wang, J., Yung, P. and Jun, G. (2013), 'Engagement of facilities management in design stage through bim: Framework and a case study'.

Won, J. and Lee, G. (2011), 'Algorithm for efficiently extracting ifc building elements from an ifc building model, in: Computing in civil engineering', American Society of Civil Engineers, Miami, Florida, United States.
URL: *https://doi.org/10.1061/41182(416)88*

The influence of design uncertainties in annual energy consumption

Marko Rumnici[1] and Jimmy Abualdenien[1]

[1]Chair for Computational Modelling and Simulation · Technische Universität München · Arcistrasse 21 · 80333 München · Germany ·

E-Mail: ge46nec@mytum.de · jimmy.abualdenien@tum.de

The aim of this research is to provide a conceptual framework to investigate the impact of uncertainties in evaluating the performance of a building early in the conceptual design phase. The research question addressed was how the annual energy consumption of a building was affected quantitatively by simple design configurations. A local sensitivity analysis was performed by changing three input parameters, WWR (window to wall ratio), R-value (thermal resistance) for mass exterior wall, U-value (thermal transmittance) for mass glazing, to identify which parameter has more impacts on building performance. Preliminary results indicated that whole building energy consumption is affected more by the WWR parameter. The paper is concluded with a case study of a real-world construction project that demonstrates the utility of sensitivity analysis for the decision-making process.

Keywords: Uncertainties, early design phase, conceptual mass, annual energy consumption

1 Introduction

The building sector is responsible for a large share of human environmental impacts. The relationship between energy, construction industry, and the environment has become more significant when the data show that the construction sector in Europe consumes relatively 40% of the total consumed energy.

Architects, designers, and planners are the key players for reducing the environmental impacts of buildings, as they define them to a large extent. The design phase, as the most critical step where important decisions are made, should be considered for achieving these goals by evaluating buildings from an environmental perspective.

In the earliest design phase, there are numerous uncertainties due to the lack of information on materials and processes. Designers, therefore, cannot quantify precisely the environmental impacts of buildings in their designs early on. For this reason, it is necessary to introduce a method which can evaluate the design uncertainties in the earliest phases and give accountable feedback on how the design aspects influence the whole building performance in terms of annual energy consumption.

Hopfe et al. described uncertainties in design parameters as design variations that occur during the planning process. They can be either caused due to a lack of knowledge of the designer or they arise due to changes or irregularities in the planning phase of the building. The consideration of design uncertainties could, therefore, improve and enable design decision support, in particular, if it would be augmented by sensitivity analysis (Hopfe, et al., 2007).

For our research study, a local sensitivity analysis (differential sensitivity analysis) is utilized and a general workflow (Figure 1) is proposed to evaluate the most influenced parameter in total energy consumption.

Figure 1: Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG office building, in Regensburg, Germany built in 2017

Figure 2 shows Ferdinand Tausendpfund GmbH & Co. KG office building that is used for our case study during this research. It has three stories and is 27m long, 14.7m wide, and 9.8m tall.

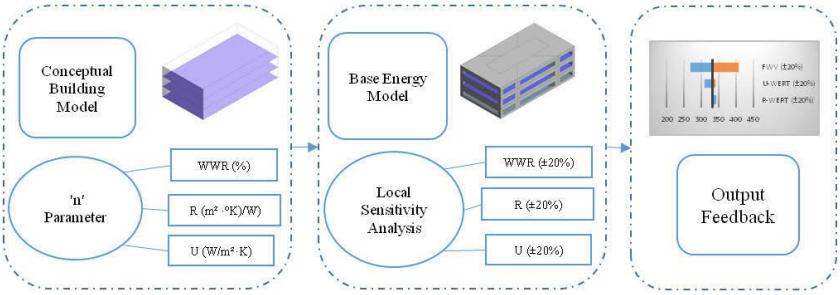


Figure 2: The general workflow for the analysis

This study considers the utilization of Autodesk Revit for building modelling purposes, the Green Building Studio energy simulation interface for developing the geometric model of the building and DOE2 as a simulation energy engine. In the earliest design phase (the conceptual massing elements "phase"), the energy analysis can be run on Green Building Studio in the cloud and provide analysis results directly within the tool (Kamel et al., 2019).

Based on the case study building, a parametric BIM model is modelled and for different input parameters, a range of $\pm$ 20% uncertainty is given. Then, energy simulation analysis is conducted to evaluate the relation between energy performance and key design parameters under consideration. In early design phases, energy simulation is useful for comparative analysis of multiple design schemes. Besides, energy simulation tools can facilitate a broader search of the design space by allowing the parametric analysis of a whole building or a single room, floor, or façade (Hygh et al., 2012).

2 Background and related work

Y.Ibraheem et al. presented in their research a set of 6 variables categorized in system and subsystem variable and a 'measure level' of each variable were also specified. Sub-system variables were clustered into sub-groups. Those are the depth of panels, d/l (d=depth of the PVSD and l=distance between the PVSDs), angle of inclination and glazing systems. Then, the trend of the mean electricity consumption was estimated (Ibraheem et al., 2018).

P. Heiselberg et al. considered a set of 21 design parameters and for each parameter, the range and distribution are defined. For some design parameters, the probability density function is given as a normal distribution defined by its mean value and the standard deviation. For other design parameters, a uniform distribution is defined by four discrete values. Then a sensitivity analysis was performed to identify the important design parameters to change to reduce the energy use in the reference building (Heiselberg et al., 2009).

S. Yang et al. presumed a set of 11 parameters where their ranges are considered based on the Chinese Design Standard for Energy Efficiency in public buildings (GB 50189). The GB 50189-2005 specified the requirements for these technical parameters in all climate zones of China. Then a comparison between different methods for sensitivity analysis is provided (Yang et al., 2016).

In the above research studies, the range and the distributions for each parameter are defined based on domain knowledge and numerous studies on the required information for energy performance simulation. Since these parameters taken into account obtain different ranges of variation of the building with their measurement units and values, it is laborious to identify with a precise quantification which input parameter influences the output performance. The vague determination of the parameter range accompanied by non-coherent different ranges of the parameter when they are compared with each other can cause evasive overview on how uncertainties influence in the output results.

3 Methodolgy

The proposed method in this research is the local sensitivity analysis which belongs to the class of the one-factor-at-a-time methods. This method (also called Differential Sensitivity Analysis) usually calculates the sensitivity of parameters when one input is changed and all others are fixed.

The DSA method requires a base case simulation in which input parameters are set for initial evaluation of the output performance. Then the simulation is repeated with one input parameter changed from P to $P \pm \delta P$ and the effect on the output parameters of interests is noted. This is done for each parameter, giving a total of N+1 simulations for analysing the effects of N uncertain parameters (Macdonald et al., 2001).

The output result (OP) can be expressed in general by the multivariable function f with n numbers of depending variables (input parameters):

$$OP = f(x_1, x_2, ..., x_n) \tag{1}$$

By using the chain rule of partial differentiation, its differential is given by:

$$df = \frac{\partial f}{\partial x_1} dx_1 + \frac{\partial f}{\partial x_2} dx_2 + ... + \frac{\partial f}{\partial x_n} dx_n \tag{2}$$

The gradient of the function for parameter x_1, can be expressed as:

$$\frac{df}{dx_1} = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \frac{\partial f}{\partial x_2}\frac{dx_2}{dx_1} + \frac{\partial f}{\partial x_3}\frac{dx_3}{dx_1} + ... + \frac{\partial f}{\partial x_n}\frac{dx_n}{dx_1} \tag{3}$$

We assume that input parameters are independent from each other and if x_1 is independent of $x_2, x_3, \ldots, x_n$, then:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{dx_3}{dx_1} = ... = \frac{dx_n}{dx_1} = 0 \tag{4}$$

$$\frac{df}{dx_1} = \frac{\partial f}{dx_1} \tag{5}$$

Equality of the above equation (5) holds as long as the difference from the base case value is not very large (Lam, et al., 1996).

The first step in sensitivity analysis is to determine the range and the probability distributions of the inputs. The ranges (or distributions) of inputs are mainly dependent on the research purposes for sensitivity analysis (Tian, 2013).

When a sensitivity analysis considers only the variation of the output performance in different design options caused by the uncertainties of the inputs, it is recommended to take the input variables as discrete or continuous uniform distributions. For our case study, a discrete uniform distribution is implemented for each of the input parameters (Figure 3). In the design phase, the variation of the inputs is equally likely to happen with the same probability in all their range and through this assumption, it is accurately introduced an evaluation of the influence of the inputs in various design options.

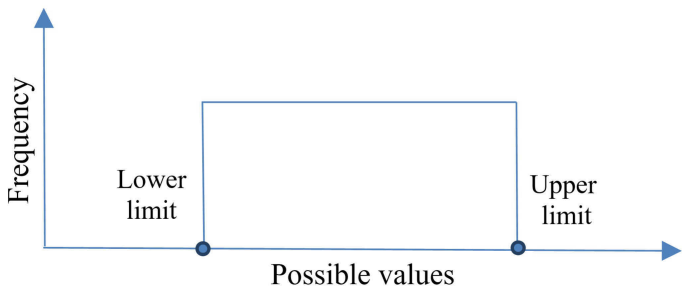


Figure 3: Modeling ranges with uniform distribution functions for each parameter

Then sensitivity analysis is used to decide whether a different value of the input is necessary compared to other measures. When a sensitivity analysis considers the evaluation of the output performance in an existing building or tries to perform a retrofit analysis based on different use of materials (inputs), it is recommended to presume normal distributions of the inputs. This is because natural variations of a building life cycle include the change in the conditions of buildings during their construction, operation and maintenance phase and their depreciation.

4 Case study

For the "conceptual mass" phase, where this research is focused on, a 3D-solid object (figure 4) is modelled in Revit based on the real case study mentioned above. It has three stories and is 27m long, 14.7m wide, and 9.8m tall (Figure 1).

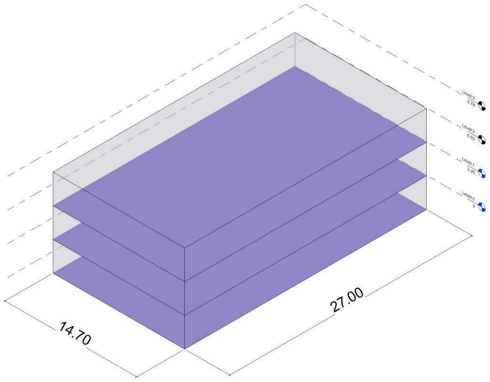


Figure 4: . Modeling ranges with uniform distribution functions for each parameter

This study takes into account three different input parameters a) WWR (%), b) R ($m^2 \cdot \circ K/W$), c) U(W/m˙K), where WWR represent window to wall ratio, R-value is the thermal resistance for mass exterior wall and U-value is a measure of thermal transmittance for mass glazing (Table 1).

Table 1: The 3 design parameters and associated sampling ranges used in the sensitivity analysis*

Input parameters	Base case	Range	
Window-Wall Ratio (%)	45	45 (-20%)	45 (+20%)
Exterior Walls (R-value-(m² • °K)/W)	1.91	1.91 (-20%)	1.91 (+20%)
Exterior Windows (U-value-W/m²•K)	3.17	3.17 (-20%)	3.17 (+20%)

*For discrete parameters, each number represents a codified name of building components in Revit (e.g. 1.91 means "High Mass Construction - Typical Mild Climate")

It is assumed a building operational schedule of 12 hours / 5 days and the "Central VAV, Electric Resistance Heat, Chiller 5.96 COP" type for the HVAC system. An initially base study with fixed parameters and then 2 other cases for each of three input parameters with a variation of ±20% is analyzed. For the base study and for each study where the parameters have the above-mentioned variation, a whole building energy simulation is conducted (Figure 5).

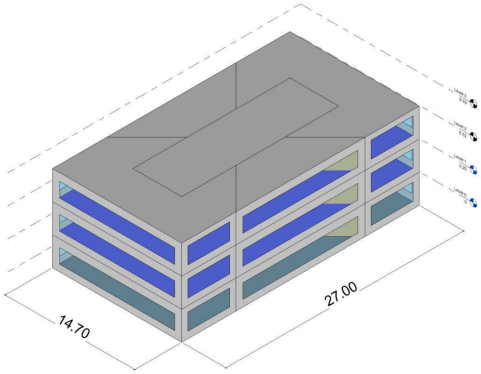


Figure 5: Energy model of the conceptual 3D-model

This analysis and the sensitivity measures are calculated when one factor is changed in its maximal variation (+20% and -20%) and the other factors are maintained fixed. This study analysis a set of 7 samples, 1 sample for the base case and 6 samples for the cases where the uncertainty of ±20% is given. (Figure 6) presents the variation from the base case of the annual energy consumption results based on the given uncertainty.

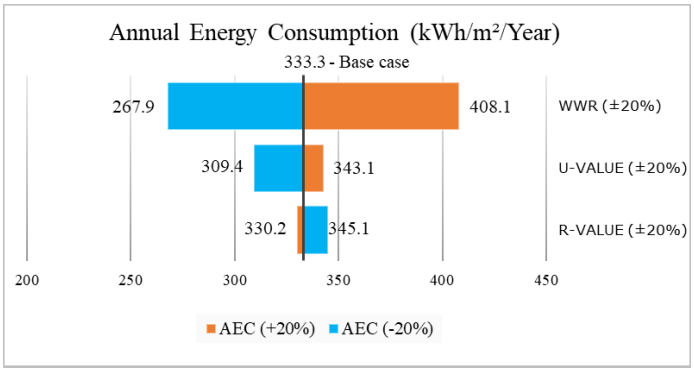


Figure 6: Comparison of the uncertainty in annual energy consumption results for three different parameters, a) WWR, b) Uvalue, c) Rvalue

As it is shown in (Figure 6), the vertical line presents the value of annual energy consumption for the base case, the orange part of the graph presents variation of the values when the uncertainty of (+20%) is given for each parameter and the light blue part of the graph refers the

variation of the values when an uncertainty of (-20%) is given. The total variation of energy consumption for the three parameters are $\Delta_{WWR} = 140.2 kWh/m^2$, $\Delta_{u_{val}} = 33.7 kWh/m^2$ and $\Delta_{R\text{- }val} = 14.9 kWh/m^2$. It is concluded that WWR parameter has the biggest influence in the output range compared with two other parameters.

5 Conclusions

This study has evaluated the influence of design uncertainties in the annual energy consumption of a three-story building early in the "conceptual mass" phase. The local sensitivity analysis is adaptable for this study regarding the limited design information that the designers might have in the first designing steps of a building. An overview of the impact that a $\pm 20\%$ uncertainty given to the input parameters have in energy consumption variation is presented and this result can help the designer when considering different design aspects and type of materials. This approach might lead to more precise energy calculation in the early design phases where the uncertainty given for WWR parameter results as the highest impact factor in energy consumption. The main limitation of the proposed method is that it does not support taking the interactions between the different parameters into account, but in further studies when a more detailed design is considered, it would be valuable to follow a general approach, such as global sensitivity analysis.

References

Heiselberg, P., Brohus, H., Hesselholt, A., Rasmussen, H., Seinre, E. and Thomas, S. (2009), 'Application of sensitivity analysis in design of sustainable buildings', *Renewable Energy* **34**(9), 2030–2036.

Hopfe, C., Hensen, J. and Plokker, W. (2007), Uncertainty and sensitivity analysis for detailed design support, *in* 'Proceedings of the 10th IBPSA building simulation conference', Tsinghua University, pp. 3–5.

Hygh, J. S., DeCarolis, J. F., Hill, D. B. and Ranjithan, S. R. (2012), 'Multivariate regression as an energy assessment tool in early building design', *Building and Environment* **57**, 165–175.

Ibraheem, Y., Piroozfar, P., Farr, E. R. and Ravenscroft, N. (2018), Sensitivity analysis of energy consumption of integrated façade systems: system and sub-system variables of a base case model for building energy simulation, *in* 'International Sustainable Ecological Engineering Design for Society (SEEDS) Conference 2018', pp. 441–454.

Kamel, E. and Memari, A. M. (2019), 'Review of bim's application in energy simulation: Tools, issues, and solutions', *Automation in Construction* **97**, 164–180.

Lam, J. C. and Hui, S. C. (1996), 'Sensitivity analysis of energy performance of office buildings', *Building and environment* **31**(1), 27–39.

Macdonald, I. and Strachan, P. (2001), 'Practical application of uncertainty analysis', *Energy and Buildings* **33**(3), 219–227.

Tian, W. (2013), 'A review of sensitivity analysis methods in building energy analysis', *Renewable and sustainable energy reviews* **20**, 411–419.

Yang, S., Tian, W., Cubi, E., Meng, Q., Liu, Y. and Wei, L. (2016), 'Comparison of sensitivity analysis methods in building energy assessment', *Procedia Engineering* **146**, 174–181.

Ein ontologisches Modell zur Repräsentation von Brücken

Taras Kozak[1] and Al-Hakam Hamdan[2]

[1]KREBS+KIEFER Ingenieure GmbH · Altmarkt 10a · 01067 Dresden · E-Mail:taras.kozak@protonmail.com

[2]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnbergerstr. 31a, 2. OG · 01062 Dresden · E-Mail:al-hakam.hamdan@tu-dresden.de

Die Erstellung von Repräsentationen eines Bauwerks beschränkt sich im Brückenbau derzeit noch auf semantikarme Modelle. Unter anderem ist dies auf die fehlende Software-Unterstützung eines offiziellen Building Information Modeling (BIM)-Standards für Brücken zurückzuführen. Eine Lösungsmöglichkeit hierfür wäre die Verwendung von Linked Data Technologien, die die Erstellung einer einheitlichen Datenrepräsentation sowohl in menschen-, als auch in maschinenlesbarer Form ermöglichen. Momentan beschränkt sich die Entwicklung von Linked Data Anwendungen im Bauwesen hauptsächlich auf den Hochbau und eine umfassende Struktur zur Repräsentation einer Brückenkonstruktion wurde noch nicht erarbeitet. In diesem Paper wird ein erstes Konzept zur Modellierung von Brücken unter Verwendung der W3C standardisierten Ontology Web Language (OWL) vorgestellt. Dabei liegt der Fokus auf einer semantischen Anreicherung von IFC-Brückenmodellen unter Verwendung einer OWL-Ontologie die mittels Multimodell-Ansatz verlinkt wird. Hierbei werden terminologische Komponenten (TBox) für Brücken in Spannbeton- und Verbundbauweise erstellt. Zu Testzwecken werden ebenfalls assertionale Komponenten (ABox) basierend auf der TBox erstellt sowie mit einem IFC-Modell verlinkt. Es wurden Abfragen unter Verwendung der standardisierten SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) definiert und auf die Ontologie angewendet um diese auf Konsistenz und Anwendbarkeit zu überprüfen.

Keywords: BIM, Brücke, Ontologie, IFC, OWL

1 Einleitung

Eines der gängigsten Datenaustauschformate im Bereich des Building Information Modeling (BIM) sind die standardisierten Industry Foundation Classes (IFC) (1). Ein erster Entwurf einer IFC-Erweiterung für den Brückenbau wurde bereits veröffentlicht (IFC-Bridge 4.2)[1]. Eine Unterstützung der neuen Erweiterung durch BIM-Software ist allerdings noch nicht erfolgt. Aus diesem Grund werden derzeit weiterhin IFC-Modelle von Brückenbauwerken ohne semantischen Hintergrund erstellt, z.B. über eine Repräsentation mittels benutzerdefinierten Proxy-Entitäten. Dies erschwert die computergestützte Verarbeitung der Brückeninformationen. Zudem wurde das IFC-Format hauptsächlich für den Datenaustausch konzipiert und weniger für eine Verarbeitung von domänenspezifischem Wissen. Da bei der Erstellung des STEP-Standards nur ein schwacher mathematischer Logikhintergrund berücksichtigt wurde, beschränkt dies dementsprechend die Verarbeitung der semantischen Informationen im IFC-Datenmodell (2).

Durch die Entwicklung der Semantic Web Technologien kommen wissensbasierte Anwendungen auch in der Baubranche zum Einsatz. Sie können eine effizientere Datenverarbeitung

[1]https://buildingsmart.sharefile.com/share/view/s619ceb7623d4b099/fod4202e-f039-49d7-8e4e-cddabe6efd3c

gewährleisten, indem die Informationen in maschineninterpretierbarer Form dargestellt werden. Dies ermöglicht mittels logikbasierter Inferenzmechanismen die Gewinnung neuen impliziten Wissens. Hierbei ermöglicht die Verwendung der Linked Data Prinzipien es, Daten aus mehreren Domänen untereinander zu verknüpfen und dabei zusätzlich von semantischen Abfragen unter Verwendung der standardisierten SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) zu profitieren. Da die Baubranche eine starke Datenheterogenität aufweist, könnte ein derartiges Prinzip von Nutzen sein.

Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung einer Ontologie für Brückenbauwerke gewesen. Dabei liegt der Fokus auf der semantischen Verarbeitung des Modells und unter welchen Bedingungen diese durchgeführt werden kann. Um die Ontologie auf ihre Praktikabilität zu überprüfen wurden außerdem SPARQL-Abfragen erstellt und auf ein prototypisches Modell angewendet.

1.1 Stand der Technik

Die Interoperabilität soll in der BIM-Methode mit Hilfe des IFC-Format gewährleistet werden. In der Bearbeitungszeit dieser Arbeit wurde hierbei für den Brückenbau eine Vorab-Version von IFC-Bridge IFC4.2 veröffentlicht. Zum jetzigen Zeitpunkt ist der BRIDGE-Teil in dem Schema IFC4.2 als Entwurf bereits integriert (3).
Eine erste Anwendung fand eine Entwurfsfassung von IFC-Bridge hierbei im Rahmen des SeeBridge Projekts (4). Dabei wurde eine Methode zur automatischen Verarbeitung von BIM-Modellen für bestehende Betonbrücken vorgeschlagen. Die BIM-Modelle enthalten geometrische Daten, sowie Informationen über ihre Bauteile und Schäden.
Entwicklungen im Bereich *Linked Data* fanden auch in der Baubranche statt, mit dem Ziel eine bessere Interoperabilität, sowie flexibleren Datenaustausch zu ermöglichen (6). Eine der ersten Anwendungen von Ontologien in BIM, war die Überführung des IFC-Schemas in die Web Ontology Language (OWL) von (5). Von (6) wurde ein Verbesserungsvorschlag zur ifcOWL-Ontologie mit einer semantischen Adaptation und der Verrringerung der Komplexität gebracht.

Dieser Vorschlag wird z.B. von der Building Topology Ontology (BOT) (7) realisiert, die Bauwerks-Topologie als Hauptkomponente eines ontologischen Gebäudemodells einsetzt und bei Bedarf erweitert werden kann. Ferner wurde eine Ontologie zur Verarbeitung der Instandhaltungsinformationen von Brücken von (8) entwickelt. Der Einsatz von Regeln mittels Semantic Web Rule Language hat hierbei eine erste automatische Bewertung von Schäden ermöglicht.

2 Terminologie der Brücken-Ontologie

Die terminologischen Komponenten (TBox) wurden modular konzipiert, wobei ähnlich wie bei BOT, eine Brückentopologie als Hauptontologie fungiert und mittels domänenspezifischer Erweiterungen ergänzt wird. Erweiterungen, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurden, fokussieren sich hierbei auf Brücken, die in Massivbauweise erstellt werden.

2.1 Klassen

Die BRIDGE-Ontologie definiert analog zu BOT ebenfalls zwei Hauptklassen: eine räumliche Zone und ein physikalisches Element. Brückenspezifische Unterklassen sind entweder ebenfalls in der Hauptontologie BRIDGE integriert oder werden über die Erweiterungen hinzugefügt, wie Unterbau, Überbau, Pylon, Widerlager usw., siehe Abbildung 1.

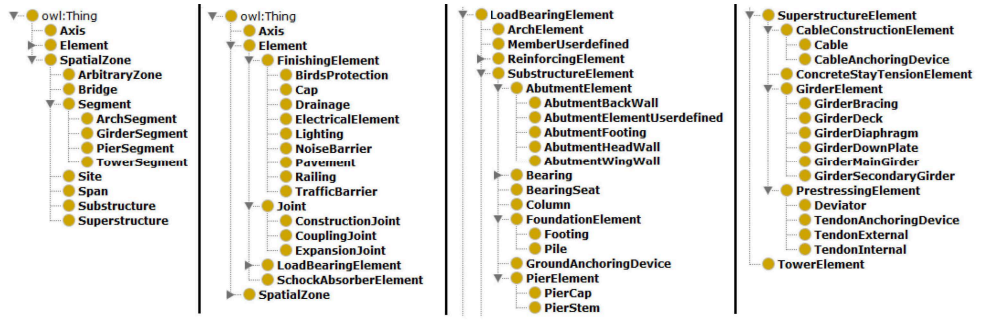


Abbildung 1: Klassen der BRIDGE–Ontologie

Die Klasse „Element“ enthält zwei Oberklassen: LoadBearingElement, FinishingElement und Joint. Die Klasse LoadBearingElement besteht aus Klassen SubstructureElement und SuperstructureElement.

2.2 Object Properties

Die ObjectProperties in der BRIDGE–Ontologie ermöglichen die Anordnung von räumlichen, sowie statischen Beziehungen zwischen Elementen. Die Erstellung von inversen ObjectProperties ermöglicht die Schlussfolgerung von Gegentripeln, wie z.B.: :Bridge :contains :Substructure –> :Substructure :containedIn :Bridge.

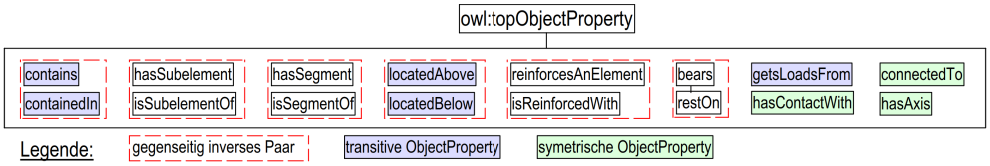


Abbildung 2: ObjectProperties in der BRIDGE–Ontologie

Diverse Konstruktoren im Rahmen der OWL DL Sprache ermöglichen die Erstellung von folgenden Konstruktionen in der Ontologie: (1) die Anordnung der Relationen A *bears* B; B *bears* C wird automatisch die Erstellung der folgenden Tripel auslösen: B, C *restOn* A; A *hasContactWith* B; B *hasContactWith* A, C; A *locatedBelow* B, C; B, C *locatedAbove* A; A *getsLoadsFrom* B, C. (2) Bei der Anordnung der Tripel A *contains* B, sowie B *contains* C, wird geschlussfolgert, dass C *containedIn* B; C *containedIn* A. (3) Die Anordnung der ObjectProperty A *reinforcesAnElement* B wird implizieren, dass das Element A ein Bewehrungselement sein kann. Die inverse ObjectProperty *isReinforcedWith* funktioniert gleich

umgekehrt. (4) Durch die asymmetrische Eigenschaften der ObjectProperty *reinforcesAnElement*, ist die Anordnung eines Tripels Stahlbeton-Stütze *reinforcesAnElement* Bewehrungsstab ausgeschlossen. (5) ObjectProperty Chain Axiom (9) ermöglicht die Erstellung neuer Tripel anhand bestehender. Z.B.: wenn ein Element A ein Unterelement vom Element B ist, wobei das Element B der Achse 1 gehört, wird es geschlussfolgert, dass das Element A der Achse 1 ebenfalls gehört.

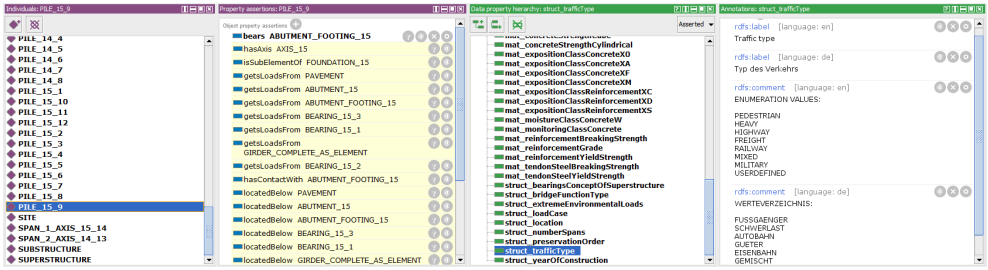


Abbildung 3: Screenshot der TBox und ABox aus Protégé Software

2.3 Data Properties

Weiterhin wurden zahlreiche DatatypeProperties in Anlehnung an DIN 1076 (10) erstellt. Z.B.: elem_yearOfInstallation (Einbaujahr des Bauteils); mat_concreteAdmixture (Betonzusatzstoffe); struct_preservationOrder (Denkmalschutz) usw. Dies ermöglicht die Anwendung dieser Methode bei der Brückenprüfung und -sanierung im Sinne einer Datenbank, sowie z.B. bei SIB-Bauwerke.

2.4 Erweiterung durch Regeln

Ergänzend wurden Regeln mittels SWRL-Sprache erstellt, die eine regelbasierte Anordnung der Tripel ermöglichen, die auf erstellte Individuen in der Brückenontologie angewendet werden, wie z.B.: Brücke enthält immer Unter- und Überbau; Unterbau enthält immer Wiederlager; Überbau enthält immer Brückendeck; wenn ein Element der Klasse ArchElement eingesetzt wird, wird die Brücke als Bogenbrücke klassifiziert.
Wenn die Instanz der Brücke ein entsprechendes Attribut mit dem Wert „salty_air“ besitzt, werden beispielsweise bei den Wiederlagern die entsprechende Mindestwerte der Expositionsklassen, Betondeckung, Betongüte, sowie Überwachungsklasse nach ZTV-ING vergeben:

$$\forall x.\forall y(Bridge(x) \wedge Abutment(y) \wedge contains(x, y) \wedge struct_location(x, salty_air)) \rightarrow mat_expClassXC(y, XC4) \wedge mat_expClassXF(y, XF2) \wedge mat_expClassXD(y, XD1) \wedge mat_moistureClassW(y, WA) \wedge elem_concreteCover(y, 40) \wedge mat_concreteCompressionStrengthClass(y, C35/45) \wedge mat_monitoringClassConcrete(y, 2)$$

3 Verlinkung der Brückenontologie mit BIM-Daten

Abgesehen von Data Properties für spezifische Schlussfolgerung-Prozesse, definiert die vorgestellte Web Ontologie keine Brückengeometrie. Zwar existieren Ansätze für Terminologien zur Repräsentation geometrischer Daten in OWL (12), diese können allerdings von aktueller Visualisierungssoftware momentan noch nicht verarbeitet werden. Im Vergleich zu geometrischen Datenformaten wie den Industry Foundation Classes (IFC) (1) die ebenfalls auch als standardisiertes BIM-Austauschformat etabliert sind, erfordert die Definition geometrischer Attribute eine größere Datenmenge die zu einer ineffizienteren Verarbeitung dieser führen kann. Um geometrische Anwendungen zu unterstützen und die Interoperabilität in einer BIM-orientierten Datenumgebung zu verbessern, wird die erarbeitete Ontologie unter Anwendung des Multimodell-Ansatzes (13) mit einem IFC-Modell verknüpft. In dieser Hinsicht fungiert das verwendete IFC-Modell als zentrales BIM-Modell an das noch weitere domänspezifische Ontologien oder Dokumente angehängt werden können. Über separate Linkmodelle, die in einem Multimodellcontainer integriert sind, werden die geometrischen Objekte im IFC-Modell (in diesem Fall Entitäten vom Typ IfcBuildingElementProxy) mit den entsprechenden Individuen der Ontologie verlinkt, siehe Abbildung 4. Das Multimodell wird hierbei als Information Container for Data Drop (ICDD) gemäß ISO/DIS 21597-1 serialisiert. Innerhalb des ICDD werden die Metadaten und Linkmodelle ebenfalls als Ontologien in OWL/RDF gespeichert, was einen Zugriff auf die verlinkten Daten über SPARQL ermöglicht.

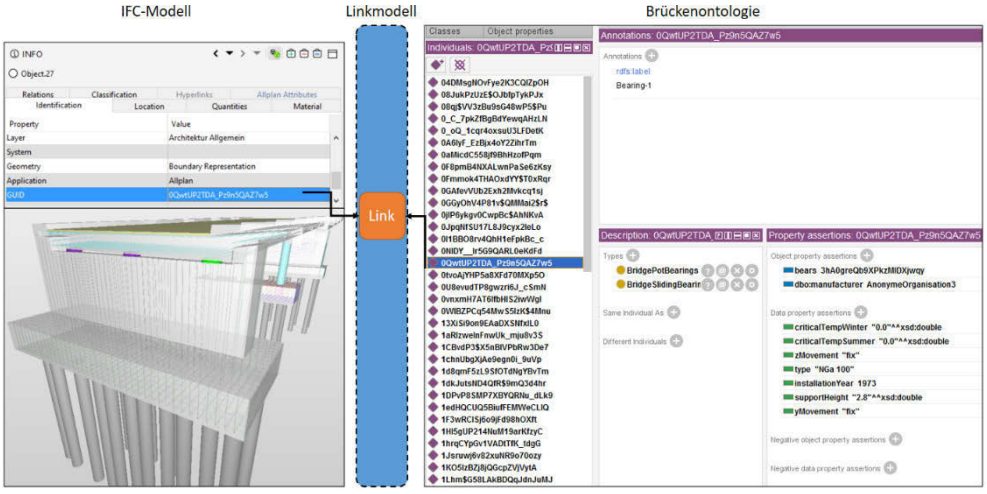


Abbildung 4: Verlinkung der Brückenontologie mit IFC-Modell über Linkmodell

4 Praktische Anwendung der Ontologie

Für die Validierung der Ontologie wurde die BRIDGE–Ontologie instanziiert. Die ABox wurde anhand eines IFC-Brückenmodells erstellt. Die Namen der Instanzen in der Ontologie

entsprechen den GUID-Nummern (11) aus IFC-Modell. Anschließend wurden diverse Beziehungen definiert, wie z.B.: Abutment_15 *hasAxis* Axis_15; Abutment_15 *contains* HeadWall_15; GirderDeck *restOn* Bearings_15_1.

Die Informationen aus dem Bauwerksbuch, sowie andere Informationen aus dem Modell wurde mit der Verwendung von DatatypeProperties bei entsprechenden Instanzen eingetragen.

Abschließend wurde die Ontologie mit Hilfe von SPARQL-Abfragen validiert. Im Folgenden werden einige Abfragen mit ihren Ergebnissen aufgeführt. Z.B.: das Ergebnis der folgenden Abfrage ist die Liste von Elementen, die eine Betondeckung über 30mm aufweisen. Dabei werden alle vorhandene DatatypeProperties bezüglich Expositionsklassen mit angezeigt, siehe Abbildung 5.

```
SELECT DISTINCT ?stbElement ?dataProp1 ?value1 ?dataProp2 ?value2
WHERE  OPTIONAL ?dataProp1 a owl:DatatypeProperty .
?stbElement ?dataProp1 ?value1.
UNION
OPTIONAL ?dataProp2 a owl:DatatypeProperty .
?stbElement ?dataProp2 ?value2 .
FILTER (?value2>30)
FILTER(REGEX(STR(?dataProp1), „exposition ")
|| REGEX(STR(?dataProp2), „concreteCover ") )
```

stbElement	dataProp1	value1	dataProp2	value2
ABUTMENT_HEADWALL_13	mat_expositionClassReinfor	"XC4"@		
ABUTMENT_15	mat_expositionClassReinfor	"XD1"^^<http://www.w3.o		
ABUTMENT_HEADWALL_13	mat_expositionClassReinfor	"XD1"^^<http://www.w3.o		
ABUTMENT_FOOTING_13	mat_expositionClassReinfor	"XD1"^^<http://www.w3.o		
ABUTMENT_13	mat_expositionClassReinfor	"XD1"^^<http://www.w3.o		
ABUTMENT_FOOTING_15	mat_expositionClassReinfor	"XD1"^^<http://www.w3.o		
ABUTMENT_FOOTING_13			elem_concreteCover	"35"^^<http://www.w3.org
ABUTMENT_15			elem_concreteCover	"35"^^<http://www.w3.org
ABUTMENT_HEADWALL_13			elem_concreteCover	"35"^^<http://www.w3.org

Abbildung 5: Ergebnisse der Abfrage

Auf der Abbildung 6 (links) sind die Abfrageergebnisse für die Anzeige von Bauteilen, die in der Achse 14 liegen (mit Schlussfolgerung).

Die Abbildung 6 (rechts) zeigt alle vorhandenen Lager in der Brücke mit der Zugehörigkeit zur ihrer Achse. Zusätzlich werden relevante DatatypeProperties dargestellt.

?x	?op	?axis
bridge:FOUNDATION_14	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:FOOTING_ELEMENT...	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_1	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_2	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:BEARING_14_1	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_4	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_5	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_7	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_8	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:PILE_14_3	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14
bridge:BEARING_14_2	bridge:hasAxis	bridge:AXIS_14

?axis	?bearings	?dataProperty	?value
bridge:AXIS_13	bridge:BEARING_13_2	bridge:elem_elementDescript...	NGe_200^^xsd:string
bridge:AXIS_13	bridge:BEARING_13_1	bridge:elem_bearingsDegree...	Z_FEST^^xsd:string
bridge:AXIS_13	bridge:BEARING_13_2	bridge:elem_bearingsDegree...	Z_Y_FEST bzw. Z_X_FEST^...
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_1	bridge:elem_yearOfInstallation	1973
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_2	bridge:elem_yearOfInstallation	1973
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_3	bridge:elem_yearOfInstallation	1973
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_2	bridge:elem_elementDescript...	NGa_150^^xsd:string
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_3	bridge:elem_elementDescript...	NGa_150^^xsd:string
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_1	bridge:elem_elementDescript...	NGa_200^^xsd:string
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_1	bridge:elem_bearingsDegree...	Z_FEST^^xsd:string
bridge:AXIS_14	bridge:BEARING_14_2	bridge:elem_bearingsDegree...	Z_FEST^^xsd:string

Abbildung 6: Beispielabfragen

5 Zusammenfassung und Ausblick

In Rahmen dieser Arbeit wurde eine Ontologie für Brückenbauwerke erarbeitet, die ein großes Spektrum an Konstruktionen, sowohl im Neubau, als auch im Bestand abdeckt. Die Data Properties in Anlehnung an DIN 1076 ermöglichen außerdem einen Einsatz der Ontologie bei der Brückenprüfung und -sanierung in Deutschland.
Aufgrund der hohen Komplexität der Bauteilgeometrie wurde auf eine Repräsentation dieser in der Ontologie verzichtet, da aktuelle Semantic Web Formate diese Daten im Vergleich zu gängigen Geometrieformaten ineffizient speichern. Mittels Multimodell-Ansatz konnte die Ontologie jedoch mit einem proxy-basierten Geometriemodell in IFC verlinkt werden, wodurch eine semantische Anreicherung von BIM-Modellen realisiert wird. Durch Verwendung des ICDD kann hierbei auch eine Abfrage der verlinkten Daten mittels SPARQL durchgeführt werden.
Die Ontologie besitzt eine generische Hauptkomponente, die mit domänenspezifischen Komponenten für Stahlbetonbrücken ergänzt werden kann. Gegenstand zukünftiger Forschung wäre, inwiefern auch andere Brückentypen durch Erweiterungen abgedeckt werden können. Einige Komponenten für die Tragwerksplanung müssen auch hinsichtlich ihrer Praktikabilität in numerischen Simulationen getestet werden. Hierfür wäre jedoch eine Schnittstelle zu gängiger Statik-Software vonnöten.
In der Zukunft wäre das Ontologie-Matching zwischen BRIDGE und BOT zu entwickeln, um auch eine Kompatibilität mit anderen gängigen Web Ontologien im Bauwesen zu gewährleisten.

Diese Forschungsarbeit wurde mit der Unterstützung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung durch die Förderung des Projektes wiSIB (Projektnummer 01|S16031C) ermöglicht.

Literatur

[1] ISO 16739-1:2018. (2018). ISO 16739-1:2018 Preview Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema. International Organization for Standardization, 2018, 70303.

[2] Zhang, C.; Beetz, J.; de Vries B.: BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data, Semantic Web. 1-27. 10.3233/SW-180297, 2018.

[3] `https://standards.buildingsmart.org/IFC/DEV/IFC4_2/FINAL/HTML/`, siehe Change logs; zuletzt geprüft am 09.06.2019

[4] Sacks, R.; Kedar, A.; Borrmann, A.; Ma, L.; Singer, D.; Kattel, U.: SeeBridge Information Delivery Manual (IDM) for Next Generation Bridge Inspection, 33rd International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC, 2016.

[5] Pauwels, P.; Terkaj, W.: EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a re-

commendable and usable ifcOWL ontology. Automation in Construction, 63:100–133, 2016.

[6] Farias, M. T.; Roxin, A.; Nicolle, C.: A Rule Based System for Semantical Enrichment of Building Information Exchange. In CEUR Proceedings of RuleML (4th Doctoral Consortium), Volume 1211, pp. 2-9, 2014.

[7] Rasmussen, M; Hviid, C.; Karlshøj, J.: Web-based topology queries on a BIM model, DOI: 10.24928/JC3-2017/0153, 2017.

[8] Ren, G.; Ding, R.; Li, H.: Building an ontological knowledgebase for bridge maintenance. Advances in Engineering Software, 130:24-40, 2019.

[9] https://www.w3.org/TR/owl2-syntax/#Object_Property_Axioms, zuletzt geprüft am 09.06.2019.

[10] https://www.bmvi.de/SharedDocs/DE/Anlage/VerkehrUndMobilitaet/Strasse/dokumentation-bauwerkspruefung-nach-din-1076.pdf?__blob=publicationFile , zuletzt geprüft am 09.06.2019.

[11] http://www.buildingsmart-tech.org/implementation/get-started/ifc-guid, zuletzt geprüft am 09.06.2019.

[12] Pauwels, P.: Product and 3D geometry ontologies at action in construction industry: from manufacturer to demolition, 2018.

[13] Fuchs, S.; Scherer, R. J.: Multimodels — Instant nD-modeling using original data. Automation in Construction, 75, 22–32. https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.013, 2017.

Ansatz zur automatisierten Ableitung eines objektorientieren BIM-Modells in eine relationale Datenbank

Friedrich Eder, Thomas Euringer und Mathias Obergrießer

Fakultät Bauingenieurwesen · Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg
Galgenbergstraße 30 · 93053 Regensburg
E-Mail: { friedrich.eder | thomas.euringer | mathias.obergriesser } @oth-regensburg.de

Die Verfügbarkeit von Modelldaten die reich an geometrischen als auch semantischen Informationen sind, ist eine der Grundvoraussetzungen das enorme Potenzial der Digitalisierung gewinnbringend im Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken auszuschöpfen. Mittlerweile liegen auch im Bauwesen vom Laserscanning bis hin zu Protokollen von Maschinendaten vielschichtige und objektspezifische Daten vor, die sich hinsichtlich des *Building Information Modelling* effizient einsetzen lassen. Im Rahmen der hier vorgestellten Arbeit wird ein Ansatz beschrieben, wie über ein entsprechendes *Application Programming Interface* aus einem objektorientierten *BIM*-Modell eine relationale Datenbank für Volumen- und Strukturmodelle abgeleitet werden kann. Ziel ist es, über die relationale Datenbank geometrisch-topologische Daten für unterschiedliche Autoren-Software bereitzustellen. Die Arbeit soll die Vorzüge einer redundanzfreien Vorhaltung geometrisch-topologischer und semantischer Bauteilinformationen in einer relationalen Datenbank zeigen.

Keywords: BIM, SQLite, Autodesk Revit

1 Einführung

Die Arbeitsweise nach dem Prinzip des *Building Information Modelling* erfordert einen zunehmend hohen Informationsgehalt der zugrundeliegenden und erzeugten geometrischen und semantischen Bauwerksinformationen. So müssen alle modellierten Bauteile - sofern diese im Sinne des *BIM* genutzt werden sollen - zumindest über einen eindeutigen Kenner identifizierbar sein. Andernfalls lassen sich über den Inhalt des Bauwerkmodells keinerlei eindeutige Aussagen treffen.
Selbstverständlich ist ein Primärschlüssel allein für die entsprechenden fachspezifischen Abfragen nicht ausreichend. Der Informationsgehalt eines *BIM-Objekts* muss also in Abhängigkeit der Anforderungen der Fachmodelle zunehmen.
Schnell wird klar, dass besonders bei großen Bauvorhaben und/oder sehr komplexen Bauwerken (mit einer hohen Zahl an Projektbeteiligten und Fachplanern) nicht nur hohe Anforderungen an die entsprechenden Planer, sondern auch an die Datenbasis und -verwaltung selbst gestellt wird.

Die Standardisierung der *BIM*-Arbeitsweisen - durch Organisationen wie buildingSMART[1] - trägt viel dazu bei, die angesprochenen Herausforderungen zu lösen. Über die Einführung der *Industry Foundation Classes (IFC)* als einheitliche Beschreibung von digitalen Bauwerkselementen und der Definition von Austausch- und Fachmodellstandards über entsprechende *Information Delivery Manual (IDM)* und *Model View Definition (MVD)* wurden Grundlagen geschaffen, die die Zusammenarbeit im digitalen Kontext prägen.
Üblicherweise werden digitale Modelldaten über *IFC*-Bezeichner kategorisiert und mit einer entsprechenden *MVD* zwischen den Projektbeteiligten ausgetauscht. Hier wird das entsprechende Datenmodell innerhalb der Modellierungs- bzw. Berechnungssoftware durchlaufen, ausgelesen und in eine Datei geschrieben. Je nach Implementierung wird eine Datei im STEP[2] oder XML[3]-Dateiformat erstellt. Diese ermöglichen dann das sequentielle oder baumbasierte auslesen der enthaltenen Daten. Letzteres ist tendenziell schneller, benötigt aber wesentlich mehr Systemressourcen, da der Dateiinhalt und die zugehörige Baumstruktur im Arbeitsspeicher gehalten werden muss (Harold et al., 2004).
Im Vergleich zu den angesprochenen Austauschformaten könnte ein relationales Datenbankmanagementsystem umgesetzt als *SQLite*-Datenbank sowohl in Puncto Portabilität als auch Performance Vorzüge aufweisen.
Die Nutzung von DBMS für die Verwaltung von Bauwerksdaten im BIM-Kontext wurde bereits von vielen Autoren betrachtet. In (Maatuk et al., 2016) und (Solihin et al., 2016) wird beschrieben, dass sich eine direkte Transformation der Relationen des EXPRESS-Schema einer IFC-Datei als sehr komplex und wenig performant darstellt. Somit wird eine direkte Transformation von IFC Datensätzen in ein RDBMS nicht weiterverfolgt.
Für Anwendungsfälle bei denen es besonders um die Weitergabe von sehr komplexen geometrischen Informationen geht, könnte es allerdings durchaus sinnvoll sein eine relationale Datenbank im *SQLite*-Format zu nutzen. Um diese Technologien gewinnbringend einsetzen zu können, ist zum einen die entsprechende Datenbasis in Form von Modelldaten und zum Anderen die Möglichkeit des Exports in eine relationale Datenbank nötig, letzteres wird im Folgenden beschrieben.

2 Datenquelle

Zur Umsetzung des gewählten Ansatzes wird die Software *Autodesk Revit* eingesetzt. Hierbei handelt es sich um ein Modellierungssystem das geometrische Objekte mittels einer objektorientierten Datenbank (*Autodesk.Revit.DB*) verwaltet. Der Zugriff auf diese Datenbank wird über ein *Application Programming Interface (API)* ermöglicht. Im Sinne der *Revit API* stehen auf oberster Ebene Folgende „Objekte“ zur Verfügung:

- Applikation → Dokumente, Optionen, globale Programmeinstellungen
- Dokument → Modelldaten, User-Interface, Benutzerauswahl

[1] https://www.buildingsmart.org
[2] *Standard for the Exchange of Product model data* - ISO-10303-21
[3] *Extensible Markup Language* - World Wide Web Consortium https://www.w3.org

Alle Modell-relevanten Informationen geometrischer und semantischer Natur werden innerhalb eines *Revit-Dokument* gehalten. Die Basisklasse aller im *Revit-Dokument* enthaltenen Modelldaten bildet die Klasse **Element** (Autodesk, 2018). In einem ersten Schritt sollen die

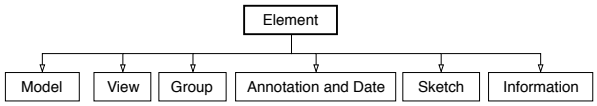


Abbildung 1: Vererbungshierarchie der Klasse **Element** (Autodesk, 2018)

geometrischen Informationen des digitalen Bauwerkmodells in die Datenbank überführt werden, daher wird im Folgenden die Datenhaltung der Struktur- und Volumenmodelle erläutert. Für die Darstellung geometrischer Daten sind (innerhalb der *Revit API*) sogenannte *Model*-Elemente zuständig. Diese stellen den Pointer auf eine *GeometryObject*-Instanz zur Verfügung. Ein *GeometryObject* kann ein Vielzahl an ebenen und räumlichen geometrischen Figuren repräsentieren. Im Objektorientierten Datenmodell von *Autodesk Revit* werden Geometrieelemente wie *Faces* und *Edges* innerhalb eines zugehörigen *Solid* gehalten und sind wie in einer typischen geometrisch-topologischen Datenstruktur analog einer *Radial Edge* (J. Weiler, 1986) organisiert.

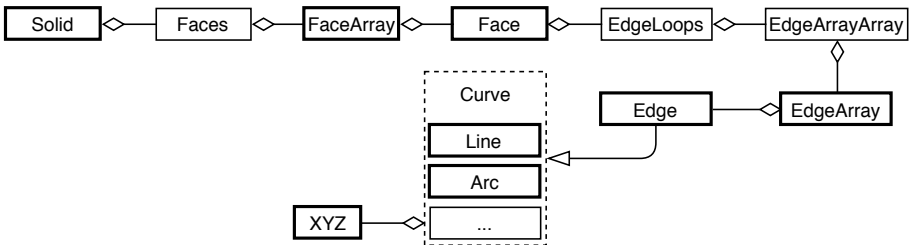


Abbildung 2: Topologische/Geometrische Repräsentation eines **Solid** Objekts (Autodesk, 2018)

Für die Transformation in die relationale Datenbank wird das in Abbildung 2 gezeigte Objekt-Modell durchlaufen. Jedes (hier dick-umrandete) Objekt wird ferner einer Tabelle (Relation) der Datenbank zugeordnet (siehe Abschnitt 4). Die gekapselte hierarchische Objektstruktur wird somit aufgelöst und es entsteht eine - über zugehörige *Foreign-Keys* - indizierte, relationale Datenstruktur. Die Informationen zur Beschreibung der Geometrie des Volumenkörpers ergibt sich also schließlich über Punkte (*XYZ*) die die Kanten beschreiben.

3 Entwicklung der Schnittstelle

Auf Basis der dargestellten Zusammenhänge wird eine Extension für *Autodesk Revit* entwickelt, die in Form einer Dynamic-Link-Library in die Applikation eingebunden wird. Im Folgenden werden die Überlegungen und entwickelten Programmstrukturen erläutert.

3.1 Aufbau

Über die *Autodesk Revit API* wird ein Interface für das Ausführen von externen Befehlen zur Verfügung gestellt. Eine Klasse die das in Abbildung 3 gezeigte *IExternalCommand*-Interface erweitert, hat zur Laufzeit Zugriff auf Applikation und Dokument im Sinne der *Revit API*. Die Klasse *Extension* repräsentiert die *Revit*-Extension selbst. Sie verwaltet neben der Verbindung zur Hostanwendung, das Auslesen der Modelldaten (über eine Instanz der Klasse *ElementDataManager*), als auch den Datenbankexport über den *DatabaseManager* (siehe Abbildung 3). Die Klasse *ElementDataManager* erzeugt zur Laufzeit Modelldaten-

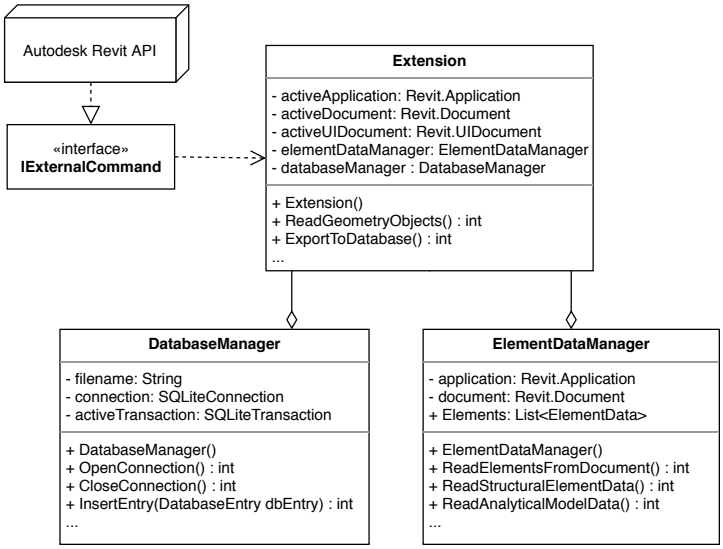


Abbildung 3: Struktur der *Revit*-Extension

Container-Objekte (*ElementData*) die in einer Pointer-Liste (*Elements*) gehalten werden. Die entsprechenden Daten des aktiven *Revit* Dokuments werden über Lese-Methoden (*Read...*) beschaffen und in ferner spezialisierten, von *ElementData* abgeleiteten Objekten gehalten.
Der Zugriff auf die *SQLite*-Datenbank wird über die Klasse *DatabaseManager* verwaltet. Sie stellt Methoden für das Verbinden, Befüllen und Auslesen zur Verfügung.

3.2 Datenhaltung

Wie oben angesprochen, erfolgt die Datenhaltung über Erweiterungen (siehe Abbildung 4) der abstrakten Basisklasse *ElementData*. Durch das Prinzip der Polymorphie und der dynami-

schen Bindung der Objekte zur Laufzeit ist diese Art der Datenhaltung möglich. Es wird - mit Bezugnahme auf die Erweiterung des Datenmodells - die „Mindestinformationsdichte“ der Klassen vorgeschrieben um einen automatisierten Datenexport für einen beliebigen Detaillierungsgrad der Modelldaten zu ermöglichen. Innerhalb dieser Basisklasse wird eine Instanz

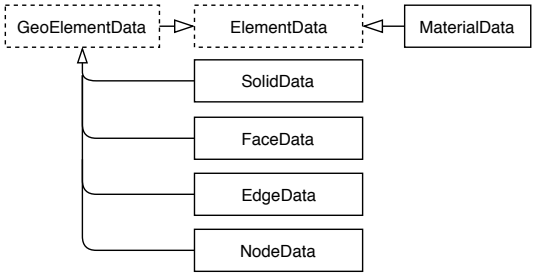


Abbildung 4: Vererbungshierarchie der Klasse *ElementData*

des zugehörigen Datenbankeintrag (*DatabaseEntry*) erzeugt. Dieser enthält einen Tabellennamen der zugehörigen Datenbank und eine Liste mit Einträgen vom Typ *SQLiteParameter* über die der *SQLite*-Query aufgebaut wird (siehe Abbildung 5). Über die Verwendung einer dynamischen Liste von Einträgen (Parameter), kann im Datenbankeintrag eine beliebige Anzahl von Parametern gehalten werden. Die neuralgischen Informationen für den Daten-

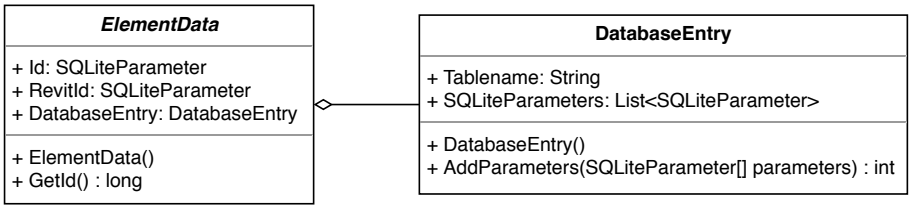


Abbildung 5: Klasse *ElementData* und *DatabaseEntry*

bankexport liegen im *DatabaseEntry*, welcher bereits in der abstrakten Basisklasse vorliegt. Somit ist sichergestellt, dass bei der Erweiterung des Datenmodells der Element-Daten keine Anpassungen in der Datenbankschnittstelle erforderlich ist. Einzig die *SQLiteParameter* einer neuen - von *ElementData* abgeleiteten - Klasse sind entsprechend zu implementieren und an den *DatabaseEntry* anzuhängen.

4 Entity-Relationship-Modell der Datenbank

Die Relationen der Datensätze sind in Abbildung 6 gezeigt. Hervorzuheben ist, dass die Verknüpfung zwischen *Solid*, *Face* und *Edge* über eine zugehörige Relation (*FaceList* bzw. *EgdeList*) deren Datensätze einen Listenkenner als auch die ID der entsprechenden Geometriedatensätze enthält. Wie in Abschnitt 2 gezeigt wurde, ergibt sich die Struktur implizit aus dem verschachtelten Objektmodell. Dieses wird mit besonderem Blick auf die Vermeidung

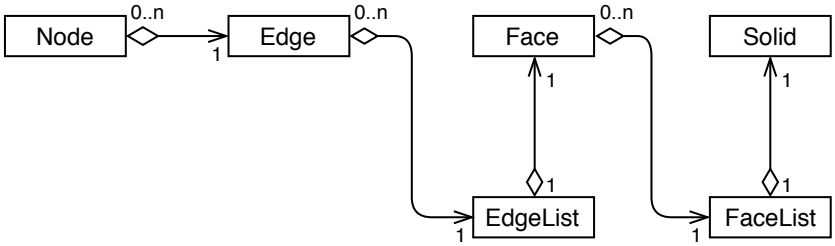


Abbildung 6: Relationen des Volumenmodells in der Datenbank

von redundanten Informationen in die Datenbank übertragen.
Die Tabellen befinden sich damit in der fünften Normalform bzw. der *Projection-join normal form* (Fagin, 1979), denn erst über entsprechende „Joins“mit den Tabellen der ein- und zweidimensionalen Objekte (*Node* → *Edge* → *Face*) wird die Geometrie des dreidimensionalen Volumenkörpers (*Solid*) beschrieben.

5 Ausblick und Anwendungsgrenzen

Auf Basis der entwickelten Schnittstelle ist es möglich die objektorientierte Datenhaltung in *Autodesk Revit* in eine relationale Datenbank zu überführen. Im aktuellen Entwicklungsstand liegt ein System vor, welches einfache geometrische Körper wie Quader und Zylinder abbilden kann. Die Erweiterung der in der Datenbank enthaltenen geometrischen und topologischen Informationen wird fortgesetzt und ist über das gezeigte generische Datenmodell der Extension ermöglicht.
Der angestrebte Einsatz der Datenbank für die Verwaltung zusätzlicher semantischer Bauwerksinformationen wird zunächst nicht weiter verfolgt. Die stark normalisierte Datenbankstruktur ermöglicht zwar eine nahezu redundanzfreie Speicherung der entsprechenden Daten, allerdings können diese *nur* über ressourcenintensive JOIN-Befehle in einen verwertbaren Kontext gebracht werden.
Somit eignet sich das aufgezeigte Datenbankschema besser zur Vorhaltung von Ergebnissen aus Vernetzungs-Algorithmen. Hier ergeben sich je nach Aufgabenstellung komplexe Strukturen und großen Punktmengen, eine redundanzfreie Datenhaltung ist hier also wünschenswert. Zudem gehört das Meshing zu den aufwendigsten und empfindlichsten Aufgaben im Bereich der FE-Analyse. Die Möglichkeit diese Ergebnisse in einem *offenen* Format vorzuhalten ist hier auch im Kontext des *Building Information Modelling* von Interesse. Hierzu werden in Zukunft weitere Untersuchungen und Entwicklungen angestrebt.

Literatur

Autodesk (2018), 'Revit API Developers Guide'. Zugriff: 2019-05-22.
URL: *http://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ENU/?guid=Revit_API_Revit_API_Developers_Guide_html*

Fagin, R. (1979), Normal forms and relational database operators, *in* 'Proceedings of the 1979 ACM SIGMOD International Conference on Management of Data', SIGMOD '79, ACM, New York, NY, USA, pp. 153–160.
URL: *http://doi.acm.org/10.1145/582095.582120*

Harold, E. R., Means, W. S. and Udemadu, K. (2004), *XML in a Nutshell*, Vol. 3, O'reilly Sebastopol, CA.

J. Weiler, K. (1986), 'Topological structures for geometric modeling'.

Maatuk, A. M., Ali, M. A., Moftah, R. A. and Elkobaisi, M. R. (2016), 'Performance evaluation of an rdb and an ordb: A comparative study using the bucky benchmark', *2016 International Conference on Engineering and MIS (ICEMIS)* pp. 1–7.

Solihin, W., Eastman, C. and Dong Hoon Yan, Y. C. L. (2016), 'A simplified relational database schema for transformation of bim data into a query-efficient and spatially enabled database'.

Verteilte Herstellerdatendienste zur Bereitstellung von Produktdaten im Web

André Hoffmann, Tim-Jonathan Huyeng, Meiling Shi, and Anna Wagner

Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt · E-Mail:hoffmann@iib.tu-darmstadt.de

Digitale Planungsmethoden verändern die Bedürfnisse der Baubeteiligten. Es sollte so einfach wie möglich sein, Produktdaten verschiedener Hersteller zu vergleichen und in das Planungsmodell zu integrieren. Web-Technologien bieten nicht nur ein großes Potenzial, bestehende Arbeitsweisen zu verbessern, sondern eröffnen auch neue Geschäftsmodelle für Produkthersteller im Service- und IoT-Bereich. Die Hersteller haben jedoch ein berechtigtes Interesse daran, die Kontrolle über die Offenlegung ihrer Produktdaten zu behalten. Daher sind die Daten oft nur offline und on demand verfügbar. Von technischem Interesse sind daher Lösungen, bei denen ein großer Teil der Datenautonomie und Zugangskontrolle auf der Seite des Herstellers verbleibt, es Projektplanern aber erlaubt, die Produktdaten aller Hersteller wie ein zusammengehöriges System zu durchsuchen. In diesem Beitrag wird ein Ansatz diskutiert, Produktdaten ohne zentrale Plattform im Web zu verteilen und die Produktdaten auf der Seite des Herstellers zu belassen. Die Grundidee ist ein Netzwerk von Herstellerdatendiensten. Jeder der Datendienste stellt Produktbeschreibungen mit Informationen in einem ontologiebasierten Datenmodell zur Verfügung, die aus der Design- und Produktionsphase stammen und somit in der Verantwortung des Herstellers liegen. Die Herstellerdatendienste tauschen Nachrichten aus, um Anfragen wie ein zusammengehöriges System zu beantworten. Um diese Transparenz zu gewährleisten, müssen Anfragen an einen Datendienst an alle anderen für die Anfragen relevanten Datendienste weitergeleitet werden. Dies muss auf horizontaler und vertikaler Ebene realisiert werden. Das Paper setzt sich mit den technischen Anforderungen eines solchen Systems auseinander und zeigt Lösungsansätze auf.

Keywords: Datenintegration, Verteilte Systeme

1 Einführung

Informationssilos sind eine Quelle von Ineffizienzen (Pala et al., 2016, S.897). Sie führen dazu, dass bestehende Lösungen für Probleme nicht gefunden und genutzt werden. Insbesondere in der Beziehung zwischen Hersteller und Kunde sind beide Seiten betroffen. Einerseits kann der Kunde anhand der bereitgestellten Informationen nicht erkennen, ob ein beworbenes Produkt für einen Kauf besser geeignet ist als ein vergleichbares Produkt. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass keine oder eine unzureichende Lösung gefunden wird. Der Hersteller andererseits verliert einen potenziellen Käufer. In der Bauindustrie ist die Demontage von Datensilos der Beteiligten eine wichtige Aufgabe. Derzeit tauschen Lieferanten und Fachingenieure verschiedener Disziplinen Geometrien in Form von mit semantischen Informationen angereicherten 3D-Modellen aus (Pala et al., 2016, S.900). Die Qualität der Datenübertragung hängt jedoch vom Importmodul der proprietären Software des Fachingenieurs ab. Die Software-Interoperabilität steht oft im Gegensatz zum Interesse des Softwareentwicklers, der proprietäre Formate unterstützt, die, wenn überhaupt, nur eine Weiterverarbeitung der Daten mit Softwareanwendungen aus seinem eigenen Produktkatalog zulassen. Eine Lösung für den offenen und effizienten Austausch von Gebäudedaten ist der Industry Foundation Classes Standard

(IFC). Die IFC wird von rund 150 Softwareanwendungen weltweit unterstützt, um bessere Arbeitsabläufe für die AEC-Industrie zu ermöglichen[1]. Darüber hinaus werden Ontologien in zahlreichen Publikationen untersucht, um Datenmodelle aus verschiedenen Ingenieurbereichen zu integrieren Pauwels et al. (2017). Die Flexibilität und Einfachheit der Darstellung in Form von Tripeln ermöglicht es, auch komplexe Zusammenhänge in menschlicher und maschinenverständlicher Weise zu modellieren. Daher stellt diese Technologie zumindest eine Teillösung für das Interoperabilitätsproblem dar. Ein weiteres Problem ist das Fehlen eines standardisierten Verbreitungsprozesses der BIM-Objekte. Hersteller verlassen sich oft auf Insellösungen auf ihren eigenen Websites oder bevorzugen den Weg des direkten Vertriebs. Zentralisierte Websites mangelt es offenbar an Herstellerakzeptanz, was die Anzahl der zur Verfügung gestellten Produkte einschränkt. Auf bimobject.com, laut Webauftritt der "Worlds Leading BIM Content Platform", sind jedoch Produktfamilien von ca. 1352 Marken zugänglich [2]. In diesem Beitrag wird ein Ansatz diskutiert, Produktdaten ohne zentrale Plattform im Web zu verteilen und die persistenten Produktdaten auf der Seite des Herstellers zu belassen. Jeder Hersteller hostet seinen eigenen Produktdatendienst, der über den Nachrichtenaustausch mit anderen Produktdatendiensten verbunden ist und Anfragen an alle anderen Dienstinstanzen weiterleitet. Anfragen an das Gesamtsystem können an jeden der Herstellerdienste gerichtet werden, um die Unabhängigkeit von einer zentralen Instanz zu gewährleisten. Das globale Datenmodell basiert auf einer Produktontologie und dient dem Vergleich und der Verknüpfung von Produktdaten. Dezentralisierung und die Gestaltungsfreiheit bei der Umsetzung von Herstellerdatendiensten sollten die Akzeptanz der Hersteller erhöhen. Eine auf das Wesentliche reduzierte Produktontologie, die bei Bedarf mit domänenspezifischen Ontologien verknüpft werden kann, soll die Dursuch- und Vergleichbarkeit gewährleisten.

2 Verwandte Themen und wissenschaftlicher Hintergrund

Es wurden bereits Plattformen vorgeschlagen, um den Austausch von Produkt- und anderen Projektdaten zwischen Lieferanten und anderen am Bauprozess beteiligten Parteien zu erleichtern. *Vortalway* ist als zentrale Cloud-Lösung konzipiert, in die bei Bedarf weitere Dienste integriert werden können (Grilo and Jardim-Goncalves, 2013). Ihr Fokus lag vor allem auf der Abbildung des Ausschreibungsprozesses, um eine Dienstleistung oder ein Produkt anzubieten oder anzufordern. Auch hier wurden auf konzeptioneller Ebene Ontologien zur Lösung des Interoperabilitätsproblems verwendet (He et al., 2018, S.18). Die Vernetzung der Hersteller, um einen Service von gemeinsamem Nutzen anzubieten, ist eine Forschungsidee, die bereits Tradition hat. Unter einem *Virtual Enterprise* versteht man eine „temporary alliance of enterprises that come together to share skills or core competencies and resources in order to better respond to business opportunities, and whose cooperation is supported by computer networks“(Camarinha-Matos and Afsarmanesh, 1999). Unter diesem Thema wurde die *OSMOS-API* in der Bauindustrie vorgeschlagen. Die *OSMOS-API* verfolgte einen projektbezogenen Ansatz der Zusammenarbeit und stützte sich ebenfalls auf eine zentralisierte Plattform (Wilson et al., 2001). Darüber hinaus wurden in der Literatur Konzepte zur Beschreibung verteilter Semantic Web Architekturen analysiert (Vdovjak et al., 2006). Die hierarchische Mediatorarchitektur kommt dem dieser Arbeit zugrunde liegenden Ansatz am nächsten (Vdovjak et al., 2006, S.44-51).

[1] `http://www.buildingsmart-tech.org/`,(accessed: 01.04.2019)
[2] `https://www.bimobject.com/en`, (accessed: 01.04.2019)

3 Konzept

Die Grundidee des in diesem Beitrag vorgestellten Ansatzes ist ein Netzwerk von Herstellerdatendiensten. Jeder der Datendienste stellt Produktbeschreibungen mit Informationen zur Verfügung, die aus der Design- und Produktionsphase stammen und somit in der Verantwortung des Herstellers liegen. Jeder Datendienst kann in die Service-Infrastruktur eines Herstellers integriert werden, beispielsweise über ein API-Gateway, das Anfragen orchestriert und an den Datendienst weiterleitet. Der Datendienst verfügt über zwei Schnittstellen: eine Netzwerk- und eine Abfrageschnittstelle. Die Netzwerk-API wird für die Kommunikation mit anderen Herstellerdatendiensten verwendet, während die Abfrage-API es Benutzern und Drittsystemen ermöglicht, Abfragen an das gesamte Netzwerk der Herstellerdatendienste zu senden. Die Herstellerdatendienste tauschen Nachrichten aus, um Anfragen wie ein zusammengehöriges System zu beantworten. Daher sollten die gleichen Vergleichs- und Durchsuchungsmöglichkeiten wie bei zentralen Plattformen bereitgestellt werden. Im Zusammenhang mit verteilten Datenbanksystemen wird diese Eigenschaft als Netzwerktransparenz bezeichnet (Özsu and Valduriez, 2011, S.9). Die Benutzer und Anwendungen, die das Netzwerk abfragen, sollten sich nicht mit der internen Architektur und dem genauen Standort der Produktdaten befassen müssen. Um diese Transparenz zu gewährleisten, müssen Anfragen an einen Datendienst an alle anderen für die Anfragen relevanten Datendienste weitergeleitet werden. Dies muss auf horizontaler und vertikaler Ebene realisiert werden. Für die Abfrageverteilung auf horizontaler Ebene müssen alle Datendienste, die den gewünschten Produkttyp enthalten, abgefragt und die Ergebnisse der Query an den Benutzer weitergegeben werden. Andererseits müssen auch Teile der betroffenen Abfragen vertikal weitergegeben werden: Bauprodukte bestehen aus Materialien und Teilen von Lieferanten und sind daher als Assemblies zu betrachten. Lieferanten können selbst Datendienste betreiben, in denen sie Informationen über ihre Produkte bereitstellen. Ergo können sich Anfragen zu bestimmten Produkten auch auf Daten beziehen, die in den Datendiensten der Lieferanten gespeichert sind. Damit jeder Datendienst weiß, welche Datendienste an welchen Adressen zu finden sind und welche Art von Informationen sie enthalten, muss ein Datenkatalog existieren, der diese Informationen zu jedem Datendienst speichert und bei Änderungen synchronisiert werden muss. Der Datendienst kann in die eigene Infrastruktur des Herstellers integriert werden, um zusätzliche Dienste anzubieten. So können die Daten je nach Anwendungsfall durch unternehmenseigene Webservices vorverarbeitet werden. Wird z.B. ein bestimmtes Format benötigt, sendet der für die Verarbeitung zuständige Webservice die Anforderung an eine Schnittstelle des Gesamtsystems.

4 Datenmodell

Um die Kommunikation von verteilten und möglicherweise nicht einheitlich gestalteten Systemen zu ermöglichen, sind maschinenverständliche Datenschemata erforderlich. Dies gilt auch für die in diesem Beitrag vorgestellte plattformübergreifende Produktsuche. Daher ist es erforderlich, dass Produktdaten mit Hilfe der Building Product Ontology[3] beschrieben werden (Wagner and Rüppel, 2019). Die *BPO* bietet Konzepte zur Beschreibung der Grundstruktur von Produkten, während zusätzliche Informationen - wie die geometrische Beschreibung oder Klassifizierung von Komponenten, Produkten und Eigenschaften - durch andere verknüpfte Ontologien umgesetzt werden. Für

[3] `https://w3id.org/bpo`,(accessed: 31.05.2019)

Hersteller ist die Eigenschaft von *BPO*, dass Produkte in ihrer Zusammensetzung in Form von Komponenten und Assembly-Verbindungen beschrieben werden können, besonders interessant. Insbesondere letzteres ermöglicht es den Herstellern, bereits bestehende Beschreibungen von Komponenten, die Teil ihrer Produkte sind, wiederzuverwenden. So kann beispielsweise ein Hersteller direkt auf die Beschreibung einer Schraube oder auch anderer komplexer Komponenten wie Türgriffe oder Fensterrahmen durch den Lieferanten verweisen, anstatt sie anhand von Informationen, die er von seinen Lieferanten erhält, neu zu designen. Die Verknüpfung erfolgt über die Eigenschaft des Semantic Web, dass alle Objekte durch einen Unified Resource Identifier (URI) identifiziert werden und darüber hinaus auch von außerhalb des Originalgraphen auf die Objekte entweder direkt oder durch Abfragen in der Datenbank des Graphen zugegriffen werden kann. In der *BPO* wird das dafür relevante Assembly mit dem Prädikat *bpo:consistsOf* implementiert, das ein Assembly mit einer beliebigen (auch externen) Komponente verbindet und impliziert, dass die Komponente Teil des Produkts ist. Ein exemplarisches Diagramm zur Visualisierung einer solchen Verbindung ist in Abbildung 1 dargestellt.

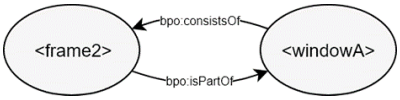


Abbildung 1: Beispielhafte Beziehung zwischen Produkten und Komponenten

5 Datendienst: Komponenten und Prozesse

Ein Datendienst besteht aus zwei funktionalen Komponenten. Eine Komponente ist der so genannte *Query Federator*, der die angeforderten Produktdatentypen im Datenkatalog sucht, um zu prüfen, welche Datendienste für die Beantwortung der Abfrage in Erwägung gezogen werden. Der *Query Federator* leitet Benutzeranfragen auch an die im vorherigen Schritt identifizierten Datendienste weiter und gibt das zusammengefasste Ergebnis an den Benutzer zurück. Die zweite Komponente ist der *Query Responder*, der Anfragen von anderen Instanzen überprüft, um festzustellen, ob Daten von Lieferanten zur Beantwortung der Anfragen benötigt werden, und den Teil der Anfrage an alle Instanzen verteilt, die zur vollständigen Beschreibung des jeweiligen Produkts benötigt werden. Die an die APIs gerichteten Abfragen sind in der Abfragesprache SPARQL formuliert. Alternativ kann auch ein Format verwendet werden, das in eine SPARQL-Abfrage umgewandelt wird.

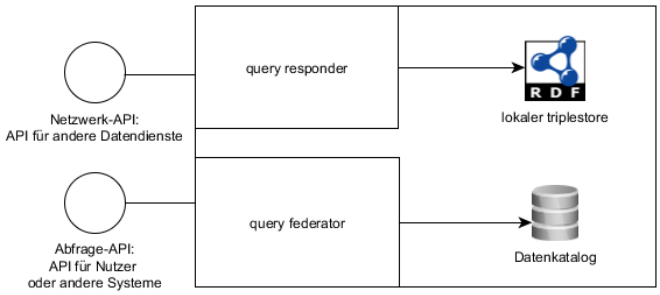


Abbildung 2: Aufbau eines Produktdatendienstes

5.1 Datenkatalog und Synchronisation

Der Datenkatalog wird in jedem Datendienst lokal gespeichert. Er enthält Adressen aller Datendienste und die Produktdatentypen (gemäß buildingSMART Data Dictionary (bSDD)), die darauf abgelegt sind. Diese Metadaten können verwendet werden, um Datendienste zu identifizieren und abzurufen, die für eine Abfrage relevant sind. Wird dem Gesamtsystem ein neuer Datendienst hinzugefügt oder werden die in einem Datendienst bereitgestellten Produktdatentypen geändert, muss ein Synchronisationsprozess gestartet werden. Ein solcher Prozess könnte entweder traditionell durch das Versenden entsprechender Nachrichten oder - falls zusätzliche Sicherheit erforderlich sein sollte -, um den Datenkatalog vor Manipulation zu schützen und zu garantieren, dass dieser bei jedem Hersteller gleich ist - durch die Implementierung der Datenkatalogsynchronisation mit einer Blockchain. Im Wesentlichen ist eine Blockchain eine Kette von chronologischen Blöcken, die von den Knoten eines öffentlichen oder für bestimmte Teilnehmer freigegebenen verteilten Netzwerks unterhalten wird. Durch sein Design ist es gut geeignet für Systeme, die Integrität, Transparenz und Unveränderlichkeit erfordern.

5.2 Vertikale Verteilung von Anfragen

Im Folgenden wird der Algorithmus zur Bearbeitung von Anfragen beschrieben, die Informationen über Komponenten aus dem Datendienst des Lieferanten benötigen. Beispielsweise können sich Abfragen von Produkten auf bestimmte Eigenschaften beziehen, die Teil der Beschreibung einer Unterkomponente sein könnten, die vom Datendienst des Lieferanten bereitgestellt wird. Um die gesamte Anfrage zu adressieren, muss der Teil der Anfrage, der sich auf das Teilprodukt bezieht, identifiziert und entsprechend verarbeitet werden. Die Ergebnisse beider Abfragen können temporär zusammengeführt werden, um die ursprüngliche Abfrage zu beantworten. Die Trennung kann durch die Analogie von Datenmodell und Datendienststruktur realisiert werden. Produkte sind mit ihren Unterkomponenten mit dem Prädikat *bpo:consistsOf* verknüpft. Um Abfragen zu finden, die sich auf mehrere Datendienste beziehen, ist in einem ersten Schritt zu prüfen, ob die Abfrage mit den verfügbaren Daten des aktuellen Datendienstes vollständig beantwortet werden kann. Ist dies nicht der Fall, wird die Abfrage um die Tripel gekürzt, die das Objekt der letzten *bpo:consistsOf*-Beziehung als Subject verwenden, bis die Abfrage gelöst werden kann. Die Antwort der verkürzten Abfrage wird auf Referenzen auf andere Datendienste überprüft. Da Linked Data URIs als Identifikator für einzelne Objekte verwendet, wird der Ort der Beschreibung eines Objekts im Datenmodell gespeichert. Dadurch kann der Datendienst eines Produkts direkt aus dem Ergebnis einer Abfrage identifiziert werden. Die Tripel, die in der ursprünglichen Abfrage nicht gelöst werden konnten, können nun als Construct-Abfrage an die referenzierten Datendienste weitergegeben werden. SPARQL-Construct-Abfragen ermöglichen die Extraktion eines Teilgraphen, der der in der Abfrage angegebenen Vorlage in Form von Tripeln entspricht. Der resultierende Teilgraph dieser Construct-Abfrage kann mit den Triples zusammengeführt werden, die mit den lösbaren Triples des lokalen Triple-Stores übereinstimmen, wodurch ein Graph entsteht, der alle Informationen zur Beantwortung der ursprünglichen eingehenden Abfrage enthält. Der gesamte Prozess ist in Abbildung 3 dargestellt. Die Construct-Abfrage selbst wird vom Zuliefererdatendienst als eingehende Abfrage behandelt, bei der der gleiche Prozess wiederholt wird. Auf diese Weise werden solche Anfragen von allen betroffenen Datendiensten rekursiv beantwortet. Der Prozess muss immer dann stattfinden, wenn die Abfrage vom *Query Federator* eines anderen Datendienstes gespeist wird. Das dafür verantwortliche Modul heißt *Query Responder*.

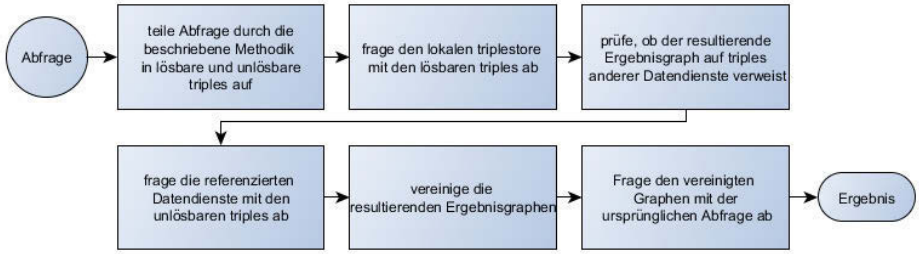


Abbildung 3: Algorithmus zur Auflösung von Anfragen an Zulieferer

5.3 Integration in die Infrastruktur des Herstellers

Der vorgestellte Dienst kann mit Hilfe einer Microservice-Architektur implementiert und auch in bestehende Systeme integriert werden. Microservices sind kleine Prozesse, die mit anderen Prozessen über HTTP oder eine REST-API kommunizieren (Dragoni et al., 2017). Mit Microservices kann eine große Anwendung in kleine Anwendungen zerlegt werden, die unabhängig voneinander kombiniert werden können. Diese kleineren Anwendungen können flexibel genutzt oder ersetzt und als Container organisiert werden. Insgesamt ist die Architektur von Mikroservices komplexer als die eines monolithischen Systems, aber die Skalierbarkeit und Flexibilität dieses Ansatzes überwiegen den Nachteil. Im Rahmen der vorgestellten Arbeiten ist Flexibilität von Vorteil, da die vorgestellte dezentrale Datenhaltung schrittweise in bestehende Herstellersysteme integriert werden sollte. Für die dezentrale Struktur ist eine klare Definition der Schnittstellen zwischen den einzelnen Diensten von Bedeutung. Die Kommunikation kann über HTTP-Requests oder andere Protokolle erfolgen und muss vor externen Angriffen geschützt werden.

Durch die Microservice-Architektur wird die Integration des Datenservices in bestehende Systeme sowie die Wartung und Nutzung für Unternehmen vereinfacht. Kleinere Unternehmen, die aufgrund ihrer internen Struktur nicht alle notwendigen Dienstleistungen erbringen können oder wollen, können auch andere Dienstleistungen nutzen und integrieren. Beispielsweise können Rechenleistungen an einen Spezialisten ausgelagert werden, der den spezifischen Dienst optimiert hat. Basierend auf Outsourcing-Prozessen kann ein neues Geschäftsfeld entstehen, da leistungsfähige Dienstleistungen anderer Hersteller genutzt und die Nutzung des Services verkauft werden kann. Allerdings muss die Datenverschlüsselung gewährleistet sein, um die Akzeptanz und das Vertrauen zwischen den einzelnen Interessengruppen zu erhöhen.

5.4 Authentifizierung

Eine wichtige Komponente zur Steigerung des Vertrauens von Herstellern und Anwendern in Mikrodienstleistungen ist die Authentifizierung von Partnern. Da das in diesem Beitrag vorgeschlagene Konzept die Daten dezentral speichert, ist es wichtig, eine eindeutige Identifizierung zu gewährleisten. Dazu wird ein Authentifizierungsdienst vorgeschlagen, der auf Wunsch der Hersteller an einen eigenen Microservice ausgelagert werden kann. Dies würde eine zentrale Registrierung ermöglichen und unerwünschte Mehrfachanmeldungen an den verschiedenen Diensten und Herstellerinstanzen verhindern. Es gibt mehrere Möglichkeiten der Authentifizierung: Neben einer Single-Sign-On-Implementierung ist es auch möglich, die Authentifizierung mit Client-Zertifikaten, API-Schlüsseln

oder einem öffentlichen und privaten Schlüsselpaar durchzuführen. Die Autorisierung kann mit diesem Dienst verbunden oder auch für jeden Datendienst durchgeführt werden. Hier konnten die einzelnen Hersteller den jeweiligen Anwendern Rechte zuweisen. Ein weiterer Vorteil der Nutzung von Microservices ist die Implementierungsfreiheit. Die freie Wahl von Programmiersprachen und Paketen erhöht das Potenzial, die Eigenentwicklungen der Hersteller voranzutreiben. Darüber hinaus können die unabhängigen Microservices einfacher und effizienter als Container eingesetzt werden. Dazu stehen aktuelle Technologien wie Docker zur Verfügung (Stubbs et al., 2015).

6 Fazit und Ausblick

Bisher wurden Teile der Funktionalitäten experimentell umgesetzt, um sich mit den Technologien vertraut zu machen und einen Überblick über die konzeptionellen Anforderungen an die Architektur des Systems zu erhalten. Als Ergebnis dieser Bemühungen wurde im vorliegenden Beitrag ein Konzept für ein verteiltes Netzwerk von Herstellerdienstleistungen vorgestellt, das es den Beteiligten ermöglicht, Produktdaten aller Hersteller wie ein zentrales System zu durchsuchen. Ein Vorteil dieser dezentralen Datenverwaltung ist die Nachbildung der natürlichen Verteilung und die so erreichte Datenautonomie der Hersteller. Bei Interesse können Hersteller Datendienste einrichten und in ihre eigene Infrastruktur integrieren. So kann das Gesamtsystem und die interne Datenbank eines Herstellers modular wachsen. Das gesamte Netzwerk ist über einen beliebigen Herstellerdatendienst erreichbar und alle Datendienste sind als gleichwertig anzusehen. Die hierarchische Abfrageverarbeitung ergibt sich aus dem Aufbau des Produktdatenmodells und fügt sich damit in die dezentrale Systemarchitektur ein. Zwei Quellen von Ineffizienzen in der hierarchischen Mediatorarchitektur sind zu nennen (Vdovjak et al., 2006, S.49-51), die auch für den vorgeschlagenen Ansatz gelten: Wenn beispielsweise ein Produkt eine Unterkomponente von mehr als einem Produkt ist, werden die Informationen der Unterkomponente mehrfach abgefragt. Auch wenn sich Teilkomponenten auf Produkte beziehen, die weiter oben in der Komponentenhierarchie liegen, können Ineffizienzen auftreten. Der Übergang zu einer kooperativen Mediatorarchitektur, die zusätzliche Kommunikationskanäle zwischen den Datenservices einführt, könnte hier Abhilfe schaffen. Die Architektur der Kommunikationskanäle könnte durch bestimmte Produktdatentypen auf den Datenservices und deren Einteilung in Funktionsbereichen begründet werden. Neben den Datenservices selbst sollen im Rahmen des Forschungsprojektes *SCOPE* weitere Microservices geschaffen werden. Diese Leistungen sind als Blaupausen für verschiedene Aufgaben im Bauwesen zu verstehen und umfassen beispielsweise Verarbeitungsroutinen für Daten aus dem *BPO*-Datenmodell ins Format der Planungssoftware.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „Semantic Construction Project Engineering“[4].

[4] `https://www.projekt-scope.de/`

Literatur

Camarinha-Matos, L. M. and Afsarmanesh, H. (1999), The virtual enterprise concept, *in* L. M. Camarinha-Matos and H. Afsarmanesh, eds, 'Infrastructures for Virtual Enterprises', Springer US, pp. 3–14.

Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lafuente, A. L., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R. and Safina, L. (2017), Microservices: Yesterday, Today, and Tomorrow, *in* M. Mazzara and B. Meyer, eds, 'Present and Ulterior Software Engineering', Springer International Publishing, Cham, pp. 195–216.
URL: *https://doi.org/10.1007/978-3-319-67425-4_12*

Grilo, A. and Jardim-Goncalves, R. (2013), 'Cloud-marketplaces: Distributed e-procurement for the AEC sector', **27**(2), 160 – 172.
URL: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1474034612000973*

He, D., Li, Z., Wu, C. and Ning, X. (2018), 'An e-commerce platform for industrialized construction procurement based on BIM and linked data', **10**(8), 2613.
URL: *http://www.mdpi.com/2071-1050/10/8/2613*

Pala, M., Edum-Fotwe, F., Ruikar, K., Peters, C. and Doughty, N. (2016), 'Implementing commercial information exchange: a construction supply chain case study', **34**(12), 898–918.
URL: *https://doi.org/10.1080/01446193.2016.1211718*

Pauwels, P., Zhang, S. and Lee, Y.-C. (2017), 'Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview', **73**, 145–165.
URL: *https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580516302928*

Stubbs, J., Moreira, W. and Dooley, R. (2015), Distributed Systems of Microservices Using Docker and Serfnode, *in* '2015 7th International Workshop on Science Gateways', pp. 34–39.

Vdovjak, R., Houben, G.-J., Stuckenschmidt, H. and Aerts, A. (2006), RDF and traditional query architectures, *in* S. Staab and H. Stuckenschmidt, eds, 'Semantic Web and Peer-to-Peer: Decentralized Management and Exchange of Knowledge and Information', Springer Berlin Heidelberg, pp. 41–58.
URL: *https://doi.org/10.1007/3-540-28347-1_3*

Wagner, A. and Rüppel, U. (2019), BPO: The Building Product Ontology for Assembled Products, *in* 'Proceedings of the 7th Linked Data in Architecture and Construction workshop (LDAC 2019)', Lisbon, Portugal, p. 12.

Wilson, I., Harvey, S., Vankeisbelck, R. and Kazi, A. S. (2001), 'Enabling the construction virtual enterprise: The osmos approach', **6**, 83–110.
URL: *http://www.itcon.org/2001/8*

Özsu, M. T. and Valduriez, P. (2011), *Principles of distributed database systems*, 3rd edn, Springer Science+Business Media. OCLC: ocn706920112.

Zusammenführung modularer Ontologien zur Beschreibung parametrischer, multifunktionaler Bauprodukte in einem Semantic Web Kontext

Anna Wagner[1], Christian Nothstein[2],
Tim Rist[3], André Hoffmann[1], Tim-Jonathan Huyeng[1], and Meiling Shi[1]

[1]Technische Universität Darmstadt· Franziska-Braun-Str. 7· 64287 Darmstadt ·
E-Mail:[wagner,hoffmann,huyeng,shi]@iib.tu-darmstadt.de
[2]Ed. Züblin AG · Albstadtweg 3 · 70567 Stuttgart · E-Mail:christian.nothstein@zueblin.de
[3]Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE)· Heidenhofstr. 2 · 79110 Freiburg ·
E-Mail:Tim.Rist@ise.fraunhofer.de

Die voranschreitende Digitalisierung im Bauwesen verdeutlicht Schwachstellen der digitalen Infrastruktur. Insbesondere der applikationsübergreifende Datenaustausch ist aufgrund heterogener Softwarelandschaften ein häufiger bemängelter Prozess, für den keine zufriedenstellende Lösung existiert. Um die Interoperabilitätsprobleme zu bewältigen, sind offene und applikationsunabhängige Datenformate notwendig, wobei die Anwendung von Semantic Web Technologien als Alternative zu herkömmlichen Ansätzen untersucht wird. In diesem Beitrag wird ein Konzept vorgestellt, um modulare, bereits existierende und eigens entwickelte Ontologien zu nutzen und kombinieren, sodass eine ganzheitliche Beschreibung der Produkte ermöglicht wird. Die verwendeten Ontologien befassen sich mit Geometriebeschreibungen basierend auf dem OpenCASCADE Geometriekernel (OCC Ontologie), der Verknüpfung geometrischer und nicht-geometrischer Inhalte (OMG / FOG Ontologie), der abstrakten Beschreibung von Bauprodukten (BPO Ontologie) und einer Taxonomie angelehnt an die Linked Data Version des buildingSMART Data Dictionary (bSDD-LD). Die modellierten Produkte werden zur Validierung visualisiert, durchsucht und semantisch vorverarbeitet. Durch die applikationsunabhängige Beschreibung von Produkten im Kontext des Semantic Web, ist eine unkomplizierte Verbreitung der Produktdaten über Verlinkungen im Web möglich. Somit ist ein Grundstein für intelligenten, web-basierten Datenaustausch im Bauwesen gelegt.

Keywords: Produktdaten, Semantic Web Technologien, Ontologien, Geometrie, Produktbeschreibung

1 Einleitung

Im Bauwesen ist die Kollaboration verschiedener Fachplaner von essentieller Bedeutung. Dennoch ist das Thema der Interoperabilität der heterogenen Softwarelandschaft ein Problempunkt, der durch die Digitalisierung verdeutlicht wird. Ein Lösungsansatz für solche Interoperabilitätsprobleme sind die Industry Foundation Classes (IFC), die einen standardisierten Datenaustausch versprechen (ISO 16739, 2018). Unter Berücksichtigung des Gebäudedaten- und Produktdatenlebenszyklus ist dieser Ansatz allerdings nicht umfassend und flexibel genug: Der Standard ist auf die Beschreibung vollständiger Gebäudemodelle zugeschnitten und bietet kaum Möglichkeiten digitale Modelle einzelner Produkte abzubilden. Zudem legen die IFC aufgrund ihrer starren Klassenstruktur ihrer Merkmal- und Typenbeschreibungen (Taxonomie) Anwendern Einschränkungen in der Definition multifunktionaler und neuartiger Komponenten auf. Als weitere Option zur applikationsübergreifenden Produktbeschreibung wurde die VDI 3805 entwickelt, die in eine internationale Norm überführt

wird (VDI 3805, 2011). Die Richtlinie stellt ein Datenschema zur Beschreibung von Produkten der Technischen Gebäudeausrüstung vor, das auf XML basiert. Entsprechend definiert die VDI 3805 ebenfalls strikte hierarchische Strukturen und Templates für Produktbeschreibungen.

Alternativ zu den IFC und der VDI 3805 werden Webtechnologien – insbesondere das Semantic Web – in ihrer Anwendung im Bauwesen untersucht (Pauwels et al., 2017). Von den Technologien wird erhofft, den Datenaustausch zu vereinfachen und die Durchsuchbarkeit der Daten zu verbessern. Speziell unter dem Aspekt (multi-funktionaler) Produkte bietet das Semantic Web und Linked Data durch ihre Unterstützung von gängigen Suchmaschinen Potentiale zur Verbreitung der Produktbeschreibungen und somit Marktvorteile. Zudem kann infolge der Flexibilität der Datenschemata im Semantic Web (Ontologien) auf strikte Produktdefinitionen mit Vorgaben der auszufüllenden Eigenschaften verzichtet werden, wodurch innovative und multi-funktionale Produkte ohne aufwändige Erweiterung rigider Klassenstrukturen beschrieben werden können.

1.1 Multi-funktionale Bauprodukte

Unter multi-funktionalen Bauprodukten verstehen sich Produkte, die mehrere herkömmliche und bekannte Produktkategorien in sich kombinieren und Eigenschaften aller Kategorien besitzen. Multifunktionale Bauprodukte sind zumeist neuartig und verwenden innovative Technologien, weswegen geeignete Templates zur Beschreibung fehlen. Lediglich durch aufwändige Erweiterungen herkömmlicher Datenschemata wird eine vollständige Beschreibung erreicht, wobei dies zu Missverständnissen und Informationsverlusten führt, sofern die Daten nicht maschinenverständlich hinterlegt sind.

Entsprechend gelten für die digitale Beschreibung dieser Produkte besondere Anforderungen. Zentrale Anforderung ist die Flexibilität der Beschreibung. So muss ein Produkt mehreren Produktkategorien entsprechen können und jede der Eigenschaften einer zugehörigen Produktkategorie besitzen dürfen. Weiterhin muss die Beschreibung domänenübergreifend erfolgen, da eine Vielzahl an Funktionalitäten ebenfalls für eine Vielzahl an Gewerken relevant sind. Hieraus folgt zudem die Anforderung, Produkte effektiv durchsuchen zu können, um der Informationsflut einer derart umfassenden Beschreibung entgegenzuwirken. Zusätzlich gelten Anforderungen der allgemeinen Produktbeschreibung, namentlich die Verbindung zwischen geometrischen und nicht-geometrischen Beschreibungen und Eigenschaften sowie eine internationale – und damit multi-linguale – Anwendbarkeit.

Im Rahmen dieses Beitrags werden drei Produkte beispielhaft vorgestellt und beschrieben: ein Building Integrated Photovoltaik Modul (BIPV Modul), das als Teil der Fassade elektrische Energie erzeugen kann, ein außenliegender Sonnenschutz (Raffstore) sowie ein komplexes Fensterelement.

1.2 Semantic Web Technologien

Semantic Web Technologien und ihre Datenmodelle (Ontologien) strukturieren ihre beschriebenen Informationen maschinenlesbar und, sofern das zugehörige Schema ebenfalls vorliegt, *maschinenverständlich*. Sie nutzen Web Technologien, wie *Unique Resource Identifiers* (URIs) und deren Spezifikation *Unique Resource Locators* (URLs), um Objekte zu identifizieren. Dies ermöglicht es, Informationen unterschiedlicher Quellen und von verteilten Orten über Verlinkungen zu verbinden, statt die Inhalte kopieren zu müssen. Aufgrund der Eigenschaft, mehrere domänenübergreifende Ontologien kombinieren zu können, ist empfohlen Ontologien modular und mit für den konkreten Anwendungsfall möglichst eng gefassten Fokus zu formulieren (Hyland et al., 2014). Bei Einhaltung dieser

Empfehlung können die Ontologien auch in bei der Entwicklung nicht betrachteten Anwendungsfällen wiederverwendet werden ohne Missverständnisse oder ungewollte Schlussfolgerungen im Datenschema zu verursachen. Diese Empfehlung geht mit einer weiteren einher Hyland et al. (2014), Ontologien nach Möglichkeit wiederzuverwenden bzw. anzupassen statt neue Ontologien zu definieren.

1.3 Gliederung

In diesem Beitrag werden zunächst relevante Ontologien für die Produktbeschreibung vorgestellt (Abschnitt 2), gefolgt von der Präsentation des Gesamtkonzepts für die Produktbeschreibung in Abschnitt 3. Die Implementation des Konzeptes wird anschließend innerhalb des Abschnitt 4 demonstriert, bevor der Bericht mit einer Diskussion und einem Ausblick beendet wird (Abschnitt 5).

2 Relevante Ontologien

Für Produktdaten gibt es relevante Ontologien, die das Ziel haben, eine allgemeingültige Datenstruktur für Produkte aller Domänen einzuführen. Zu diesen Ontologien zählen *GoodRelations* (Hepp, 2008) und *Schema.org*[1], wobei Schema.org die Konzepte von GoodRelations beinhaltet. Da Konzepte dieser Ontologien generischer Natur sind, ist zudem eine Ontologie für die Beschreibung der konkreten Zusammensetzung eines Produktes – inklusive Verbindungen von in einem Produkt verbauten Komponenten – notwendig. Zu dieser Anforderung wurden drei geeignete Ontologien ermittelt: 1) die *Light Upper Product Ontology* (LUPO) und *Feature-based PROduct Ontology* (FPRO), die gemeinsam verwendet werden können, um Produkte mit ihrem Aufbau und ihrer Geometrie zu beschreiben (Sanfilippo, 2018); 2) die *SolConPro Ontology*, die ein abstraktes Gerüst zur Beschreibung von Produktzusammensetzungen und Verbindungen zur Verfügung stellt (Wagner et al., 2018); und 3) die *Building Product Ontology* (BPO), eine Überarbeitung der SolConPro Ontologie, die Konzepte verbreiteter upper-level Ontologien (u.a. Schema.org) aufgreift (Wagner and Rüppel, 2019).

Bei der Untersuchung zur Beschreibung der geometrischen Eigenschaften eines Produktes mithilfe von Semantic Web Technologien wurden zwei Schwierigkeiten identifiziert: Einerseits wurde ein Mangel an Ontologie-basierten Geometriebeschreibungen, die auf einem offenen Geometrie-Kernel (wie bspw. OpenCASCADE) basieren, festgestellt und andererseits eine inkonsequente Herangehensweise zur Verlinkung von geometrischen und nicht-geometrischen Inhalten beobachtet. Um diese Hindernisse wurden die *Ontology for OpenCASCADE*[2] (OCC) für Geometriebeschreibungen und die *Ontology for Managing Geometry* (OMG) (Wagner et al., 2019) mit ihrer Erweiterung *File Ontology for Geometry formats* (FOG) (Bonduel et al., 2019) zur Verlinkung erstellt.

Abschließend wurden Ontologien untersucht, die der (mutli-lingualen) Begriffsdefinition im Bauwesen dienen. Betrachtete Ontologien sind die *ifcOWL* (Pauwels and Terkaj, 2016) und andere, die auf Definitionen der IFC basieren[3], BauDataWeb (Radinger et al., 2013), Wikidata[4] und der *buildingSMART Data Dictionary*[5] (bSDD). Der bSDD liegt aktuell als reines Lexikon vor, wird

[1] `https://schema.org/`
[2] `https://www.projekt-scope.de/ontologies/occ/`
[3] `https://github.com/openBIMstandards/BIMbots-PSD-Repository`
[4] `https://www.wikidata.org/wiki/Wikidata:Main_Page`
[5] `http://bsdd.buildingsmart.org/`

allerdings zurzeit mit dem Ziel eine Linked Data Version des Lexikons zu erhalten überarbeitet. Da ein solcher bSDD-LD voraussichtlich starke Überschneidungen mit IFC-basierten Ontologien besitzen wird und durch die Schirmherrschaft von buildingSMART International eine weitreichende Verbreitung verspricht, wird diese Ontologie für die Produktbeschreibungen genauer betrachtet.

3 Konzept der Zusammenstellung

Das Konzept für die Zusammenstellung der Ontologien für die Beschreibung multi-funktionaler Bauprodukte besteht aus drei Ebenen für unterschiedliche Funktionalitäten: Begriffsdefinition, Produktaufbau und -struktur mit Produkteigenschaften und Geometriebeschreibung (siehe Abbildung 1). Die Ebenen werden über Relationen zwischen den Objekten der Ebenen verbunden, wobei die Ebene der Produktstruktur die Mittelschicht und somit das Gerüst der gesamten Beschreibung ergibt.

Aufgrund ihrer Fähigkeiten und Anbindung an upper-level Ontologien dient die BPO als zentrales Element (grüne Ebene, mitte, Strichpunktlinie). Zur Verbindung abstrakter Produktstrukturen mit ihren Geometrierepräsentationen wird die OMG / FOG Methode angewandt (gelb-gestrichelte Pfeile, unten), mit der die OCC als Geometriebeschreibung angebunden wird (schwarze Ebene, unten, Strichzweipunktlinie). Zudem werden Konzepte des bSDD-LD für die Begriffsdefinition (blaue Ebene, oben, Punktlinie) und und ihre Verbindung zur Produktbeschreibung (orange-gepunktete Pfeile, oben) genutzt. Da sich der bSDD-LD in der frühen Entwicklungsphase befindet, wird in diesem Beitrag von Begriffsdefinitionen abgesehen.

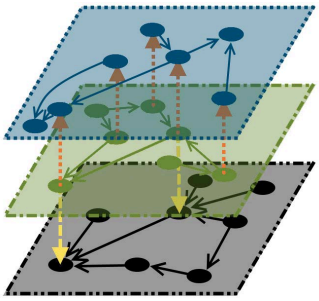


Abbildung 1: Architektur der Ontologie-Zusammenstellung der Produktbeschreibung.

4 Proof of Concept

In diesem Abschnitt wird die Implementation der Produktbeschreibung vorgestellt. Diese umfasst vollständige Beschreibungen multi-funktionaler Produkte (BIPV Module, Abschnitt 4.1), Ontologiebasierte Datenverarbeitungen am Beispiel der Geometriereduktion (Raffstore, Abschnitt 4.2) und das Einbinden von Produktbeschreibungen in digitale Gebäudemodelle (Fenster, Abschnitt 4.3).

4.1 Produktmodelle

Zur Demonstration der Abbildung eines multi-funktionalen Bauproduktes wird die Beschreibung eines BIPV Moduls betrachtet, das zuvor mithilfe der SolConPro Ontologie modelliert wurde (Wagner et al., 2018). Die resultierende nicht-geometrische Beschreibung wurde in das Datenschema der BPO übertragen, die Geometrie mittels der OCC beschrieben und eine Verbindung der Beschreibung mit der OMG / FOG Methode geschaffen. Der in Abbildung 2 erkenntliche Ausschnitt des Graphen visualisiert diese Verbindun: Links sind die Geometriebeschreibung und rechts die

nicht-geometrische Produktbeschreibung der PV Zellen abgebildet.

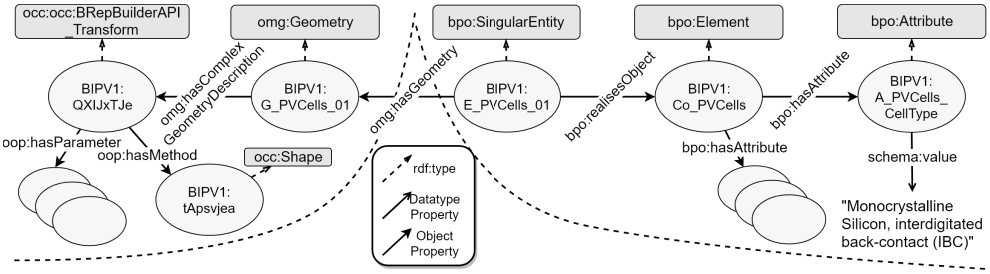


Abbildung 2: Ausschnitt der BIPV Modul Produktbeschreibung.

4.2 Ontologie-basierte Datenverarbeitung

Weiterhin wurden als Demonstration der Machbarkeit und des Mehrwertes des verfolgten Ansatzes Routinen zur Weiterverarbeitung der beschriebenen Produktdaten entwickelt. Neben Filtern, die nicht-geometrische Inhalte auf die benötigten Daten reduzieren, wird eine geometrische Verarbeitung gezeigt. Im Folgenden wird ausführlicher auf die Visualisierung und Reduktion der geometrischen Produktbeschreibung im Schema der OCC eingegangen.

Für die Visualisierung der Beschreibung ist ein Geometriekernel notwendig. Da die OCC auf die mittels dem Python Paket *pythonOCC* gewrappten Kernelfunktionen des OpenCASCADE Kernels basiert, kann eine Visualisierung durch Übersetzen des Graphen in Python-Code realisiert werden. Somit können beliebig komplexe Geometrien verarbeitet werden, beispielhaft ist in Abbildung 3 das *Raffstore* Produkt dargestellt.

Abbildung 3: Visualisierung der Geometrie des Raffstore Produkts.

Zur weiteren geometrischen Vorverarbeitung wurde die Reduktion der Geometrie auf eine Bounding-Box betrachtet. Die Reduktion kann auf unterschiedliche Weisen realisiert werden, in diesem Beitrag wird speziell das Vorgehen mittels Ontologie-basierter Vorfilterung der Daten betrachtet. Hierzu werden Konzepte der OMG / FOG Methode genutzt, um bei dem Fenster Beispielprodukt die seitlichen Schrauben über ihren `omg:GeometryContext` herauszufiltern und eine Bounding-Box zu erzeugen (siehe Abbildung 4).

4.3 Einbindung der Produktdaten in ein digitales Gebäudemodell

Ein weiterer Vorteil bei der Verwendung von Semantic Web Technologien für Produktbeschreibung ist die einfache Integration der Produktdaten in das digitale Gebäudemodell, sofern dieses ebenfalls

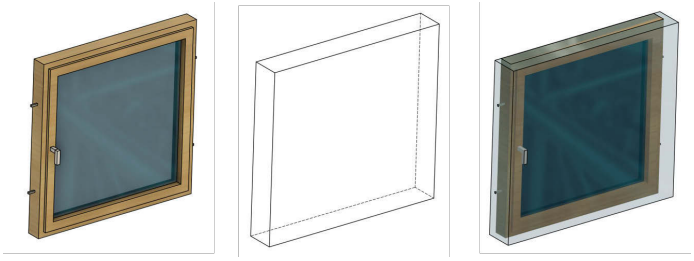


Abbildung 4: Geometriereduktion des Fenster Produkts.

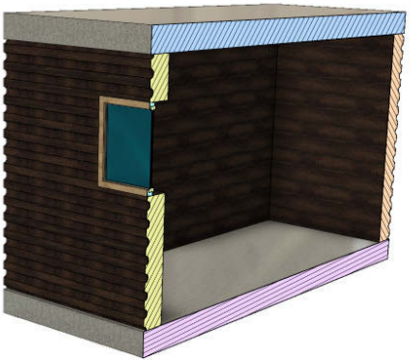


Abbildung 5: Beispielgebäude mit integriertem Fenster Produkt.

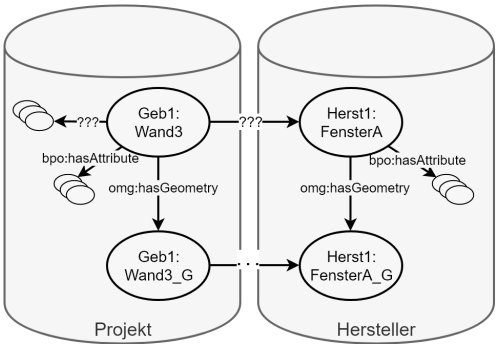


Abbildung 6: Schematisch dargestellter Graph des Beispielgebäudes mit extern bezogener Produktbeschreibung.

mit Ontologien beschrieben ist. Zur Demonstration, wurde ein Beispielgebäude erzeugt, das ebenfalls auf Semantic Web Technologien beruht und über einen Link das Fenster Beispielprodukt in dieses Gebäudemodell integriert (siehe Abbildung 5).

Die technische Implementation dieser Integration ist Abbildung 6 zu entnehmen. Während die Beschreibung der Wand in einer Projektdatenbank enthalten ist, kann direkt auf die Produktbeschreibung des Herstellers zugegriffen werden. In der vorgestellten Implementation ist dieser Link nur über die Geometriebeschreibungen realisiert, da sich noch nicht mit geeigneten Ontologien für die Beschreibung gesamter Gebäudemodeller auseinandergesetzt wurde.

5 Diskussion und Zusammenfassung

In diesem Beitrag wird demonstriert, wie vorhandene Ontologien angewandt werden können, um multi-funktionale und komplexe Produkte inklusive ihrer Geometrie zu beschreiben. Zudem werden Routinen für den Umgang mit umfassenden und detaillierten Produktbeschreibungen vorgestellt.

Mit den vorgestellten Methoden entsteht eine Flexibilität in der Produktmodellierung, die sich aufgrund der ausgewählten Verbindungs-Ontologien nicht nur auf die Modellierung, sondern auch auf die genutzten Ontologien bezieht. Sofern die Kern-Ontologie BPO sowie die Verbindungs-Ontologien OMG / FOG und zukünftig bSDD-LD genutzt werden, können Produkt-spezifische Abfragen auch auf Daten mit anderen Geometrie- oder Begriffs-Ontologien ausgeführt werden.

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums des bSDD-LD konnte dieser im Rahmen des vorliegenden Beitrags nicht betrachtet werden. Ohne eine standardisierte und einheitliche Vorgehensweise zur Begriffsdefinition und Anbindung dieser in andere Graphen sind semantisch wertvolle Abfragen über einen Anbieter (bzw. eine Ontologie) hinaus nicht praktikabel. Weiterhin fehlt die Unterstützung der Abbildung von parametrischen Produkten, damit Hersteller ihre Produkte für kundenindividuelle Massenproduktionen beschreiben können und somit einen Anreiz erhalten auf die neuartige Herangehensweise umzustellen. Erste Konzepte für das Hinterlegen von Meta-Informationen von Abhängigkeiten zwischen Geometriebeschreibungen und Produkteigenschaften sind bereits mit der OMG eingeführt worden.

In Bezug auf die Anbindung der Produktdaten in digitale Gebäudemodelle muss zudem einerseits eine geeignete Ontologie zur Beschreibung vollständiger Gebäudemodelle in einem Semantic Web Kontext identifiziert und andererseits ein Vorgehen zur Inklusion von Produktdaten in die Gebäude-Ontologie bestimmt werden, das sowohl die technischen als auch rechtlichen Aspekte berücksichtigt. (bspw. bzgl. des Firmengeheimnisses). Als potentiell geeignete Referenz-Ontologie zur Beschreibung vollständiger Gebäudemodelle könnte die *Building Topology Ontology* (BOT) als geeigneter Kandidat betrachtet werden. In Anbetracht des Vorgehens wurde die Umsetzbarkeit verteilter Produktdatenkataloge unter Berücksichtigung der Authentifizierung, Autorisierung und Datensicherheit in Hoffmann et al. (2019) betrachtet.

Ein weiterer wichtiger Aspekt im Bauwesen ist die erforderliche Nachhaltigkeit der Daten, da diese in späteren Phasen des Gebäudelebenszyklus wieder relevant werden könnten. Da sich Schemata und auch die Technologie stets weiterentwickeln und speziell bei verteilten Datenhaltungen die Erreichbarkeit nicht dauerhaft garantiert werden kann, ist dieses Thema mit Sorgfalt zu betrachten. Unter Verwendung von Semantic Web Technologien könnten zur Datensicherung bspw. in regelmäßigen Abständen sog. *Information Container for Data Drops*[6] erzeugt werden.

Mit den vorgestellten Methoden kann eine applikationsunabhängige Integration komplexer und multi-funktionaler Bauprodukte erreicht werden. In zukünftigen Arbeiten sollte der Fokus darauf liegen, einheitliche Begriffsdefinitionen umzusetzen, parametrische Zusammenhänge abzubilden, eine Vorgehensweise zur Integration der Produktdaten in Ontologie-basierte Gebäudemodelle zu entwickeln und eine langfristige Datensicherung zu untersuchen. Da der Ansatz offener Datenschemata von Softwareherstellern durch closed BIM Lösungen und fehlende Unterstützung bzw. Schnittstellen ausgeschlossen wird, sind diese Schritte für eine vollständig applikationsunabhängigen Datenhaltung notwendig. Somit bildet die vorgestellte Herangehensweise einen Grundstein, um die aktuell anhaltenden Interoperabilitätsprobleme zu lösen.

Danksagung

Diese Arbeit ist Teil des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsprojektes „Semantic Construction Project Engineering“[7].

[6] `https://www.iso.org/standard/74389.html`
[7] `https://www.projekt-scope.de/`

Literatur

Bonduel, M., Wagner, A., Pauwels, P., Vergauwen, M. and Klein, R. (2019), Including Widespread Geometry Formats in Semantic Graphs Using RDF Literals, *in* 'Proc. Eur. Conf. Comput. Constr. (EC3 2019)', Chania, Greece, pp. 341–350. DOI: 10.35490/EC3.2019.166.

Hepp, M. (2008), GoodRelations: An Ontology for Describing Products and Services Offers on the Web, *in* 'Lect. Notes Comput. Sci.', Vol. 5268, Berlin, Heidelberg, pp. 329–346. DOI: 10.1007/978-3-540-87696-0_29.

Hoffmann, A., Wagner, A., Huyeng, T., Shi, M., Wengzinek, J., Sprenger, W., Maurer, C. and Rüppel, U. (2019), Distributed Manufacturer Services to Provide Product Data on the Web, *in* '26th Int. Work. Intell. Comput. Eng.', Vol. 26, p. 12. zugegriffen am 23.07.2019.
URL: *http://ceur-ws.org/Vol-2394/paper23.pdf*

Hyland, B., Atemezing, G. and Villazón-Terrazas, B. (2014), 'Best Practices for Publishing Linked Data'. zugegriffen am 23.07.2019.
URL: *https://www.w3.org/TR/ld-bp/*

ISO 16739 (2018), ISO 16739-1:2018: Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries, Standard, ISO/TC 59/SC 13.

Pauwels, P. and Terkaj, W. (2016), 'EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology', *Automation in Construction* **63**, 100–133. DOI: 10.1016/j.autcon.2015.12.003.

Pauwels, P., Zhang, S. and Lee, Y.-C. (2017), 'Semantic web technologies in AEC industry: A literature overview', *Automation in Construction* **73**, 145–165. DOI: 10.1016/j.autcon.2016.10.003.

Radinger, A., Rodriguez-Castro, B., Stolz, A. and Hepp, M. (2013), BauDataWeb, *in* 'Proceedings of the 9th International Conference on Semantic Systems - I-SEMANTICS '13', pp. 25–32. DOI: 10.1145/2506182.2506186.

Sanfilippo, E. M. (2018), 'Feature-based product modelling: an ontological approach', *Int. J. Comput. Integr. Manuf.* **31**(11), 1097–1110. DOI: 10.1080/0951192X.2018.1497814.

VDI 3805 (2011), VDI 3805 - Produktdatenaustausch in der Technischen Gebäudeausrüstung, Standard, Vereins Deutscher Ingenieure.

Wagner, A., Bonduel, M., Pauwels, P. and Rüppel, U. (2019), Relating Geometry Descriptions to its Derivatives on the Web, *in* 'Proc. Eur. Conf. Comput. Constr. (EC3 2019)', Chania, Greece, pp. 304–313. DOI: 10.35490/EC3.2019.146.

Wagner, A., Möller, L. K., Leifgen, C. and Rüppel, U. (2018), SolConPro: Describing multifunctional building products using semantic web technologies, *in* 'eWork eBusiness Proc. 12th Eur. Conf. Prod. Process Model.', 12, CRC Press, pp. 447–455. ISBN: 978-0-429-01364-5.

Wagner, A. and Rüppel, U. (2019), BPO: The Building Product Ontology for Assembled Products, *in* 'Proc. 7th Linked Data Archit. Constr. Work. (LDAC 2019)', Vol. 7, p. 12. zugegriffen am 23.07.2019.
URL: *http://ceur-ws.org/Vol-2389/08paper.pdf*

Blockchain-based Data Synchronization for Product Catalogs in Distributed Systems

Meiling Shi, André Hoffmann,Tim-Jonathan Huyeng, Anna Wagner

InstitutfürNumerischeMethodenundInformatikimBauwesen· TechnischeUniversitätDarmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287Darmstadt · E-Mail:shi@iib.tu-darmstadt.de

Efficient collaboration between different project partners plays a vital role in construction projects and the achievement of project objectives. An option for implementing digital collaboration is the distributed system, where the same data and information are replicated on all nodes. A distributed system has advantages regarding data availability and scalability. Its shortcoming lies in synchronization of transactions in all nodes across the distributed network. The synchronization process should meet the following demands: data consistency, robustness against malicious attack, and transparency. Traditional methods for synchronization are not suitable to fulfill all requirements without high technical expenditure. This article presents the concept for a new synchronization process with blockchain technology, which updates the executed transactions and broadcasts them over the distributed network to all nodes automatically. This synchronization process ensures that the data remains consistent in all nodes of the system. With the consensus procedure and the cryptographic encryption of the blockchain technology, the data in the distributed system is also tamper-proof. By implementing blockchain for synchronization, collaboration in construction projects can be conducted with trust without having a single central authority.

Keywords: distributed system, synchronization, blockchain technology

1 Introduction

Collaboration exists in several scenarios in the construction industry. Such as the design phase, where several disciplines are working parallel on the same project. Or in the construction logistics and supply chain management, where several suppliers, distributors, and construction companies arrange and keep track of goods information. Collaboration in those fields can reduce waste and improve productivity significantly (Fulford and Standing, 2014). Within the collaboration, organizations are usually required to share and exchange their operating data and sensitive business information. The emergence and widespread use of electronic collaborative technologies for distributed project management have opened up opportunities for sharing data and collaborative development such as digital cloud platforms. Because of the complexity and short of professional personals, these platforms are usually outsourced and provided by software development companies. Besides, most tools and techniques for project management focus on static, long term relationships when inter-organizational relationships are becoming more dynamic and geographically separate (Qureshi et al., 2006-01). Also, there are concerns that a single third-party provider can threaten the security and privacy of shared data. Thus the demand for distributed systems with data replication, which are independent of central third control increases. Data replication is the maintenance of copies of data at multiple nodes, i.e., computers used as servers in a network. Multiple nodes are essential components to provide high availability, scalability, and fault tolerance in distributed systems (Coulouris, 2012,

765-766). However, data replication is also a source of problems. One fundamental question is how to balance availability and consistency while synchronizing transactions. Transactions are database changes, such as updates or inserts. Secondly, the system shall be robust enough against malicious data manipulation from adversaries. Thirdly, for the sake of system performance and security transactions of replicated data should not be controlled by one central administration. Last but not least, execution of transactions in replicated data need to be transparently documented, so that it is traceable who has done which changes at which time. These problems can be solved by the blockchain technology that is by design a distributed database. In this paper, we propose an architecture model for synchronizing the replicated data in distributed nodes by implementing blockchain technology.

2 Replication in distributed systems

A distributed system is a system in which hardware or software components located at networked nodes communicate and coordinate their actions only by passing messages (Coulouris, 2012, 2). Distributed systems provide high availability to clients and fault tolerance by having data replication in multiple nodes. Availability means that the proportion of successful access from a client to the system with reasonable responses should be close to 100%. Having different copies of data solves the availability problems, but it creates synchronization problems too. Data can be manipulated maliciously by adversaries because of data's openness in a distributed network. Replicating data is a method to achieve fault tolerance (Coulouris, 2012, 766-768). Suppose the majority nodes of the distributed system are honest. If one node is attacked and broadcasts malicious transactions in the distributed network, other nodes can prevent this attack happening by uniting together to refuse synchronization. However, replication cannot resist majority attack, in which adversaries manipulate more than half of all nodes. Except for the majority attack, there is another crucial challenge in data replication, the data inconsistency.Consistency means keeping the various copies of data in sync. Since copies of data are stored in multiple nodes independently, database transactions which happen locally cannot be synchronized immediately across the network because of internet latency. Moreover, there are usually numbers of nodes in a distributed system. If multiple nodes make transactions concurrently, the order of synchronized transactions is different in diverse nodes due to lack of global time. This concurrency property leads to inconsistency replicated data. Thus a consistency model is needed to synchronize data through the distributed network. There are two models: passive and active replication.

2.1 Passive replication

In the passive replication model, there are always a single primary node and several secondary nodes - "slaves". Clients only communicate with the primary node to obtain the service. The primary node receives transactions from slaves, execute transactions locally, and broadcasts copies of the updated data to the slaves. Should the primary node crashes, a new primary node will be selected from the slave nodes through group communication (Coulouris, 2012, 778-780). Passive replication can tolerate non-deterministic nodes and uses little processing power compared to other replication techniques. The drawbacks of the passive replication are the low scalability and the high reconfiguration cost when the primary node fails (Wiesmann et al., 2000).

2.2 Active replication

In an active replication model, all nodes are equal, and they act as a group. When clients send requests to nodes through the network, a group communication system delivers the request to every node in the same order. Each node processes the request identically and gives reply to the clients. Thus the order of processed requests is not necessarily the same in all nodes (Coulouris, 2012, 780-781). The drawback of this approach is the lack of linearity, which leads to non-determinism.

3 Blockchain technology

In essence, a blockchain is a chain of chronological blocks which is maintained by the nodes in a distributed network. By design, blockchain is well suited for systems that require integrity, transparency, and immutability (Wüst and Gervais, 2018-06). Every node in the distributed network holds the replicated data in the form of blockchains. Each block consists of a set of transactions that are executed by participants in a blockchain network, a hash value of the previous block, a timestamp when this block is generated and a hash value of the current block, to name a few. The current hash value and the hash value of the previous block links block chronologically together, which makes a chain of blocks. Here is how a blockchain works: In a distributed network, nodes conduct transactions with each other. Each transaction is signed with the digital signature of its generator. Every once in awhile, transactions are collected by a miner into a block. Miners are nodes with transaction collection rights. Within the mining process, miner packs transactions that are executed in the nearest timespan in one block with a corresponding hash value and a timestamp. Subsequently, all nodes in the network give their votes to this block, which is called consensus. If the distributed nodes reach the consensus, say the majority have given their endorsement, the miner broadcast this block to all other nodes in the network. These nodes in the network then append the new block to their local blockchain. Blockchain is considered to be very secure. The replication of same data on distributed nodes and consensus already ensures fault tolerance. Moreover, blocks are linked together chronologically through hash values. With encrypting all transactions and blocks to hash values, the manipulation of data is even more challenging. Since as long as one node edit transactions, hash values change. All nodes keep the transaction history for approval in case of inconsistency. Once appends a block into the blockchain, it is almost impossible to manipulate or erase this entry (Crosby, 2016), since one needs to manipulate data in all nodes. Last but not least, by signing a digital signature in each transaction, the identity of transaction executor can be proved later.

The blockchain technology combines the advantages of passive and active replications in synchronizing transactions across the distributed network. Every node in a blockchain network is equal-valued and can response clients' request individually, which ensures scalability. With suitable consensus algorithms, such as practical byzantine fault tolerance, processing synchronization only needs a little computing power. Besides, blockchain technology can prevent non-deterministic nodes since all nodes receive the same block with transactions in the same order from one miner node. Furthermore, by using cryptography, distributed database, consensus algorithms, and digital signature, blockchain provides "Trust" in a distributed network without the need of a certificated central authority.

According to its publicness, there are three kind of blockchains: public, permissioned, and private blockchain. In a public blockchain, every anonymous node with internet access can read and write

blocks in it. A permissioned Blockchain, also called consortium blockchain, only grants the write permission to a consortium of nodes. A private blockchain only allows a single node to generate blocks. Since the collaboration in the construction industry usually involves multiple partners who actively contribute transactions in the replicated data, and shared operating data should not be seen by nodes out of the consortium, private and public blockchains are not suitable. The permissioned blockchain provides transaction privacy for consortium from the public and supplies all blockchain properties in a closed consortium. It is most suitable to implement in collaboration distributed system.

4 Case study

We introduce here a case which demands the implementing of distributed systems. With buildings and infrastructures are getting more sophisticated, the requirement of direct embedding digital product data from manufacturers into building information models in design phases increases. Through integrating product data into digital models, building analyses, such as energy simulation or construction simulation, can be done more precisely. To find the most suitable product for a building, planners spend much time searching for and comparing products. There are several platforms co compare product (DBZ, 2019) from third-party, such as BIMobject, buildup, However, HeinzerBIM and Plan.One. The main problems of these platform providers are the uncertainty of a central authority, concerns of data security, and lack of transparency. Manufacturers have a legitimate interest to retain control over the disclosure of their product data and to make sure that their products are not neglected intentionally by platform providers while being searched. To satisfy the demand of data autonomy, data security, and transparency, the research project EnOB: SCOPE [1] proposes a solution by implementing distributed systems called distributed data service.

5 Concept

The distributed data service is an interface, which receives and responses product data queries from customers, e.g., planers, and enables manufacturers to communicate with each other. Manufacturers that implement the data service in its digital infrastructure (e.g., servers) are nodes in the distributed system. The company stores the product database behind the manufacture's network firewall, which ensures the company's data authority. Suppose that a customer is searching for a solar plant with specific parameters in the distributed system, the network sent this request to one undetermined manufacturer data service instance. Firstly, it looks for the particular type of solar plant in this manufacturer's product database locally. Then this data service instance forwards the same request to some other instances which also provide similar products according to a product catalog. It contains addresses of all data service instances and the product types that lie on these instances. Every data service instance stores the product catalogs replicated. Through product catalog, a request can identify all data services that are relevant for queries from customers and send those queries to corresponding data services. Since there are copies of the product catalog in every data service, should one data service falls, the network can send queries to other data services. If an update is made to the product catalog locally in a data service or if new data service registers in the distributed system, a synchronization process must start to bring all nodes in the same stand.

[1] Project SCOPE: https://www.projekt-scope.de/

On implementing the data catalog which exists locally in distributed data services, it must fulfill the following requirements: First, replicated data catalogs in distinct sites should be in a consistent state. That means local changes in data catalog must be synchronized in all other data services through the internet. Second, unintended changes, including data altering with malicious intent and hardware breakdown, must be detected and avoided to guarantee data integrity. Third, manufacturers should only have writing access to their own product catalog entries. Fourthly, executions – including metadata such as author and timestamp – should be documented and traceable to avoid allegations in case of hostile alterations in the database. Last but not least, information needs to be available when customer queries come from outside of a data service. As mentioned in capital 2 data synchronization in a distributed system causes data inconsistency and non-determinism. Data can also be manipulated by majority attack. This article suggests implementing consortium blockchain (see capital 3) to enhance the resistance against these threatens and to eliminate the manufacture concerns of central authority, data security, and lack of transparency. For the reasons as mentioned above, blockchain is suitable to store an immutable record of transaction logs for distributed database (Sutton and Samavi, 2017)(Gaetani et al., 2017) that keeps the product data catalogs integral and available.

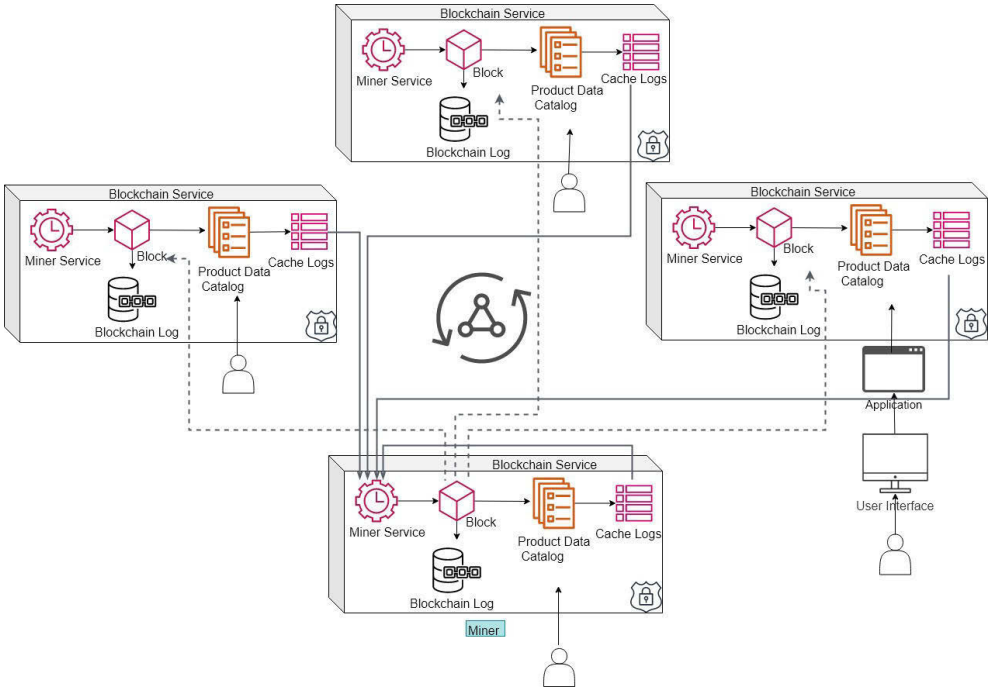


Figure 1: Concept for synchronization with blockchain

Figure 1 illustrates the architecture of deploying product catalog synchronization with blockchain. As a part of data service, the blockchain service consists of following parts: a product catalog, a logfile names "cache log" which records transactions of the product catalog, a block that contents the most recent transactions in the whole distributed system, a miner service to receive transactions from the distributed network, and a blockchain log which records history of all occurred transactions. The easiest way to get transactions that happen in a product catalog in a period is to store the

product catalog in a database management system (DBMS), such as MySQL. Most DBMS has a built-in transaction log that records all transactions and the database modifications made by each transaction. The cache log only stores transactions that occur since the last mining process. The synchronization process through multiple data services can be performed by the broadcast function of blockchain, where transaction logs are wrapped up in a block and sent to all data services to validate. With suitable consensus mechanism manufacturers can give their approvals or rejections to a block so that unintended transactions can be obviated. The blockchain log is maintained in every data service for the sake of data security.

Similar to (Gaetani et al., 2017), this concept uses the rotation method to conduct the mining process in the blockchain. First, the blockchain service defines a timespan which gives the duration of a round. In each round, the miner generates a new block. This timespan is a round, where a miner will be chosen from distributed nodes randomly to generate a block. During this round, all nodes send executed transactions that are stored locally in cache logs, including their timestamps, to the miner service of the miner. At the end of each round, the miner confirms all received transactions by signing its digital signature on it and wrapping transactions with the hash value of the previous block as well as other metadata in a new block. Afterward, the miner service generates a new hash from this new block and add the hash value to the new block itself. After this mining process, the miner broadcasts the newly generated block to all nodes to verify its correctness. As soon as the majority nodes have confirmed the block with their digital cryptographic signatures, the block can be appended to the original local blockchain log and execute the transaction logs in the local product catalog. That the blockchain is maintained by a distributed instead of a centralized network also improves database security. If one node crashes or is attacked, the transactions can be recovered from other nodes. To ensure manufacturers being restricted to edit their product catalog entries only, a smart contract can be applied. Smart contracts are part of the blockchain protocol and define who can update which entries in the product catalog.

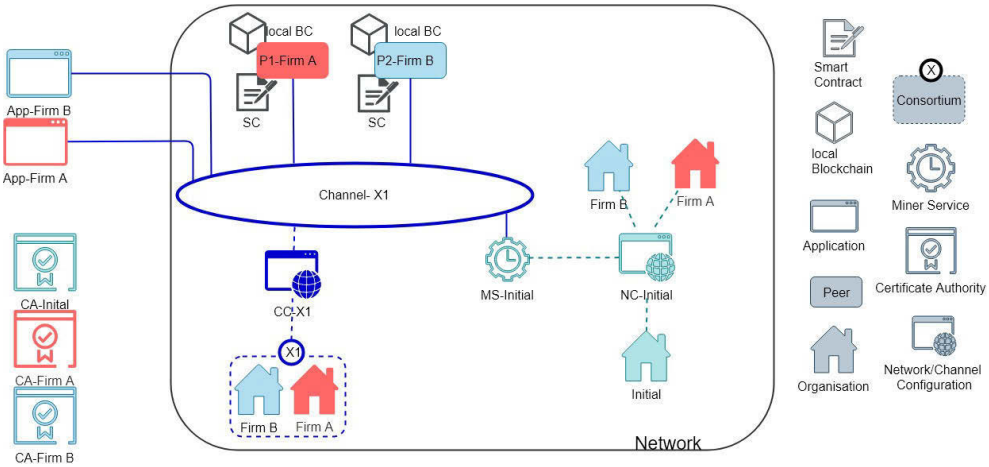


Figure 2: Initializing a blockchain network for product calatog (based on Hyperledger Fabric documentation)

Not only the synchronization process but also the establishment of a distributed network and the admission of new participants in a consortium apply the distribute principles of blockchain technology.

Different from a central network, there is no central administrator for admitting new manufacturers into the distributed network. The abandon of centralized administration is due to the risk that malicious nodes can attack it and take over the right to permit zombie-bots to entry the network and bring down services. Thus it is essential to have a distributed admission process across the manufacturer data services. This paper refers to the Hyperledger Fabric (Androulaki et al., 2018) to set up this consortium distributed network. In Figure 2 organizations Firm A and Firm B plan to form a consortium in a blockchain network with which customers can search for specific products. They have agreed on a joint policy, which defines all administrative rules in the distributed system, such as who has administrative rights and how a new company enters this consortium. The blockchain network starts by an "Initial" organization, which is trusted by those two companies. The initial organization realizes the policy in "Network Configuration" (shot NC) in its digital infrastructure, which grants administrative rights to the organization Initial in this network. A certification authority CA-Initial issues identities to Initial and all following access nodes from it. Afterward, Firm A and Firm B are added by Initial into this network and are assigned the same administrative rights to the network. Thus all three organizations share the same rights over this network. CA-Firm A and CA-Firm B provide the identities of those two firms. Firm A and firm B will also have a copy of NC-Initial within themselves to form the distributed system. If a new organization wants to join this network, all three organizations should give their agreements through the blockchain approval process. Those changes in the NC will be recorded as a blockchain on this network. After the network exists, firm A and firm B launch a consortium, channel X1, to enable manufacture data services. They define administrative rules within this channel in CC-X1, which is replicated in both companies in the form of blockchain. Likewise, the changes in CC-X1 and permissions of new nodes (peers), such as P1-Firm A and B, into this consortium should be approved both by firm A and B. P1-Firm A and B holds both blockchains and smart contracts locally. Smart contracts SC control whether the database transactions, namely the updates from applications App-Firm A and B, are authentic. Now, these two organizations can share product catalog in channel X1 in the form of a blockchain. If the transactions are proved to be reasonable, they will be sent to a miner service MS-Initial to be ordered sequentially into a block. Every after a while the miner service broadcasts a block to all nodes in the channel.

6 Conclusion

This article presents an approach to synchronize replicated data for a smoother collaboration with blockchain technology, grounding on real demands originates from the research project EnOB: SCOPE. This paper explains the architecture of implementing blockchain technology for synchronizing product catalog. The concept we proposed can be further investigated by realizing a demonstrative program to validate its performance with the focus on failure tolerance, throughput, and synchronize latency. This approach also provides an alternative to other collaboration cases such as paralleled design and construction supply management.

7 Acknoledgement

This work is part of the research project EnOB: Semantic Construction Project Engineering, founded by the German Federal Ministry for Economic Affairs and Energy (BMWi).

References

Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., Enyeart, D., Ferris, C., Laventman, G., Manevich, Y., Muralidharan, S., Murthy, C., Nguyen, B., Sethi, M., Singh, G., Smith, K., Sorniotti, A., Stathakopoulou, C., Vukolić, M., Cocco, S. W. and Yellick, J. (2018), 'Hyperledger fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains', pp. 1–15.

Coulouris, J. D. G. (2012), 'Distributed systems: Concepts and design', p. 1067.

Crosby, M. (2016), 'BlockChain technology: Beyond bitcoin', (2), 16.

DBZ (2019), 'Der vergleich von produktvergleichsplattformen', `https://www.dbz.de/artikel/dbz_Der_Vergleich_von_Produktvergleichsplattformen_3381292.html`.

Fulford, R. and Standing, C. (2014), 'Construction industry productivity and the potential for collaborative practice', **32**(2), 315 – 326.

Gaetani, E., Aniello, L., Baldoni, R., Lombardi, F., Margheri, A. and Sassone, V. (2017), 'Blockchain-based database to ensure data integrity in cloud computing environments', p. 10.

Qureshi, S., Liu, M. and Vogel, D. (2006-01), 'The effects of electronic collaboration in distributed project management', (1), 55–75.

Sutton, A. and Samavi, R. (2017), Blockchain enabled privacy audit logs, *in* C. d'Amato, M. Fernandez, V. Tamma, F. Lecue, P. Cudré-Mauroux, J. Sequeda, C. Lange and J. Heflin, eds, 'The Semantic Web – ISWC 2017', Lecture Notes in Computer Science, Springer International Publishing, pp. 645–660.

Wiesmann, M., Pedone, F., Schiper, A., Kemme, B. and Alonso, G. (2000), Understanding replication in databases and distributed systems, *in* 'Proceedings 20th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems', IEEE Comput. Soc, pp. 464–474.

Wüst, K. and Gervais, A. (2018-06), Do you need a blockchain?, *in* '2018 Crypto Valley Conference on Blockchain Technology (CVCBT)', pp. 45–54.

BIMification of stone walls for maintenance management by utilizing Linked Data

Mushtak K. Seeaed und Al-Hakam Hamdan

[1] Institute of Construction Informatics · Technical University of Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden ·
E-Mail: mushtak.seeaed1@tu-dresden.de

A large proportion of the data created during the inspection and assessment of stone facades and their damages is recorded in formats that are not machine-readable and thus cannot be further processed or managed digitally. Consequently, this increases the risk of data loss and incorrect information due to human misinterpretation.
Therefore, a Multimodel-based approach has been developed in which stone facades of existing buildings are digitized as IFC-model by using proxy entities and linked with web ontologies for semantic enrichment. Additionally, detected anomalies in the stone structure are implemented and linked with geometrical representations. By utilizing additional rules and inference mechanisms, the anomalies can be classified, and a knowledge-based damage assessment is processed.

Keywords: Multimodel, Linked Data, BIM, Ontology, Natural Stone, Damage

1 Introduction

In the life cycle of natural stone facades, multiple influences lead to stone texture impairment. In order to ensure the safe continuation of a stone facade that consists of damaged stones, its structure must be evaluated considering any occurred damage. For a computer-based damage evaluation, machine-readable data about the affected construction and their inspected damages are mandatory. Therefore, (Scherer & Katranuschkov, 2018) propose a process called BIMification, where a Building Information Modeling (BIM) model of an existing building is created based on the standardized BIM specification Industry Foundation Classes (IFC) (ISO 16739-1:2018, 2018). In this research, a concept has been developed that covers the Anamnesis for natural stone components, which is the first major stage of the BIMification and dedicated to the survey and collection of facts about the building. The Anamnesis stage includes several subtasks, which are processed through the creation of various data models. The Geometrical BIMification involves the production of a pure geometric model and therefore is realized in this approach through creating an IFC model for the building components and their aggregated parts, respectively stones and joints as well as serializing a damage model in a common geometry format. Additionally, the Topological and Behavior BIMification are covered by utilizing web ontologies using the Ontology Web Language (OWL) as data format. In this regard, an ontological model is provided, which renders the topological relations between stones, joints and their damages of existing components. Furthermore, through a semantic enrichment, additional technical information is added to each individual of the ontology. In this publication the aforementioned concept is described in detail and tested on a stone wall representation as simple example.

1.1 Background

Developing a BIM-model of an existing building has been the subject of previous approaches such as by (Arayici, 2008; Murphy, Mcgovern, & Pavia, 2009). However, BIM was intended to support design and construction processes (Volk, Stengel, & Schultmann, 2014). Thus, the current IFC version (IFC4) does not support additional classes or attributes, which are required for the representation of existing constructions. Consequently, modeling stones in IFC is only possible by either using entity types that have been designed for a different purpose (e.g. *IfcMember* or *IfcBuildingElement*) or via *IfcBuildingElementProxy*, a class for instantiating user-defined entities. The same problem exists for representing damages in IFC. Although, in this case IFC extensions have been proposed such as (Sacks et al., 2018; Tanaka et al., 2018), the extension schemas cover only damages and defects that occur on bridges and therefore are too domain specific. Besides the digital representation in IFC, (Cacciotti, Blaško, & Valach, 2015) developed an ontological model for the diagnosis of damages to heritage. Furthermore, (Hamdan, Bonduel, & Scherer, 2019) developed a web ontology for recording damage data and its topological relations.

2 Modeling natural stone facades

2.1 Representation of natural stone facades in IFC

Since, IFC does not support modeling two main component types of a stone façade, respectively representations of stones and mortar joints, *IfcBuildingElementProxy* is used for modeling these objects. In this regard, the modeling and identification of mortar joints could be realized in various ways. Although, some of the variants that human experts also use during inspections are more intuitive and require fewer joint elements (see Fig. 1, variant 1), the modeling rules on which these elements are structured are difficult to comprehend. Therefore, a specific modeling variant has been developed that follows a reproducible structure (see Fig. 1, variant 2).

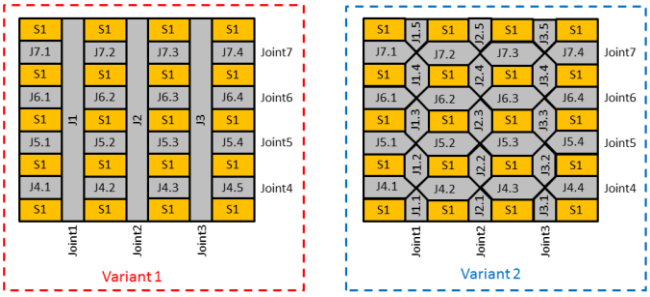


Figure 1: Stone façade and mortar joint format variants

The impairments of variant 1 are the intersection points between joint lines, which generate conflicts and overlapping in shareable data. Furthermore, the joint adjacency along several stone façade elements makes it difficult to identify a single damaged joint part located between two stone façade elements. Variant 2 provides a concept dividing a single joint element horizontally and vertically into several joint element parts separating and surrounding each single stone façade element.

The wall has been modeled as an instance of *IfcWall* and the stones as well as the joint elements as *IfcBuildingElementProxy* occupying the wall volume. To avoid contradictions in the visualization of the wall and its aggregated components, the resulting IFC-model is subdivided into two models. Thereby, WallModel_P1.ifc represents the wall and WallModel_P2.ifc the stone and joint elements. Separating the wall representation into two IFC models is also beneficial when collaborating with multiple expert domains, e.g. Architecture or Structural Engineers where single walls are designed as simple objects likewise as rectangular shapes covered with various layers e.g. isolation, plaster, etc. without modeling each stone separately. As a test case, a composition of stones and adjacent joints has been generated from a wall object, using proprietary BIM modeling software. Thereby, each stone and joint element has a newly generated Globally Unique Identifier (GUID) assigned.

2.2 Ontology for Semantic Enrichment

Proxy elements used in the IFC model for natural stone representation contain no further information besides geometric data. Therefore, additional properties that describe material, age or refurbishment history of each component must be added via a semantic enrichment process. This can either be done directly in IFC through the implementation of additional user-defined property sets or via a separate ontology that is linked with the IFC model by a Multimodel Container (Scherer & Katranuschkov, 2018). The utilization of a separate ontology to describe the topology and other non-geometrical data is also recommended by (Bonduel, Vergauwen, Klein, Rasmussen, & Pauwels, 2018) to support a more flexible workflow where existing buildings can be digitized without the need for producing a geometric representation, which is often a cost and time consuming task. Therefore, the following web ontologies has been used as terminological components (TBox).

- StoneComponent.owl ➔ Topology of stones and joints and geometry
- BuildingMaterial.owl ➔ Natural stone and joint material
- bot.owl / ifcowl.owl ➔ Wall component

The StoneComponent-model defines classes for representing stones and joints as well as their topological relations and simple geometrical data properties such as height, length and width. Thereby, the topology is based upon the Building Topology Ontology (BOT) (Rasmussen et al., 2017)[1]. The surrounding elements are considered as adjacent elements, and will contribute effectively to locate the damaged elements within a damaged area or damage pattern (see Figure 2: StoneComponent-model). For representing the wall components an existing ontology can be used such as BOT or ifcOWL (Pauwels & Terkaj, 2016).

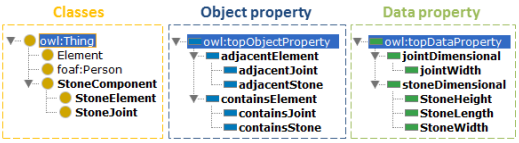


Figure 2: StoneComponent-model

[1]https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/

In general, The Building Material Ontology (BMAT)[2] allows the definition of building materials used in construction as well as their related metadata via data properties (see Figure 3: BuildingMaterial-model). In this research BMAT have been used for defining the attributes of natural stone and mortar, and to identify either the stone material types (sandstone, limestone and etc...) as well as mortar joint types (normal mortar, thin-bed mortar and etc...) and their related properties. By providing chemical and mechanical properties of the involved elements, the material structure is clearly described and ready to be linked to additional OWL-models.

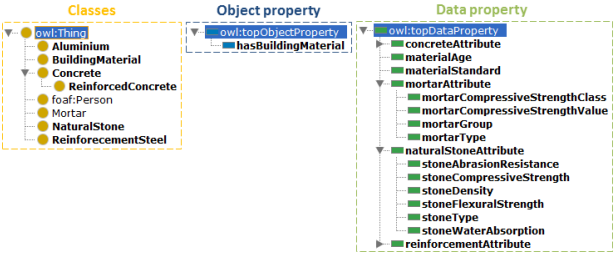


Figure 3: BuildingMaterial-model

By using the aforementioned TBoxes, assertional components (ABox) are created in a resulting stone model. For each individual, various property assertions are defined (see Fig. 4).

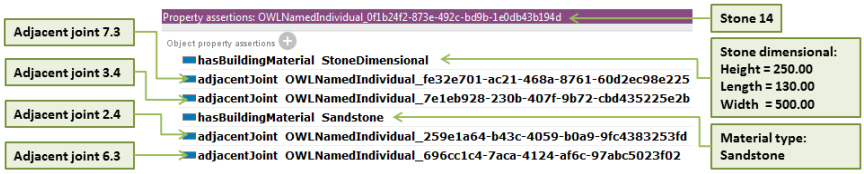


Figure 4: Property assertions

2.3 Multimodel Container

Generally, a Multimodel represents a containment of heterogeneous domain models having an explicitly loose coupling between their data elements. Specially, a multimodel container is an agreed or standardized data format for the exchange of multimodel information. By using separate Linkmodels specific elements between these domain models are linked with each other through referencing their model specific identifiers (e.g. GUID, Primary Key, etc.). Thereby, the domain models are kept in their original format (Fuchs & Scherer, 2017). In this regard, the Multimodel developed in this research is serialized as Information Container for Data Drop (ICDD) according to ISO/DIS 21597-1[3], in which the domain models and link models are structured in a folder structure for an enhanced manageability. Furthermore, the link models are serialized in OWL, which enables the application of standardized Semantic Web Technologies such as the

[2]https://wisib.de/ontologie/bmat/

[3]https://www.iso.org/standard/74389.html

SPARQL Protocol And RDF Query Language (SPARQL) for querying linked elements. The Multimodel developed for the BIMification of natural stone components consists of three domain models, which are linked via three link models. Thereby, the IFC model representing the wall is linked with an IFC model that contains stone and joint elements. Additionally, both models are linked with a web ontology describing the stone wall and its aggregated components (see Fig. 5). Further damage data can be implemented in a similar way and thus are connected with the existing models.

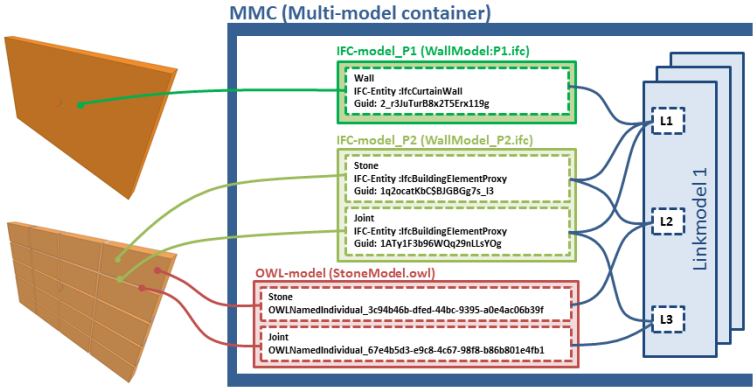


Figure 5: Multi-model container

3 Damage Representation

3.1 Structure of the ontological model

Similar to the ontology for representing natural stone structure, a separate ontological model for digitizing damages is used and integrated in the Multimodel for maintenance management of existing masonry. In this regard, the terminological components of the damage model are structured as a modular web ontology, consisting of a core model for defining generic information such as the topology or inspection data and a domain specific extension for information related to specific stone damages and their characteristics. Therefore, the Damage Topology Ontology (DOT)[4] (Hamdan et al., 2019) is used that provides a generic terminology for defining damages and their topology as well as relations to existing construction components and inspection information. Furthermore, an initial assessment class regarding the impact on the structural capability of the affected structure can be assigned to damage objects. For defining the damage topology, three main classes are used (Fig. 6). While instances of *dot:DamageElement*, are used for representing single damages at a high detail level, the class *dot:DamageArea* allows the definition of an area containing a set of damages at a lower detail level referring to a more simplified geometry. Furthermore, multiple instances of *dot:DamageElement* that represent physically connected damages can be grouped in an instance of *dot:DamagePattern*.

[4]http://www.w3id.org/dot

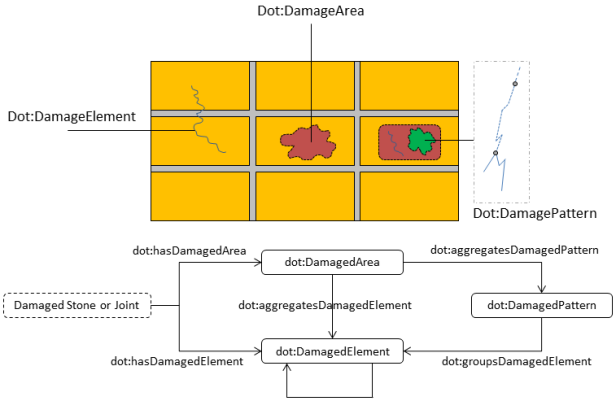


Figure 6: DOT main classes and object properties

Due to the generic functionality of DOT, an extension is necessary for specifying damages to natural stone structures. The extension consists only of a taxonomy that adds new classes for stone damage representation, which are structured hierarchically (Fig. 7). Furthermore, data properties for characterizing these damages (e.g. width or depth of a crack) are implemented in the extension. However, no new object properties for defining relations between damages are added, since these terminological components are already provided by DOT.

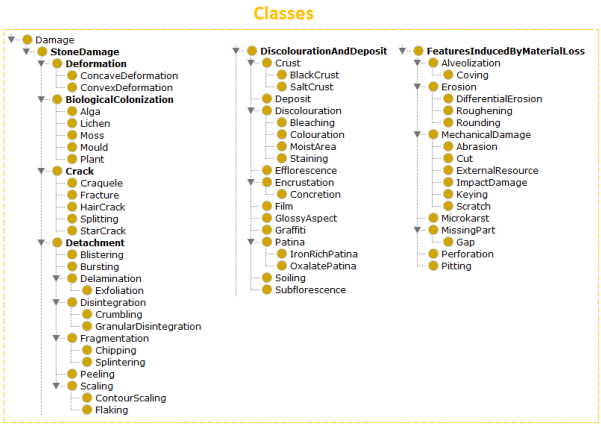


Figure 7: Taxonomy of the DOT extension for natural stone damage

Using the terminology of DOT and its extension, an ontological damage model is created that is linked with a geometrical model, representing the damage geometry as well as the stone ontology and BIM-model. In its current state, IFC is not suitable as a geometrical model for stone damages, since no officially published IFC-class supports the representation of recesses in a structure, which is common for several stone damages such as cracks. Therefore, Collada as alternative format has been used to model the damage geometry[5].

[5]https://www.khronos.org/collada/

3.2 Initial damage classification and assessment

Detected anomalies can be imported in the damage ontology where they can be classified regarding their damage type and causation based on specific characteristics. Furthermore, an initial assessment based on certain criteria, e.g. structural capability or durability can be processed. This can be realized using OWL inference mechanisms as well as applying additional rules. To define rules various rule languages such as the Semantic Web Rule Language (SWRL) or the Shapes Constraint Language (SHACL) could be used. At its current state, rules have only been specified for cracks that are detected through visual inspection. As an example, Eq. 1 describes a SWRL rule in first order logic that classifies a detected crack as hairCrack due to a specific crack width.

$$crackWidth\ d,w) \wedge\ \mathrm{w} < 0.1) \rightarrow HairCrack\ d) \tag{1}$$

Furthermore, a subsequent rule can be reasoned that assesses the classified hair crack as a defect that has no serious impact on the structural capability on the affected construction (see Eq. 2).

$$\mathrm{HairCrack\ d}) \rightarrow Defect\ d) \tag{2}$$

However, an intersection of rules regarding similar value ranges or other common characteristics can occur, especially if the anamnesis stage during the BIMification has not been completely processed. Therefore, a decision tree can be implemented in the damage ontology and ruleset that groups classification types in multiple stages, based on the available information (Gajderowicz, Sadeghian, & Soutchanski, 2013). Additionally, instances of these grouping classes should be marked as unclassified damage either via an additional data property or through a new class. In this regard, the definition of rulesets for classification and assessment of natural stone damages is still subject of further research.

4 Conclusion

Based on the BIMification process of (Scherer & Katranuschkov, 2018), an approach has been developed for creating a digital representation of natural stone walls for computer-based data management and processing. Thereby, multiple geometrical models for representing the existing building, aggregated stone and joint elements and damages have been linked with web ontologies for semantic enrichment using the Multimodel approach (Fuchs & Scherer, 2017). Currently, the approach has only been conceptually tested on idealized walls, with even stone and joint measurements. A validation of the concept on real existing walls that have an irregular stone structure is subject of future research. Furthermore, the classification of detected damages needs to be enhanced in order to process uncertain damages, where multiple classification results are possible. Consequently, undetected damages that can not be recognized during the Anamnesis stage (e.g. cracks behind a multi-layered wall) are currently not covered by the aforementioned concept.

Acknowledgements

This research is done with the support of the Federal Ministry of Education and Research by funding the project BIM-SIS (project number 01 | S18017D).

5 References

Arayici, Y. (2008). Structural Survey Towards building information modelling for existing structures. *Structural Survey*, *26*(3), 210–222.

Bonduel, M., Vergauwen, M., Klein, R., Rasmussen, M. H., & Pauwels, P. (2018). *A Novel Workflow to Combine BIM and Linked Data for Existing Buildings ECPPM conference 2018*. (September).

Cacciotti, R., Blaško, M., & Valach, J. (2015). A diagnostic ontological model for damages to historical constructions. *Journal of Cultural Heritage*, *16*, 40–48.

Fuchs, S., & Scherer, R. J. (2017). Multimodels — Instant nD-modeling using original data. *Automation in Construction*, *75*, 22–32.

Gajderowicz, B., Sadeghian, A., & Soutchanski, M. (2013). Ontology Enhancement Through Inductive Decision Trees. *Uncertainty Reasoning for the Semantic Web II*, 262–281.

Hamdan, A., Bonduel, M., & Scherer, R. J. (2019). An ontological model for the representation of damage to constructions. *7th Linked Data in Architecture and Construction Workshop*.

ISO 16739-1:2018. (2018). ISO 16739-1:2018 Preview Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries -- Part 1: Data schema. *International Organization for Standardization*, *2018*, 70303.

Murphy, M., Mcgovern, E., & Pavia, S. (2009). Structural Survey Historic building information modelling (HBIM). *Structural Survey*, *27*(4), 311–327.

Pauwels, P., & Terkaj, W. (2016). EXPRESS to OWL for construction industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL ontology. *Automation in Construction*, *63*, 100–133.

Rasmussen, M., Pauwels, P., Lefrançois, M., Schneider, G. F., Hviid, C., & Karlshøj, J. (2017). *Recent changes in the Building Topology Ontology*.

Sacks, R., Kedar, A., Borrmann, A., Ma, L., Brilakis, I., Hüthwohl, P., … Muhic, S. (2018). SeeBridge as next generation bridge inspection: Overview, Information Delivery Manual and Model View Definition. *Automation in Construction*, *90*, 134–145.

Scherer, R. J., & Katranuschkov, P. (2018). BIMification: How to create and use BIM for retrofitting. *Advanced Engineering Informatics*, *38*, 54–66.

Tanaka, F., Tsuchida, M., Onosato, M., Date, H., Kanai, S., Hada, Y., … Oyama, T. (2018). *Bridge Information Modeling based on IFC for supporting maintenance management of existing bridges*.

Volk, R., Stengel, J., & Schultmann, F. (2014). Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs. *Automation in Construction*, *38*, 109–127.

A Checking Approach for Distributed Building Data

Jeroen Werbrouck[1,2], Madhumitha Senthilvel[1], Jakob Beetz[1], and Pieter Pauwels[2]

[1]Chair of Design Computation · Schinkelstraße 1 · 52062 Aachen · E-Mail: werbrouck@caad.arch.rwth-aachen.de
[2]Dept. of Architecture and Urban Planning · Ghent University, Belgium

Since the early 2000s, the building industry has been steadily embracing the concept of Building Information Modelling (BIM). Currently, the BIM focus lies on file-based collaboration, although with the rise of semantic web technologies, the benefits of web- and data-based collaboration for the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry come within reach. A web-based AEC industry that relies on Linked Data can provide various advantages compared to 'classic' BIM practice, e.g. regarding interdisciplinarity, linking across domains and logical reasoning. In this paper, we investigate Linked Data rule checking mechanisms on decentralised building datasets. The recent Semantic Web standard Shapes Constraint Language (SHACL) is used to check a Linked Data building model that is hosted on multiple data pods. After a short introduction to Linked Building Data and rule checking approaches, a minimal distributed building model will be checked with basic SHACL patterns, generating a report to inform both end users and tools. In this case study, we make use of the Social Linked Data (Solid) ecosystem, a set of conventions and tools for creating decentralised applications.

Keywords: Linked Building Data, decentralisation, rule checking, SHACL, Solid

1 Introduction

The concept of Building Information Modelling/Management (BIM) has been key to the adoption of smart, object-oriented digital technologies in the Architecture, Engineering and Construction (AEC) industry. Nevertheless, a lot of fragmentation is still present, due to the many stakeholders involved in a project, each with different background and using specialised software tools. To improve interoperability, the Industry Foundation Classes[1] (IFC) were founded in 1997, aimed at encompassing the diversity of activities present in the Building Life Cycle (BLC). However, because of the size of the IFC schema, full compatibility with commercial tools is seldom the case, and a lossless information flow between tools is difficult to achieve Kiviniemi et al. (2005).

A promising candidate for maximising interoperability with integrated data, is the use of the Semantic Web technology stack, instead of relying on document-based building models (Beetz et al. (2005); Pauwels, Zhang and Lee (2017); Rasmussen et al. (2017)). The Semantic Web Berners-Lee et al. (2001), which can be thought of as an additional layer upon the classic world wide web, enables to link data of various nature on multiple servers in the form

[1]https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc, BuildingSMART

of a directed graph. With the use of the Resource Description Framework[2] (RDF) standard for establishing Linked Data graphs, a significant format interoperability gain can be achieved, which is why more and more disciplines are making semantic web-compatible domain models, among which also the AEC industry. Furthermore, semantic web technologies allow linking across domains and advanced checking of regulations and rule sets.

RDF allows to set up a decentralised web ecosystem, where interlinked data is stored on different servers, and applications are decoupled from the data. An example of such ecosystem framework is the Social Linked Data (Solid) project (Berners-Lee and Verborgh (2018); Mansour et al. (2016)). Although focused on social data and applications, it offers a set of specifications and tools that can be applied to other disciplines as well. In the case of the AEC industry, the available project data can be stored personally by the different stakeholders, nevertheless forming a coherent model; the basis for a decentralised Common Data Environment (CDE) (Werbrouck et al. (2019)). Such distributed Linked Building Data can then be queried and checked with rulesets, which is the core topic of this paper. After a short introduction to the nature of Linked Data, its implementations for the AEC industry and a discussion on rule checking mechanisms, a minimal configuration is set up for retrieving and checking the data with a ruleset based on the Shapes Constraint Language[3] (SHACL) standard.

2 Related Work

2.1 Linked Data

In the introduction, the concept of Linked Data and the Semantic Web was introduced, along with its main data model, namely RDF. An RDF graph can be thought of as basic statements that are coupled together into so-called *triples*, consisting of a *subject*, a *predicate* and an *object*. *Subjects* and *objects* form the nodes of the graph, the *predicate* gives meaning to the edge, pointing from subject to object. To give a Linked Data *resource* a context that is globally identifiable over the web, RDF makes use of Uniform Resource Identifiers (URIs)[4] . URIs form a superclass of the more known Uniform Resource Locator (URL): while a URI *identifies* a resource uniquely, a URL also allows to retrieve it via a web page. To improve readability, it is recommended to make use of *prefixes* when referring to a Linked Data resource. Listing 1 illustrates this concept of linking resources with triples and prefixes, formatted with Turtle notation[5]. The 'inst' prefix defines project-specific instances, thereby illustrating the difference between specific instances (ABOX) and general classification concepts (TBOX).

[2]https://www.w3.org/TR/rdf-primer/, W3C
[3]https://www.w3.org/TR/shacl/, W3C
[4]https://www.w3.org/wiki/URI/, W3C
[5]https://www.w3.org/TR/turtle/, W3C

Listing 1: RDF data in Turtle format. (*a* refers to *rdf:type*; the prefix *inst* refers to specific instances)

```
@prefix bot: <https://w3id.org/bot#>.
@prefix rdf: <http://www.w3.org/1999/02/22-rdf-syntax-ns#> .
@prefix inst: <http://www.example.org/myproject#> .

inst:site1          bot:hasBuilding     inst:building1
inst:building1      bot:hasStorey       inst:storey1;
inst:storey1        bot:hasSpace        space1, space2
```

Domain models that organise definitions such as taxonomies and relations between nodes are called *ontologies* or *vocabularies*[6]. Ontologies enable to deduce implicit information from the data that is present in a certain graph, a process called *inferencing*. For instance, by looking up the predicate *bot:hasStorey* from List. 1 in the Building Topology Ontology (BOT)[7] (Rasmussen et al. (2017)), one can infer that inst:storey1 is an instance of *bot:Storey*. Certain ontologies, such as RDF Schema[8] (RDFS) and the Web Ontology Language[9] (OWL) serve as general means for setting rules and restrictions for other ontologies.

2.2 Linked Building Data

The idea that a web-based approach to data would offer several advantages to the AEC industry, has been put forth multiple times already (Beetz et al. (2005); Pauwels, De Farias, Zhang, Roxin, Beetz, De Roo and Nicolle (2017); Rasmussen et al. (2017)). Specifically, it is expected to be a game changer in terms of interoperability, linking across domains and logical inference and reasoning (Pauwels, Zhang and Lee (2017)). Interoperability is achieved through mappings or implementations of standards into RDF; an important use case is the conversion of the Industry Foundation Classes (IFC) schema into a Linked Data equivalent: ifcOWL[10] (Pauwels and Terkaj (2016)). Furthermore, in the use of the RDF syntax, multiple disciplines can link their knowledge together, in order to achieve a more complete perspective on the available information. Specifically for the AEC industry, this includes domains that are not (sufficiently) integrated in 'classic' BIM environments: heritage data, GIS, Facility Management, circular economy etc. With this in mind, the W3C Linked Building Data Community Group advises the use of small, modular ontologies that are easy to extend and can be coupled with other ontologies in a flexible way. The core LBD ontology is the Building Topology Ontology (BOT), defining the topological structure of a built or unbuilt asset. Other vocabularies can easily be coupled with the BOT core graph of the building (Schneider et al. (2018)). This modularity stands in stark contrast with the ifcOWL ontology: because IFC is such an enormous schema, it is easy to lose oversight and difficult to couple other domains in a flexible way.

As mentioned in Section 2.1, RDF relies on one of the fundamental aspects of the web, namely URIs. This is a fundamentally different approach from identification of concepts via GUIDs or local IDs; it allows to distribute data over the web, referring to this data and retrieving it whenever necessary. It means that graph nodes (whether ontology nodes or instance

[6]https://www.w3.org/standards/semanticweb/ontology/, W3C
[7]https://w3c-lbd-cg.github.io/bot/, Linked Building Data Community Group [8]https://www.w3.org/TR/rdf-schema/, W3C
[9]https://www.w3.org/OWL/, W3C
[10]https://github.com/buildingSMART/ifcOWL, BuildingSMART I

nodes) do not need to be located on the same server, but can be spread around the globe instead. In a building-related context, such distributed systems allow multiple stakeholders to work collaboratively on a building project, while nevertheless remaining the owner of the data they add to the model; a decentralised CDE. As a result, multiple web services that are disconnected from the data itself can be allowed to access the data and retrieve this data from the data stores of different partners. This can be thought of as a Linked Data equivalent of Model Servers such as the BIMserver (Beetz et al. (2010)) or the late BLIS/SABLE initiative (BLIS-project (2002); Kiviniemi et al. (2005)).

2.3 Rule Checking Approaches in AEC

In the current document-based AEC practice, model checking is typically done through mvdXML, a buildingSMART standard (Chipman et al. (2016)). The mvdXML standard defines a way to document the Exchange Requirements for an IFC model, accompanied by a method to validate resulting Model View Definitions (MVDs). The *eXtended Process to Product Modeling* (xPPM) (Lee et al. (2013)) proposes a method to integrate MVDs with the BuildingSMART Information Delivery Manual (IDM) standard, in order to stimulate a practice of reusing checking templates. A general classification of different rule-checking approaches for the AEC industry is given in (Solihin and Eastman (2015)).

While in the current industry, mvdXML focuses on the validation of document-based IFC models, a lot of work has been done to implement checking mechanisms based on Semantic Web technologies in an AEC context (Pauwels, De Farias, Zhang, Roxin, Beetz, De Roo and Nicolle (2017); Pauwels et al. (2011); Zhang et al. (2014)). This research relates to several domains of checking: apart from model consistency checking, a BIM model can be checked for regulation compliance or project-specific rules. The recent bimSPARQL mechanism (Zhang et al. (2018)) streamlines querying information expressed in ifcOWL and reasoning on BIM-related data. It is based on the W3C standard SPIN[11] (SPARQL Inference Notation), the predecessor of SHACL. Going further on this work regarding rule-checking of building models in a Semantic Web environment, one can investigate how such rule checking mechanisms can be applied in a distributed environment.

In the scenario of a decentralised CDE, model checking is slightly more complex than when all information is stored locally, since the checking engine needs to retrieve all information from the different servers. In a traditional object-oriented system, where data is typically stored at a single location, a so-called Closed World Assumption (CWA) is common. In a CWA, it is assumed that all information is present in the system: if information is not present, it is considered false. This stands in contrast with the Open World Assumption (OWA) used in Semantic Web contexts, where new information can be added to the graph at any time and at any web location. Rule checking is more difficult in such open world context, because one can never really 'close the world' and consider a graph 'complete'. This dichotomy between OWA and CWA is also one of the main differences between OWL and SHACL: while OWL restrictions essentially describe inference patterns in an OWA, SHACL covers data validation and constraints and is one of the few Semantic Web technologies that actually involve a CWA (Knublauch (2017)). A combination of the two technologies in different phases of the

[11] https://www.w3.org/Submission/spin-overview/, W3C

checking process can thus be a powerful tandem: in a first phase, OWL inference mechanisms infer implicit statements, while in the next phase 'the world is closed' and the model is validated with SHACL rulesets, called *shapes*.

An example SHACL shape is given in Listing 2. This shape imposes that a complete building structure *must* be present, i.e. a bot:Site instance *must* have at least one instance of bot:Building, which in turn needs at least one bot:Storey that contains a minimum of one bot:Space. Also, the bot:Site must link to a geolocation, using the *bot:hasZeroPoint* predicate. In the BOT ontology, this property refers to a wsg84:Point with latitude (*wgs84:lat*) and longitude (*wgs84:long*). The SHACL shape in Listing 2 will be used for the use case discussed in Section 3.

Listing 2: SHACL shape for building topology description and georeference.

```
@prefix sh: <http://www.w3.org/ns/shacl#> .
@prefix b4r: <https://www.bim4ren.org/shapes#> .
@prefix bot: <https://w3id.org/bot#>.
b4r:SiteShape       a               sh:NodeShape;
                    sh:targetClass  bot:Site;
                    sh:property     [sh:path        bot:hasBuilding;
                                     sh:minCount    1;
                                     sh:message     "A Site must have at least one Building";],
                                    [sh:path        bot:hasZeroPoint;
                                     sh:minCount    1;
                                     sh:maxCount    1;
                                     sh:message     "A Site must have exactly one zero Point"; ].
b4r:BuildingShape   a               sh:NodeShape ;
                    sh:targetClass  bot:Building;
                    sh:property     [sh:path        bot:hasStorey;
                                     sh:minCount    1;
                                     sh:message     "A Building must have at least one Storey"; ].
b4r:StoreyShape     a               sh:NodeShape;
                    sh:targetClass  bot:Storey;
                    sh:property     [sh:path        bot:hasSpace;
                                     sh:minCount    1;
                    sh:message "A Storey must have at least one Space"; ].
```

2.4 The Solid Ecosystem

In general, a lot of work has already been done regarding Semantic Web. However, a gap seems to persist between available technologies on the one side and implementation on the other (Verborgh (2018)). The recent Solid initiative[12] aims at lowering this threshold, it provides specifications for developing Social Linked Data applications, and an infrastructure that preconfigures these specifications. In this way, a developer can focus on the functionality of the app instead of spending precious time at, for instance, Linked Data authentication.

As indicated in Section 2.2, disconnecting applications from the data they use allows to configure a network of tools that can connect to the distributed data stores (pods in Solid terminology). This concept of decentralisation and personal data pods lies at the core of Solid. Although its primary use case lies in Social Web applications, Solid also lends itself quite well for the building industry, considering the many stakeholders and tasks present in the BLC.

[12]https://inrupt.com/solid, Inrupt Inc.

Thus, in a similar way, modular chains of Solid-compatible BIM bots (van Berlo (n.d.)) can be established for specific activities in the Building Life Cycle, in a flexible and automated approach to counter (non-)typical challenges in building projects.

2.5 Case Study: Checking Distributed Building Models

As a case study, we configure a React app that complies with the Solid specs, in order to deal with distributed datasets from multiple stakeholders. The basis for the app is generated with the Solid React Generator. It is a part of the ConSolid app, which aims to test the use of Solid for construction purposes (Werbrouck et al. (2019)).

At the moment of writing, this app allows to configure a building project with the use of BOT, to set different stakeholders with the use of their WebID (a method to identify people over the web using URLs) and to link the project documentation from different stakeholders (unstable). The checking functionality discussed in this section uses this data to check the model. Currently, this checking procedure takes the following workflow:

- Look up the stakeholders of the project;
- Fetch the project data (after authorisation) and combine it into a single graph;
- Read the SHACL shape URL from the user input;
- Check the building graph against the SHACL shape;

2.6 Validation

We configure one pod[13] that contains a BOT representation of the building topology and a graph that contains the stakeholders and their role in the project, and another pod[14] that contains the geolocation of the project, linked to the bot:Site instance in the other pod. This (minimal) distributed graph will be validated against the SHACL shape in Listing 2.

For this example, we consider a scenario where one bot:Storey instance does not relate to any instance of bot:Space, and where the surveyor has not set the geolocation yet.

When the manager authenticates and goes to the 'Validation' tab, a URL to a SHACL shape can be set. For a flexible reuse of shapes, it is recommended to make it available to anyone. In this case, the shape is located at a public location in the manager pod, but it could as well be stored on any other server (e.g. Github). The resulting report is depicted in Fig. 1.

Figure 1 also indicates that a certain constraint (*sh:NodeShape*) can be linked to specific stakeholders, so they can be notified if the constraint is not satisfied. This may be a default mapping or can be overridden in the project. In this example, the first error is the responsibility of the project surveyor, the second one of the architect. After these stakeholders enriched the graphs with the necessary data, a pass report is generated.

[13] https://jwerbrouck.solid.community/public/myProjects/BuildingProject1/
[14] https://jwerbrouck.inrupt.net/public/myProjects/BuildingProject1/

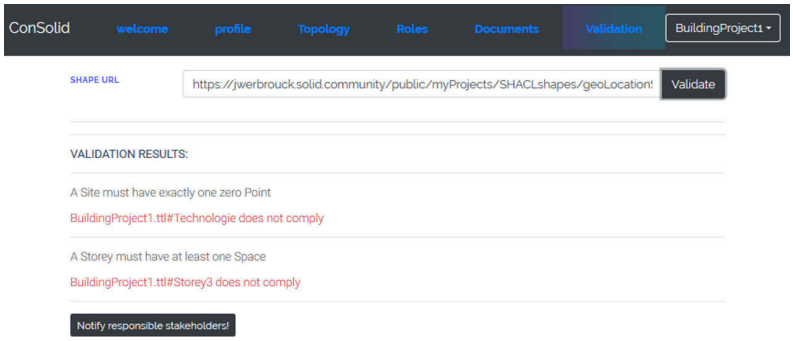


Abbildung 1: Validation of the model ("BuildingProject1") against a given SHACL shape - FAIL

In this section, a very basic scenario was sketched in which a distributed building model, with information owned by diverse stakeholders, can be checked against a ruleset that is online available. When stakeholders can be identified and their responsibilities formalised, the web authentication standards used in Solid can provide a way to grant fine-grained access of project data to certain people involved in the project, retrieve this data and perform different checks on the model.

3 Conclusion and Future Work

This paper demonstrated the use of the W3C standard SHACL applied to distributed Linked Building Data for building model checking. After a brief introduction to Linked Data, in general and applied to the AEC industry, a possible approach of using SHACL with the Solid framework was suggested. However, the following notes can be made, to be addressed in future research:

- What are the limits of SHACL validation? Can we configure shapes that check building regulations, project ambitions or geometric constraints (e.g. accessibility)? Can we make use of bimSPARQL?
- How to integrate efficient OWL reasoning, prior to SHACL validation?
- Does the system still perform well enough with large, real-world datasets?
- Is real-time cooperation on such models possible?
- Is there a way to present such interface to non-Linked Data experts?

The checking application is part of the 'ConSolid' app in development. In a more advanced scenario, the different modules of this app are not as interlinked as in this proof-of-concept. Rather, they are set up as middleware APIs that can be used for multiple front-end applications. This will result in a flexible (re)use of modules and enable the configuration of different tool chains, each one dedicated to a particular use case. Validation technologies may be essential in such chains, to validate if the input data (coming from unknown web locations) can be used for this particular method.

This paper featured only a very lightweight model and SHACL shape, so upscaling this to

a more realistic building context is necessary. However, we illustrated some basic features, and opportunities for further research can be identified: the combination of decentralisation, distributed building data, modular ontologies and modular applications could be the basis for an ecosystem for managing the diverse facets of the BLC, with Linked Building Data.

4 Acknowledgements

The authors would like to acknowledge the support by both the BIM4REN project, which has received funding from the European Union's Horizon 2020 Research and Innovation Program under grant agreement No 820773, and the UGent Special Research Fund (BOF).

Literatur

Beetz, J., van Berlo, L., de Laat, R. and van den Helm, P. (2010), BIMserver. org–An open source IFC model server, *in* 'Proceedings of the CIP W78 conference', p. 8.

Beetz, J., Van Leeuwen, J. P. and De Vries, B. (2005), An Ontology Web Language Notation of the Industry Foundation Classes, *in* 'Proceedings of the 22nd CIB W78 Conference on Information Technology in Construction', Vol. 2006, Technical University of Dresden, p. 670.

Berners-Lee, T., Hendler, J. and Lassila, O. (2001), 'The Semantic Web', *Scientific american* **284**(5), 28–37.

Berners-Lee, T. and Verborgh, R. (2018), 'Solid: Linked Data for personal data management'. **URL:** *https://rubenverborgh.github.io/Solid-DeSemWeb-2018/#*

BLIS-project (2002), 'BLIS Building Lifecycle Interoperable Software'. **URL:** *http://www.blis-project.org/index2.html*

Chipman, T., Liebich, T. and Weise, M. (2016), 'mvdXML - specification of a standardized format to define and exchange Model View Definitions with Exchange Requirements and Validation Rules'.

Kiviniemi, A., Fischer, M. and Bazjanac, V. (2005), Integration of multiple product models: Ifc model servers as a potential solution, *in* 'Proc. of the 22nd CIB-W78 Conference on Information Technology in Construction'.

Knublauch, H. (2017), 'SHACL and OWL Compared'. **URL:** *https://spinrdf.org/shacl-and-owl.html*

Lee, G., Park, Y. H. and Ham, S. (2013), 'Extended Process to Product Modeling (xPPM) for integrated and seamless IDM and MVD development', *Advanced engineering informatics* **27**(4), 636–651.

Mansour, E., Sambra, A. V., Hawke, S., Zereba, M., Capadisli, S., Ghanem, A., Aboulnaga, A. and Berners-Lee, T. (2016), A Demonstration of the Solid Platform for Social Web Applications, *in* 'Proceedings of the 25th International Conference Companion on World Wide Web', International World Wide Web Conferences Steering Committee, pp. 223–226.

Pauwels, P., De Farias, T. M., Zhang, C., Roxin, A., Beetz, J., De Roo, J. and Nicolle, C. (2017), 'A performance benchmark over semantic rule checking approaches in construction industry', *Advanced Engineering Informatics* **33**, 68–88.

Pauwels, P. and Terkaj, W. (2016), 'EXPRESS to OWL for Construction Industry: Towards a recommendable and usable ifcOWL Ontology', *Automation in Construction* **63**, 100–133.

Pauwels, P., Van Deursen, D., Verstraeten, R., De Roo, J., De Meyer, R., Van de Walle, R. and Van Campenhout, J. (2011), 'A semantic rule checking environment for building performance checking', *Automation in Construction* **20**(5), 506–518.

Pauwels, P., Zhang, S. and Lee, Y.-C. (2017), 'Semantic Web Technologies in AEC Industry: A Literature Overview', *Automation in Construction* **73**, 145–165.

Rasmussen, M., Pauwels, P., Lefrançois, M., Schneider, G. F., Hviid, C. and Karlshøj, J. (2017), Recent Changes in the Building Topology Ontology, *in* 'LDAC2017-5th Linked Data in Architecture and Construction Workshop'.

Schneider, G. F., Rasmussen, M. H., Bonsma, P., Oraskari, J. and Pauwels, P. (2018), Linked building data for modular building information modelling of a smart home, *in* '11th European Conference on Product and Process Modelling', CRC Press, pp. 407–414.

Solihin, W. and Eastman, C. (2015), 'Classification of rules for automated BIM rule checking development', *Automation in construction* **53**, 69–82.

van Berlo, L. (n.d.), 'bimbots.org - Automate your work with BIM Bots'.
URL: *http://bimbots.org*

Verborgh, R. (2018), 'Designing a Linked Data Developer Experience'.
URL: *https://ruben.verborgh.org/blog/2018/12/28/designing-a-linked-data-developer-experience/*

Werbrouck, J., Pauwels, P., Beetz, J. and van Berlo, L. (2019), Towards a decentralised common data environment using linked building data and the solid ecosystem, Newcastle, UK.

Zhang, C., Beetz, J. and de Vries, B. (2014), An ontological approach for semantic validation of IFC models, *in* 'Proceedings of the 21st International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE)'.

Zhang, C., Beetz, J. and de Vries, B. (2018), 'BimSPARQL: Domain-specific functional SPARQL extensions for querying RDF building data', *Semantic Web* (Preprint), 1–27.

KI-Methoden für die automatische Anreicherung von räumlich-semantischen Tatortmodellen

Steffen Franz[1], Timo Bittner[2], Robert Irmler[1], and Christian Eller[2]

[1] Kriminaltechnisches Institut · Bundeskriminalamt · Äppelallee 45 · 65203 Wiesbaden · E-Mail: KT24-INSITU@bka.bund.de
[2] Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt · Franziska-Braun-Str. 7 · 64287 Darmstadt · E-Mail: insitu@iib.tu-darmstadt.de

Das Sicherheitsforschungsprojekt INSITU beschäftigt sich mit der Optimierung der Strafverfolgung mit Hilfe einer Mobilcomputer-basierten Vor-Ort-Beschreibung von Tatorten. Um eine Beschleunigung des zeitintensiven Prozesses der Dokumentation aller Informationen und Zusammenhänge zu erreichen, wird in diesem Beitrag demonstriert, wie ein Mobilcomputer in die Lage versetzt werden kann, Objekte und deren räumlich-semantische Beziehungen automatisiert zu erfassen. Hierbei werden Augmented-Reality-Technologien mit maschinellen Lernverfahren fusioniert und auf einem Mobilcomputer in Echtzeit zur Anwendung gebracht. Mittels AR-Technologien verortet sich das Gerät im Raum, verfolgt Positionsänderungen und erzeugt kontinuierlich Bilddaten, welche parallel über Algorithmen für die Objektdetektion mit semantischen Informationen angereichert werden. Die so generierten Daten werden anschließend mit den Tracking-Informationen vereinigt, wodurch das räumlich-semantische Tatortmodell automatisiert um Objektinformationen erweitert werden kann.

Keywords: Tatortdokumentation, Maschinelle Lernmethoden, Augmented Reality, Bildverarbeitung

1 Einleitung

Unabhängig davon, ob der Baufortschritt eines Gebäudes, der Zustand einer Immobilie oder ein Tatort dokumentiert werden sollen, es fallen vor Ort eine Vielzahl von Informationen an, die in Beziehung zueinander erfasst werden müssen. Zu den Dokumentationsinformationen gehören neben der eigentlichen Beschreibung des Objekts auch dessen Kontext (z.B. Lage, Aufnahmezeitpunkt und erfassende Person). Dabei werden die zu dokumentierenden Informationen oftmals mit unterschiedlichen Geräten, digital und analog aufgenommen. Eine Zusammenführung erfolgt in der Regel erst im Anschluss an die Aufnahme in mühsamer Handarbeit. Das Sicherheitsforschungsprojekt INSITU beschäftigt sich daher mit der Optimierung der Strafverfolgung durch eine Mobilcomputer-basierte Vor-Ort-Beschreibung von Tatorten. Ein Forschungsziel ist dabei, den Nutzer mit Hilfe handelsüblicher, preiswerter Geräte bei der Dokumentation durch Automatisierung von Aufgaben zu entlasten. Insbesondere die zuvor angesprochenen Kontextinformationen der Dokumentation lassen sich mit Hilfe eines Mobilcomputers gut (teil-)automatisiert erfassen. Dieser Beitrag soll demonstrieren, wie unter Verwendung aktueller Forschungen im Bereich der KI-Methoden eine weitestgehend maschinelle Unterstützung einer Dokumentation gestaltet werden kann. Hierfür wird ein Verfahren vorgestellt, welches eine automatische Objekterkennung, inklusive räumlicher Verortung in einem dreidimensionalen Modell, in Echtzeit vor Ort ermöglicht.

2 Stand der Technik

Zur Dokumentation geometrischer Daten kommen heute typischerweise stationäre und mobile Laserscanner sowie photogrammetrische Verfahren zum Einsatz. Die so aufgezeichneteten Punktwolken bilden die dokumentierte Umgebung lediglich geometrisch ab. Sie geben keine beschreibende Auskunft über aufgezeichnete Objekte oder deren Zusammenhänge. Für eine automatisierte, maschinelle Verarbeitung der Daten sind diese Informationen jedoch notwendig. Daher gibt es eine Vielzahl an Forschungen, die sich mit der (teil-)automatischen Extraktion von semantischen Informationen aus Punktwolkendaten beschäftigen (Czerniawski et al., 2016), (Beetz et al., 2016), (Qi et al., 2019). Gemein haben diese Ansätze, dass neben dem Einsatz von Spezialhardware zwischen Aufnahme und Analyse differenziert wird. Die semantisch angereicherten Informationen stehen somit nicht sofort vor Ort zur weiteren Verwendung zur Verfügung. Die simultane Aufnahme und Prozessierung der Informationen vor Ort, in Echtzeit sowie auf einem mobilen Endgerät demonstrieren Wald et al. (2018) und Franz et al. (2018). Es kommen dabei allerdings ebenfalls spezielle Mobilgeräte mit einer TOF-Kamera zum Einsatz.
Eine Voraussetzung zur geometrischen Erfassung der Umgebung mit Mobilgeräten ist, dass diese sich im dreidimensionalen Raum lokalisieren und ihre Positionsveränderung verfolgen können (Simultaneous Localization and Mapping). Im Bereich der Konsumerhardware existieren hierfür Augmented Reality (AR) Softwarebibliotheken. Zu den am weitesten verbreiteden zählen Google ARCore (Google, 2019*a*) und Apple ARKit (Apple, 2019). Beide Bibliotheken ermöglichen zusätzlich die Wiedererkennung von zweidimensionalen Bilddaten, ARKit ist zudem seit Version 2 in der Lage dreidimensionale Gegenstände wiederzuerkennen. In beiden Fällen müssen die zu erkennenden Objekte dem System vorher angelernt werden. Das System ist im Anschluss dann in der Lage genau diese wiederzufinden. Ähnliche Objekte, die sich beispielsweise in Farbe oder Form unterscheiden, werden nicht mehr erkannt. In unkontrollierten Umgebung, wie beispielsweise an Tatorten, ist es nicht möglich diese Objekte zunächst für die Wiedererkennung durch das System anzulernen.
Eine allgmeine Objekterkennung ist jedoch in Bilddaten mit Hilfe künstlicher neuronaler Netze, insbesondere Convolutional Neural Networks (CNN), möglich. Moderne Objektdetektoren - wie Faster R-CNN (Ren et al., 2017), R-FCN (Dai et al., 2016), SSD (Liu et al., 2016) und YOLO (Redmon et al., 2016) - basieren auf diesen Netzwerken. Sie sind effizient und schnell genug, um auch auf mobilen Geräten ausgeführt werden zu können. Zhang et al. (2018) und Liu et al. (2019) entwickelten cloudbasierte System für die automatische Detektion und Verortung von Objekten. Um die Schnelligkeit zu erhöhen und Aussagen in Echtzeit treffen zu können, wurde die GPU eines externen Servers genutzt und Ergebnisse an das mobile Endgerät gesendet, während dies weiter die Position verfolgt und Daten übermittelt. Objekte werden auf diese Weise beschriftet und mit geringer Latenz auf dem mobilen Endgerät angezeigt. Voraussetzung für diese Anwendung ist die sichere und performante Anbindung an die Cloud. Eine Lösung zur allgemeinen Objekterkennung und Verortung, welche autark auf einem handelsüblichen Mobilgerät ohne Anbindung an eine Cloud und spezielle Sensoren auskommt, existiert nicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Verfahren entworfen dies zu ermöglichen.

3 Konzept

Das dem Forschungsprojekt INSITU zu Grunde liegende digitale Tatortmodell zeichnet sich durch eine räumlich-semantische Beschreibung aller Elemente eines Tatort aus. Dies bedeutet, dass Objekte zusätzlich zu bezeichnenden Merkmalen auch über eine Koordinate verfügen, welche die Lage des Objekts in einem lokalen dreidimensionalen kartesischen Koordinatensystem eindeutig beschreibt. Damit ein Computer in die Lage versetzt werden kann, diese Informationen automatisiert aus Bilddaten zu erfassen, muss er folgende zwei Kernprobleme lösen:

1. **Objekterkennung:** Um welches Objekt handelt es sich im Bild?
2. **Positionsbestimmung:** Wo befindet sich das Objekt in Relation zum lokalen Koordinatensystem des Tatortmodells?

Im Rahmen des Forschungsprojekts INSITU müssen diese Probleme vor Ort, während der Bildaufnahme, in Echtzeit auf einem Smartphone oder Tablet gelöst werden. Dies ist notwendig, da die extrahierten Informationen sofort dem Benutzer zur weiteren Verwertung zur Verfügung stehen sollen. Zur Lösung des ersten Problems, der Objekterkennung, wurden in den vergangen Jahren eine Vielzahl von Methoden im Bereich des maschinellen Lernens entwickelt. Zu den aktuell gängigsten Deep Learning Ansätzen gehören: Region Proposals (R-CNN, Fast R-CNN, Faster R-CNN), Single Shot MultiBox Detector (SSD) und You Only Look Once (YOLO). Diese verwenden ein künstliches neuronales Netz, dass zuvor mit einer großen Menge an Bilddaten für die Detektion bestimmter Objekte trainiert wurde. Zusätzlich zur Erkennung des Objekts geben diese Verfahren die Position des Objekts im Bild an und treffen eine Aussage darüber, wie sicher sie sich bei einem detektierten Objekt sind. Die Position wird durch eine Bounding Box gekennzeichnet, deren Koordinaten in Bezug auf das untersuchte Bild angegeben werden (siehe Abbildung 1 a)). Um die zweite Fragestellung beantworten zu können, müssen Tiefeninformationen aus dem Bild gewonnen werden. Dies ist mit zusätzlichen Sensoren (z.B. TOF-Kamera, Stereokamera) möglich, erfordert jedoch Spezialhardware. Dank der jüngsten Entwicklungen im Bereich der Augmented-Reality-Technologien stehen allerdings auch robuste Algorithmen zur Verfügung, die eine Positionsbestimmung und Kartierung der Umgebung auf Basis der Inertialsensoren in Kombination mit der Kamera eines Smartphones ermöglichen. Zu nennen sind hier Visual Inertial Odometry (VIO) sowie Simultaneous Localization and Mapping (SLAM). Die Verfolgung der Position wird dabei durch markante Stellen (“feature points”) im Bild gestützt. Aufgrund der Verfolgung dieser Punkte über mehrere direkt aufeinander folgende Bilder hinweg, können diese zur Bestimmung von Tiefeninformationen verwendet werden. In Abbildung 1 b) werden die detektierten “Feature Points” visualisiert. Durch die simultane Anwendung der beiden KI-Methoden ist ein Computer in der Lage, automatisch Objekte in einem Live-Kamerafeed vor Ort zu erkennen und zu verorten. Die Idee ist, die Ansammlung von “Feature Points” wie eine dünnbesetzte Punktwolke zu betrachten. Punkte, die im aktuellen Bild vorhanden sind, werden in den zweidimensionalen Objektraum des Bildes transformiert. Fallen sie dort in den Detektionsbereich (Bounding Box) eines Objektes, werden sie mit der Bezeichnung des Objekts gelabelt.

(a) (b)

Abbildung 1: Maschinelle Auswertemöglichkeiten von Bilddaten: a) Objekterkennung; b) Feature Points

Bewegt man das Gerät durch den Raum werden Objekte aus unterschiedlichen Winkeln detektiert. Punkte, die aus mehreren Blinkwinkeln mit dem gleichen Objekt gelabelt wurden, können mit einer hohen Sicherheit als zutreffende Positionsangabe für das Objekt gewertet werden. Nach Abschluss des Scans wird als geometrische Repräsentation des Objekts die Bounding Box um alle zum Objekt gehörenden Punkte gewertet. Auf diese Weise wird das räumlich-semantische Tatortmodell mit Hilfe von KI-Methoden automatisch angereichert. Das nächste Kapitel erläutert die Umsetzung.

4 Umsetzung

Zur Validierung des Konzepts wurde eine Android-Applikation entwickelt. Im Folgenden wird zunächst auf die wesentlichen Komponenten eingegangen, im Anschluss wird das entwickelte Verfahren zur automatischen Anreicherung des räumlich-semantischen Tatortmodells vorgestellt.

Plattform: Die App ist lauffähig auf allen Smartphones und Tablets, die mindestens Android SDK Version 26 (Android 8.0 Oreo) und Google ARCore unterstützen. In der vorliegenden Arbeit wurden ein Samsung Galaxy S4 Tablet (Android 8.1) sowie ein Google Pixel 2 (Android 9.0) verwendet.

Objekterkennung: Für die Objekterkennung wird in der vorliegenden Arbeit Tensorflow Lite in der Version 1.13.1 eingesetzt. Die Detektion wird durch ein von Google bereitgestelltes quantisiertes MobileNet-SSD-Modell (Google, 2019*b*) durchgeführt, welches mit dem COCO-Bilderdatenset (Lin et al., 2014) trainiert wurde und 80 Objekte aus dem alltäglichen Gebrauch differenzieren kann (z.B. Tisch, Laptop, Tasse). **Positionsbestimmung:** Zur Bestimmung sowohl der Lage des Geräts im Raum als auch zur Tiefenmessung wird Google ARCore (Google, 2019*a*) in der Version 1.9 verwendet. Das Gerät ist dadurch fähig seine Position und Orientierung autark zu bestimmen. Es wird keine externe Infrastruktur benötigt, lediglich ausreichend gute Lichtverhältnisse. Die zur Positionsbestimmung verwendeten "Feature Points" erhalten während einer Session eine eindeutige ID. Dies ermöglicht die Wiedererkennung von Punkten bis zur Beendigung der App.

4.1 Automatische Anreicherung eines räumlich-semantischen Tatortmodells

Zunächst muss das System lokalisiert werden. Dies geschieht mittels Scan eines Markers, welcher am Einsatzort angebracht wird. Dieser stellt den Ursprung des Koordinatensystems dar. Koordinaten, welche sich auf diesen Ursprung beziehen werden im Folgenden als Weltkoordinaten bezeichnet. Nach erfolgreicher Lokalisierung verfolgt das System die eigene Lageänderung und verarbeitet die durch die Hauptkamera des Geräts aufgenommen Bilddaten. Der gesamte Prozess ist in Abbildung 2 dargestellt.

Frame aufzeichnen: Solange das Tracking der Lageänderung gültige Werte liefert, werden die dafür verwendeten Frames (Bildgröße von 640 x 480 Pixel) aufgezeichnet und analysiert. Der Algorithmus verarbeitet die Frames sequentiell und ignoriert neu eintreffende Frames solange sich ein Frame in der Verarbeitung befindet. Bevor der Frame zur Objekterkennung weitergebeben wird, werden zusätzlich noch die Position und Orientierung sowie Projektions- und Viewmatrix der Kamera des Frames gespeichert. Weiterhin wird die Summe der "Feature Points" als lokale Punktwolke des Frames gesichert.

Objekt(e) detektieren: Im nächsten Schritt werden Objekte im aktuellen Frame mit Hilfe des künstlichen neuronalen Netzes detektiert. Wurde mindestens ein Objekt gefunden, wird die Liste der Objekte inklusive ihrer Positionen im Frame (Bounding Box) gespeichert und die Analyse der Punktwolke gestartet.

Transformation auf 2D-Bildkoordinaten: Eingangs wird geprüft, ob sich die Punkte innerhalb des Sichtfeldes der Kamera und in einem Maximalabstand von 2m zum Gerät befinden. Der Maximalabstand wurde gewählt, da mit zunehmender Entfernung die Messungenauigkeit zunimmt. Erfüllt ein Punkt nicht diese Randbedingungen, wird er als Ausreißer betrachtet und verworfen. Danach folgt die Vorbereitung auf den Abgleich der erkannten Objekte mit der Punktwolke. Hierfür müssen die Punkte zunächst aus ihrem dreidimensionalen Raum auf die 2D-Bildkoordinaten des Frames transformiert werden.

Punkt labeln: Der Labelingprozess beinhaltet die Prüfung, ob ein Punkt der Punktwolke innerhalb einer Bounding Box eines Objekts liegt. Ist dies der Fall, wird der Punkt mit der Bezeichnung des Objekts annotiert und in einer Liste gespeichert.

Transformation auf Weltkoordinaten: Eine Eigenschaft der ARCore-Bibliothek ist, dass jede Punktwolke in Bezug auf den aktuellen Frame registriert ist. Dies bedeutet, dass die Punkte auf Weltkoordinaten transformiert werden müssen. Ist dies geschehen, werden sie in einer Liste gespeichert und ein Zähler inkrementiert, sofern für einen bereits vorhandenen Punkt das gleiche Label erneut erkannt wurde. Ist das Gegenteil der Fall, wird der Zähler dekrementiert. **Objekt dokumentieren:** Wurde ein Punkt mehrfach mit dem gleichen Label registriert, ist die Wahrscheinlichkeit hoch, dass an dieser Position das entsprechende Objekt erkannt wurde. Die Information wird in einer Liste gespeichert und sofern das Tracking noch aktiv ist, beginnt der Ablauf von Vorne mit einem neuen Frame.

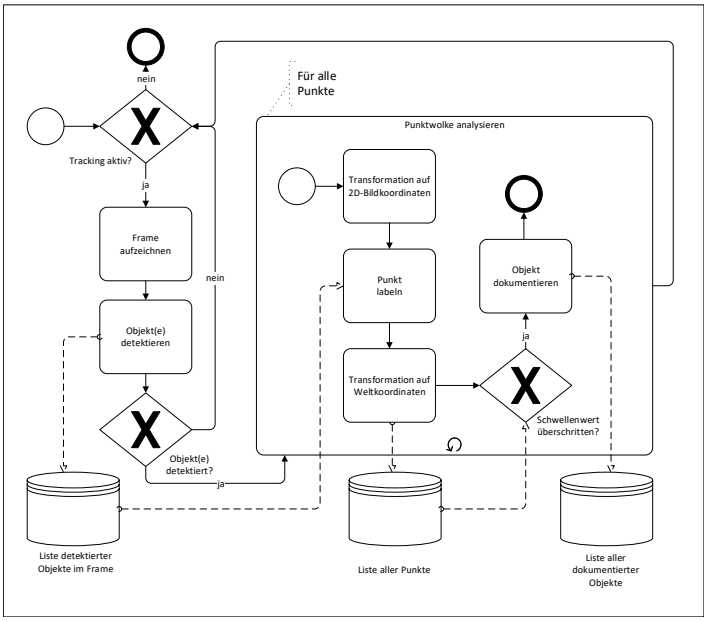


Abbildung 2: Prozessmodell des entwickelten Verfahrens

4.2 Testszenario

Zur Demonstration des Ansatzes wurde ein Raum gescannt, der über folgende detektierbaren Objekte verfügt: Stuhl, Tisch, TV, Couch, Flasche, Laptop, Zimmerpflanze, Fernbedienung und Computermaus. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Anzahl der Objekte. Weiterhin gibt die Spalte “Detektiert” Auskunft darüber, wieviele Objekte des jeweiligen Typs erkannt wurden. Die Spalte “Position” gibt an, wieviele Objekte an der richtigen Position (Lagegenauigkeit +/- 10cm) detektiert wurden. Die Farbangaben in Spalte fünf korrespondieren mit den Farben in Abbildung 3 Das Scannen des Raums dauerte ca. 1 Minute. Abbildung 3 a) visualisiert die dünnbesetzte Punktwolke, die im Rahmen der Positionsverfolgung durch ARCore generiert wurde. Mittels Objekterkennung gelabelte Punkte werden farblich differenziert nach Objekttyp dargestellt. Grafik 3 b) veranschaulicht das Ergebnis im Kontext einer Mesh-Darstellung des Raums. Das Mesh wurde mit einem Asus Zenfone AR unter Verwendung der Google-Tango-Technologie generiert.

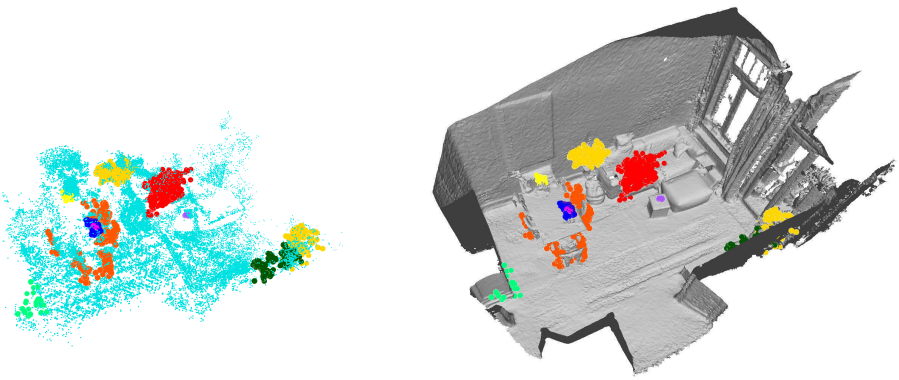
Tabelle 1: Auswertung Testszenario

Objekt	Anzahl	Detektiert	Position	Farbe
Stuhl	5	4	4	orange
Tisch	1	0	0	braun
TV	1	1	1	dunkelgrün
Couch	1	1	1	rot
Flasche	4	3	3	hellgelb

wird auf der nächsten Seite fortgesetzt

Tabelle 1: Auswertung Testszenario

Objekt	Anzahl	Detektiert	Position	Farbe
Laptop	1	1	1	blau
Zimmerpflanze	2	2	2	dunkelgelb
Computermaus	1	1	0	pink
Schrank	1	0	0	hellrot
Kühlschrank	0	1	0	hellgrün
Fernbedienung	2	2	2	lila



(a) (b)

Abbildung 3: a) gelabelte, dünnbesetzte Punktwolke der Positionsbestimmung nach Objekterkennung, b) Überblendung des Ergebnisses des konzipierten Verfahrens mit einem Mesh des Raums

5 Fazit und Ausblick

Die durchgeführten Tests haben gezeigt, dass das konzipierte Verfahren technisch realisierbar ist sowie autark auf handelsüblichen Geräten lauffähig ist und somit für (Tatort-)Dokumentationen verwendet werden könnte. Ein Problem, das aktuell einer praktischen Verwertung noch im Wege steht, ist die auftretende Falschklassifizierung von Objekten. Im oben gezeigten Testszenario wurde beispielsweise ein weißer Schrank als Kühlschrank klassifiziert. Auch war der Testraum sehr übersichtlich, für eine Verwendung in der Praxis müssen noch weitere Tests in ungeordneteren Umgebungen durchgeführt werden. Erweitert werden könnte der Ansatz auch dahingehend, dass für ein Verbrechen typische Objekte wie z.B. (Schuss-)Waffen dem neuronalen Netz angelernt werden. Diese Arbeit hat demonstriert, dass mit Hilfe von KI-Methoden Objekte automatisch in Echtzeit mit handelsüblichen Smartphones sowie Tablets autark am Einsatzort detektiert und verortet werden können. Im Rahmen von Tatortdokumentationen entsteht dadurch die Möglichkeit der automatischen Anreicherung eines räumlich-semantischen Tatortmodells. Dies reduziert den Aufwand der manuellen Datenaufnahme für die durchführenden Personen und gestaltet die gesamte Dokumentation effizienter.

Literatur

Apple (2019), 'ARKit | Apple Developer Documentation', https://developer.apple.com/documentation/arkit.

Beetz, J., Blümel, I., Dietze, S., Fetahui, B., Gadiraju, U., Hecher, M., Krijnen, T., Lindlar, M., Tamke, M., Wessel, R. and Yu, R. (2016), Enrichment and Preservation of Architectural Knowledge, *in* '3D Research Challenges in Cultural Heritage II', Lecture Notes in Computer Science, Springer, Cham, pp. 231–255.

Czerniawski, T., Nahangi, M., Haas, C. and Walbridge, S. (2016), 'Pipe spool recognition in cluttered point clouds using a curvature-based shape descriptor', *Automation in Construction* **71**, 346–358.

Dai, J., Li, Y., He, K. and Sun, J. (2016), R-fcn: Object detection via region-based fully convolutional networks.

Franz, S., Irmler, R. and Rüppel, U. (2018), 'Real-time collaborative reconstruction of digital building models with mobile devices', *Advanced Engineering Informatics* **38**, 569–580.

Google (2019*a*), 'Google ARCore', https://developers.google.com/ar/reference/java/.

Google (2019*b*), 'TensorFlow examples', https://github.com/tensorflow/examples.

Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Bourdev, L., Girshick, R., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., Zitnick, C. L. and Dollár, P. (2014), 'Microsoft COCO: Common Objects in Context'.

Liu, L., Li, H. and Gruteser, M. (2019), 'Edge Assisted Real-time Object Detection for Mobile Augmented Reality', p. 16.

Liu, W., Anguelov, D., Erhan, D., Szegedy, C., Reed, S., Fu, C.-Y. and Berg, A. C. (2016), SSD: Single Shot MultiBox Detector.

Qi, C. R., Litany, O., He, K. and Guibas, L. J. (2019), 'Deep Hough Voting for 3D Object Detection in Point Clouds', *arXiv:1904.09664 [cs]* .

Redmon, J., Divvala, S., Girshick, R. and Farhadi, A. (2016), You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection, *in* '2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)', IEEE, Las Vegas, NV, USA, pp. 779–788.

Ren, S., He, K., Girshick, R. and Sun, J. (2017), 'Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks', *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* **39**(6), 1137–1149.

Wald, J., Tateno, K., Sturm, J., Navab, N. and Tombari, F. (2018), 'Real-Time Fully Incremental Scene Understanding on Mobile Platforms', *IEEE Robotics and Automation Letters* **3**(4), 3402–3409.

Zhang, W., Han, B. and Hui, P. (2018), Jaguar: Low Latency Mobile Augmented Reality with Flexible Tracking, *in* '2018 ACM Multimedia Conference on Multimedia Conference - MM '18', ACM Press, Seoul, Republic of Korea, pp. 355–363.

Development of an MVD for checking fire-safety and pedestrian simulation requirements

Jimmy Abualdenien[1], Sina Pfuhl[2] and Alexander Braun[3]

[1]Chair of Computational Modeling and Simulation · Technical University of Munich · Arcistraße 21· 80333 Munich · E-Mail: jimmy.abualdenien@tum.de

[2]Chair of Computational Modeling and Simulation · Technical University of Munich · Arcistraße 21· 80333 Munich · E-Mail: sina.pfuhl@gmx.de

[2]Chair of Computational Modeling and Simulation · Technical University of Munich · Arcistraße 21· 80333 Munich · E-Mail: alex.braun@tum.de

The formal and automatic integration of building information among the different tools is crucial for delivering a seamless exchange of models. The Model View Definition (MVD) mechanism is a standard approach for IFC implementation. An MVD represents a subset of the IFC schema that specifies the requirements and specifications of the exchanged data between the involved software tools. Fire safety and pedestrian simulations are highly connected domains evaluating the developed designs during the different events and scenarios. Hence, the early integration of those domains in the design process can support the decision-making process, reduce the project risks, and avoid a substantial amount of rework. In this paper, the Bavarian building law and the pedestrian simulation requirements are analyzed and mapped to the Industry Foundation Classes (IFC). Additionally, an MVD is developed to facilitate pedestrian simulators to parse and filter IFC building models and to automate checking the correctness and completeness of the exchanged IFC files.

Keywords: Building Information Modeling (BIM), Model View Definition (MVD), Fire safety, Building regulations, Pedestrian simulation

1 Introduction

Failures in fire protection cause enormous damages in the event of a fire and often endanger human lives. Recent examples are the Grenfell Tower fire in London in 2017 or the continuing delays in fire protection at Berlin Airport. If structural or technical fire protection measures are incorrectly implemented, they can also lead to additional damage, such as fire-fighting water damage or the contamination of ventilation systems with smoke gases. Consequently, it is essential to consider fire safety requirements as early as the planning stages.

In Germany, building permits are mandatory for construction projects. To receive a building permit, a fire safety certificate, or a fire safety concept developed by a fire safety engineer is necessary. Fire safety engineers manually create these certificates after, for example, evaluating the measures of escape routes to analyze possible dangers. The requirements given in building codes differ from country to country, rendering complexity and challenges in the automation of code checking and simulation. Code checking requires extensive expertise in the applicable law and a specialized analysis for each particular case; it is time-consuming and error-prone.

Developing a building project requires intensive collaboration between several domain experts. In this kind of collaboration, the information quality, such as compliance with regulations and analysis requirements, is essential for exchanging, coordinating, and integrating the partial designs at the different design stages. As the use-cases of building projects are highly specialized, a Building Information Modeling (BIM) model needs to include numerous additional information to satisfy the use-cases' requirements in proper representations (i.e. types, properties, and names). Hence, a robust mechanism for defining the requirements and automatic checking of the model's completeness and compliance to domain specification is vital for the practical use.

The Industry Foundation Classes (IFC) is a vendor-neutral format for exchanging building information among different BIM-authoring and simulation tools. IFC includes data specifications for the individual building elements and their relationships (Liebich et al. 2013; Borrmann et al. 2018). However, different researchers have identified the inflexibility of providing IFC data from the BIM-authoring tools to support the diverse use-cases during a construction project (Bazjanac 2002; Lee et al. 2013). As a solution for this inflexibility, the Information Delivery Manual (IDM) and the Model View Definition (MVD) approach was proposed by the buildingSMART to provide a common understanding of which information should be present in the export IFC model for a particular use-case (BLIS Consortium - Digital Alchemy 2019; buildingSMART 2019). Through the development of an IDM/MVD, the actual workflow and the required interaction between the different disciplines is explicitly defined.

Checking a building model for compliance with fire safety regulations involves verifying its geometric and semantic information as well as functional requirements, such as safe escape routes. Hence, providing seamless integration with pedestrian simulation tools and automatically checking their requirements is crucial.

In this paper, the building regulations in Bavaria are analyzed and mapped to IFC. At the same time, the requirements for integrating IFC building models into *crowd:it*[1] (a pedestrian simulation tool) are extracted. Finally, together the extracted regulations and simulator requirements are combined in an MVD, which is capable of ensuring the completeness and correctness of the exchanged building models. Figure 1 demonstrates the information flow from the BIM-authoring tool to the pedestrian simulator. First, an IFC file is exported and validated using an mvdXML file. Then the simulator uses the same mvdXML file to filter the IFC building model.

The paper is organized as follows: Section 2 discusses the background and related work of our research. Section 3 provides an overview of the steps follow to extract rules and develop and MVD from the Bavarian law and the used simulator. Finally, Section 4 summarizes our progress hitherto and presents some of the limitations that we have encountered during this research.

[1] https://www.accu-rate.de/

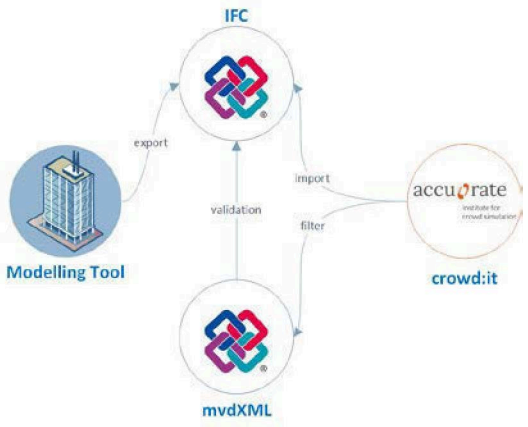


Figure 1: Flow of information from BIM-authoring tools to the pedestrian simulator, demonstrating the usage of the generated mvdXML file for validating and filtering IFC building models.

2 Background & Related work

2.1 Fire-safety Engineering

Typically, fire safety engineers require a minimum set of information from the architect when exchanging construction plans to perform their analysis. Accordingly, when exchanging a BIM model, a set of information needs to present in the model. Fire safety engineers analyze the model comprehensively; if necessary, they require altering the model to incorporate certain fire safety measures to comply with the building codes. These required changes can be concerned with missing information or changes to the developed design. This process is recursive, depending on the size of the project and the integrity of the exchange data.

Various requirements of different building codes place complex demands. In practice, escape routes are manually checked and evaluated as part of fire safety by specialized engineers. This traditional building plan checking and verification process are inefficient and time-consuming. Automated checking offers various benefits; flaws can be allocated within seconds instead of hours, and inconsistencies can be avoided. This could speed up the design process and reduce costs.

In contrast to the compliance check, evacuation models simulate the movement of pedestrians through the building model in the event of an evacuation. This kind of simulations can help architects and engineers to detect flaws in the designs. Mainly, it assists in managing crowd movements and avoids fire-exit flaws.

2.2 Bavarian Building Regulations

Building regulations ensure the quality as well as safety of building projects and differ from country to country. Regulations represent the minimum requirements in which a building must comply within. Model Checking denotes the automated, rule-based verification of the

model for building code requirements. Typically, building codes include fire safety, structural safety, accessibility, technical requirements, and other aspects. A major challenge of compliance checking is the translation of rules into a computer-readable format.

This paper deals with the applicable law in Bavaria, Germany - Bayerische Bauordnung (BayBO) (Bavarian Building Regulations). The BayBO includes the minimum requirements that must be complied with during the whole construction project in 84 Articles. One of the essential parts of the BayBO is the building classes' classification (so-called Gebäudeklassen). The classification consists of five classes where the requirements regarding fire protection differ for each class. The determination of the classes relies on the building's usage, type, height, number of storeys, and the gross floor area. The higher the Building Class, the stricter the BayBO's regulations.

2.3 Pedestrian Simulation

The evacuation of pedestrians securely and in a timely manner is very crucial during unexpected disaster events (Yu et al. 2018). Pedestrian dynamics in emergencies has become increasingly important and got the attention of both researchers and practitioners (Yu et al. 2018). Various attempts have been made to model the behavior of crowds in emergencies for the validation of buildings and public environments in general. In the last decade, a lot of effort was taken to enhance models and simulators.

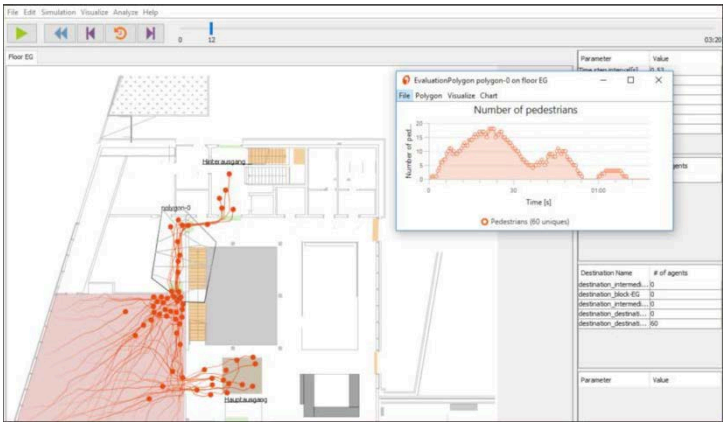


Figure 2: Screenshot of Crowd:it[2], a pedestrian simulation tool.

Figure 2 shows a screenshot of the pedestrian simulator used in this paper, crowd:it. The simulator is capable of analyzing the pedestrian flow and movement patterns, evaluating the building against safety concepts as well as its performance during a particular event or worst-case scenarios. Pedestrian simulators are mainly interested in boundaries, spaces, transport elements, and exits. Besides the elements' geometry, additional information is required, including, the spaces' maximum number of occupants, the stairs number of treads, or riser height…etc. (more details are provided in Section 3).

[2] https://www.accu-rate.de/en/software-crowd-it-en/

3 Requirements analysis and Developing an MVD

The process of developing an MVD involves multiple steps: (1) analyze the Bavarian law and extract rules from the provided regulations, (2) investigate which building information is required by the simulator to generate the scene and perform the analysis, and (3) map the extracted requirements to IFC and generate an mvdXML file.

Figure 3 presents part of the extracted rules from the BayBO regulations for all building classes. The building requirements are mapped to the common property sets defined in IFC. The provided flowchart describes logical checks to identify the requirements a building element needs to fulfill based on its building class. At the same time, it assigns each check with a set of IFC requirements.

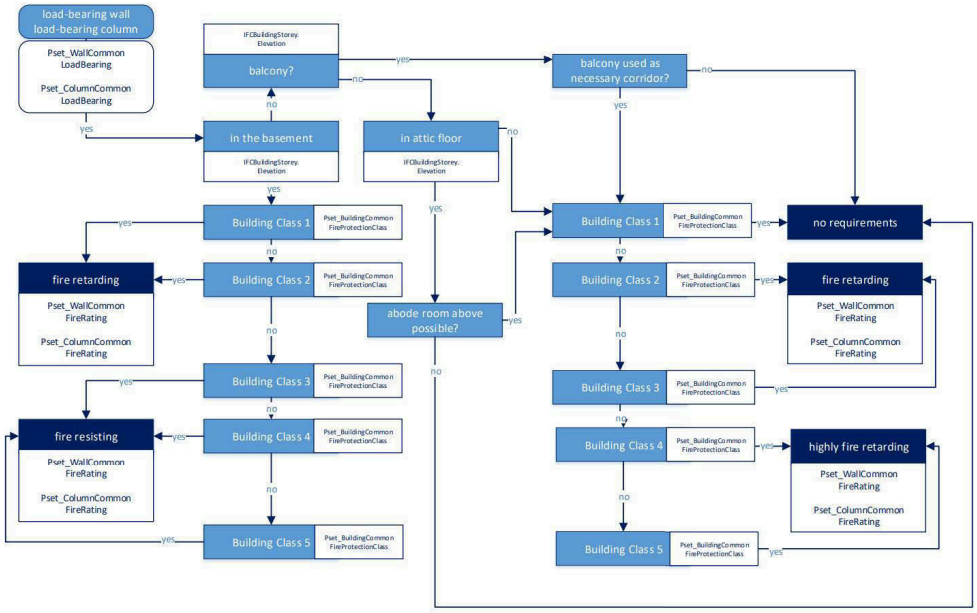


Figure 3: Flowchart mapping the requirements of one example from the BayBO to IFC. This figure shows the requirements of a load-bearing wall or column, depending on the building class. For instance, if a building model belongs to building class 1 and has a load-bearing wall in the basement, this wall needs to be fire retarding. If the same model has a load-bearing wall in any other storey but not in the attic floor with an abode room, a wall has no requirements.

Besides the resultant flowchart, the complete analysis is available online on GitHub[3], the repository includes a table comparing the requirements of each building class as well as a list identifying which of the requirements can be checked by an mvdXML or require a manual check by a specialist.

[3] https://github.com/SinaPf/BIM-based_Fire_Code_Compliance_Checking

[4] http://www.accu-rate.de/

Afterwards, in collaboration with accu;rate4 (an institute for crowd simulation), the required building information for the simulator to parse and import the build-ing IFC model were investigated. Figure 4 provides an overview of the main classes that were investigated and their mappings to the IFC schema.

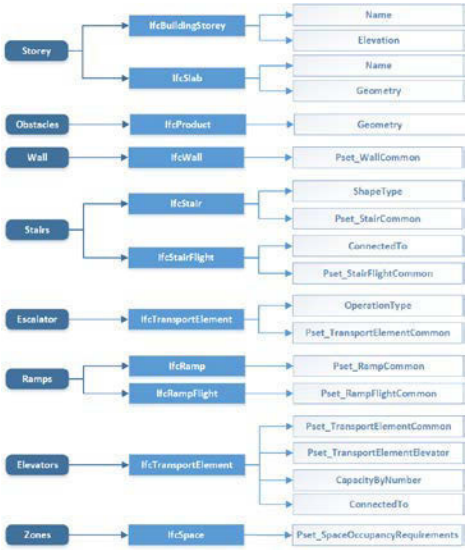


Figure 4: Extracted information required for pedestrian simulation

To support developing MVDs, the buildingSMART provided a free tool called ifcDoc. Using this tool, it is possible to build over the commonly available MVDs[5], including coordination, reference, and design transfer views. Additionally, the ifcDoc is capable of exporting mvdXML, the open standard for developing an MVD (Chipman et al. 2012). The mvdXML can be used to structure the exchange requirements with specific IFC types, entities, and attributes (See et al. 2012). Based on the extracted requirements from the Bavarian law and the pedestrian simulator, an mvdXML file is generated. Figure 5 demonstrates the ifcDoc user interface used to input the extracted requirements from Figure 3 and 4. Each of the required IFC classes is defined and assigned to the required properties.

After the mvdXML file is exported from the ifcDoc, two parties can use it: (1) the software vendors, to filter and understand the exchanged IFC files, (2) the architect or engineer, who is interested in evaluating the performance of the developed designs, to verify the exchanged model's compliance to requirements before handing it to the simulation specialist. The software vendors need to implement a generic algorithm that would understand the links and the relationships between the mvdXML templates and views. In this regard, the buildingSMART has provided a sample implementation that is integrated with their tool, XbimXplorer, and

[5] http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/specification-tools/ifcdoc-tool/ifcdoc-baselines

available online[6]. Figure 6 illustrates using the XbimXplorer for validating the developed mvdXML.

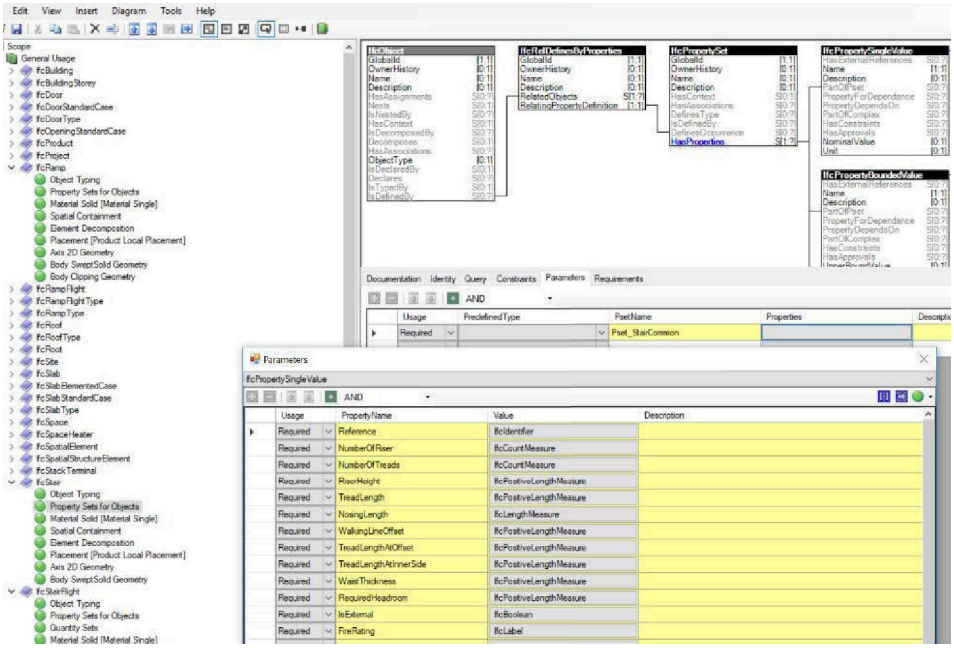


Figure 5: Using the ifcDoc to develop an MVD

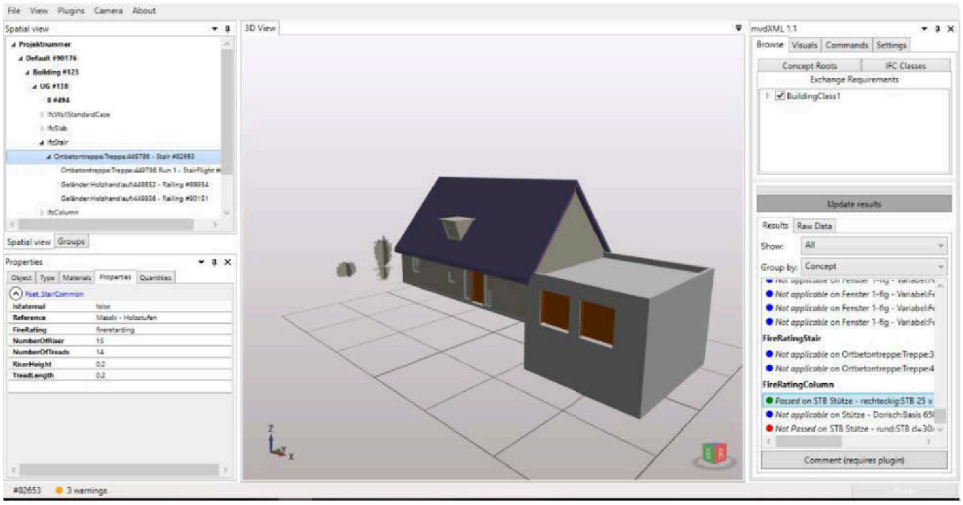


Figure 6: Using the XbimXplorer to validate an IFC against the developed mvdXML

[6] https://github.com/xBimTeam/XbimMvdXML

4 Conclusions

In this paper, the Bavarian law and the requirements for importing an IFC file to a pedestrian simulator were analyzed and mapped to the IFC schema. Based on the results, an MVD is developed to facilitate the pedestrian simulator to parse and filter IFC building models and to automate checking the correctness and completeness of the exchanged IFC files. Translating the BayBO's regulations completely to an MVD is a complex task; many parts of the BayBO are vague (include many exceptions and allow multiple interpretations). Additionally, the common property sets defined in IFC are not capable of covering all of the use-cases included in the BayBO or required by the pedestrian simulator (a comprehensive list of the missing properties is available on the authors GitHub).

5 Acknowledgments

We gratefully acknowledge the support of mFUND – Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur for funding the research project AHEAD.

Literature

Bazjanac, V. (2002): Early lessons from deployment of IFC compatible software. Proc. fourth Euro. conf. product process modelling, Portorož, SLO, pp. 9–16.

BLIS Consortium - Digital Alchemy (2019): IFC Solutions Factory – The Model View Definition. Available online at http://www.blis-project.org/IAI-MVD/reporting/listMVDs_4.php?SRT=Name&MVD=, checked on 6/12/2019.

Borrmann, A.; König, M.; Koch, C.; Beetz, J. (2018): Building Information Modeling Technology Foundations and Industry Practice: Technology Foundations and Industry Practice: Springer.

buildingSMART (2019): Overview of Information Delivery Manuals, 2019. Available online at http://iug.buildingsmart.org/idms/overview, checked on 6/12/2019.

Chipman, T.; Liebich, T.; Weise, M. (2012): mvdXML: Specification of a standardized format to de-fine and exchange Model View Definitions with Exchange Requirements and Validation Rules. In *V* 1, p. 34.

Lee, G.; Park, Y.; Ham, S. (2013): Extended Process to Product Modeling (xPPM) for integrated and seamless IDM and MVD development. In *Advanced engineering informatics* 27 (4), pp. 636–651.

Liebich, T.; Adachi, Y.; Forester, J.; Hyvarinen, J.; Richter, S.; Chipman, T. et al. (2013): Industry Foundation Classes IFC4 official release. In *Online: http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html.*

See, R.; Karlshoej, J.; Daves, D. (2012): An Integrated Process for Delivering IFC Based Data Exchange. In *2012-09-16). http://iug. buildingsmart. org/id ms/methods-and-guides/Integrated _IDM-MVD_ProcessFormats_14. pdf/view.*

Yu, J.; Zhang, C.; Wen, J.; Li, W.; Liu, R.; Xu, H. (2018): Integrating multi-agent evacuation simulation and multi-criteria evaluation for spatial allocation of urban emergency shelters. In *International Journal of Geographical Information Science* 32 (9), pp. 1884–1910.

Improving pedestrian simulations with low power, high range sensor beacons

Felix Eickeler and Jimmy Abualdenien

Chair of Computational Modeling and Simulation · TU Munich · Arcisstraße 21 · 80333 Munich ·
E-Mail: felix.eickeler@tum.de, jimmy.abualdenien@tum.de

In contemporary research of pedestrian dynamics, there are several different approaches to model pedestrian dynamics patterns and wayfinding behavior. As we are interested in further validation of different pedestrian models in different environments, tracking pedestrian movement is essential. In the past multiple methods were used to support our research, counting pedestrians at checkpoints, using cameras and tracking algorithms to get data on choking points of the pedestrian flow. While all these methods worked well, the constraints were significant, and no solution could be used to monitor flow in a robust, durable and concurrent manner. Following recent developments, we use a set of IOT sensor beacons with LoRa (Long Range Wide Area Network) transmitters with range up to 2 km, to collect data autarch from any power source. The data will be collected monitoring and triangulate Wi-Fi signals in the vicinity of the sensors. The data will be compressed and streamed to our datastore. The devices are optimized for energy consumption, thus can operate from small battery or solar cells while providing a life feed for days. Based on this we will inject the data to our simulation kernel to provide calibration and undertake a near-term simulation to identify erratic pedestrian flow. With these models we are able to provide information to the organizer of events giving them the opportunity to proactively redirecting pedestrians and therefore preventing shutdowns and security problems.

Keywords: LoRa, Pedestrian simulation, Localization, WiFi-Positioning

1 Introduction

Predicting pedestrians' behavior and movement patterns are crucial for numerous use-cases, from designing a construction project to fulfill safety measures, to delivering seamless experience for events' attendees and accounting for emergencies while planning for mass events Handel et al. (2014). Pedestrian behavioral models are incorporate various aspects, such as psychology, sociology, systems theory and engineering disciplines by defining a set of rules and state machines logic. In this regard, Schadschneider et al. (2009) introduced a cognitive agent framework called Spice. However, reality is complex to be predicted by rules. Therefore, improving the reliability of the predicted behavioral patterns through additional information is necessary.

A common approach for validating the models of pedestrian dynamics is using video recordings as a ground truth Similarly, Kielar and Borrmann (2018) used video footage that

captured students on a career fair and used that data for validating their models. Although, this approach can help in evaluating the performance of the developed models, it requires a lot of processing, cameras need to be installed, video footage need to be preprocessed and annotated, then the knowledge need to be extracted and compared with the simula-tion results.

In this paper, the authors propose a generic approach for improving the reliability of the available pedestrian dynamics models by incorporating real-time pedestrians' movement patterns. Mainly, by passively tracking pedestrians' movement through capturing WiFi traffic of their mobile devices. To support the approach applicability in the places that lack an internet infrastructure and good connectivity, like outdoor festivals, mountain range events or other locations that are far from the city, the proposed approach employs long range technologies to transmit the captured readings.

Afterwards, the position of the individual pedestrians is inferred using localization techniques. Finally, the localization results are incorporated in the pedestrian simulator to enhance the simulation predictions; providing the opportunity for making real-time responses and decisions in mass events or sensitive crowded areas, like airports and main stations. With this data it is possible to proactively react to the situation and take countermeasures e.g. add temporal chokepoints or in an urban environment control the direction of escalators.

2 Background and Related work

2.1 Direction Finding, Signals & Protocols

Sensing and locating radio transmitters are used since the World War II. Techniques of direc-tion finding (DF) use different systems, such as directional antennas or multiple receivers. With an array of receivers, the transmitter can be located via triangulation or multi-lateration Keen (1947). While some sophisticated systems use the signal runtime to measure the di-stance estimation in short range networks can be done with signal strength alone. For civil use multiple frequencies of the radio spectrum can be used to transmit data and the most important are located in the ISM-(industry, scientific, medical)- and the SRD-Band (Short Range Device). While WiFi uses 2.4 or 5Ghz longer range devices use 433 or 868 Mhz. All true WiFi devices are using protocols defined by the IEEE 802.11 standard which describes how data is transmitted between nodes. This standard defines that a device can probe their surroundings to find available networks. Such probe requests are send out between 55 and 2000 times an hour Freudiger (2015) and also are send when the devices has already joined a network but resumes communication after idling (e.g. unlocking a phone). The metadata of every dataframe contains the receiver's MAC address (byte 4-10) as well as the senders (byte 10-16) IEEE (2016). While devices will spoof their MAC address for non-established probe calls to MAC tracking impossible, this is not the case for connected devices as well as broadcasting responses.

Numerous researchers have investigated approximating mobile devices' position using different techniques, including Angle of Arrival (AOA), Time of Arrival (TOA), and the Recei-

ved Signal Indicator (RSSI) Siva Ram Murthy and Manoj (2004). Ranging techniques allow users to estimate physical distance between the position $X = (x_r, y_r)$ and any reference point $X_i = (x_i, y_i) | i \in N$. The physical distance can be estimated based on the RSSI value. Accordingly, it is possible to calculate the distance from the transmitter by considering the attenuation factor.

This measurement is called Freespace path loss (FSPL) Andersen et al. (1995), it's defined as the loss in signal strength of an electromagnetic wave; as a result of travelling in a direct path from the transmitter to the receiver through free space with no obstacles nearby to cause reflection or diffraction. Mathematically represented as:

$$FSBL(dB) = 10\log_{10}(d) + 20\log_{10}(f) - 27.55$$

Where f is the signal frequency in megahertz and d is the distance from the transmitter in meters. Additional attenuation factors can be applied if the terrain adds extended distortion.

2.2 LoRa & The Things Network

Using the SRD-Band a new technology has emerged for medium range communication. LoRa can be used to transmit data from IOT-devices (internet of things) to other trans-ceivers in range of 2 - 40km depended on the terrain in between. The data rates and pay-load are different for multiple frequencies and are ranging from merely 59 bytes for long-rang (SF-12, 250 bits/s) to 230 bytes for short-range (SF-7 11 kbits /s) applications Sornin et al. (2015). Since all devices share the bandwidth, the transmitting time is capped to 1% by law

The TTN is a community based LoRaWAN (WAN – Wide Area Network) network. Since its boot in 2015 it consists of 8000 public gateways distributed around the world. As a Eu-ropean initiative central Europe has a pool of over 4000 gateways itself making it possible to send data to the "the things network" (TTN) in most locations in Germany using faster SF-Factors. To establish a connection to the TTN device is registered with an application and a device key. The connection uses a MQTT (Message Queuing Telemetry Transport) Protocol instead of TCP/IP to minimize the transmission overhead. From the TTN the MQTT Message can be forwarded to a custom endpoint for further processing.

2.3 Pedestrian Simulation

Understanding pedestrian behavior and movement patterns is essential for improving pedestrians' experience, events' organization, and accounting for emergencies. Agent-based simulators are computational systems that employ theories and models to describe the individual pedestrians' behavior. Using simulators, it is possible to forecast, evaluate, and compare pedestrians' movement patterns and response. Therefore, simulators can help in the design process of a construction project as well as in planning of mass events Biedermann et al. (2015).

Pedestrian dynamics simulations are mainly grouped in two categories, Macroscopic and Microscopic. Macroscopic models focus on describing the accumulated densities, providing an overview of the pedestrians' flow. Whereas, microscopic models describe the individual

pedestrians as discrete objects. Many different models concerned with various use-cases have been studied and evaluated in literature Duives et al. (2013).

2.4 MomenTUM

Research in pedestrian simulation requires an agent-based simulation framework that is extensible in terms of developing new behavioral models. MomenTUM[1] (v2), an open source simulation framework, complies with the best practices of software engineering and based on deep knowledge and practical experience in pedestrian dynamics research Kielar et al. (2016). The most important key features of MomenTUM are:

- It handles models generically, because models are conceptualized as operation providers
- It is extensible by design, which enables model developers to add models by following interface definitions
- It can couple models in almost any modular manner, based on a configurable execu-tion pipeline

This research is based on MomenTUM to incorporate real-time pedestrian behavior as basis for simulations to improve the forecasts reliability.

3 Concept

3.1 System Overview

The system is built around the assumption that most of the pedestrian carry a “always-on” device with them. This assumption is based on the fact that most people do not deactivate their connectivity while leaving their user space or use localization services (which combine GPS & WiFi). Our system (see Fig. 1) consists of multiple sensor nodes (1) that will periodically track the signal strength of WiFi and Bluetooth capable devices in range. The nodes themselves are low power devices that can operate for several days without recharging. The data will be transmitted to the TTN (2) over an available gateway and forwarded to our cloud services. The cloud server (3) provides an API for the MomenTUM (4) pedestrian simulation toolbox to pull in the data directly. This creates new use cases for the Momen-TUM: (1) We are able to validate our simulation model and the pathfinding of pedestrians in new contexts. (2) We enable MomenTUM to run in parallel to the actual pedestrian movement and can identify critical situations before they occur.

[1] `https://github.com/tumcms/MomenTUM`

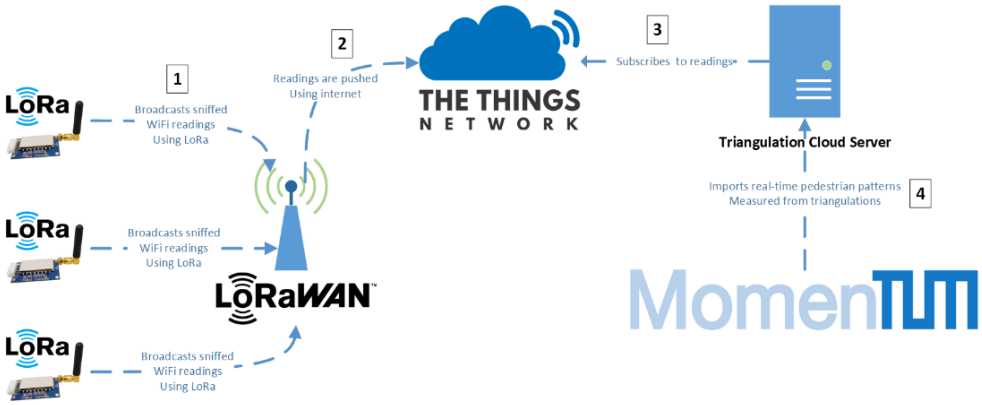


Abbildung 1: System Overview

3.2 Sensor nodes

While designing the sensor nodes 3 major goals were pursuit:

1. We wanted devices that are capable of monitoring WiFi / Bluetooth signals.
2. The nodes should be capable of operating multiple days autonomously
3. The data should be transmitted and stored on the device itself

With these goals in mind we decided on a combined platform of the Espressif esp32 and a Semtech SX-1267 lora chipset. The esp32 (see Fig. 2) is a highly integrated device that features both BT and WiFi modules, two cores running at 80 Mhz and a *Real Time Clock* (RTC) that can measure time and wake up the device after a fixed period. Lora was cho-sen to ensure autonomy and battery life. Additionally, the WiFi controller is free for the sniffing tasks.

Hibernation		**2.5 µA**
Deep Sleep	RTC, ULP	10 µA
Light Sleep	RTC, ULP, Core	0.8 mA
Modem Sleep	RTC, ULP, Core	3-20 mA
Active Listening	All	80 mA

Abbildung 2: Block-Diagram of the ESP32. After https://lastminuteengineers.com/

The nodes are set to operate in a repeating cycle. As a prior step the devices need to synchronize their internal time, and some reference measurements used to take obstructions of the WiFi signal into account. After the nodes are set up at the site of interest and placed into

setup mode the internal clock will start after a specific probe request is send globally. After the frame timer is synced all nodes will proceed to their normal mode of operation (Fig 3).

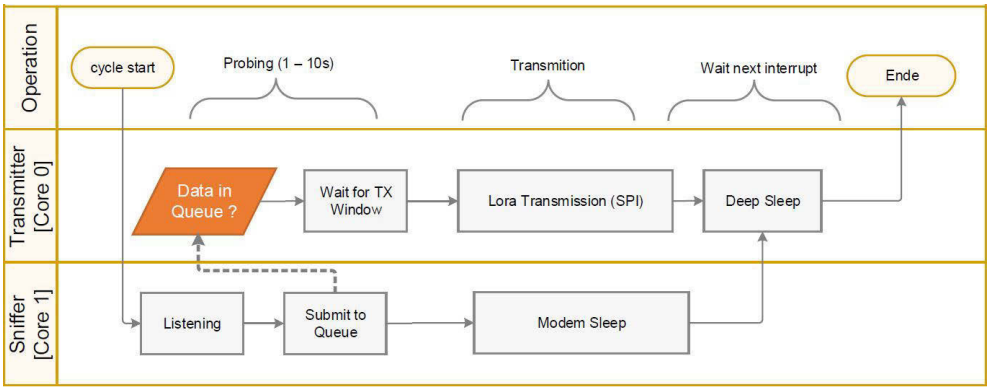


Abbildung 3: Normal Mode of Operation. Lanes are executed in parallel.

The normal mode of operation consists of two interrupt driven tasks. After the tasks finish the device will go to sleep for defined time and will start the next cycle at a predefined constant time. The first task is the recording of the WiFi devices. The node will capture all smartphones probing and add them to the submission queue. After a certain amount the device will complete the measuring frame and enter a partial sleep mode. In the second tasks the data is transmitted to the TTN. The transmission is in depended from the probing and will run in modem sleep. After all stacked transmissions are processed the node will go to deep sleep until the next cycle is due.

Encoding

As the bandwidth using lora is very limited we use a custom binary encoding on a subscription-based model (Fig. 4). We predefined 4 available commands (cmd) to describe the message content. After registering a new device (01) we can transmit multiple RSSI measures to this exact device (00). If the device vector exceeds the memory of our node all devices that were not seen for 20 cycles will be deregistered (02). The time counter is resetted every 12 h (03). With this encoding it is possible to pack 76 RSSI-Measures in one transmission window!

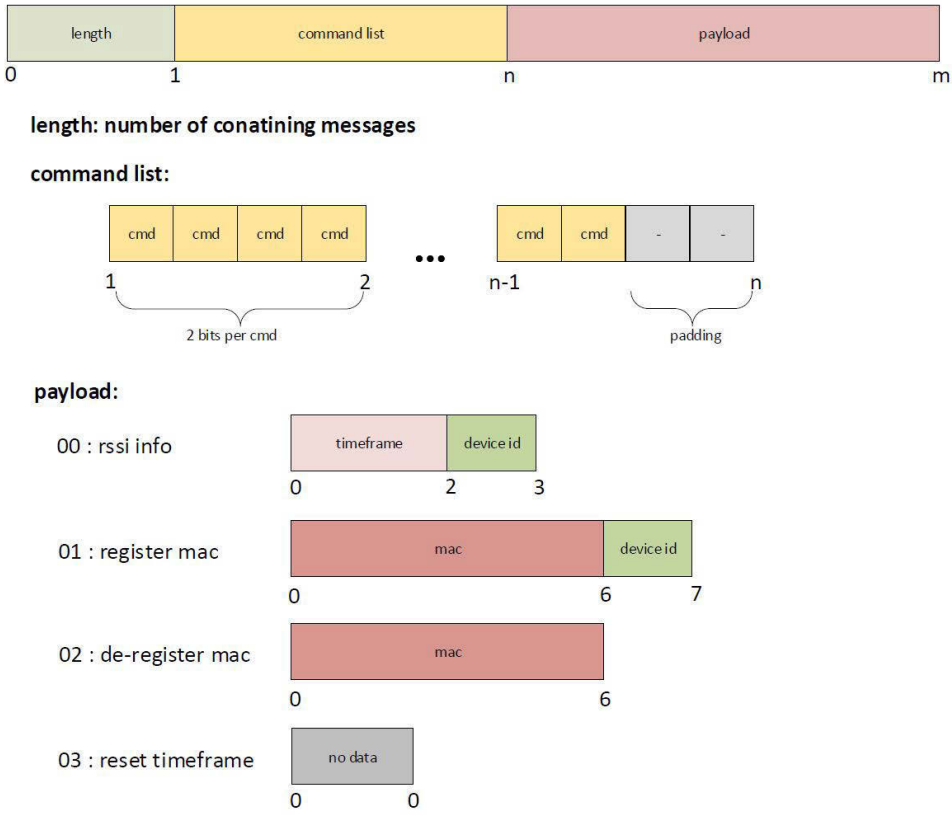


Abbildung 4: Binary Encoding of the transmission. The protocol follows the no overhead policy and is designed to use minimal bandwidth.

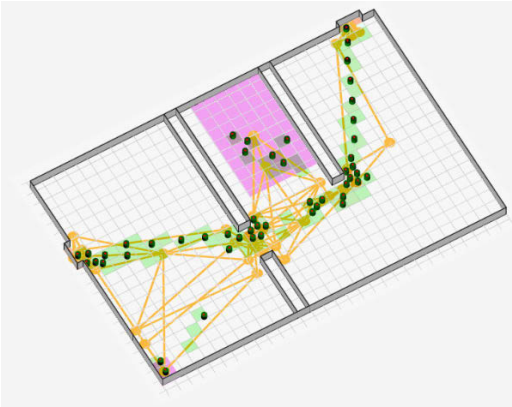
3.3 3.3 Server and Storage

For automatic and continuous transmission of WiFi readings, our cloud server is subscribed to the TTN; TTN forwards new messages when they arrive immediately (this takes 5-15 seconds due the TX Window). Accordingly, our cloud server decodes each message when it is received following the binary encoding described in Section 3.2. Afterward, the raw information, including the device id, time stamp, RSSI and associated MAC address are stored into a NoSQL database for further processing. Periodically, the server retrieves the latest messages from the database and locates the pedestrians. This multilateration step uses the distances between the pedestrians' devices and the LoRa nodes that is estimated by a power-based path loss model (Section 2.1).

We use the own node MAC address to trigger the start of a new observation. This will be sent, if the nodes change their mode of operation from setup to normal. Since LoRa can also roughly locate the sending devices, projects can be sorted by time and date as well as location. The server does not only provide listings of the devices and project but also allows for data export though an http request. This API call generates a tailored CSV (Fig. 5b) that can be used to directly start the simulation. The API will generate a CSV file for every time frame created by the nodes.

3.4 MomenTUM Integration

Typically, the simulator is used before an event takes place in order to plan exits and points of interests in a safe and comfortable way. In this paper, we propose to periodically feeding the simulator with real-time readings of the pedestrians' movement patterns. In the implemented approach. MomenTUM communicates with the cloud server and retrieves the last real-time readings. Those readings can then be used as a setup environment to run the simulation where at least three frames are needed to provide trajectory and the acceleration of the pedestrians. The runtime of the simulator this example (Fig 5a) was generated with a synthetic CSV set to test the system. We verified also the processing speed of MomenTUM is enough to capture single dataframes. The simulation with a 60s simulator time took ~5s to process. This also including reading the BIM Model and establishing the environment.



	A	B	C	D
1	timeStep	id	x	y
2	30	1	28.96	20.87
3	30	2	1.10	13.98
4	40	1	28.75	20.43
5	40	2	1.54	13.84
6	50	1	28.47	19.90
7	50	2	2.11	13.63
8	50	3	29.00	20.99
9	60	1	28.16	19.33
10	60	2	2.71	13.41
11	60	3	28.87	20.67
12	60	4	1.21	13.93

Abbildung 5: Integration of real-time pedestrians' movements patterns into MomenTUM: (a) MomenTUM running on custom csv data, (b) CSV sample contains a real-time pedestrians movement pattern

4 Conclusions and Future Work

This paper proposed an integrated approach for incorporating real-time pedestrians' movement patterns in simulation models. The proposed approach can overcome the lack of traditional internet infrastructure and assists in improving the simulation results quality. Additionally, verified that it is possible to run pedestrian simulations during events and respond in timely fashion to any potential emergencies or obstruction.

For the future work, the authors want to test this system in a crowded environment (conference or festival) to analyze the limitations provided by the hardware stack. It is crucial to evaluate the impact of adjusting the parameters of the different behavioral models from our readings. Additionally, more detailed analysis of using long range transmission techniques is required, most importantly, the evaluation of the transmission rate and overall size of information that can be transmitted and who to overcome the limit they provide.

Literatur

Andersen, J. B., Rappaport, T. S. and Yoshida, S. (1995), 'Propagation measurements and models', *IEEE Communications magazine* p. 43.

Biedermann, D. H., Dietrich, F., Handel, O., Kielar, P. M. and Seitz, M. (2015), 'Using raspberry pi for scientific video observation of pedestrians during a music festival', **2015**. **URL:** *http://arxiv.org/pdf/1511.00217v1*

Duives, D. C., Daamen, W. and Hoogendoorn, S. P. (2013), 'State-of-the-art crowd motion simulation models', *Transportation research part C: emerging technologies* **37**, 193–209.

Freudiger, J. (2015), How talkative is your mobile device?, *in* Unknown, ed., 'Proceedings of the 8th ACM Conference on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks', ACM, New York, NY, USA, pp. 1–6.

Handel, O., Biedermann, D. H., Kielar, P. M. and Borrmann, A. (2014), 'A system dynamics based perspective to help to understand the managerial big picture in respect of urban event dynamics', *Transportation Research Procedia* **2**, 669–674.

IEEE (2016), *IEEE Std 802.11-2016: IEEE Standard for Information technology–Telecommunications and information exchange between systems Local and metropolitan area networks–Specific requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access*, IEEE, S.l. **URL:** *http://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?punumber=7786993*

Keen, R. (1947), *Wireless direction finding*, Published for "Wireless world," by Iliffe. **URL:** *https://books.google.de/books?id=J6ZRAAAAMAAJ*

Kielar, P. M., Biedermann, D. H. and Borrmann, A. (2016), 'Momentumv2: a modular, extensible, and generic agent-based pedestrian behavior simulation framework'.

Kielar, P. M. and Borrmann, A. (2018), 'Spice: a cognitive agent framework for computational crowd simulations in complex environments'.

Schadschneider, A., Klingsch, W., Klüpfel, H., Kretz, T., Rogsch, C. and Seyfried, A. (2009), 'Evacuation dynamics: Empirical results, modeling and applications', *Encyclopedia of complexity and systems science* pp. 3142–3176.

Siva Ram Murthy, C. and Manoj, B. S. (2004), 'Ad hoc wireless networks: Architectures and protocols', *PHI Pearson Education Inc., India* pp. 304–307.

Sornin, N., Luis, M., Eirich, T., Kramp, T. and Hersent, O. (2015), 'Lorawan specification v1. 0', *0. Technical report, LoRa Alliance, Tech. Rep.* .

Tracking trajectories and breaking down trajectory motions of a one-arm robot to assemble low LOD facade elements

Suraj Shetty[1], Khashayar Samiee Moghaddam[2], and Adrian Schubert[3]

[1]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str.31a · 01062 Dresden · E-Mail:suraj_sunil_kumar.shetty@tu-dresden.de
[2]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str.31a · 01062 Dresden · E-Mail:khashayar.samiee@mailbox.tu-dresden.de
[3]Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str.31a · 01062 Dresden · E-Mail:adrian.schubert@mailbox.tu-dresden.de

In the last few years, there has been a significant development in applications of robotics in the construction industry. As modern architecture gets more organic, buildability is one of the major problems faced by the architecture, engineering and construction sector. Façade elements play a major role in the aesthetics of a building. However, with complex architecture, geometries manufacturing custom façade elements and installing them is a time-consuming process and is also prone to errors. As a result, strong and intense research is going on in the field of digital manufacturing, smart factories and robot integrated workflow.

The objective of this study is to conduct detailed research on types of parametric façade elements. For one particular construction type of façade system, the assembly of façade elements using robots shall be visualised and analysed. Later on, an evolutionary algorithm shall be developed, so the robot recognises the relevant elements and assembles the façade parts automatically.

Keywords: Facade, Robotics, Trajectories

1 Introduction

As modern architecture needs to be improved by achieving the ability to design more complex shapes. Generating unique and new shapes need much effort in the design stage. Therefore, parametric design raises as a tool which helps to generate new algorithms based on calculations and defined variables to find new geometries by architects. On the other hand, the manufacturing process of complex styles of façades is time consuming and costly. These two parameters have a significant impact in all projects. Then, using digital manufacturing and robots are an approach to simplify the fabrication process of complex geometries. As robotics in construction is a noteworthy topic, this research will be conducted in three major parts: 1) Studying types of parametric facades 2) develop details of specific parametric façades. 3) tracking the trajectory of façade element to assemble low LOD façade parts by one arm robot. In this paper, an approach to assemble parametric façade elements using robots and their constraints are studied. Furthermore, a demonstration of this is developed in Rhinoceros (3D Modelling software) using grasshopper (visual programming tool) for visualizations and data extractions.

1.1 Automation in facade

In the manufacturing phase, unique shapes of façades with different dimensions and angles make the process very complicated and tedious. Therefore, architects concentrate more on the operations, as they create control data for machines that drive the digital fabrication equipment. There is a significant research interest in digital manufacturing. Because schedule and budget have a high impact on projects, this topic has a desirable result for users. (Kolarevic 2003). From the early 1970s, single-task robots were developed in Japan for use to construction sites. In initial steps, it is necessary to conduct detail research on different types of facades to know the properties and technical criteria. Two major kinds of façade are considered in this study, i.e. post and beam façade(fig.1 left) and curtain wall systems (fig.1 right). The core purpose of studying this is to investigate the elements which should be assembled using a robot. In the case of post and beam façade, the two major components are transoms and mullions. The height of the post is restricted to the height of the level storey, and they are linked to each other by using beams. The area between posts and beams can be filled with different material to have many varied functions such as cladding, lighting and ventilation. This system is also designed for bearing the wind loads and self-weights, and it also can be used for connecting the cladding to buildings. (Knaack et al. 2014)

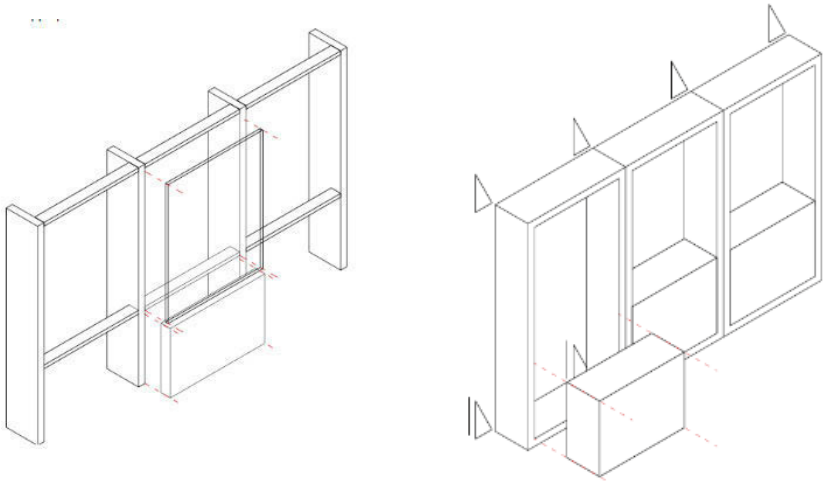


Figure 1: left: post and beam system right: curtain wall system (Knaack et al. 2014)

In the case of curtain wall systems, load-bearing elements are rarely included. These are cladding systems used mostly for external covering of large or multi-storey buildings. There are two main types of curtain wall systems, unitised systems and stick System. In case of stick systems pieces are installed one by one on-site. Later on, the glazing is inserted to the frame. Whereas Unitised systems are pre-fabricated elements. The profiles are manufactured the glazing is fixed, and its whole module is sent to the site. These modules consist of metallic frames, mainly aluminium or steel. these are surrounded by one or multiple layers of glass. Every module is a storey height and fixed using the gaskets which are fixed to a slab. Unitised curtain wall system is the most extensively used façade systems in the industry in the present era. It is also expensive compared to the other façade system. Unitised curtain wall systems

are extensively used because of their ease of installation, which makes the timeline much shorter compared to the installation of other façade systems. The tolerances are considered and are implemented on-site, the brackets to which the façade element will be connected will have a long hole in horizontal direction where the modules can be moved in case of any errors. Hence without cutting out any material, the clashes can be managed just by moving the entire modules itself.

1.2 Application of robotics in facade construction

Most researches and use of robots are related to the installation phase of facades. The most studied façade type is curtain walls. Thomas Bock (Bock and Linner 2016) categorised single-task construction robots. This research shows us that unitised curtain walls are the most suitable systems to develop the manufacturing phase of curtain walls to achieve a complete robotic system. As mentioned in his research, there are some cases in Japan which use one arm mobile robots to help workers to install the façade. Brunkeberg® System is the other system which manages the logistic process and correspondingly installation of parts. This robot delivers the units horizontally uses semi-automatic connection and with the help of workers, the façade will be installed safer and easier in comparison to recent methods. The types of robots used for façade installation and cleaning are listed in the table below (Table 1). (Bock and Linner 2016)

Table 1: application area of robotics in facade construction (Bock and Linner 2016)

Application Area	Robot Manufacturer
For installation of post and beam structures of facades	Kajima
Robot for positioning façade elements from upper levels on lower levels	Kajima
Façade concrete panel installation robot	Kajima
Automatic façade panel installation using a movable fixture	Fujita
Roof cover installation robot	Kumagai Gumi
Ceiling glass installation robot	Hanyang University and Samsung
Robotic installation systems for façade panel installation in building renovation	Technische Universität München

In the early 1980s, the robots were deployed on-site directly, and the tasks were completed by the robots under high supervision of humans (Bock and Linner 2016). Along the timeline, the various interfaces and programs were developed where the robots were controlled through computers offsite. The tasks given to the robots could be on the go, or a program could be fed to the robot where the robot would conduct many tasks at once. Especially in the field of

Architecture and Engineering, a digital twin of the robot was developed to avoid clashes on-site and also to calculate approximate operation timing. Meanwhile, in this study, the focus is on providing a framework for trajectories of one arm robots for a combination of assembly of various façade elements.

2 Generation of initial facade elements and selection of LOD

2.1 Parametric Design

Since the recent developments in architecture, Architects try to provide new styles, although some cases were not successful. As modernism is going to be a trend, designing of new facades are an exciting topic in architecture. Nowadays, digital technologies play a crucial role in designing façades. According to modern styles, creating new shapes is very time consuming and need many efforts, because each case needs different calculations. Therefore, the parametric design comes to help speeding up the design process of the identification and implementation of a set of fundamental algorithms, including variables that address the needs of the different dimensions and shapes. (Kolarevic 2003). The parametric design brings advantages over conventional methods since it is based on rules, constraints, features, and associations between parameters and objects within a model. The regulations of parameters are defined based on mathematical formulas which conduct to adjustment of the model quickly, and there is no need to revise the whole model for just a change. It also should be considered that parametric modelling requires a logical process which must be understood by parametric design (Ajla Aksamija 2011). Grasshopper is one of the programming tools which can help in design stage.it has a simple user interface which provides a user-friendly environment for engineers with limited programming knowledge to implement codes and algorithms and allows them to build façade models in Rhino.

In this research, we present node and facade elements and The model is totally developed parametric in grasshopper, and the model is initiated with a simple random shape for the plans floor. There are many parameters which can control the total height of the building, height of each floor, number of facade units, etc. Therefore, the size of each curtain wall unit can be adjusted (fig. 2).

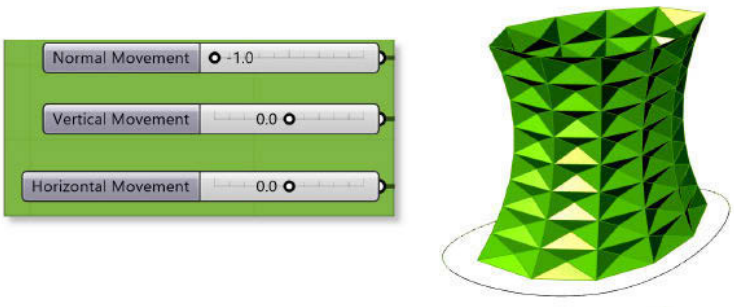


Figure 2: parametric building generate, grasshopper

Each unit of facade consists of 4 nodes on corners and one node somewhere between these four nodes. Moving the middle point triggers new shapes (Fig.3). In the next sequences, a random unit was chosen and further investigated for connection of cylinder elements at nodes (Fig.3). The intersection of 4 cylindrical elements needs unique cuts to have a clean and beautiful shape at nodes. We are working with parametric design since there are too many different units with unique cuts and welding process. We assume a node, which can be made by the additive manufacturing process. In this case, cylindrical profiles can be assembled automatically.

Figure 3: shape of each unit varies with changing the position of the middle node

2.2 Level of Details (LOD) of the designed model

Referring to the newest LOD specification of BIMForum, curtain wall library components are classified according to LOD. BIMForum LOD specification expresses curtain walls as exterior window walls pursuant to UniformatTM. The curtain wall library components classified earlier can be prepared as a classification table, as shown in Figure 5, based on the LOD standard of BIMForum. Since LOD 100 is the conceptual design level and expresses the shapes and volumes of masses instead of components, it was not expressed in the classification table.. (Beomjun Kima 2016)

2.3 Reason for selecting the low level of detail facade

For this specific task low level of detailed façade, elements are chosen. In the initial steps, only the geometrical constraints of mullions and transoms will be studied. Using Kuka PRC plug-in in Rhino different shapes of mullions and transoms will be classified, and the complexity of fixing theses transoms and mullions using Kuka robots will be studied. In the initial algorithms, details like bolt holes and screw holes are not considered. As it is a two-step approach, in the present step, the capability of robots to handle mullion elements to fix it to a transom will be studied. Also, the focus will be on studying the trajectory of robots with regard to the length and weight of mullions or transoms the robot is handling.

3 Integrating robots in facade assembly

For developing a fast and efficient manufacturing process, using robots is necessary. KUKA offers a wide range of robotic arms which have different abilities. The payload of industrial robots varies from 7 kg to 4000 kg for different types of robots. In this case, heavy payload robots are needed with a payload of about 1000 kg and a maximum reach of 3 m. The robots have six axes which brings the ability to deliver items in the desired direction and place.

3.1 Initial work to program trajectories

For the study of the criteria's and trajectory and to train the robots, Kuka PRC plugin was developed in Grasshopper for Rhinoceros. The Kuka robots based inverse kinematic. Therefore, by using this plugin, we can simulate the assembly process and define the trajectories. This plugin provides a file as output for programming the robots. In this study, the façade elements from the parametric design, which was mentioned earlier in the paper, were selected. The 3D printed parametric node is assembled into the standard façade elements, as shown in the image below. The initial tests were conducted to connect only two elements, and later on, complex elements like the one shown below were tested. Currently, a library with various shapes of façade elements and nodes are developed. In the next step, it is envisaged able to train the robot aiming to recognise the shape of the elements and assemble the right pieces together to form a complete façade element module (Fig. 4).

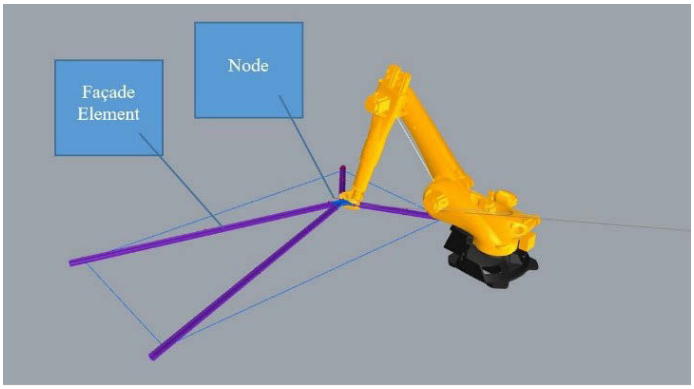


Figure 4: General assembly of elements on the node (author's simulation)

In this algorithm for assembling the façade elements, two specific kind of robot arm movements, i.e. Kukaprc linear Movement and Kuka PRC PTP (plane to plane) Movement, were tested. In the case of linear Movement, the robot gets defined through a plane. The robot will move in a straight line to the provided plane. In the case of PTP movement, the robot target is defined through a plane. The robot will move most efficiently to the provided plane. The standard end effector is used in this case. Required custom end effectors for the robot can be defined and designed in Rhinoceros.

The trajectories are adjusted based on the failure of the robot arms, which is pre-programmed

in Kuka PRC. Based on the arm lengths and degree of freedoms, the failure of robot arms is recognised. One of such examples is shown in figure 5. Based on this, the distance of the assembly platform, the height of the assembly platform and dimensions of the façade elements are determined. Instead of trial and error, different on-site combinations of movements are tested in the Rhinoceros environment, and once the movement is clash-free, it will be implemented to the robot on site.

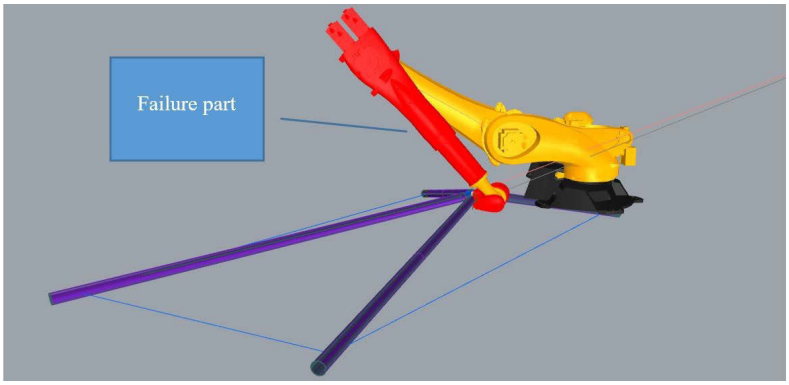


Figure 5: Collision detection by Kuka PRC (authors simulation)

4 Conclusion and Further Development

4.1 Conclusion

The algorithm mentioned in this paper has many components which were preprogrammed. Hence the flexibility to explore the trajectories and to connect them to façade types were limited. All the mechanisms and the tasks for the robots were manually inputted only; then the program would perform the expected task. The other major drawback is that the robot end-effector position in real might vary than that to the one which is represented digitally. For example, the end effector in the digital version might be at 300,300,300, but in reality the end-effector might not be precisely at 300,300,300. There might be slight tolerances because of the weight of the façade element or because of the holding position of the façade element. In this case, the low level of detailed façade elements was used. Hence it did not make a difference, but for a high level of detail installation, there must be an absolute precision.

4.2 Future Work

The problem of precision could be solved by reprogramming and breaking down the trajectories. These trajectories can then be manipulated to consider errors so that the position of end effector digitally and in reality, is in the same position.

Secondly, the façade type can also be created digitally by developing a façade type matrix. The façade shall be differentiated based on material, type of façade and type of assembly. For each unique type, a specific trajectory list shall be developed to assemble that particular façade element module. The brief architecture of this is shown in Fig. 6.

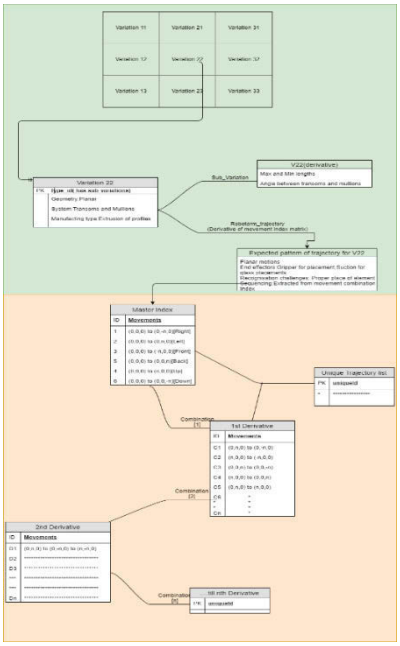


Figure 6: facade type matrix

These are future topics which lead to a new generation of facades, which helps the architectures and engineers to have a new method of construction.

References

Ajla, A. (2011), 'Parametric control of bim elements for sustainable design in revit', *Linking Design and Analytical Software Applications through Customization* .

BIMForum 2019 Level of Developement (2019).

Bock, T. and Linner, T. (2016), 'Single-task construction robots by category', *Construction Robots (Cambridge University Press)* pp. 14–290.

Kima, B. and Chinb, S. (2016), 'Parametric Library Components for BIM-based Curtain Wall Design Automation Module'.

Knaack, U., Klein, T., Bilow, M. and Auer, T. (2014), 'Facades: Principles of construction'.

Kolarevic, B. (2003), *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*.

Entwicklung und Integration eines Verkehrsmodells in eine Strömungssimulation zur Ermittlung von Schadstoffausbreitungen im urbanen Raum

Anna Wellmann[1]

[1] Institut für rechnergestützte Modellierung im Bauingenieurwesen (IRMB) · Technische Universität Braunschweig · Pockelsstraße 3 · 38106 Braunschweig · E-Mail: a.wellmann@tu-bs.de

Die Verbesserung der Luftqualität innerstädtischer Umgebungen stellt eine große Herausforderung dar. Ein wesentlicher Faktor bei der Betrachtung von Luftverschmutzung ist Feinstaub, denn dieser kann diverse gesundheitliche Probleme auslösen oder verstärken (Umweltbundesamt, 2018). Insbesondere in urbanen Gebieten trägt der Verkehr stark zur Feinstaubbelastung bei (Umweltbundesamt, 2018). Deshalb werden zahlreiche Maßnahmen bis hin zu Straßensperrungen oder großräumigen Fahrverboten diskutiert und umgesetzt.

Simulationen zur Schadstoffausbreitung mit Luftströmungen im urbanen Raum können zur Bewertung des Nutzens solcher Maßnahmen beitragen. Zur Simulation dieser Multi-Komponenten-Strömungen kann die Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) verwendet werden. Erste Ansätze zur Modellierung von Schadstoffeinträgen aus dem Straßenverkehr basieren auf der Annahme, dass es sich bei der Straße um eine homogene Schadstoffquelle handelt. Diese Ansätze vernachlässigen jedoch die Dynamik und Verteilung des Verkehrs. Um dieses Defizit zu beheben, wurde in dieser Arbeit ein Verkehrssimulator implementiert und in die Strömungssimulation integriert. Auf Basis eines zellulären Automaten wird eine Verkehrssimulation erstellt, die Ort und Menge des Feinstaubeintrags bestimmt. Hierbei bildet das Nagel-Schreckenberg-Modell (NaSch) die Grundlage zur Darstellung des Verkehrs. Es wurde dahingehend optimiert und erweitert, dass die innerstädtische Verkehrsdynamik realistischer dargestellt werden kann.

Zusätzlich zur Entwicklung der Software für die Central Processing Unit (CPU) wurde eine Portierung auf die Graphics Processing Unit (GPU) vorgenommen. Dadurch kann bei großen Straßennetzwerken die Simulationsgeschwindigkeit erhöht werden.

Die Simulationsergebnisse des neu entwickelten Ansatzes mit individuell simulierten Fahrzeuge als Schadstoffquellen, wurden den Ergebnissen gegenübergestellt, die bei Verwendung der Straßen als homogene Quellen erzielt wurden. Es konnte gezeigt werden, dass die Integration der Verkehrssimulation zu wesentlich realistischeren Schadstoffdynamiken führt.

Keywords: Verkehrssimulation, Nagel-Schreckenberg-Modell, Schadstoffausbreitung, numerische Strömungssimulation, Lattice-Boltzmann-Methode

1 Einleitung

In der hier vorgestellten Strömungssimulation im urbanen Raum wird die Schadstoffausbreitung des Feinstaubs als zusätzliche Komponente innerhalb der Strömung modelliert. Übliche Ansätze definierten dabei die Straße als homogene Feinstaubquelle. Der Eintrag des Feinstaubs über individuell simulierte Fahrzeuge stellt im Vergleich dazu einen wesentlich realistischeren Ansatz dar. Im Folgenden wird hier das zur Simulation der Fahrzeuge verwendete Verkehrsmodell vorgestellt und dessen Integration in die Simulation der Multi-Komponenten-Strömung beschrieben. Die daraus folgenden Simulationsergebnisse für die unterschiedlichen Ansätze bezüglich der Schadstoffquellen werden im Anschluss präsentiert.

2 Simulation des Verkehrs

Die Basis des Verkehrssimulators ist eine für den Stadtverkehr optimierte Variante des Nagel-Schreckenberg-Modells (NaSch). Das Verkehrsmodell wurde zunächst in der Programmiersprache C++ implementiert und anschließend zur Performancesteigerung auf die GPU portiert.

2.1 Nagel-Schreckenberg-Modell

Das Nagel-Schreckenberg-Modell wurde zur Simulation von Autobahnverkehr entwickelt. Die Straße wird hierbei durch eine Reihe von uniformen Zellen diskretisiert, wobei die Einträge in den Zellen die diskreten Geschwindigkeiten der Fahrzeuge repräsentieren. Zur Berechnung des Zustands des Verkehrs im nächsten Zeitschritt werden folgende Regeln nacheinander angewandt (Nagel, 1992):

1. **Beschleunigen:** Falls die Geschwindigkeit eines Fahrzeugs geringer als die Maximalgeschwindigkeit ist, wird die Geschwindigkeit inkrementiert.
2. **Bremsen zur Kollisionsvermeidung:** Anschließend wird der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug überprüft. Falls die Anzahl der freien Zellen vor dem Fahrzeug geringer als dessen Geschwindigkeit ist, wird diese entsprechend reduziert.
3. **Trödeln:** Ein spontanes Bremsen ohne Begründung wird im Kontext des NaSch als Trödeln bezeichnet. Mit der Trödel- oder Verzögerungswahrscheinlichkeit wird die Geschwindigkeit des Fahrzeugs um eins dekrementiert.
4. **Fortbewegen:** Zuletzt wird das Fahrzeug um die in den vorigen drei Schritten bestimmte Geschwindigkeit nach vorn bewegt.

Für die Länge einer Zelle wird der Platzbedarf eines PKWs im kompakten Stau mit $\Delta x = 7{,}5$ m angenommen. Der Zeitschritt basiert auf der typischen Reaktionszeit eines Fahrers und beträgt in der Regel $\Delta t = 1$ s. Daraus ergibt sich ein Geschwindigkeitsinkrement von $\Delta v = \Delta x/\Delta t = 27$ km/h und eine Beschleunigung von $a = \Delta v/\Delta t = 7{,}5$ m/s^2 (Nagel, 1992).

2.2 Erweiterung und Anpassung des Verkehrsmodells

Damit das für den Autobahnverkehr entwickelte Nagel-Schreckenberg-Modell sinnvoll für eine Simulation des innerstädtischen Verkehrs genutzt werden konnte, waren mehrere Veränderungen notwendig. Für den Stadtverkehr ist die ursprüngliche Diskretisierung des NaSch nicht fein genug. Es stehen lediglich drei Geschwindigkeitswerte (0 km/h, 27 km/h, 54 km/h) zur Verfügung (vgl. Unterabschnitt 2.1) (Treiber, 2010). Bei gleichbleibenden Zeitinkrement kann die Anzahl der Geschwindigkeitsinkremente durch eine Verkleinerung der Zellgröße erhöht werden. Durch die Verringerung der Zellgröße auf 1 m umfasst ein Fahrzeug acht Zellen. Zur Vereinfachung der Berechnung wurde für jedes Fahrzeug dennoch nur eine Zelle gespeichert. In dieser Arbeit wurde dazu die Position des Hecks eines jeweiligen Fahrzeugs gewählt (Maerivoet, 2005). Da für diese Arbeit definiert wurde, dass der Feinstaub am Heck des Fahrzeugs in die Strömungssimulation eingetragen werden soll, konnten die Schadstoffe direkt an der gespeicherten Zelle zum System hinzugefügt werden.

Nach einer Verkleinerung der Zellgröße muss die Beschleunigung der Fahrzeuge angepasst werden. Typische Werte für das Anfahren und die Beschleunigung eines PKWs bis 60 km/h liegen bei rund 2 bis 4 m/s^2 (Burg, 2017). Zur Simulation des innerstädtischen Verkehrs wurde eine Beschleunigung von 2 m/s^2 gewählt.

Im NaSch breitet sich ein Stau langsamer entgegen der Fahrtrichtung aus, als man im realen Verkehr beobachten kann. Daher bilden sich nicht die in der Realität beobachteten langlebigen Stauwellen, sondern kurzlebige statische Strukturen. Dieses Problem kann durch die Nutzung des Slow-to-Start-Modells reduziert werden. Die Wahrscheinlichkeit, dass Fahrer trödeln, wurde von 0,2 auf 0,4 verdoppelt, wenn diese aus dem Stand anfahren (Treiber, 2010; Barlovic et al., 2002).

Das Modell wurde um Quellen, die Fahrzeuge zum simulierten Gebiet hinzufügen, sowie Senken, über die Fahrzeuge das Gebiet verlassen können, erweitert. Sobald ausreichend Platz auf der Straße vorhanden ist, wird an einer Quelle mit einer voreingestellten Wahrscheinlichkeit ein Fahrzeug mit einer zufälligen Geschwindigkeit erzeugt. Auch den Senken wird eine individuelle Wahrscheinlichkeit zugeordnet, die angibt ob Fahrzeuge das simulierte Gebiet verlassen können. Durch das Einführen eines solchen Zufallsterms werden Hindernisse außerhalb des simulierten Gebiets abgebildet (Barlovic et al., 2002).

Darüber hinaus wurden Kreuzungen ergänzt, damit weitere wesentlichen Charakteristika des Innenstadtverkehrs abgebildet werden können. Straßen, die in einer Kreuzung enden, können Fahrzeuge an eine Kreuzung übergeben. Einfache Kreuzungen verteilen die Fahrzeuge zufällig auf andere Straßen, die an dieser Kreuzung beginnen. Dabei wurde festgelegt, dass Fahrzeuge an Kreuzungen nicht wenden können. Es wurden auch Kreuzungen mit Lichtsignalanlagen implementiert, die steuern zu welchem Zeitpunkt Fahrzeuge von welcher Straße in die Kreuzung einfahren können. Die Schaltzeit der Lichtsignalanlage kann für jede Kreuzung individuell festgelegt werden.

2.3 Portierung des Verkehrsmodells für die GPU

Die Parallelverarbeitung bietet im Vergleich zur sequentiellen Verarbeitung eine Möglichkeit zur Performancesteigerung der Simulation. Die Graphics Processing Unit (GPU) ist eine verhältnismäßig kostengünstige Hardwareplattform, die besonders gut für numerische Berechnungen mit vorrangig lokalen Abhängigkeiten geeignet ist. Zur Parallelisierung des im Zuge dieser Arbeit entwickelten Quellcodes wird die Programmierschnittstelle Compute Unified Device Architecture (CUDA) des Hardwareherstellers NVIDIA verwendet. CUDA stellt Erweiterungen der Programmiersprache C zur Verfügung, die zur Implementierung von auf einer GPU lauffähigem Code genutzt werden können (Schönherr, 2015). In klassischen, sequentiellen Programmen führt der Prozessor die einzelnen Anweisungen nacheinander aus. Im Gegensatz dazu werden in parallelen Programmen mehrere als Threads bezeichnete Teilaufgaben parallel zueinander (nebenläufig) ausgeführt. (Rauber, 2012). Die Nutzung von Parallelverarbeitung bietet sich an, wenn große Datenmengen mit den gleichen Algorithmen verarbeiten werden sollen (Single Instruction Multiple Data paradigm) (Zamith et al., 2012).

Da die Anwendung der Regeln auf eine Zelle unabhängig von der Bearbeitung anderer Zellen erfolgt, konnte die Parallelisierung des NaSch für die GPU sinnvoll realisiert werden.

Bei großen Straßennetzwerken konnte im Gegensatz zur ursprünglich auf der Central Processing Unit (CPU) implementierten Version eine erhöhte Performance festgestellt werden (vgl. Abbildung 1).

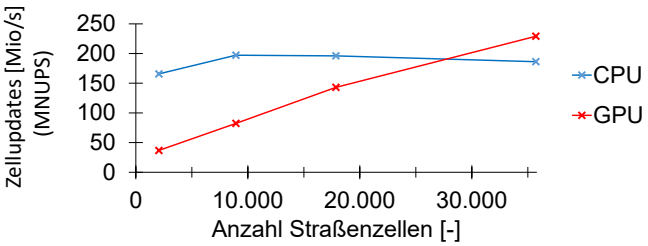


Abbildung 1: Vergleich der Performance von CPU und GPU für mehrere Systemgrößen

3 Integration des Verkehrsmodells in die Strömungssimulation

Die Ausbreitung des Feinstaubs in der Innenstadt wurde mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) simuliert. Die LBM ist eine auf der Boltzmann-Gleichung basierende Methode zur Strömungssimulation (Schönherr, 2015). Luftverschmutzungen können vereinfacht als Zwei-Komponenten-Strömungen, bestehend aus Luft als erster Komponente und einem gasförmigen oder partikulären Schadstoff als zweiter Komponente, betrachtet werden (Lee, 2013). Daher wurde zur Untersuchung der Schadstoffausbreitung eine Erweiterung der LBM für Multi-Komponenten-Strömungen verwendet (Yang et al., 2016). Dieses Modell ist Teil des Strömungssimulators VirtualFluidsGPU, der am IRMB entwickelt und in dieser Arbeit zur Simulation der Multi-Komponenten-Strömungen auf der GPU verwendet wurde.

3.1 Randbedingungen der Strömungssimulation

An den räumlichen Grenzen des simulierten Gebiets mussten Randbedingungen festgelegt werden (Krafczyk, 2001). Im Modell der Stadt Basel wurden die Ränder in x- und y-Richtung als periodische Ränder implementiert (vgl. Abbildung 2). Das berechnete Gitter wird bei der periodischen Randbedingung mit den Werten des gegenüberliegenden Rands fortgeführt. Feinstaub, der an einer Seite das Gitter verlässt, sollte trotz der periodischen Randbedingung nicht an der anderen Seite des Gitters wieder eingetragen werden. Daher wurde für diese Komponente in x- und y-Richtung eine Neumann-Randbedingung eingeführt, welche den Gradient der Konzentration vorgibt. Die obere Begrenzung des Gebiets wurde mit einer Slip-Randbedingung belegt. Die Slip-Randbedingung verhält sich wie eine Wand ohne Wandhaftung (Rückborn et al., 2014). Auch die Gebäudegeometrie des Stadtmodells begrenzt das simulierte Gebiet, sie wurde als Haftrandbedingung modelliert. Zur praktischen Umsetzung wurde hier der Bounce-Back-Ansatz verwendet. Ein Partikel, das auf eine feste Wand trifft, wird durch die Rauigkeit der Wand in eine zur vorherigen Richtung unkorrelierte Richtung abprallen (Krafczyk, 2001). Außerdem wurde ein gleichmäßiger Wind ca. 3 m/s in positiver X-Richtung induziert, indem an jedem Knoten des LBM-Gitters eine Kraft (Forcing) aufgeprägt wird (Lenz et al., 2019).

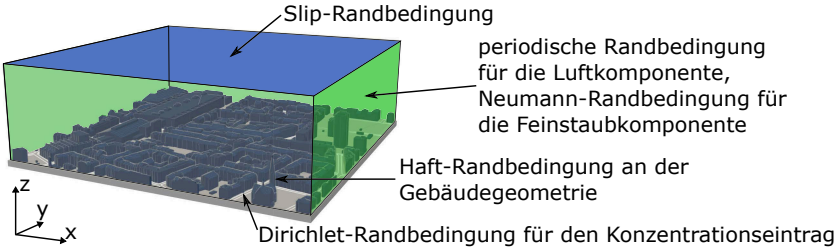


Abbildung 2: Randbedingungen der Strömungssimulation zur Schadstoffausbreitung im urbanen Raum

Die Schadstoffkomponente wurde über eine Dirichlet-Randbedingung eingetragen. Bei einer Dirichlet-Randbedingung wurde an den Eintragspunkten ein fester Wert, in diesem Fall die Konzentration des Schadstoffs, vorgegeben (Krafczyk, 2001). Die Höhe des relativen Schadstoffeintrags ist abhängig vom Bewegungszustand des Fahrzeugs. Dabei werden erste Schätzungen des IRMB zum Eintrag von Feinstaub mit einer Partikelgröße kleiner als $10 \cdot 10^{-6}$ m, der durch den Verbrennungsmotor oder den Abrieb der Reifen und Bremsen erzeugt wird, berücksichtigt (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Schätzungen des IRMB zum gesamten Feinstaubausstoß eines Fahrzeugs durch den Verbrennungsmotor sowie den Abrieb der Reifen und Bremsen

Fahrsituation	relativer Schadstoffeintrag [-]
Anfahren aus dem Stand	0,84
Beschleunigen	0,63
Fahren mit konstanter Geschwindigkeit	0,22
Bremsen	0,38
stehendes Fahrzeug	0,07

3.2 Verknüpfung der Verkehrssimulation mit der Strömungssimulation

Zur Integration der Verkehrssimulation in die Strömungssimulation mussten die Koordinaten der Verkehrssimulation im Gitter der LBM bestimmt werden. Außerdem mussten anhand des Verkehrsmodell Feinstaubkonzentrationen für die Randbedingung der LBM berechnet und der Aufruf der Verkehrssimulation aus der Strömungssimulation realisiert werden.

Sobald das Straßennetzwerk in die Strömungssimulation integriert werden soll, muss jeder Straßenzelle ein Knoten des LBM-Gitters zugewiesen werden. Dazu wurde durch eine Funktion des Gittergenerators der räumlich nächste Knoten zum Mittelpunkt der Straßenzelle bestimmt. Wenn ein Fahrzeug Feinstaub ausstößt, wird er an diesem Punkt zur Strömungssimulation hinzugefügt. Der Feinstaub wird jeweils am Heck der einzelnen Fahrzeuge in das Gebiet eingebracht.

4 Simulationsergebnisse

Es wurde eine Simulation am Beispiel eines Quartiers der Innenstadt vom Basel (Schweiz) durchgeführt. Das simulierte Gebiet ist ca. 500 * 500 m groß. Das Gitter für die Simulation

der Strömung wurde mit einem Gitterabstand von 1,2 m diskretisiert, sodass das Gitter mit etwa 24 Millionen Knoten deutlich größer als das der Verkehrssimulation mit etwa 9000 Zellen war. Die Simulation wurde mit einer zufälligen Verteilung der Fahrzeuge und einer initialen Feinstaubkonzentration von null begonnen. Zur realitätsnahen Simulation des Verkehrs wurden an den Kreuzungspunkten der Hauptverkehrsstraßen Lichtsignalanlagen modelliert. Dies führte zu einer verstärkten Bildung von Staus an den betroffenen Kreuzungen (vgl. Abbildung 3).

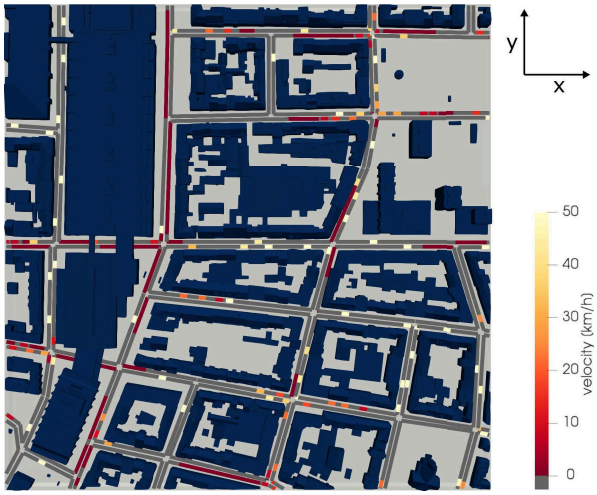
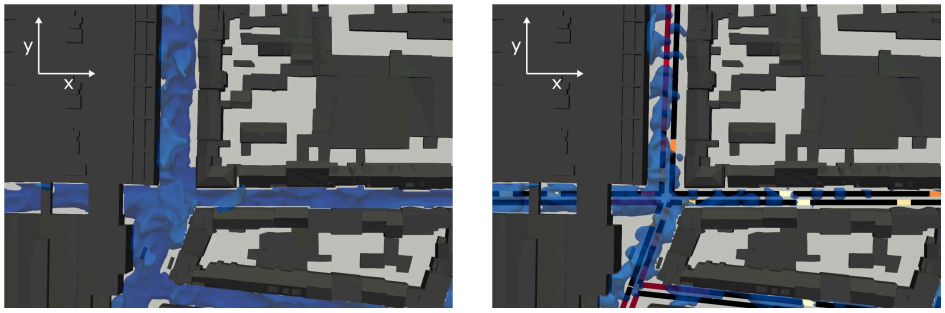


Abbildung 3: Verkehrszustand des Simulationsgebiets nach 4 Stunden (Echtzeit)

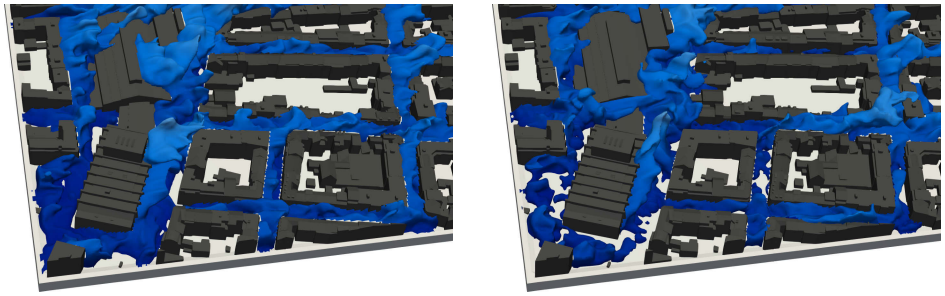
Der Vergleich der beiden Ansätze, einerseits mit der Straße als homogener Quelle und alternativ dazu mit einem individuellen Eintrag an den Fahrzeugen, zeigt speziell in den Kreuzungsbereichen sehr unterschiedliche Ergebnisse in der räumlichen Feinstaubverteilung (vgl. Abbildung 4).



(a) homogener Feinstaubeintrag entlang der Straße (b) Eintrag durch individuell simulierte Fahrzeuge

Abbildung 4: Feinstaubeintrag an einer Kreuzung

Auch nach einer Simulation von vier Stunden (Echtzeit) sind noch deutliche Unterschiede in den Verteilungsmustern des Feinstaubs zu erkennen (vgl. Abbildung 5).



(a) homogener Feinstaubeintrag entlang der Straße (b) Eintrag durch individuell simulierte Fahrzeuge

Abbildung 5: Verteilung des Feinstaubs nach 4 Stunden (Echtzeit)

Positiv hervorzuheben sind die Ergebnisse bezüglich der Berechnungsperformance. Für die Simulation des Stadtausschnitts mit dem Gaming-Grafikprozessor Geforce GTX 1080 Ti von NVIDIA wurde im Verhältnis zur berechneten Echtzeit (4h) nur etwa die dreifache Berechnungszeit benötigt (ca. 12 h). Im Vergleich dazu verlängert sich die Berechnungszeit für eine Einkomponentenströmung, bei der nur etwa 50 % des Berechnungsaufwandes anfällt, unter Verwendung von 160 CPUs auf das 60-fache des simulierten Zeitraums (Lenz et al., 2019).

5 Ausblick und Fazit

Im Bereich der Verkehrssimulation bieten sich mehrere Erweiterungen an. Da im aktuellen Stand der Implementierung die Größe und die Beschleunigung der Fahrzeuge bereits eingestellt werden können, bietet sich die Implementierung weiterer Fahrzeugtypen an. Zusätzlich können die Vorfahrtsregeln an Kreuzungen ergänzt und mehrspurige Straßen implementiert werden. Im Rahmen der Strömungssimulation könnten weitere Feinstaubquellen berücksichtigt werden, wie Hausfeuerungsanlagen sowie Industrie- und Gewerbebetriebe oder eine diffuse Hintergrundbelastung. Für Simulationen über längere Zeiträume hinweg kann es notwendig sein, weitere Transport- sowie Transformationsprozesse des Feinstaubs zu berücksichtigen (Lee, 2013).

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass durch zahlreiche Anpassungen der Verkehrssimulation eine im Vergleich zum Nagel-Schreckenberg-Modell realitätsnähere Darstellung der Verkehrsdynamik in der Innenstadt erreicht wurde. Die Simulation einzelner Fahrzeuge als Feinstaubquellen führt im Vergleich zur Verwendung von linienförmigen statischen Quellen zu deutlich realistischeren Ergebnissen. Daher sollte die Methode des Schadstoffeintrags durch individuell simulierter Fahrzeuge auch bei zukünftigen Simulationen zur Schadstoffdynamik im urbanen Raum verwendet werden. Der hier entwickelte Ansatz führt in Kombination mit den genannten potentiellen Verbesserungen zu einer realitätsnahen und performanten Möglichkeit, zeitabhängige Feinstaubverteilungen für großskalige Fragestellungen zu untersuchen.

Literatur

Barlovic, R. et al. (2002), 'Open boundaries in a cellular automaton model for traffic flow with metastable states', *Physical Review E* **66**(4).

Burg, Heinz und Moser, A. (2017), *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion: Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*, ATZ / MTZ-Fachbuch, Springer Fachmedien, Wiesbaden.

Krafczyk, M. (2001), Gitter-Boltzmann-Methoden: Von der Theorie zur Anwendung, Habilitation, Technische Universität München, München.

Lee, W. H. (2013), *Computational Methods for Two-Phase Flow and Particle Transport*, World Scientific Publishing Company, Singapore.

Lenz, S. et al. (2019), 'Towards real-time simulation of turbulent air flow over a resolved urban canopy using the cumulant lattice Boltzmann method on a GPGPU', *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* **189**, 151–162.

Maerivoet, Sven und de Moor, B. (2005), 'Cellular automata models of road traffic', *Physics Reports* **419**(1), 1–64.

Nagel, Kai und Schreckenberg, M. (1992), 'A cellular automaton model for freeway traffic', *Journal de Physique I* **2**(12), 2221–2229.

Rauber, T. und Rünger, G. (2012), *Parallele Programmierung*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Rückborn, T. et al. (2014), 'Numerische Simulation des Sedimenttransports im Modellmaßstab', *22. Fachtagung Lasermethoden in der Strömungsmesstechnik* .

Schönherr, M. (2015), Towards reliable LES-CFD computations based on advanced LBM models utilizing (Multi-) GPGPU hardware, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig.

Treiber, Martin und Kesting, A. (2010), *Verkehrsdynamik und -simulation: Daten, Modelle und Anwendungen der Verkehrsflussdynamik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

Umweltbundesamt (2018), 'Feinstaub-Belastung'.
URL: *www.umweltbundesamt.de/daten/luft/feinstaub-belastung*

Yang, X. et al. (2016), 'Intercomparison of 3d pore-scale flow and solute transport simulation methods', *Advances in Water Resources* **95**, 176–189.

Zamith, M. et al. (2012), *An Approach for Traffic Forecast with GPU Computing & Cellular Automata Model*, SemanticScolar.
URL: *www.semanticscholar.org/paper/An-Approach-for-Traffic-Forecast-with-GPU-Computing-Zamith-Joselli/2d1b80dc29b5db00200e551f7ddd941b2ee0f238*

Evaluation of Sensor-Based Registration Accuracy using Head Mounted Augmented Reality Devices

Felix Kremp[1] and Mathias Artus[2]

[1]Intelligentes Technisches Design · Universität Weimar · Marienstraße 7a · 99423 Weimar · E-Mail:felix.kremp@gmail.com
[2]Intelligentes Technisches Design · Universität Weimar · Marienstraße 7a · 99423 Weimar · E-Mail:mathias.artus@uni-weimar.de

The number of Augmented Reality (AR) Systems in engineering and construction increases year by year. A wide variety of systems is used and there has been a trend towards Head Mounted Displays (HMD) in recent years, due to their intuitive use. In building services an HMD can provide the user with all important data for an as-built as-designed comparison. Building services management and maintenance can become quite complex. To ensure the correct installation of all building services, it has to be checked within an as-built as-planned comparison. Although the registration accuracy of virtual content in the real world is of crucial importance for construction applications, it is often neglected. Registration Accuracy describes the offset of virtual content in physical space in relation to its correct position. This offset can be caused by sensor inaccuracies and thus also an inaccurate odometry. This paper will analyze different use cases for initial point registration of virtual content in real space. Furthermore, an evaluation of registration accuracy within the context of head mounted augmented reality is realized. To this end, different testing scenarios regarding different registration methods are developed, to check if the accuracy of the device fulfills the requirements of the construction industry. Individual aspects of these registration methods are then isolated and their accuracy is measured in terms of registration.

Keywords: Augmented Reality, Optical See-Through, Building Services, As-Build As-Planned Comparison, Microsoft Hololens

1 Introduction

In the Architecture, Engineering and Construction (AEC) sector, the term building services engineering describes the process of planning all technical services within a building. Building services engineering address the area of energy supply, heating, ventilation and air conditioning. These systems are closely interlocked with the building and require a variety of openings in walls, ceilings and floors. When it comes to accuracy in building construction in Germany, standards are defined by the “Deutsche Industrie Norm” (DIN) 18201 and 18202 Niedersachsen (2000). The corresponding international norms can be taken from Micksch Micksch (2016). The DIN norm declares the tolerances in building construction with regard to the carcass. The evaluation is based on values taken from that standard.

Today state of the art starts establishing a check of building services clashes within a 3D model. However, if there is no 3D model available only one third of the clashes is detected Borrmann et al. (2015). To ensure a proper positioning and dimensioning of all openings in the later manufacturing process, manufacturing control needs support. In order to supervise huge amounts of openings for building services, e.g. for industrial buildings, this support could be done by using Augmented Reality (AR) and Head Mounted Displays (HMD).

A large number of researches has described the concept of bringing AR into construction industry. In an early approach from the year 2008 Schoenfelder et al. Schönfelder and Schmalstieg (2008) propose an AR system that allows real-time discrepancy checking for industrial facilities. Baek et al. Baek et al. (2019) propose an AR application in order to "offer visually assistive information for facility management". The idea is an image-based localization, which provides the user with data e.g. pipes under the floor. Koch et al. Koch et al. (2014) develop a framework in order to "digitally support facility maintenance operators in performing their daily on-site maintenance jobs". A visualization of as-built and as-planed representation in order to support decision-making tasks is described by Golparvar Golparvar-Fard and Savarese (2011) in an AR application that uses Structure From Motion (SFM) and a Building Information Model (BIM) for registration. The implementation however differs from the other examples shown since only a still-frame image is returned for visualization and evaluation. Furthermore, the concept of AR is researched in the early design phase.

This work introduces different approaches of registering digital content in virtual space, implemented on a Microsoft Hololens Head Mounted Device.

2 Concept

The precondition for the entire process is an existing digital planning model in every use case. All virtual content is represented by the building services planned by an engineer e.g. pipes or electrical lines (within a BIM model), whereas the physical model is given by the building carcass. With the model, a certain amount of information is provided. Not only the building services are shown, but also a 3D model with all important semantic data is provided. The further steps that have to be performed by the user and the device are described down below. Thereby the different concepts are similar in their basic workflow.

The alignment of the digital model with the real-world carcass on start, called initial guess, is the first step in the algorithm. It is followed by the continuous update of the position, while walking. There are three approaches to get the initial guess. Continuous updating after the initial guess is always done by Simultaneous Localization And Mapping (SLAM). The three approaches for the initial guess follows.

2.1 2D Marker based initial guess

Once the engineer creates the digital content, the marker should be located in the model on parts of the carcass. It is important that the position can be easily referenced later in the physical carcass. Afterwards the marker needs to be printed with the correct scale. The printed marker then is put on the same position in physical space relation to building elements as the digital marker. After the marker has been placed, the application is started and the user can capture the marker with the device. The pose estimation is performed based on the marker. The virtual content is shown with the correct transformation. Now the engineer can check if his planned building services have clashes with the built carcass. First it is checked whether all wall openings that were planned for the building services exist in the carcass. If the wall openings do not exist, the planning needs to be reworked or the construction

company needs to be informed and further construction work needs to be done. In case of an existing wall opening, the accuracy is checked. If the offset of the wall opening is within the building tolerances, the approval for release is given for the construction work of the building services. When the offset exceeds the building tolerances, the construction company needs to be informed and further construction work needs to be done.

2.2 User based initial guess

As in the preceding use case, the building services need to be given in digital form. Within the digital model, the user needs to place at least one insert points that represent the insert points of the digital model in physical space. These points will serve as orientation marks for the placement of the digital model in physical space and the position should be easy to identify in the physical space. These positions in turn can be prominent geometries like corners of walls or edges of columns on the floor or ceiling. Once the application is started, the user is prompted to mark the position of the orientation marks in the physical space. When all points are set, the digital content is aligned based on the orientation marks. The following steps correspond to the previous use case.

2.3 Point Cloud/3D Marker based

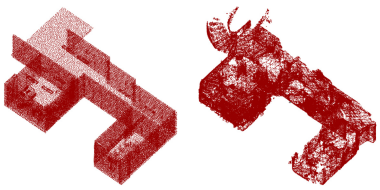


Figure 1: Left: Screenshot: 3D Marker generated from BIM model; Right: Spatial Mapping of chair returned from Hololens (Odomerty)

As in the previous examples, the basis of this method is also a completed planning and thus a virtual content. In the following step the user has to select the digital geometries which are already built in the physical space. The selected geometries serve in the following as 3D marker, but do not require any further actions on the part of the user. The user merely has to start the application and sees the digital content by means of the registration, using the 3D marker and the real-time capture of a point cloud through the device. The following steps correspond to the previous use case. Figure 1 shows on the point clouds, on the left side the one generated from a BIM model on the right side the one based on the visual odometry running in the background of the device. The two point clouds are aligned using the iterative closest point algorithm Besl and McKay (1992) with the . The resulting transformation matrix is applied to the virtual content and thus placed in physical space.

3 Test design

In order to determine the individual uncertainty of measurement, the entire application is broken down into segments, which are manageable in terms of the uncertainty of measurement. This leads to table 1 which is showing the observable test scenarios and which in turn will be described in further detail in the coming section. Each test scenario is run with different test parameters which are defined as dependent variables. The parameters vary depending

on the scenario. For example, there are different walking distances regarding the user or different ambient lighting in the scenario. Only one dependent variable is created in each set. The other parameters thus become independent variables. In this way, the uncertainty of measurement with the corresponding correlation can be determined in each experiment.

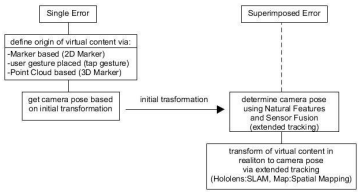
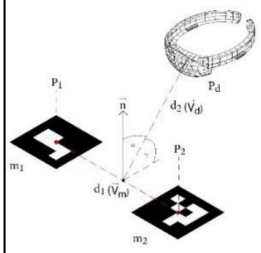
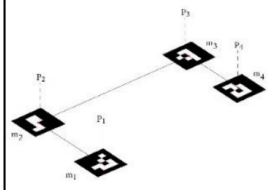
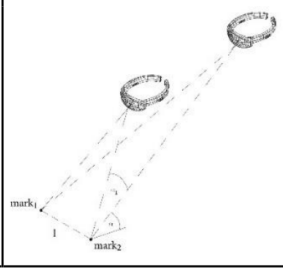


Figure 2: Sequence diagram of distinction between testing

Furthermore, a distinction between "Single Error Testing" and "Superimposed Error Testing" is made. Figure 2 shows the schematic distinction between the two different error testing approaches. It is observable that the left side, which is addressed by the single error test, describes the initial transformation and accordingly the initial camera pose in relation to the origin of the virtual content. The initial pose is estimated by different means depending on the use case (2D marker, User based, 3D marker). The superimposed error testing is based on the initial guess, however includes a consecutively tracking, which is done by the extended tracking, using sensor fusion and SLAM. The accuracy of the extended tracking is measured with the testing scenarios of the "Superimposed

Table 1: Overview of different testing scenarios with different parameters

Name	Parameters to test	Measurement Setup
Measurement of Marker Tracking	distance between marker and device, angle between marker and device, lighting conditions	
Measurement of Point Cloud by Marker	distance between markers, line of sight, data availability, lighting conditions	
Measurement of Point Cloud by Device	distance and angle to measured marks, data availability	

The superimposed errors are also subdivided in different use test scenarios which can be seen in table 2. The measurement is performed through a marker at location of the virtual content. The distance is measured through a vector from the middle of the marker to middle virtual content. The schematic setup can be seen in figure 3.

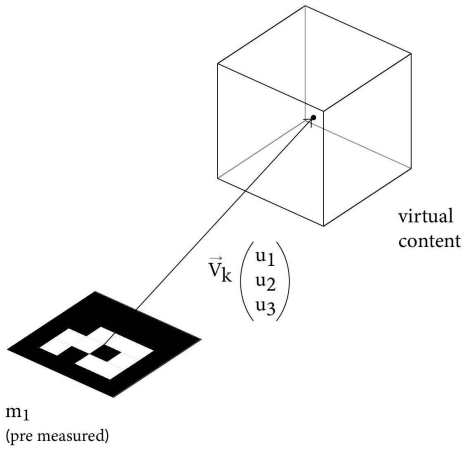


Figure 3: Superimposed error measurement method- from center of marker m1 to center of virtual content

Table 2: Superimposed Error Measurement Scenarios

Measurement Marker based	distance of virtual content
Measurement User besed	distance of virtual content
Measurement Point Cloud based	distance of virtual content, area covered by Point Cloud

4 Test results

For all tests, the Microsoft Hololens serves as test device. In order to give a brief overview, the results of only one single error test is described. Furthermore, all single errors are also included, however not isolated explicitly, in the superimposed error tests.

4.1 Marker Tracking

Marker tracking is split up in device angle and device distance measurements with different lightning conditions since only the RGB camera is used for marker tracking. The statistical values were obtained with around 350 samples for each testing set (for each brightness level and measurement method) within the range the marker tracking worked. The marker pair has a distance of 420 mm and a size of 90 mm. When the marker tracking did not work due to distances being too close or far or angles being too flat, 4 20 m m w ere a ssumed as distance. Figure 4 shows the statistical results with all measurements on the left and only with positive measurements on the right. The darkened environment of the room showed a mean of measurement error within 10.60 mm within the range of a working tracking. That range spans from a close distance of 684 mm from marker to Device to a further distance of 3084 mm. The standard deviation of the measurement error was calculated with 3.38 mm. Figure 4 shows single measurement points that are created within the trackable Range on the left side. It is unusual that the error first exceeded but then dropped again. This behavior can also be seen in the other marker tests. The right side of the graph exemplifies the range in which the marker detection worked.

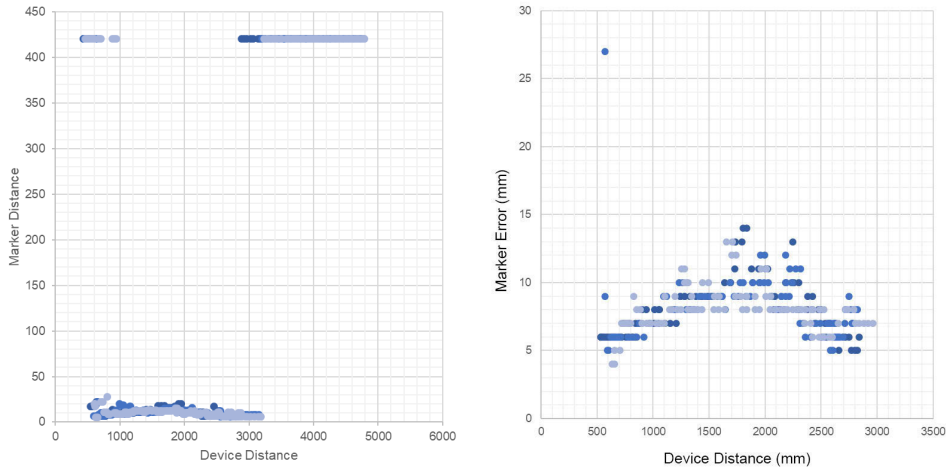


Figure 4: 96 lux: Left: entire range captured during the measurements with corresponding error (if no tracking is possible error value is 420 mm/ 100%); Right: tracked Marker distances error within the trackable range Tracked Marker distances in the range

Under the most realistic circumstances for a construction site with a degree of illumination of 96 lux, the marker tracking showed an improvement in its mean which is $x = 8.03mm$. The distribution of the data points got smaller and thus had a standard deviation of $\sigma = 2.11mm$. All values were also obtained in an almost unchanged range from 578 mm to 2910 mm distance between marker and device. To provide an example: if one does not want to fully exhaust the building tolerances at this point and expects a value of 10 mm as critical value there is a 76.91% chance to retrieve a value smaller or equal to the critical value. With an confidence interval of $\alpha = 5\%$ in order to prove significance, the corresponding marker measurement error would be $\leq 13.01mm$.

4.2 Superimposed Error Tests

The test scenarios which are closest to the use cases are affected by several measurement errors. What all use cases have in common is the drift caused by SLAM. The marker based approach in addition is influenced by the accuracy of the marker detection, whereas the user based approach is affected by the tap accuracy and the Point Cloud based approach by the quality of the point cloud registration. Since single aspects of the marker and user based approach had already been tested, the test runs were performed three times in order to get a representative result Koch et al. (2014). The Point Cloud registration approach had been tested ten times for the best case (with around 50000 points) with the Point Cloud covering a smaller area three times. The accuracy had been measured on two points: The hallway (approximately 6500 mm distance) and the conference room (approximately 18100 mm). In addition, the marker in the conference room and so the virtual content were placed on a table at the height of 730 mm. In all cases the Spatial Mapping data cache has been cleared in order to provide a realistic testing setup. Table 3 shows a listing of the results gained in the tests.

What is striking is the drift in the Point Cloud based approach with a small Point Cloud area used form registration. Since these results are too far from the norm permissible tolerances for building construction, the observation will be dropped in the following explanations and plots.

Table 3: Superimposed Error Measurement Results

Method	$\bar{e}$ Hallway (mm)	$\bar{s}^2$ Hallway (mm)	$\bar{e}$ Conf. room (mm)	$\bar{s}^2$ Conf. room (mm)	Point Cloud (points)	Scanned Area (m²)
Marker based	88.9	11.46	117.66	39.80	-	-
User based	111	59.99	239	47.84	-	-
Point Cloud based (large)	59.59	25.31	173.01	97.72	52318	~50

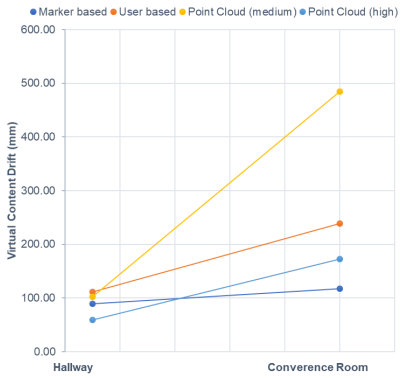


Figure 5: Virtual Content drift, vector length, Distance from initial registration to Virtual Content: Hallway 6500mm, Conference Room: 18100 mm

A comparison of the different scenarios is shown in figure 5. Displayed is the mean of every result at the corresponding measurement point. At the fist measurement point (hallway) all measured means are relatively close together. The Point Cloud based approach with a large Point Cloud for registration has the best mean ($x = 59.59mm$) and the user based the worst one with a value of $x = 111mm$. At the second measurement point (conference room) the results spread more. The approach with a medium scanned area Point cloud had a mean error of $x = 998.76mm$. The best results were achieved by the marker based approach however with only little difference to the Point Cloud based approach of a large area. The probability to stay under a critical value of 20 mm is 8.33% in the hallway and 5.87% in the convergence room.

5 Conclusion

The aim of this work was to find out whether the accuracy of a Head Mounted Augmented Reality Device fulfills the requirements of the construction industry regarding the accuracy norms. The motivation behind the idea of visualizing building services geometry in AR is based on the increasing complexity of building services systems (e.g. pharmaceutical or semi-conductor production). Based on this, different use cases have been developed and

described in order to register virtual content in form of a building services planning into the physical world. The use cases differed in the way how virtual content was registered in the real world. The decisive factor whether an HMD can be used for these purposes or not, is the sensor-based accuracy of the device.

To this end, different measurement scenarios were developed. A distinction between single errors and superimposed error testing has been made. The single error test addressed aspects like the marker tracking and the SLAM accuracy. The superimposed error testings addressed a marker based, a user placed and a 3D marker based approach in order to measure the drift of augmented virtual content.

Regarding the results above, it can be stated that none of the approaches is reliable for the use within permissible tolerances for building construction based on DIN 18201 (20mm). Hence, the Microsoft Hololens cannot be used within building construction in order to check as-built and as-planned states of building services. In order to be neglected, the probability of getting an error of $\leq 20mm$ needs to be 95.5% or higher. The achieved results are much higher, since many of them have a mean value of $\leq 20mm$. However, the accuracy is high enough for other purposes, like indoor navigation.

References

Baek, F., Ha, I. and Kim, H. (2019), 'Augmented reality system for facility management using image-based indoor localization', *Automation in Construction* **99**, 18–26.

Besl, P. J. and McKay, N. D. (1992), Method for registration of 3-d shapes, *in* 'Sensor Fusion IV: Control Paradigms and Data Structures', Vol. 1611, International Society for Optics and Photonics, pp. 586–607.

Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2015), *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, VDI-Buch, Springer Fachmedien Wiesbaden.

Golparvar-Fard, Mani, F. and Savarese, S. (2011), 'Integrated sequential as-built and as-planned representation with d 4 ar tools in support of decision-making tasks in the aec/fm industry', *Journal of Construction Engineering and Management* **137**(12), 1099–1116.

Koch, C., Neges, M., König, M. and Abramovici, M. (2014), 'Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance', *Automation in Construction* **48**, 18–30.

Micksch, K. (2016), *Bauleitung im Ausland*, Springer.

Niedersachsen, B.-V. (2000), 'Merkblatt toleranzen im hochbau'.
URL: *http://architekt-buxtehude.de/*

Schönfelder, R. and Schmalstieg, D. (2008), Augmented reality for industrial building acceptance, *in* '2008 IEEE Virtual Reality Conference', IEEE, pp. 83–90.

Rekursive Bayesische Schätzverfahren zur smartphonebasierten Positionierung von Personen innerhalb von Gebäuden – Ein Vergleich von Unscented Kalman Filter und Partikelfilter

Annika Kessen[1] und Jan Grottke[2]

Geodätisches Institut · RWTH Aachen · Mies-van-der-Rohe Straße 1 · 52074 Aachen ·

[1]E-Mail: annika.kessen@rwth-aachen.de
[2]E-Mail: jan.grottke@gia.rwth-aachen.de

Die Positionsbestimmung von Personen oder Objekten im Inneren von Gebäuden gewinnt zunehmend an Bedeutung. Im Außenbereich wird die Positionierung in der Regel mithilfe satellitenbasierter Systeme in einem globalen Bezugssystem realisiert. Im Inneren von Bauwerken ist hingegen auch mit speziellen Receivern derzeit keine flächendeckende und exakte Positionsbestimmung möglich, da die Satellitensignale durch Bauwerkselemente abgeschirmt bzw. stark gedämpft und somit nicht mehr für die Positionsbestimmung genutzt werden können. Seit einigen Jahren werden daher alternative Lösungen für die automatische Lokalisierung in Innenräumen untersucht. Das Smartphone, ein weitverbreitetes low-cost Multisensorsystem, erscheint als eine vielversprechende Plattform, insbesondere für die In-door-Lokalisierung von Personen.

Für die Fusion aller verfügbaren Daten werden häufig stochastische Filter, meist in Form rekursiver Bayesischer Schätzverfahren, eingesetzt. Insbesondere bei nichtlinearen System-modellen kann das Unscented Kalman Filter (UKF) oder ein sequenzielles Monte-Carlo-Filter, wie das Partikelfilter (PF), eingesetzt werden. Ziel ist es die Position im Gebäude anhand von Sensordaten und integrierten Kommunikationstechnologien des Smartphones, eines di-gitalen Gebäudemodells sowie unterstützenden externen Indoor-Positionierungssystemen zu bestimmen. Ein weiterer Bestandteil ist die Evaluierung sowie ein Vergleich des entwickel-ten UKF mit einem existierenden PF.

Keywords: Indoor-Positionierung, Smartphone-Sensorik, Sensor Fusion, Unscented Kalman Filter, Partikelfilter, Bluetooth Low Energy, WLAN.

1 Einleitung

Die Positionsbestimmung von Personen oder Objekten innerhalb von Gebäuden oder überbauten Arealen (Indoor) gewinnt zunehmend an Bedeutung. Die automatische Positionsermittlung kann bspw. für Sicherheitsanwendungen, das Materialtracking auf Baustellen, die Steuerung autonomer Maschinen oder für Wartungs- und Inspektionsanwendungen in der Bauwerksunterhaltung äußerst hilfreich sein. Im Außenbereich ist eine Positionsbestimmung bereits seit einigen Jahren mithilfe satellitenbasierter Systeme (Global Navigation Satellite System, GNSS) möglich. Innerhalb von Gebäuden ist auch mit speziellen Receivern (High Sensitivity GNSS) aufgrund von Signalabschottungen derzeit keine flächendeckende und exakte Positionsbestimmung möglich.

Um dennoch eine Positionsschätzung in Innenräumen durchzuführen, sind in den vergangenen Jahren eine Vielzahl alternativer Lösungen für die automatische Lokalisierung innerhalb von Gebäuden untersucht worden. Die entwickelten Systeme bieten dabei häufig nur für spezielle Anwendungen oder unter optimierten Bedingungen zufriedenstellende Ergebnisse (Klingbeil 2012.). Deshalb ist es Motivation dieser Arbeit zu überprüfen, inwieweit durch die Kombination verschiedener Technologien eine genaue Schätzung gegenwärtiger Positi-onen ermöglicht werden kann. Als vielversprechende Plattform für die Indoor-Positionierung wird das Smartphone, ein weitverbreitetes low-cost Multisensorsystem, verwendet. Neben den durch die vorhandenen Sensoren moderner Smartphones ermittelten Daten werden hier-für auch zusätzliche Informationen, wie etwa verfügbares Kartenmaterial, in die Schätzung der Position eingebunden. Die Verarbeitung der verschiedenen Daten zur Positionsschätzung erfolgt hierbei durch rekursive Bayesische Schätzverfahren. Diese Ausarbeitung konzentriert sich dabei auf die Varianten PF sowie UKF der Bayesischen Filtermethoden.

2 Stand der Technik

Neben Empfängerchips der GNSS verfügen mobile Endgeräte, wie z. B. Smartphones, heutzutage über eine Vielzahl von alternativer Positionierungssensorik (bspw. Accelerometer, Gyroskop oder Magnetometer). Die Positionsangabe wird abhängig von dem Genauigkeits-potenzial des Systems in Form von Koordinaten oder einer semantischen Beschreibung (z. B. Raumnummer und Etage) angegeben. Indoor-Positionierungssysteme (IPS) sollen hierbei eine automatische Positionsbestimmung von Personen oder Objekten innerhalb von Gebäu-den in Echtzeit ermöglichen und stellen damit sogenannte Real-Time Locating Systems (RTLS) dar (Blankenbach 2014).

Trotz intensiver Forschungen in den vergangenen Jahren, hat sich bisher keine Technologie oder Methode bzw. Algorithmus als Standard etabliert. Viele der existierenden Systeme stoßen in Innenräumen bspw. aufgrund von Mehrwegeausbreitung oder Signalabschottung an ihre Grenzen. Bei der smartphonebasierten Lokalisierung von Personen wird daher verstärkt an der Entwicklung hybrider Systeme gearbeitet. Die Grundlage der Systeme stellt in der Regel ein autonomes IPS dar. Dieses verwendet die Inertialsensoren eines Smartphones in Kombination mit der Fußgänger-Koppelnavigation (Pedestrian Dead Reckoning - PDR) sowie Bayesischen Filteralgorithmen zur Positionsbestimmung. Zusätzlich werden die Schätzungen häufig mithilfe von Informationen aus digitalen Gebäudegrundrissen plausibilisiert (Zampella et al., 2015). Durch die Ergänzung eines autonomen IPS um weitere infrastrukturbasierte Technologien und Algorithmen wird schließlich die Entwicklung eines robusten IPS angestrebt (Behnke 2013).

Generell können solche Positionierungssysteme auf der Basis verschiedener Einzeltechnologien realisiert werden. Zu diesem Zweck werden bereits Funksysteme wie WLAN (Khalil and Jung 2015), Bluetooth (Maratea 2018) oder auch Magnetfelder (Xie et al., 2014) eingesetzt. Basierend auf dem Ansatz des PDR können die in heutigen Smartphones installierten inertialen Messeinheiten (IMU) Kurs- und Geschwindigkeitsinformationen für eine relative und kontinuierliche Lokalisierung liefern.

Der ausschließliche Einsatz von IMU zur Positionsbestimmung ist jedoch aufgrund dessen Driftverhaltens nur für einen kurzen Zeitraum möglich (Becker and Becker 2015). Um qualitativ hochwertige Messungen zu erreichen, werden häufig Sensoren mit hohem Gewicht

und Stromverbrauch benötigt. Diese sind allerdings für viele Anwendungen im Massenmarkt ungeeignet. Im Low-Cost-Bereich hingegen sind weitere Sensoren wie barometrische Höhenmesser oder Magnetometer integriert, die wiederum nur Messdaten zur Bestimmung von ein oder zwei Freiheitsgraden liefern.

In (Sternberg et al., 2010) wird die Sensorfusion eines kompakten Sensorsystems beschrieben, während in (Willemsen et al., 2015) und (Real Ehrlich 2018) die Daten von kostengüns-tigen MEMS-Sensoren (mikro-elektro-mechanische Systeme wie IMU, Magnetometer, Ba-rometer) und approximativen Schätzverfahren auf Basis von Kommunikationstechnologien (WLAN, Bluetooth Low Energy - BLE) mit digitalen Gebäudemodellen für die 2,5D Fuß-gängerlokalisierung kombiniert werden. Um all diese Informationen zu nutzen, wird die Sen-sorfusion oft mit einem Kalman-Filter (Kalman 1960) in verschiedenen Varianten (z.B. Ex-tended Kalman-Filter (EKF), iterativer Kalman-Filter (IKF) (Hellmers et al., 2016) oder auch mit dem in dieser Arbeit genutzten UKF realisiert (Diefenbach and Eichhorn 2016) (Thrun et al., 2005)). Der Kalman-Filter basiert hierbei auf einer Gaußschen Wahrscheinlichkeits-verteilung. Um den aktuellen Standort aus komplexen, nichtlinearen und nicht-gaußschen Bewegungsmustern bestimmen zu können, die im Allgemeinen auch nicht analytisch lösbar sind, wird ein stochastisches Modell verwendet.

Die Datenfusion und Positionsschätzung erfolgt daher mit sequentiellen Monte-Carlo-Filtern, auch bekannt als PF. Diese können leicht verschiedene lineare und nichtlineare Informationsquellen fusionieren. Zu diesem Zweck verwenden diese Filter normalerweise Hunderte oder Tausende von unabhängigen, zufällig verteilten Partikeln. Dabei soll die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Systems durch eine große Anzahl von gewichteten Teilchen (Gordon et al., 1993) reproduziert werden. Durch ihre Verteilung und Bündelung (Kon-vergenz) um einen Punkt herum, zeigen diese Partikel die aktuelle Position an.

Im Rahmen der Entwicklung eines smartphonebasierten Echtzeit-IPS auf Grundlage des PFs ist bereits ein Modell zur Distanz- und Orientierungsermittlung anhand der Inertialsensorik eines Smartphones entwickelt worden (Real Ehrlich 2018). Die im Rahmen dieser Veröffentlichung ermittelten Daten dienten als Ausgangspunkt für die Entwicklung eines hybriden IPS unter Verwendung eines UKFs.

3 Partikelfilter und Unscented Kalman Filter

Rekursive Bayesische Filtermethoden ermöglichen die Schätzung eines Zustandes aus vorhandenen Wahrscheinlichkeitsprognosen. Die a-posteriori Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p\ (x\ (t\ )|z\ (t\ ))$ beschreibt den Zustand $x\ (t\ )$ zum Zeitpunkt t und spiegelt damit die Un-sicherheit der Zustandsgröße wider. Die Grundlage der Bayes Filter stellt das Bayes-Theo-rem dar, welches rekursiv angewendet wird. Eine Zustandsschätzung zum Zeitpunkt t wird somit rekursiv aus der Schätzung zum Zeitpunkt $t\ -1$ ermittelt. Dieser Vorgang gliedert sich in zwei Schritte: erstens der Prädiktion (Prediction) oder Vorhersage und zweitens dem Update bzw. der Aktualisierung. In der Prädiktionsphase wird, basierend auf der Zustands-schätzung $x\ (t\ -1)$ sowie einer Steuerung $u\ (t\ )$, eine Schätzung für den aktuellen Zustand $x\ (t\ )$ abgegeben. Eine Steuerung $u\ (t\ )$ stellt dabei eine Schätzung der tatsächlichen Messung $z\ (t\ )$ dar, wie z. B. im Rahmen der Positionsschätzung die vermutete Bewegung einer Person. Die Zustandsschätzung wird im zweiten Schritt des rekursiven Vorgangs (Aktualisierung) mithilfe der Messung $z\ (t\ )$ korrigiert. Bayes Filter sind in ihrer Ursprungsform nur für sehr

einfache Schätzprobleme und damit nicht für die Positionsschätzung in Innenräumen einsetzbar. Für die Implementierung eines rekursiven BF existieren eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten. Das PF sowie das UKF zählen zu den am häufigsten verwendeten Filtermethoden und sind auch für nichtlineare Schätzprobleme geeignet (Thrun et al., 2005). Beide Filterme-thoden wurden im Rahmen dieser Arbeit in Matlab 2018a implementiert.

3.1 Partikelfilter

Die Grundidee des Partikelfilters besteht darin, dass die a-posteriori Zustandsschätzung durch einen Satz zufälliger Stichproben repräsentiert wird, die aus der a-posteriori Wahrscheinlichkeitsverteilung entnommen werden. Mit dem Ziel, die wahre Position im Gebäude zu schätzen, können die Partikel unter Berücksichtigung der aus den Sensordaten gewonnenen Bewegungen des Nutzers gesteuert und anhand der Gebäudestruktur evaluiert werden. Dabei gilt, dass die Wahrscheinlichkeit eines Zustandes in einem bestimmten Bereich steigt, je mehr Partikel sich in diesem Bereich des Zustandsraumes ansammeln. In dieser Arbeit werden die Messdaten und die Schrittweiten- sowie Schrittrichtungsbestimmung aus (Real Ehrlich 2018) genutzt. Dort findet sich auch eine ausführliche Beschreibung des PF.

3.2 Unscented Kalman Filter

Das UKF ist ein weiteres Werkzeug zur Schätzung von Zuständen. Ebenso wie bei dem EKF wird die Annahme der Linearität bei dieser Methode aufgehoben. Um die Wahrscheinlich-keitsdichtefunktion für die Zustandsschätzung in Gaußscher Form abzubilden ist somit auch bei dieser Filtermethode eine Linearisierung erforderlich. Diese erfolgt bei dem UKF in ei-nem gewichteten, statistischen, linearen Regressionsprozess. Dieser Prozess wird als Unscented Transform bezeichnet und stellt eine Alternative zu der Taylor Expansion dar, die bei dem EKF zum Einsatz kommt.

Anstelle einer Annäherung an die Funktion g durch eine Tangente werden bei der Unscented Transform sogenannte Sigma-Punkte X_i aus der Ausgangsverteilung extrahiert und über die nichtlineare Funktion g (X_i) transformiert. Die Sigma-Punkte orientieren sich für gewöhnlich an dem Mittelwert der Verteilung und erstrecken sich symmetrisch über die Hauptachsen der Kovarianz. Für eine n-dimensionale Gauß-Verteilung mit dem Mittelwert μ und der Kovari-anz ∑ werden $2n + 1$ Sigma-Punkte ausgewählt. Die Variable n entspricht dabei der Dimen-sion des Zustandsvektors x_t.

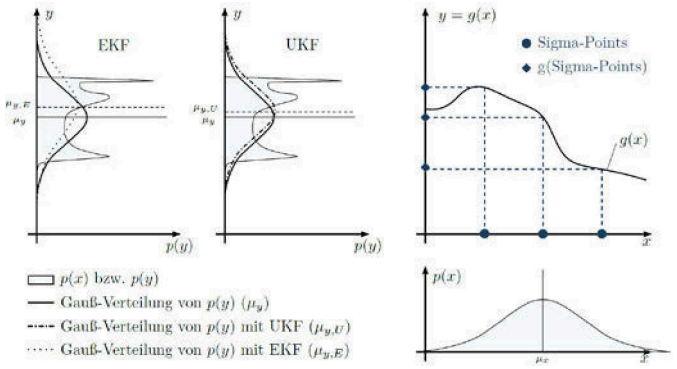


Abbildung 1: Vergleich der Linearisierung mit der Taylor Expansion (EKF) und der Unscented Transform (UKF) bei einer hohen Kovarianz (Thrun et al., 2005)

Mithilfe der Skalierungsparameter α und κ kann über die Variable λ die Entfernung der Sigma-Punkte zu dem Mittelwert μ reguliert werden. Für jeden Sigma-Punkt werden zwei Gewichtungsfaktoren definiert. Der erste Faktor w_m wird für die Ermittlung des Mittelwertes verwendet, während der zweite Gewichtungsfaktor w_c bei der Berechnung der Kovarianz zum Einsatz kommt. Mithilfe der transformierten Sigma-Punkte kann schließlich die resultierende Gauß-Verteilung der Unscented Transform (vgl. Abbildung 1) ermittelt werden.
Hierbei ist insbesondere bei einer hohen Kovarianz der Verteilung, im Vergleich zu der Tay-lor Expansion, eine genauere Annäherung an die tatsächliche Verteilung erreichbar. Die Ver-teilung wird durch den resultierenden Mittelwert μ′ und die Kovarianz $\sum'$ definiert (Thrun et al., 2005).

4 Evaluationsumgebung

Als Messstrecke diente das vierte Obergeschoss des Institutsgebäudes der Fakultät Bauingenieurwesen der RWTH Aachen. Dieses Geschoss hat eine Länge von ca. 83 m und eine maximalen Breite von ca. 17 m. Die Teststrecke ist ca. 145 m lang und basiert auf insgesamt 14 Ground Truth Points (GTP) (vgl. Abbildung 2). Anhand der Referenzkoordinaten der GTP auf der Teststrecke und den geschätzten Koordinaten wurde ein Soll-Ist-Vergleich durchgeführt. Als Vergleichsmaßstab werden im Folgenden die maximale und die mittlere Entfernung, der Median der Entfernungen sowie die Wurzel des mittleren Abwei-chungsquadrates (Root-Mean-Square Error - RMSE) der Soll-Ist-Streckenlängen betrachtet.

Da die Sensordaten in der Bewegung aufgenommen worden sind, ist eine akkurate Zentrierung des Fußes auf den Bodenpunkt schwer zu erreichen gewesen. Bei dem Soll-Ist-Ver-gleich der Referenzkoordinaten und der geschätzten Position ist daher zu beachten, dass Abweichungen bis zu 30cm mit der Bewegung während der Aufnahme der Sensordaten zu er-klären sind.

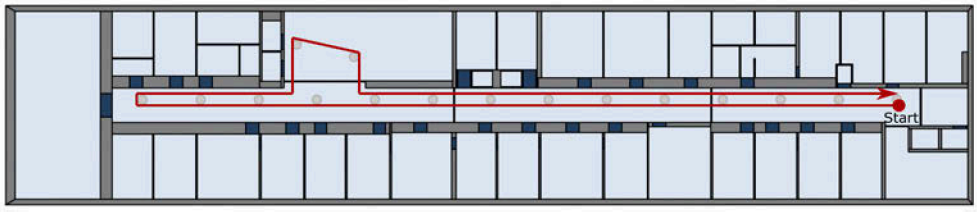


Abbildung 2: Versuchsstrecke im 4. OG

5 Ergebnisse

Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse der Testläufe für die Smartphones Sony Z5 und Google Pixel 2, jeweils ausgewertet mit dem UKF und dem PF. Als Stützinformationen kamen neben dem PDR drei BLE Beacons zum Einsatz. Unter Verwendung des UKFs ist eine deutliche Abweichung der geschätzten Position zu den GTP erkennbar.

Tabelle 1: Ergebnisse der Positionsschätzung mit dem UKF sowie dem PF in einem hybriden System unter Berücksichtigung von drei BLE Beacons

Filter	Smartphone	Maximale Abweichung [m]	Mittlere Abweichung [m]	Median der Abweichung [m]	RMSE [m]
UKF	Sony Z5	50.88	11.81	7.88	16.47
	Google Pixel 2	51.32	7.03	3.73	12.37
PF	Sony Z5 (600 Partikel)	4.84	1.98	1.88	0.97
	Google Pixel 2 (1500 Partikel)	8.94	3.27	2.55	2.07

Das UKF erreichte im Vergleich zum PF unter Beachtung aller Vergleichsmaßstäbe eine schlechtere Positionsgenauigkeit. Wird das hybride System um ein WLAN-Fingerprinting erweitert, so erhöhen sich bei beiden Positionierungsverfahren die Abweichungen zu den GTP. Das PF erzielte unter Verwendung von 1500 Partikeln auf dem Google Pixel 2 jedoch eine Verbesserung des RMSE. Das UKF erreichte trotz der zusätzlichen Informationen schlechtere Positionierungsergebnisse, welche in Tabelle 2 zu erkennen sind.

Tabelle 2: Ergebnisse der Positionsschätzung mit dem UKF sowie dem PF in einem hybriden System unter Berücksichtigung des WLAN-Fingerprintings und drei BLE Beacons

Filter	Smartphone	Maximale Abweichung [m]	Mittlere Abweichung [m]	Median der Abweichung [m]	RMSE [m]
UKF	Sony Z5	61.36	18.59	16.09	23.13
	Google Pixel 2	36.81	13.00	11.92	15.76
PF	Sony Z5 (600 Partikel)	6.74	2.95	2.79	1.51
	Google Pixel 2 (1500 Partikel)	7.59	3.25	3.06	1.77

Die in Tabelle 3 vorgestellten Durchschnittszeiten für die Berechnung der Positionsverschie-bung nach einem Schritt bzw. für eine komplette Simulation zeigen die Performance von UKF und PF und wurden anhand von 10 Simulationsdurchläufen aufgezeichnet. In der aktu-ellen Form skaliert die Bearbeitungszeit in etwa mit der Anzahl der Partikel. Um zu gewähr-leisten, dass auch höhere Schrittfrequenzen mit dem PF in Echtzeit verarbeitet werden, muss die Partikelanzahl begrenzt werden. Dies ist bspw. bei dem Test mit 1500 Partikeln zu er-kennen, bei dem ein Schritt nur knapp alle 0.56s erfolgen kann, da eine höhere Schrittfre-quenz nicht mehr verarbeitet werden könnte. Aufgrund der (derzeit noch) begrenzten Re-chen- und Speicherressourcen von Smartphones stellt die geringere Rechenzeit mit dem UKF einen maßgeblichen Vorteil gegenüber dem PF dar.

Tabelle 3: Durchschnittlich erforderliche Rechenzeit für eine Positionsschätzung mit dem UKF sowie dem PF in einem autonomen System

		Rechenzeit je detektiertem Schritt [s]	Rechenzeit je Simulation [s]
UKF		0.0227	4.566
PF	30 Partikel	0.0265	5.202
	600 Partikel	0.2544	50.316
	1500 Partikel	0.5599	110.670

6 Schlussbetrachtung und Ausblick

Abschließend lässt sich festhalten, dass im Falle der Bayesischen Filtermethode des PFs unter Zuhilfenahme der vorhandenen mobilen Sensorik eines Smartphones eine Lokalisierung in Innenräumen möglich ist. Wohingegen die hohe Fehleranfälligkeit der Inertialsensoren insbesondere bei der Anwendung des UKFs zu erheblichen Ungenauigkeiten in der Positionsschätzung führt. Die Stützung dieser Systeme durch infrastrukturbasierte Positionierungssysteme auf Basis von WLAN führt u. a. aufgrund der Ausbreitungseigenschaften der Funksignale (z. B. Absorption) sowie der hohen Aktualisierungsrate der Signalstärkekarten zu einer erhöhten Ungenauigkeit.

Die punktweise Korrektur der Positionsschätzung durch die Installation von BLE Beacons im Gebäude wirkt sich dagegen sehr positiv auf die Schätzungen aus. Insbesondere bei einer Stützung der Positionsbestimmung in einem IPS auf Grundlage des PF verringern sich die mittleren Abweichungen auf ca. 2 − 3 m (siehe Tabelle 1). Ebenso wird beim UKF durch die punktweise Korrektur der Positionsschätzung eine erhöhte Genauigkeit erzielt. Mit mittleren Abweichungen von über 7 m ist die Genauigkeit dieser Systemvariante unter Einsatz des UKFs allerdings unzureichend für eine Positionsschätzung in Innenräumen. Die Installation zusätzlicher BLE Beacons stellt eine Möglichkeit zur Verbesserung der Schätzungen dar. Bei einer ausreichenden Anzahl von BLE Beacons ist zu erwarten, dass auch mit dem UKF eine robuste Positionsschätzung abgegeben werden kann.

Insbesondere im Hinblick auf das Ziel ein smartphonebasiertes Echtzeit-IPS zu entwickeln, stellt die erforderliche Rechenleistung ein wichtiges Kriterium und damit einen maßgebenden Vorteil des UKFs gegenüber dem PF dar. Allerdings ist das PF im Vergleich zu dem UKF aufgrund dessen höherer Genauigkeit insgesamt als die bessere Lösung für die Positionsschätzung in Innenräumen zu beurteilen. Insgesamt lässt sich festhalten, dass die Notwendigkeit einer Startposition für den UKF und dessen unzureichende Positionsgenauigkeit sowie der Bedarf nach einer Steigerung der benötigten BLE-Sender die Verwendung des UKFs in der vorliegenden Form unpraktikabel für den Einsatz als robustes IPS machen.

Literatur

Becker, D. and Becker, M., 2015. A study of non-stochastic IMU errors in strapdown airbor-gravimetry.2015 DGON Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS), IEEE, Karlsruhe, Germany, 18 pages.

Behnke, R., 2013. Effiziente Algorithmen der Positionsbestimmung und positionsbasierte Kontextgewinnung zur Selbstorganisation in drahtlosen Sensornetzwerken. Dissertation, Universität Rostock, Rostock, Germany.

Blankenbach, J., 2014. Indoor-Positionierung & Lokale Positionierungssysteme. Brand/Schilcher (Hrsg.): Mobile GIS – Hardware, Software, IT-Sicherheit, vol. 2, pp. 26-33.

Diefenbach, N. and Eichhorn, A., 2016. Direct georeferencing of a multi-sensor platform for mobile mapping applications and damage detection. 3rd Joint International Sympo-sium on Deformation Monitoring, Vienna, Austria.

Gordon, N., Salmon, D. and Smith, A., 1993. Novel approach to nonlinear/non-Gaussian Bayesian state estimation. Proceedings on Radar and Signal Processing, vol. 140, pp. 107-113.

Hellmers, H., Diefenbach, N. and Eichhorn, A., 2016. IMU/UWB Sensorfusion für die Indoor-Positionierung von fahrbaren Plattformen. Zeitschrift für Geodasie, Geoinformation und Landmanagement (ZfV), Wisner, vol. 6, pp. 407-415.

Kalman, R. E., 1960. A new approach to linear filtering and prediction problems. Journal of basic Engineering, vol. 82, no. 1, pp. 35-45.

Khalil, L. and Jung, P., 2015. Spherical simplex unscented Kalman filter for RSSI-Based WLAN IEEE 802.11n positioning and tracking. 2015 IEEE 26th Annual Interna-tional Symposium on IEEE, Personal, Indoor, and Mobile Radio Communica-tions (PIMRC), Hong Kong, China, pp. 2094-2098.

Klingbeil, L. und Romanovas, M., 2012. Rekursive Bayesische Schätzverfahren zur Lokalisierung von Personen innerhalb von Gebäuden. Band 6, zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement, Seiten 365–376.

Maratea, A., Gaglione, S., Angrisano, A., Salvi, G. and Nunziata, A., 2018. Non parametric and robust statistics for indoor distance estimation through BLE. 2018 IEEE International Conference on Environmental Engineering (EE), Milan, Italy, 6 pages.

Real Ehrlich, C. M., 2018. Echtzeit-Positionierung für Fußgänger innerhalb von Gebäuden auf Basis von Smartphone-Sensoren. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Aachen.

Sternberg, H., Hönniger, C. and Fessele, M., 2010. Indoor-Navigation ohne Verwendung von Infrastruktursensoren. Beiträge zum 16. Internationalen Ing.verm.kurs München, Wichmann, Heidelberg, Germany, pp. 131-143.

Thrun, S., Burgard, W. and Fox, D., 2005. Probabilistic Robotics. MIT press, Cambridge.

Willemsen, T., Keller, F. and Sternberg, H., 2015. A topological approach with MEMS in smartphones based on routing-graph. 2015 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), Banff, Canada, 6 pages.

Xie, H., Gu, T., Tao, X., Ye, H. and Lv, J., 2014. MaLoc: A practical magnetic fingerprinting approach to indoor localization using smartphones. Proceedings of the 2014 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing, pp. 243-253.

Zampella, F., Ruiz, A. R. J. and Granja, F. S., 2015. Indoor Positioning Using Efficient Map Matching, RSS Measurements, and an Improved Motion Model. IEEE Transac-tions on Vehicular Technology vol. 64, no. 4, pp. 1304-1317.

Mixed Reality in der universitären Tragwerkslehre

Judith Krischler

Professur für Intelligentes Technisches Design · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 13A · 99423 Weimar · judith.krischler@uni-weimar.de

Durch neue Arbeitsmethoden in der Bauindustrie wird von den IngenieurInnen von morgen auch ein verändertes Kompetenzprofil verlangt. Die Kompetenzbildung im Zuge der universitären Ausbildung soll mit der Integration neuer Lehrmethoden beschleunigt und an die zeitgemäßen Anforderungen des Berufsbildes angepasst werden. Der Einsatz von Mixed Reality (MR) soll die Studierenden dabei bei der Bildung eines sogenannten „Mentalen Modells" unterstützen. Ein mentales Modell steht jeweils am Ende eines jeden Lernprozesses und impliziert das Verständnis des erlernten Wissens im gesamthaften Kontext. Eigens entwickelte MR-Szenarien werden an die jeweilige Stufe im Lernprozess sowie die damit verbundenen Lehrziele angepasst, um den Prozess bestmöglich zu unterstützen, bzw. zu beschleunigen. Dieser Beitrag behandelt die Studienkonzeption und das Soft- und Hard-ware-Framework zur Umsetzung besagter MR-Szenarien. In einer Vorstudie werden die konzipierten Szenarien eingesetzt, um eine optimierte AR(Augmented Reality)-, bzw. VR(Virtual Reality)-Lernumgebung zu schaffen, welche den Nutzen der Technologie für die Lehre bestmöglich unterstützen. Dabei kommt für die VR-Szenarien die Spieleengine Unity zum Einsatz, für die AR-Szenarien ein Setup aus dem 3D-Modellierungsprogramm Rhino 6 sowie der visuellen Programmierumgebung Grasshopper. Die entwickelten Lern-szenarien werden in der universitären Praxis auf ihre tatsächliche Fähigkeit zur Unterstützung des Lernprozesses getestet. Zu diesem Zweck werden nicht nur motivationale und kognitive Faktoren berücksichtigt, sondern vor allem auch die Interaktionen des Nutzers geloggt und ausgewertet.
Keywords: Teaching, Engineering, Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality

1 Hintergrund

Dieser Beitrag beschreibt das Studiendesign sowie erste Prototypen für die Untersuchung von positiven Effekten bei der Nutzung von VR- und AR-gestützten Anwendungen in der universitären Ingenieurausbildung.

1.1 Signifikanz des Problems

Franz E. Weinert beschreibt Kompetenz als „[. . .] die bei Individuen verfügbaren oder durch sie erlernbaren kognitiven Fähigkeiten und Fertigkeiten, um bestimmte Probleme zu lösen sowie die damit verbundenen motivationalen, volitionalen und sozialen Bereitschaften und Fähigkeiten um die Problemlösungen in variablen Situationen erfolgreich und verantwortungsvoll nutzen zu können." Weinert (2002). Als gängige Kompetenzen in Ingenieurberufen gelten analytisches, systematisches Denken und eine gewisse Affinität zu naturwissenschaftlichen Fächern, wie Mathematik, Physik und Chemie. Auch räumliches Vorstellungsvermögen und die generelle Fähigkeit, abstrahierte technische Systeme mental auf die Wirklichkeit zu übertragen, spielen eine große Rolle.

Die traditionelle Ingenieurlehre an Universitäten, insbesondere die Tragwerkslehre, ist seit jeher bestimmt durch abstrahierte Übungsbeispiele, welche per Hand und in einer hohen Wiederholungszahl durch Studierende erarbeitet werden müssen. Im Gegensatz zu der vielkommentierten Kompetenzorientierung in der Erwachsenenbildung Frank and Iller (2013), also

die gezielte Ausbildung hin zu einer Kompetenz und nicht zur reinen Wissens-vermittlung, stellt die universitätsspezifische Ingenieurausbildung noch immer eher letzteres dar. Obengenannte Kompetenzen für Ingenieurberufe sind an der Universität bereits vo-rausgesetzt und nicht, bzw. nur sehr reduziert, Gegenstand gezielten Trainings. Laut Lersch fallen jedoch bei der Kompetenz „Wissen und Können zusammen." (Lersch, 2013, S. 37).

Der Umgang mit der neuen Arbeitsmethodik Building Information Modeling (BIM) und der übergroßen Informationsverfügbarkeit legt ein verändertes Kompetenzprofil der zukünfti-gen IngenieurInnen nahe. In einer Studie der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg zum Thema „Anforderungen an den Ingenieur der Zukunft", nannten etwa ein Drittel der Be-fragten „Neueinstellungen" als geeignete Maßnahme zum Ausgleich von Kompetenzdefizi-ten im Unternehmen Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (2015). Das nimmt in der Kausalkette auch die Universitäten und deren Lehre in die Pflicht.

1.2 Bedeutung der kognitiven Text- und Bildverarbeitung für die Wahl der Lehrmethoden

Bildung von Kompetenz setzt laut Lersch nicht nur das reine Wissen voraus, sondern auch das Begreifen des Erlernten. Gesprochen wird im Zusammenhang mit dem Lernprozess auch vom sogenannten „Mentalen Modell". Der Begriff, welcher von P. N. Johnson-Laird geprägt wurde, beschreibt die simplifizierte Repräsentation einer Thematik im (menschlichen) Bewusstsein Johnson-Laird (1983). Dieses Abbild sollte im Idealfall alle relevanten Eigenschaften des wirklichen Sachverhaltes widerspiegeln und es ermöglichen, aufgrund dieses tiefen Verständnisses Zusammenhänge zu erkennen und Problemstellungen zu lösen.

Der Weg zur Bildung eines mentalen Modells kann mithilfe von Text- und Bildinformationen beschritten werden. Unter Textinformationen wird dabei nicht nur geschriebener Fließtext in Form von Büchern oder Vorlesungsskripten verstanden, sondern auch das gesprochene Wort in Form von Vorträgen oder Audio-Kommentaren. Bildinformationen indes beinhalten auch Videos, Bilder auf Folien oder in Skripten sowie Gesehenes in (einer) Realität. Für das menschliche Gehirn sind bildliche Informationen einfacher zu verarbeiten als textliche, bei der kognitiven Bildverarbeitung kann der Weg zum Mentalen Modell sozusagen verkürzt werden Schnotz and Bannert (1999). Auf Grundlage dieser Erkenntnisse bieten Mixed-Reality-Szenarien, also sowohl AR als auch VR, aufgrund ihrer Bildhaftigkeit die Möglichkeit, zur effizienteren Bildung eines mentalen Modells beizutragen.

Damit zusammenhängend bieten VR und AR als Mittel der Wahl zur Ergänzung der universitären Ingenieurausbildung weitere Vorteile. So erlaubt diese Art des Lernens die Exploration von Gegenständen und deren Verhalten ohne diese zu zerstören (z.B. bei Experimenten zu Materialversagen). Der Lernprozess kann durch den hohen Grad an Immersion am realen Objekte stattfinden, unter real wirkenden Größenverhältnissen und Bedingungen. Der (empfundene) Realitätsbezug bewirkt damit einen Erfahrungszuwachs und eine In-tegration des Gesehenen in das mentale Modell über die Abkürzung der kognitiven Bild-verarbeitung. Weitere Vorteile von VR und AR bezüglich der These des Embodiments, also positive Effekte auf den Lernerfolg bei Einbeziehung von Körper und Bewegungen in den Lernprozess, sind auf Grundlage von Studien zu vermuten DeSutter and Stieff (2017).

2 Studiendesign

Die geplante Studie richtet sich sowohl an thematisch affine als auch an thematisch averse ProbandInnen. Je nach Vorwissensstand soll damit untersucht werden können, ob die MR-Anwendungen auch bei unterschiedlicher Komplexität des Lerninhaltes effizienzsteigernd auf die Bildung eines mentalen Modells wirken können. Studien zeigen, dass sich spezifisches Vorwissen vorteilhaft auf die Bildverarbeitung und damit auf die Einbettung neuen Wissens in bestehende Wissensstrukturen auswirkt Seufert (2019). Damit ist zu erwarten, dass die MR-Anwendungen vor allem für fortgeschrittene Studierende Vorteile bringt. Über einen Vorwissenstest soll die thematische Affinität der ProbandInnen ermittelt und später als Kontrollvariable herausgerechnet werden. Somit kann auch in gemischten Test- und Kontrollgruppen aus Fachfremden und Fachleuten eine Randomisierung erhalten bleiben. Der Vorwissenstest besteht aus verschiedenen Fragen zu mathematischen und physikalischen Sachverhalten, so z.B. aus der Frage nach dem zweiten Newtonschen Gesetz oder dazugehörigen Einheit zur Beschreibung von Kraft. Die Fragen können zu gleichen Teilen frei als auch in Multiple Choice beantwortet werden. Die Antworten werden entsprechend einer Bewertungsmatrix bepunktet und ermöglichen so die Einordnung des individuellen Vorwissens der Testperson in einer angemessenen Varianz.

Die zentrale Fragestellung bei Durchführung der Studie ist, ob sich mittels VR/AR-Anwendungen die Zeit bis zur Bildung eines qualitativ hochwertigen mentalen Modells verkürzen lässt. Sprich, ob der zeitliche Lernprozess verkürzt und somit eine Kompetenzbildung früher erfolgt als mit tradierten Lernmethoden. Um eine Vergleichbarkeit im Mehrwert bei variabler Immersion zu gewährleisten, sind die entwickelten Prototypen sowohl in AR als auch in VR umgesetzt und werden vergleichend zur herkömmlichen Wissensaneignung mittels konventionellen Lehrunterlagen (Kontrollgruppe) evaluiert. Folgende Abbildung 1 zeigt das experimentelle Design der Studie. In allen drei Gruppen sollen dieselben Lerninhalte vermittelt werden. In einer Erfolgskontrolle nach einer bestimmten Lernzeit wird der Erfolg der Wissensvermittlung anhand eines unbekannten Problems ermittelt.

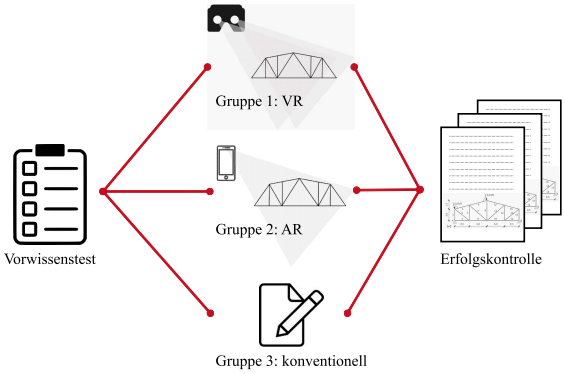


Abbildung 1: Experimentelles Design

Vor und nach den Testläufen werden in Form von Pre- und Posttests zudem motivationale Faktoren wie Selbstwirksamkeit, Versagensangst, etc. und kognitive Faktoren wie mentale Anstrengung oder kognitive Belastung (u.a. nach Rheinberg et al. (2001)) für weitere Auswer-tungen erhoben. In vergangenen Studien zeigte sich durch den Novelity-Effekt einen posi-tiven Motivationsschub der ProbandInnen, welcher zu Anfang auch bei besagten AR- und VR-Anwendungen greifen könnte. Die Korrelation von Motivation und Immersion wurde des Weiteren in vergangenen Studien bereits festgestellt (Georgiou and Kyza (2018)).

2.1 Konzeption der Lernszenarien

Zwei Szenarien unterschiedlichen Schwierigkeitsgrades und für unterschiedliche Vorwissensstände wurden sowohl für AR als auch für VR konzipiert und dienen als Grundlage.

Szenario 1: Kragarm / Balken auf zwei Stützen

Dieses Szenario kann auch ohne spezifisches Vorwissen gelöst werden. Innerhalb der Applikation können über Controller-Interaktionen in VR, bzw. Smartphone-Interaktionen in AR einfache Tragsysteme mit wenigen Bewegungen zusammengebaut werden. Die Interaktion erfolgt dabei über Drag&Drop, also durch Aufnehmen des Objektes, Festhalten bis zur gewünschten Position und Loslassen. Die zur Verfügung stehenden 3D-Objekte sind auf Auflager, Balken und Gewichte mit unterschiedlichen Parametern beschränkt. Um ein Tragwerk zu erstellen, können Objekte frei platziert werden. Dabei wird ein Balken mit spezifischer Länge, Querschnitt und Material gewählt und anschließend die gewünschten Auflager und Lasten an die gewünschte Position gesetzt.

Die ProbandInnen sollen die Thematik durch Ausprobieren und Beobachten erkunden und daraus Erkenntnisse gewinnen können. Das Lernszenario soll hauptsächlich das induktive Lernen fördern und den Personen durch die Beobachtung von Einzelfällen Phänomene der Tragwerkslehre vermitteln. Beim induktiven Lernen wird aus dem Einzelfall eine allgemei-ne Regel abgeleitet nach dem Schema der folgenden Abbildung 2 Dillmann (1988). Die Beobachtung des individuellen Tragwerks ergibt, dass sich bei bestimmter Krafteinwirkung das Loslager in x-Richtung verschiebt. Die abgeleitete, allgemeine Regel der Tragwerkslehre wäre in diesem Fall, dass Loslager keine horizontalen Kräfte aufnehmen können, da sie sich verschieben und nicht an Ort und Stelle bleiben.

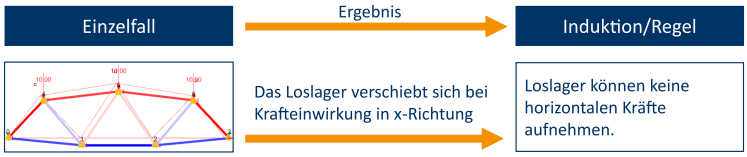


Abbildung 2: Beispiel für einen induktiven Lernprozess

Die Testpersonen haben durch Beobachten und Ausprobieren nach obigem Schema die Möglichkeit, Grundlagen der Tragwerkslehre zu entdecken und sich daraus ein rudimentä-res mentales Modell zu bilden. Dazu gehört u.a. der Einfluss von Material und Querschnitt auf den Grad der Durchbiegung, das Verhalten von Auflagern bei Krafteinwirkungen aus unter-

schiedlichen Richtungen sowie die spezifischen Verformungsbilder von Bauteilen bei unterschiedlichen Lastangriffspunkten.

Szenario 2: Fachwerk

Dieses Szenario richtet sich an Testpersonen mit einem erweiterten Vorkenntnis-Stand. Vorgegeben wird eine Fachwerk-Struktur. Die Probanden sehen zunächst nur, wo sich die Knoten befinden, um welche Auflager es sich handelt und wo die entsprechenden Lasten ansetzen. Das Tragwerk kann von allen Seiten betrachten sowie Bauteile markiert werden.

Das gewählte Tragsystem setzt multiple Lerninhalte der Mechanik-Grundlagen für Bauingenieure voraus und wird in dieser oder ähnlicher Form in entsprechenden Lehrveranstaltungen behandelt. Die verschiedenen möglichen Lernszenarien fördern sowohl das induktive als auch das deduktive Lernen. Das deduktive Lernen, im Gegensatz zum induktiven Lernen, beinhaltet die Nutzung des bereits erlernten Wissens, um dieses auf den konkreten Anwendungsfall zu übertragen Peter Köck (1997). Dabei wird die allgemeine Regel auf den Einzelfall (das spezifische Fachwerk) angewendet und führt schließlich zum Ergebnis. In diesem Falle könnten die bereits erlernten, allgemeinen Regeln zur Bestimmung von Nullstäben auf den vorliegenden Einzelfall angewandt und damit zum spezifischen Ergebnis gelangen.

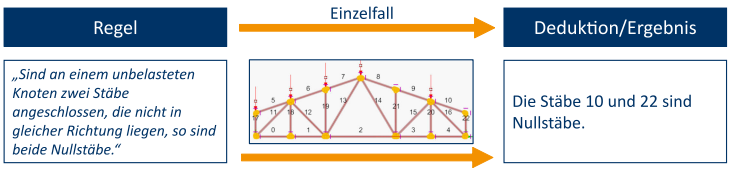


Abbildung 3: Beispiel für einen deduktiven Lernprozess

Das induktive Lernen der Testpersonen kann in diesem Fall durch die Möglichkeit zur Manipulation (z.B. durch Deformation) des Modells gefördert werden. Dafür eignen würde sich ein Sandbox-Modus, welcher den Testpersonen anhand simplifizierter Beispiele ein vorheriges Üben ermöglicht. Studien belegen, dass Probanden i.d.R. bessere Ergebnisse bei der Verständnisleistung erzielen, wenn sie die Möglichkeit zum vorherigen Training haben Seufert (2019).

Das Vorwissen der Testpersonen soll mithilfe dieses Szenarios angewendet und gefestigt werden. Durch die Anwendung von bereits erlernten Inhalten soll das bereits vorhandene mentale Modell um qualitative Eindrücke erweitert werden, so z.B. die maßstabsgetreue Verformung von Bauteilen, das Verformungsverhalten komplexer Tragwerksstrukturen oder die Bestimmung von Nullstäben ohne rechnerischen Ansatz.

2.2 Framework für die AR- und VR-Prototypen

Für die Entwicklung des AR-Prototypen wird das 3D-Programm Rhino 6 sowie das Visual Scripting Plugin Grasshopper verwendet. In Kombination mit dem parametrischen Modellierungswerkzeug Karamba3D, welches Grasshopper um einige Funktionen erweitert, werden die ausgewählten Beispiele aus der universitären Tragwerkslehre in diesem Software-

Framework umgesetzt. Um die Applikation auf mobilen Endgeräten nutzen zu können, dient die Grasshopper-Erweiterung Fologram, welche gleichzeitig auch als Schnittstelle zur gleichnamigen Applikation auf dem jeweiligen mobilen Endgerät oder zur Microsoft Hololens fungiert. Über den Computer, auf welchem die Anwendungen laufen, kann die Applikation gestartet und mit dem jeweiligen Endgerät, ob Smartphone oder Hololens, gekoppelt werden. Dafür müssen sich beide Geräte im selben WLAN-Netzwerk befinden. Änderungen am Tragwerk können in Echtzeit in einer laufenden Sitzung über die Software am Computer vorgenommen werden. Die Berechnungen des Tragverhaltens wird durch Karamba3D vorgenommen.

Die AR-Applikation kann als AR-Modell auf jeder horizontalen Fläche platziert und skaliert werden. Es können sich multiple mobile Endgeräte in die laufende Session einwählen und so das Modell betrachten. Die Interaktion mit den jeweiligen Modellen erfolgt über klassische Smartphone-Gesten wie Wischen, Finger-Tabs oder Mehrfinger-Interaktionen. Für die Hololens stehen die Standard-Gesten des Gerätes zur Verfügung. Die Art der Interaktionen können innerhalb von Grasshopper erkannt und geloggt werden.

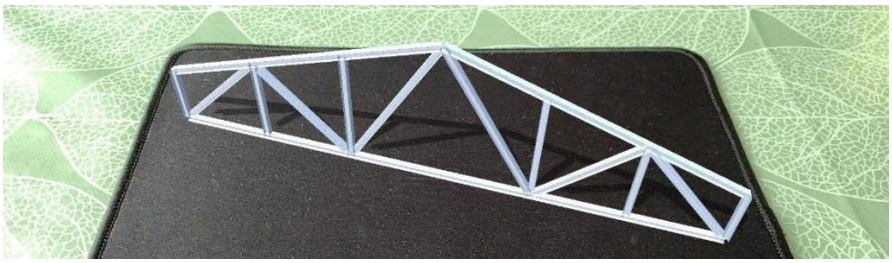


Abbildung 4: Darstellung eines einfachen Fachwerks in der AR-Applikation Fologram

Für die Entwicklung der VR-Szenarien wird die Spielentwicklungsumgebung Unity sowie Visual Studio für die Integration von Python-Skripten. Die fertige Applikation wird als .exe aus Unity exportiert und kann mit marktüblichen VR-Brillen sowie einem entsprechend leistungsfähigen Computer genutzt werden. In diesem Falle wurde zur Entwicklung eine Asus Mixed-Reality-Brille verwendet. Die Berechnungen des Tragverhaltens wird durch einen Finite-Elemente-Berechnungskern durchgeführt, welcher per Python-Skript mit der Anwendung in Unity angesprochen wird. Zur Nutzung der VR-Applikationen mittels VR-Brille werden das Microsoft Mixed Reality Portal, sowie SteamVR und Windows Mixed Reality for SteamVR benötigt.

Bei Start der VR-Applikation finden sich die Nutzer zunächst in einem virtuellen Versuchsraum wieder. Über die VR-Controller können mittels eines angelegten Menüs bestimmte Aktionen durchgeführt werden, je nach Szenario. Grundsätzlich sind innerhalb der VR-Applikation grundsätzliche Navigationsmöglichkeiten gegeben, wie z.B. die Teleportation.

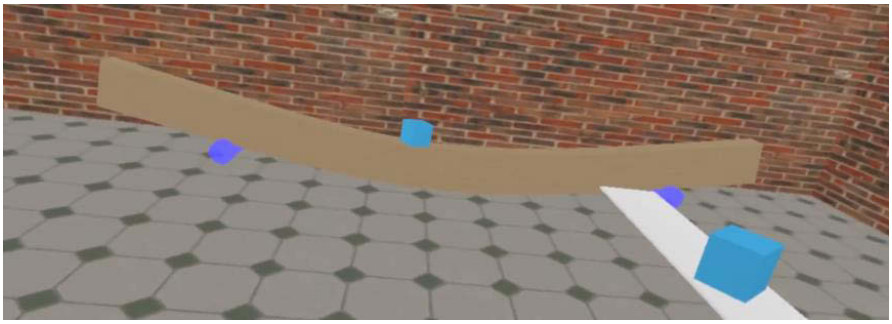


Abbildung 5: Virtueller Versuchsraum innerhalb des VR-Prototypen

Zur optimalen Unterstützung des Lernenden innerhalb der AR- und VR-Umgebungen werden Maßnahmen zur Aufmerksamkeitslenkung umgesetzt. Dies beinhaltet visuelle Annotation in Form von Pfeilen oder ähnlichem sowie Darstellung zusätzlicher Informationen (Formeln, Diagramme, Schnittkräfte, etc.). Auditive Aufmerksamkeitslenkung durch Spracheinspielungen sollen die ProbandInnen beim zielgerichteten Explorieren unterstützen. Die Optionen zur Gestaltung der Testumgebung sind konfigurierbar und momentan noch Gegenstand einer Vorstudie zur Evaluierung der optimalen Konfiguration der Testumgebungen.

3 Fazit und Ausblick

Ein Umdenken in der universitären Ingenieurausbildung ist aus Gründen der Verschiebung von Anforderungen, Erwartungen und benötigten Kompetenzen der IngenieurInnen von heute notwendig.

In einer Studie mit VR- und AR-Anwendungen zur optimalen Bildung von mentalen Modellen im universitären Lernprozess sollen die Vorteile von AR und VR gegenüber tradierten Lehrmethoden evaluiert werden. Zu erwarten ist, dass diese bei Einsatz in kürzerer Zeit zu Lernerfolgen und zu einem tiefergehenden Verständnis der Thematik führen. Die Gründe dafür sind aus den bereits erhobenen und vermuteten Vorteilen eines höheren Immersions-grads abzuleiten. Diese umfassen unter anderem eine höhere initiale Motivation durch korrelierende Immersion, Ausgleich von initialen Angstgefühlen sowie das Ansprechen der kognitiven Bildverarbeitung im Gehirn durch AR und VR. Durch diese ist der Mensch in der Lage, Sachverhalte schneller zu begreifen und in sein bestehendes mentales Modell einzu-betten. Durch die Bildung von drei Gruppen mit gemischtem Vorkenntnisstand werden beide Technologien sowie eine Kontrollgruppe vergleichbar gemacht. Auf lange Sicht sollen AR- und VR-Szenarien als Ergänzung zur konventionellen Lehre fungieren und diese nicht vollständig ersetzen.

Als Weiterentwicklung der Szenarien ist ein virtuelles Versuchslabor geplant, in welchem Studierende eine potentiell unendliche Anzahl an Experimenten ingenieurwissenschaftli-cher Fächer durchführen können, ohne dafür Ressourcen zu benötigen, welche über ein das notwendige Equipment für die Durchführung der MR-Szenarien hinausgeht.

Literatur

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (2015), ‘Arbeitswelt industrie – anforderungen an den ingenieur der zukunft: Weiterbildungsprogramm intelligente eingebettete mikrosysteme’.

DeSutter, D. and Stieff, M. (2017), ‘Teaching students to think spatially through embodied actions: Design principles for learning environments in science, technology, engineering, and mathematics’, *Cognitive Research: Principles and Implications* **2**(1), 22.
URL: *https://doi.org/10.1186/s41235-016-0039-y*

Dillmann, R. (1988), Lernen aus beispielen (induktives lernen), *in* M. Syrbe, M. Thoma and R. Dillmann, eds, ‘Lernende Roboter’, Vol. 15 of *Fachberichte Messen · Steuern · Regeln*, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 53–67.

Frank, S. and Iller, C. (2013), ‘Kompetenzorientierung: mehr als ein didaktisches prinzip’, *Report: Zeitschrift für Weiterbildungsforschung* **4/2013**.

Georgiou, Y. and Kyza, E. A. (2018), ‘Relations between student motivation, immersion and learning outcomes in location-based augmented reality settings’, *Computers in Human Behavior* **89**, 173–181.

Johnson-Laird, P. N. (1983), *Mental Models*, Cognitive science series, Cambridge University Press.
URL: *https://books.google.de/books?id=-XU6AAAAIAAJ*

Peter Köck (1997), *Wörterbuch für Erziehung und Unterricht*, 3100 Begriffe aus d. Bereichen Pädagogik, Didaktik, Psychologie, Soziologie, Sozialwesen.

Rheinberg, F., Vollmeyer, R. and Burns, B. D. (2001), ‘Fam: Ein fragebogen zur erfassung aktuller motivation in lern- und leistungssituationen’, *Diagnostica* **47**(2), 57–66.

Schnotz, W. and Bannert, M. (1999), ‘Einflüsse der visualisierungsform auf die konstruktion mentaler modelle beim text- und bildverstehen’, *Experimental Psychology* **46**(3), 217–236.

Seufert, T. (2019), ‘Training for coherence formation when learning from text and picture and the interplay with learners’ prior knowledge’, *Frontiers in Psychology* **10**.

Weinert, F. E., ed. (2002), *Leistungsmessungen in Schulen*, Beltz Pädagogik, 2., unveränd. aufl., dr. nach typoskript edn, Beltz, Weinheim.

Über Baustellen Lernen – Wissensgewinn aus Luftbildern

Katrin Jahr[1]

[1]Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: katrin.jahr@tum.de

Baustellenplanung basiert sowohl auf explizitem Wissen, das in Vorschriften und Richtlinien vorliegt, als auf implizitem Wissen, das sich aus der Erfahrung des Planers ergibt. Um Regeln aus implizitem Wissen zu formalisieren, können abgeschlossene Bauprojekte analysiert werden. In diesem Beitrag stellen wir eine Bildanalyse-Pipeline vor, mit der Informationen über vergangene Baustellen aus Luftbildern erlangt werden können. Wir verbinden Machine-Learning-basierte Bildanalyse mit Georeferenzierung und freiverfügbaren Geodaten, um eine detaillierte Beschreibung und tatsächliche Abmessungen der jeweiligen Baustelle zu erhalten.

1 Einleitung

Trotz der fortschreitenden Digitalisierung im Bauwesen wird die Baustelleneinrichtung (BE) noch immer manuell, weitgehend auf Grundlage von Faustregeln und der Erfahrung der Planer, geplant. Der Einsatz wissenschaftlich erprobter digitaler Unterstützungsinstrumente kann erhebliches Verbesserungspotenzial in Bezug auf Planungsgenauigkeit und Zeiteffizienz bieten. Um eine effiziente BE-Planung zu ermöglichen, wurden in früheren Forschungsarbeiten mehrere halbautomatische Lösungen vorgeschlagen. Ein wichtiger Punkt bei der Formulierung dieser Planungsalgorithmen ist das umfassende Fachwissen über die Domäne.

Bei der BE-Planung muss sowohl explizites als auch implizites Wissen genutzt werden. Explizites Wissen kann aus Vorschriften, Richtlinien und lokalen Randbedingungen gewonnen werden. Allerdings sind in der Praxis häufig zahlreiche verschiedene Lösungen für jedes Bauvorhaben möglich. Um die Planer bei der Entscheidung für eine bestimmte Variante zu unterstützen, kann implizites Wissen verwendet werden. Implizites Wissen entsteht aus Expertenwissen und praktischer Erfahrung und ist schwer auf eine strenge, logische und maschinenlesbare Weise zu formulieren, kann jedoch durch die Analyse von vergangenen Bauprojekten gewonnen werden. Daher schlagen wir vor, Informationen zu sammeln, indem wir eine große Anzahl von Luftbildern mit Baustellen analysieren.

In diesem Beitrag stellen wir eine Bildanalyse-Pipeline vor, mit deren Hilfe Informationen über vergangene Baustellen aus Luftbildern erlangt werden können. Wir kombinieren Bildanalyse, Georeferenzierung und externe Datenquellen, um eine detaillierte Beschreibung der jeweiligen Baustelle zu erhalten. Im ersten Teil des Beitrags geben wir einen Überblick über den Stand der Technik in der Baustellenplanung mit Schwerpunkt Bildanalyse, wie sie heute auf Baustellen eingesetzt wird. Anschließend erläutern wir Schritt für Schritt die in der Pipeline verwendeten Methoden. Im dritten Teil des Papiers stellen wir eine Fallstudie vor. Schließlich folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse.

2 Stand der Technik

Bildanalysemethoden haben durch die jüngsten Fortschritte im Bereich des autonomen Fahrens und des maschinellen Lernens viel Aufmerksamkeit erregt. Für eine effektive und effiziente Bildanalyse und Objekterkennung wurden und werden in den letzten Jahrzehnten zunehmend maschinelle Lernalgorithmen eingesetzt. Im Jahr 2012 erreichte das Convolutional Neural Network (CNN) "AlexNet" (Krizhevsky et al. (2012)) einen Top-5-Fehler von 15,3% bei der renommierten ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (Russakovsky et al.(2015)). Diese Ergebnisse waren überraschend genau und zeigten die Vorteile der Verwen-dung von CNN. Aus diesem Grund konzentriert sich die Softwareindustrie momentan auf CNNs für Machine-Learning-basierte Bildverarbeitungsaufgaben (LeCun et al. (2015)).

Im Bausektor ist Bildanalyse ein ziemlich neues Thema. Da einer der Hauptaspekte des maschinellen Lernens die Erfassung großer Datensätze ist, konzentrieren sich die aktuellen Ansätze auf die Datenerfassung. Tajeen and Zhu (2014) präsentieren einen Bilddatensatz mit zahlreichen kommentierten Bildern von Baumaschinen, wobei der Schwerpunkt auf Baumaschinen der Aushubphase liegt. Die analysierten Bilder wurden vom Boden aufgenommen. Kropp et al. (2018) erkennen Innenbauteile wie Heizkörper anhand von Ähnlichkeiten. Im Rahmen der automatisierten Baufortschrittskontrolle veröffentlichten Han et al. einen Ansatz zur Amazon Turk-basierten Kennzeichnung (Han and Golparvar-Fard (2017)). Bügler et al. (2017) kombinierten photogrammetrische Verfahren und Videoanalyse, um den Fortschritt der Erdarbeiten zu bewerten. Zu diesem Zweck erstellten sie Punktwolken, um das Volumen des ausgehobenen Bodens zu messen, und erkannten LKW-Kipper auf Bildern durch Foreground Detection. Jahr, Jahr et al. (2018) verwenden künstliche Intelligenz zur Erkennung von Schalungselementen auf Luftbildern von Baustellen, die aus UAVs stammen.

3 Methodik

Um implizites Wissen aus Luftbildern zu verallgemeinern, schlagen wir eine Bildanalysepipeline vor, die maschinelle Lernalgorithmen, Georeferenzierung und die Abfrage zusätzlicher Daten nutzt (siehe Abbildung 1). Für die Georeferenzierung benötigt jedes Luftbild zusätzliche Vermessungsinformationen. Im ersten Schritt verwenden wir einen Objekterkennungsalgorithmus, um Baustellen auf den Luftbildern zu erkennen. Wird mindestens eine Baustelle erkannt, wird ein Algorithmus zu Instanzsegmentierung verwendet, um einzelne Elemente der Baustelle zu erkennen. In diesem Beitrag konzentrieren wir uns auf die Erkennung von Turmdrehkranen, da diese einen besonders starken Einfluss auf den Baufortschritt haben. Um die Elementabmessungen abzuschätzen, werden die Bilder orthorektifiziert. Zusätzliche baustellenrelevante Informationen wie Gebäudemaße, Grundstückslinien oder angrenzende Gebäude können durch Georeferenzierung des Bildes und dessen Verknüpfung mit räumlichen Informationen aus der Katasterkarte oder anderen Geoinformationsdiensten, wie OpenStreetMap oder Stadtmodellen, abgerufen werden.

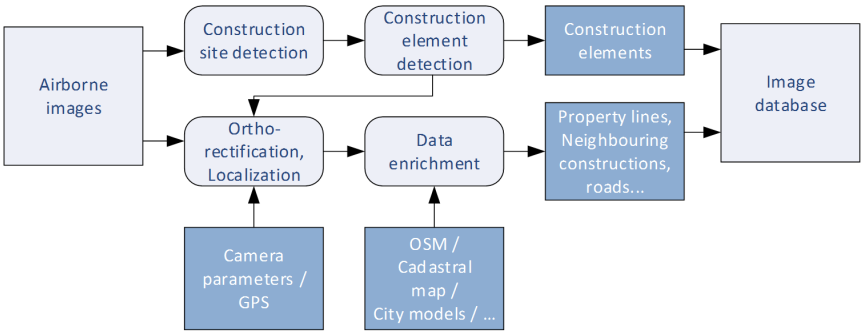


Figure 1: Bildanalyse-Pipeline: Im ersten Schritt werden Luftbilder nach Baustellen durchsucht. Auf diesen Baustellen werden einzelne BE-Gegenstände erkannt. Um die korrekten Abmessungen zu erhalten, werden die Bilder orthorektifiziert und georeferenziert. Zusätzliche Datenquellen werden verwendet, um Kontext hinzuzufügen

3.1 Luftbildanalyse mit Convolutional Neural Networks

Um Informationen über Baustellen zu sammeln, müssen diese zunächst im Bild lokalisiert werden. Es sollen also Objekte auf Bildern lokalisiert und klassifiziert werden, wobei mehrere Objekte vorhanden sein können ("Objekterkennung") (Rusk (2015)). Dazu sagen Algorithmen in der Regel rechteckige Flächen (Bounding Boxes) vorher, innerhalb derer sich mit hoher Wahrscheinlichkeit ein Objekt befindet, sowie die entsprechende Objektklasse.

In unserer Pipeline verwenden wir ein "You only look once"-Netz (YOLOv3) im Darknet-Framework (Redmon and Farhadi (2018)). YOLOv3 ist ein Single-Shot-Detector, der im Vergleich zu anderen führenden Algorithmen eine akzeptable Vorhersagerate mit sehr schnellen Trainings- und Vorhersagezeiten ermöglicht. YOLOv3 teilt das Eingabebild in ein Raster, wobei jede Zelle nur ein Objekt voraussagt. Vorhersagen von Objekten unterschiedlicher Größe werden durch ein Feature-Pyramiden-Netz ermöglicht – YOLOv3 erstellt Vorhersagen in drei verschiedenen Größen für jeden Bildbereich. Um die Bounding Box des erkannten Objekts vorherzusagen, verwendet YOLOv3 Ankerboxen, die auf die spezifische Problemdomäne zugeschnitten sind.

Für die BE Gegenstände sollen genaue Informationen über den Ort und die Abmessungen ermittelt werden. Daher muss jeder Gegenstand so genau wie möglich erfasst werden – nicht nur seine Bounding Box. Dazu verwenden wir einen Instanzsegmentierungsalgorithmus, der Bilder pixelweise untersucht, und nicht nur zwischen verschiedenen Klassen, sondern auch zwischen mehreren Objekten derselben Klasse unterscheiden kann.

Ein sehr leistungsfähiger Algorithmus ist Mask R-CNN (He et al. (2017)). Mask R-CNN prognostiziert Instanzmasken für erkannte Objekte in zwei Schritten: Zunächst verwendet es ein RoI (Region of Interest) Align-Netz, um Bounding Boxen und Klassen für mögliche Objekte zu finden. Danach wird ein semantisches Segmentierungsmodell verwendet, um die genauen Objektkonturen innerhalb des Begrenzungsrahmens zu bestimmen. Da in jedem Begrenzungsrahmen nur ein Objekt enthalten sein soll, genügt ein binärer Klassifikator, der die Pixel 1/0 abbildet, wobei "1" Anwesenheit, "0" das Fehlen eines Objekts repräsentiert.

3.2 Georeferenzierung und Orthorektifizierung

Um Objekte in Luftbildern messen und global lokalisieren zu können, müssen die Bilder georeferenziert und orthorektifiziert werden. Zur Georeferenzierung können Bodenkontrollpunkte verwendet werden, oder die Position der Kamera über die GNSS-Position (Global Navigation Satellite System) berechnet werden. Die Genauigkeit der Georeferenzierung hängt von der Qualität des GNSS-Signals ab und kann von wenigen Dezimetern bis zu wenigen Metern variieren (Pfeifer et al. (2012)).

Um die realen Dimensionen von Objekten in Luftbildern abzuschätzen, muss der Abstand zwischen zwei Pixeln am Boden (Ground Sample Distance, GSD) bekannt sein. In der traditionellen Luftphotogrammetrie werden Bilder in Nadirsicht aufgenommen. Unter der Annahme einer lokal flachen Erdoberfläche und unter Kenntnis von Flughöhe, Sensorgröße und Kamerakonstante (Brennweite) kann die GSD angenähert werden. Änderungen der Geländehöhe oder störende Objekte (z.B. hohe Gebäude) führen dabei zu abweichenden GSD.

Bei der Orthorektifizierung werden Luftbilder in der Zentralprojektion in eine orthogonale Projektion umgewandelt, um die GSD zu vereinheitlichen und direkte Messungen in den Bildern zu ermöglichen. Für jede Zelle des DSM-Netzes wird der entsprechende Teil des Bildes identifiziert und auf das DSM transformiert. Das resultierende Netz wird dann auf ein regelmäßiges Gitter ortho-projiziert, das auf der Referenzfläche mit definierter GSD erstellt wird.

3.3 Verknüpfung mit zusätzlichen Datenquellen

Die Umgebung der Baustelle hat einen erheblichen Einfluss auf die Baustellenausstattung. So beeinflussen benachbarte Gebäude die Position und Mindesthöhe von Kranen; Zufahrtsstraßen beeinflussen die Lage von Baustraßen und Lagerflächen. Wurde der Standort einer Baustelle durch die Georeferenzierung des Bildes bestimmt, kann diese Baustelle mit räumlichen Informationen über die umliegenden Einrichtungen angereichert werden.

Geodaten sind aus verschiedenen Quellen verfügbar. Eine große Auswahl an digitalen Geodaten steht auf OpenStreetMap (OSM) zur Verfügung. Auf OSM werden Daten unter offener Lizenz gesammelt und bereit gestellt, unter anderem Straßen, Parks, Gebäudeumrisse und Einrichtungen wie Feuerlöschhydranten und Briefkästen. Der Datenzugriff erfolgt über eine Kartenansicht oder verschiedene APIs. In diesem Papier haben wir die Overpass API mit Overpass QL verwendet, um Informationen über benachbarte Gebäude und Straßen abzurufen.

4 Fallstudie

4.1 Trainieren der CNNs

Damit die verwendeten CNNs Baustellen und Baustelleneinrichtung erkennen können, müssen sie zunächst trainiert werden. Dafür wird eine große Menge von Beispieldaten (Ground Truth) verwendet, welche jeweils aus einem Bild und der dazugehörigen, erwarteten Ausgabe bestehen.

Für die Ground Truth beider CNNs verwenden wir Luftbilder des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) (Kurz et al. (2012)). Die Bilder wurden in Deutschland aus Flugzeugen und Hubschraubern aufgenommen. Insgesamt stehen ca. 4.500 hochauflösende Bilder zur Verfügung. Im ersten Schritt haben wir alle Bilder, die Baustellen enthalten, ausgewählt (siehe Abbildung 2). Um Daten für die Objekterkennung zu generieren, wurden anschließend Bounding Boxen für alle Baustellen hinzugefügt und die Daten in Trainings-, Test- und Validierungsdatensätze aufgeteilt (70%, 20%, 10%).

Für die Segmentierung werden diese Bilder entlang der Baustellengrenze zugeschnitten. Um den Datensatz zu diversifizieren, nutzen wir zusätzlich Drohnen-Fotos und Bodenaufnahmen von Turmdrehkranen (Abbildung 3). Alle Kranumrisse werden pixelgetreu mit polygonalen Labels markiert. Auch in diesem Fall teilen wir die Daten in 70% Trainingsdaten, 20% Testdaten und 10% Validierungsdaten auf.

Figure 2: Luftbildaufnahme, zugeschnitten auf Baustelle

Figure 3: Bodenaufnahme und UAV-Aufnahme von Turmdrehkranen

4.1.1 Baustellenerkennung mit YOLOv3

Für die Objekterkennung verwenden wir eine YOLOv3-Architektur in Darknet (Redmon and Farhadi (2018)). Um das Netz besser an den Baustellendatensatz anzupassen, haben wir die Ankergrößen auf die Baustellengrößen angepasst, wobei Länge und Breite der Ankerboxen mit Länge und Breite der Bounding Boxen, normiert auf die jeweiligen Bildmaße, korrelieren. Um 9 Anker zu erhalten, die den Datensatz möglichst gut abbilden, haben wir ein k-means Clustering auf den Maßen der Bounding Boxen verwendet.

Um die Trainingszeit zu verkürzen und mit unserem verhältnismäßig kleinen Datensatz bessere Ergebnisse zu erzielen, verwenden wir vortrainierten Gewichte von Darknet53. Das Training für 1000 Epochen dauerte ca. 10 Stunden auf einer Nvidia DGX-1. Abbildung 4 zeigt Beispiele für resultierende Vorhersagen. Während Begrenzungsrahmen für kleinere Baustellen sehr gut vorhergesagt werden, ist das CNN für größere Baustellen noch nicht ausreichend angepasst. Bei der Betrachtung des Datensatzes wird deutlich, dass kleinere Baustellen in

Wohngebieten dominieren und einen Großteil des Datensatzes ausmachen. Für eine größere Vielfalt von Baustellen wird der Trainingsdatensatz derzeit noch erweitert. Zur weiteren Verbesserung der Objekterkennung könnten die Daten vorverarbeitet werden.

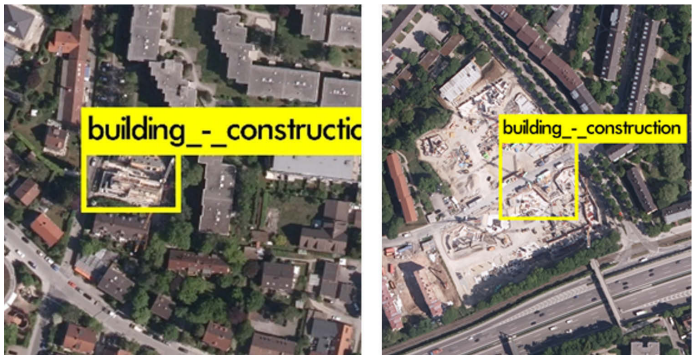


Figure 4: Beispiele für resultierende Bounding Boxen in der Baustellenerkennung

4.1.2 Segmentierung von Turmdrehkranen mit Mask R-CNN

Für die Bildsegmentierung verwenden wir Mask R-CNN in Keras mit TensorFlow Backend (He et al. (2017)). Wir verwenden vortrainierte Gewichte aus dem COCO-Datensatz (Lin et al. (2014)). Beispiele für die vorhergesagten Masken und Bounding Boxen zeigt Abbildung 5. Die Bounding Boxen werden für die meisten Krane zuverlässig vorhergesagt, die Masken sind leicht lückenhaft. Einige Krane im Randbereich von Bildern werden übersehen.

Figure 5: Beispiele für resultierende Bounding Boxen und Masken in der Kransegmentierung

4.2 Georeferenzierung

Um die Bilder zu georeferenzieren, generieren wir zunächst ein DSM und berechnen das Orthophoto. Bereiche, die von zwei Bildern abgedeckt werden, werden dabei unterbrochen

dargestellt, was es schwierig macht, Turmdrehkrane direkt im Orthophoto zu erkennen. Daher wurden die Krane in den Originalbildern markiert und die Label auf das DSM orthoprojiziert.

4.3 Datenanreicherung mit Overpass API

Um Objekte in direkter Umgebung der betreffenden Baustelle von OSM abzurufen, verwenden wir Overpass API. Anhand der GPS-Koordinaten der Außenecken des Gebäudes haben wir angrenzende Straßen und Gehwege sowie benachbarte Gebäude abgefragt. Overpass API gibt die abgefragten Daten textbasiert (z.B. als json oder xml) zurück. Zur visuellen Prüfung der Ergebnisse haben wir Overpass turbo verwendet (Abbildung 6). Overpass turbo ist eine webbasierte Anbindung an Overpass API. Die Ergebnisse werden als interaktive Karte dargestellt, auf der weitere Informationen zu den abgefragten Knoten abgerufen werden können. Die von OSM gesammelten zusätzlichen Daten werden zu den aus den Bildern gewonnenen Informationen hinzugefügt.

Figure 6: Angrenzende Objekte (Fußwege, Straßen, Gebäude) der Baustelle aus Overpass API. Links: XML, rechts: Visualisierung von Overpass turbo, gefundene Objekte sind in blau markiert

5 Zusammenfassung

In diesem Beitrag stellen wir eine Bildanalysepipeline vor, die sowohl Baustellen als auch BE-Gegenstände auf Luftbildern erkennen kann. Um weitere Informationen über die Situation vor Ort zu erhalten, ermitteln wir die realen Abmessungen des Baufeldes und der Turmdrehkrane durch Orthorektifizierung der Bilder. Zur Anreicherung der Informationen können weitere Datenquellen genutzt werden. Mit Hilfe der Overpass API erhalten wir über OpenStreetMap Informationen über die Umgebung der Baustelle. Nächste Schritte sind die Erweiterung der Algorithmen zur Erkennung weiterer Baustellenelemente wie Container oder Fahrzeuge, sowie die Anbindung an Stadtmodelle zur Gewinnung von 3D-Informationen.

References

Bügler, M., Borrmann, A., Ogunmakin, G., Vela, P. A. and Teizer, J. (2017), 'Fusion of photogrammetry and video analysis for productivity assessment of earthwork processes',

Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering **32(2)**, 107–123.
URL: *https://doi.org/10.1111/mice.12235*

Han, K. K. and Golparvar-Fard, M. (2017), 'Potential of big visual data and building information modeling for construction performance analytics: An exploratory study', *Automation in Construction* **73**, 184–198.
URL: *https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.11.004*

He, K., Gkioxari, G., Dollár, P. and Girshick, R. (2017), Mask r-cnn, *in* 'Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision', p. 2961–2969.

Jahr, K., Braun, A. and Borrmann, A. (2018), Formwork detection in uav pictures of construction sites, *in* 'Proc. of the 12th European Conference on Product and Process Modelling, Copenhagen, Denmark'.

Krizhevsky, A., Sutskever, I. and Hinton, G. E. (2012), 'Imagenet classification with deep convolutional neural networks', *Advances in Neural Information Processing Systems* p. 1097–1105.

Kropp, C., Koch, C. and König, M. (2018), 'Interior construction state recognition with 4d bim registered image sequences', *Automation in Construction* **86**, 11–32.
URL: *https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2017.10.027*

Kurz, F., Meynberg, O., Rosenbaum, D., Türmer, S., Reinartz, P. and Schroeder, M. (2012), 'Low-cost optical camera system for disaster monitoring', *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sens. and Spatial Information Sci* **39**, B8.

LeCun, Y., Bengio, Y. and Hinton, G. (2015), 'Deep learning', *Nature* **521(7553)**, 436–444.
URL: *https://doi.org/10.1038/nature14539*

Lin, T.-Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D. and Zitnick, C. L. (2014), Microsoft coco: Common objects in context, *in* 'European Conference on Computer Vision', p. 740–755.

Pfeifer, N., Glira, P. and Briese, C. (2012), 'Direct georeferencing with on board navigation components of light weight uav platforms', *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* **39(B7)**, 487–492.

Redmon, J. and Farhadi, A. (2018), 'Yolov3: An incremental improvement', *ArXiv Preprint* (ArXiv:1804.02767.).

Rusk, N. (2015), 'Deep learning', *Nature Methods* **13**, 35.
URL: *https://doi.org/10.1038/nmeth.3707*

Russakovsky, O., Deng, J., Su, H., Krause, J., Satheesh, S., Ma, S. and Fei-Fei, L. (2015), 'Imagenet large scale visual recognition challenge', *International Journal of Computer Vision* **115(3)**, 211–252.
URL: *https://doi.org/10.1007/s11263-015-0816-y*

Tajeen, H. and Zhu, Z. (2014), 'Image dataset development for measuring construction equipment recognition performance', *Automation in Construction* **48**, 1–10.
URL: *https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2014.07.006*

Verbesserung der Risserkennung in UAS Bildern durch Fusion mehrerer Aufnahmen

Paul Debus[1] and Christian Benz[1]

[1]Computer Vision in Engineering · Bauhaus Universität Weimar

Unbemannte Flugsysteme (UAS) haben in den letzten Jahren sehr stark an Bedeutung für die Zustandserfassung von Bauwerken gewonnen. Speziell im Infrastrukturbereich, in dem Teile der Bauwerke nur sehr schlecht zugänglich sind, können mobile UAS die menschlichen Bauwerksprüfer unterstützen. Teil einer digitalen Erhaltungsstrategie ist nicht nur die Datenerfassung, sondern auch die -analyse mit modernen Methoden.

Tiefe Faltungsnetze (CNN) sind in der Lage, pixelgenau Risse in Bildern zu lokalisieren. Gleichzeitig stehen durch den Einsatz von UAS vielfältige Bilder aus verschiedenen Perspektiven für die photogrammetrische 3D-Rekonstruktion zur Verfügung.

Dieser Beitrag präsentiert ein Verfahren zur Fusion von Rissinformationen aus redundanten Bilddatensätzen, das verfügbare Geometrieinformationen integriert, um die Erkennungsgenauigkeit zu verbessern. Im Rahmen der 3D-Rekonstruktion werden Position und Ausrichtung der Kamera zum Aufnahmezeitpunkt bestimmt. Mit diesen Informationen werden korrespondierende Regionen in den Bildern identifiziert, in denen die Ergebnisse der automatisierten Risserkennung mittels verschiedener Methoden kombiniert werden. Dieser Beitrag evaluiert sechs Ansätze zur Fusion mehrerer Vorhersagen unter Berücksichtigung der Konfidenz des CNN.

Es konnte gezeigt werden, dass die Fusion der Ergebnisse die Genauigkeit der Risserkennung deutlich steigern kann. Die verschiedenen Verfahren zeigen, dass der Einfluss des Fusionsalgorithmus' gering ist im Vergleich zur generellen Verbesserung der Detektion durch Kombination der Ergebnisse.

Keywords: Risserkennung, Machine Learning, Bildverarbeitung, Photogrammetrie

1 Einführung

Infrastrukturbauwerke wie Brücken und Tunnel spielen eine wichtige Rolle für eine moderne Gesellschaft, in der Mobilität immer größeren Stellenwert erhält. Um ihre Funktion und Sicherheit zu garantieren, müssen sie regelmäßig inspiziert und gewartet werden. Aktuell werden Inspektionen manuell und mit großem Ressourceneinsatz durchgeführt. Um diesen Aufwand zu reduzieren und digitale Methoden einzuführen, werden zunehmend neue Verfahren verwendet. Speziell der Einsatz von unbenannten Flugsystemen (UAS, Unmanned Aircraft Systems) gewinnt an Bedeutung. Die Geräte sind in der Lage, für Menschen unzugängliche Stellen zu erreichen und Bilddaten für die digitale Analyse und Bewertung der Bauwerke zu generieren (Siebert and Teizer (2014), Kersten et al. (2018)).

Aus den Bildern kann ein 3D Modell berechnet werden, woraus sich die Dimensionen der Bauteile und Veränderungen über mehrere Aufnahmen ermitteln lassen (Hallermann et al. (2018)). Tiefe Faltungsnetzwerke (CNN, Convolutional Neural Networks) sind zu einem wichtigen Werkzeug der automatisierten Schadenserkennung in Bilddaten geworden (Wang and Huang (2010)). Besonders wichtig ist hierbei die Erkennung von Rissen an der Oberfläche.

Dieser Beitrag steht im Kontext eines Konzeptes für den gesamten Prozess der Zustandserfassung und -bewertung im Rahmen einer digitalen Instandhaltungsstrategie, wie beschrieben in Morgenthal et al. (2019). Der Prozess umfasst alle Schritte von der Beschreibung der Messaufgabe bis zur Auswertung der Ergebnisse. Der Beitrag befasst sich mit der Erkennung von Anomalien in den erfassten Daten. Er baut auf den Ergebnissen der photogrammetrischen 3D Rekonstruktion (siehe Abschnitt 3.2) auf und verwendet die Bilder, die vom UAS aufgenommen wurden.

2 Stand der Technik

Structure from Motion (SfM), beschrieben in Schönberger (2016), berechnet die innere und äußere Orientierung der Kameras bei der Bildaufnahme und ein 3D Modell der Szene. Häufig verwendete Softwarebibliotheken sind Open Source Lösungen wie Colmap (Schönberger (2016)) oder kommerzielle Produkte wie Agisoft Metashape (Agisoft (2019)).

Für die Erkennung von Rissen in Bildern von Betonoberflächen verwenden Cha and Choi (2017) CNNs mit großem Erfolg, Pauly et al. (2017) und Yang et al. (2019) konnten die Erkennung von Rissen auf Pixelebene verfeinern. Eine vielversprechende Netzwerkarchitektur, das U-Net, wurde von Ronneberger et al. (2015) zur Analyse von medizinischen Bildern vorgestellt und von Iglovikov and Shvets (2018) erweitert. Sie ist in der Lage, dünne, unregelmäßige Strukturen zu erkennen und wird in Abschnitt 3.3 weiter erläutert.

Die aus der Überlappung der Bilder resultierende Redundanz wird genutzt, um mehrere Informationen zu kombinieren. Heideklang (2018) definiert mehrere Ebenen der Informationskombination, wobei schon einfache algebraische Kombination die Vorhersage verbessert, wobei hier nur die Fusion auf Ebene der Entscheidung betrachtet wird, der Kombination von Erkennungen in mehreren Bildern.

3 Ablauf

Als Teil einer digitalen Instandhaltungsstrategie für Infrastrukturbauwerke interagiert dieser Beitrag mit weiteren Schritten, die benötigte Informationen liefern.

3.1 Bilddatenerfassung mit UAS

Um alle Möglichkeiten der Bauwerksaufnahme mit UAS auszunutzen, ist die Befliegung des Bauwerkes im Vorfeld zu planen und vorzubereiten. Dafür muss eine Route für das UAS geplant werden, die das gesamte Bauwerk abdeckt und sicherstellt, dass die geforderte Aufnahmequalität erreicht wird. Der in Kersten et al. (2018) vorgestellte Ansatz erzeugt Flugrouten, die sowohl die Anforderungen aus der benötigten Auflösung erfüllen, als auch die notwendige Überlappung für eine photogrammetrische 3D Rekonstruktion liefern. Die berechneten Flugrouten werden als GPS Positionen und Kameraausrichtungen auf das Fluggerät übertragen, und automatisiert abgeflogen.

3.2 Photogrammetrische 3D Rekonstruktion

Bei SfM werden Bildmerkmale erkannt und mit SIFT-Deskriptoren, eindeutig und robust für ein Pixel und seine Umgebung, beschreiben. Die Positionen der Kameras werden berechnet, indem die Merkmale in benachbarten Bildern gesucht werden. Mit bekannter Kameraanordnung kann ein 3D Modell des Bauwerkes berechnet werden. Da die Orientierung zweier Kameras zueinander bekannt ist, kann eine Homografie, eine projektive Transformation, bestimmt werden, die Pixel von einem Bild in das andere transformiert, gezeigt in Abbildung 1. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Homografie dazu verwendet, Bildausschnitte des selben Bereichs des Bauwerkes aufeinander zu legen und die Ergebnisse der Risserkennung zu vergleichen.

Abbildung 1: Transformation eines Bildes auf ein anderes mit der planaren Homografie. Die überlappende Fläche ist grün markiert. Links ist das Ausgangsbild zu sehen, in der Mitte das Zielbild und rechts das Ausgangsbild auf das Ziel transformiert.

3.3 Automatisierte Risserkennung in Bilddaten

Im Rahmen dieses Beitrages wird Risserkennung als ein Problem der Risssegmentierung entsprechend Liu et al. (2019) betrachtet, deren Ergebnis eine Vorhersage für jedes Pixel des Eingabebildes ist, ob es zu einem Riss gehört oder nicht.

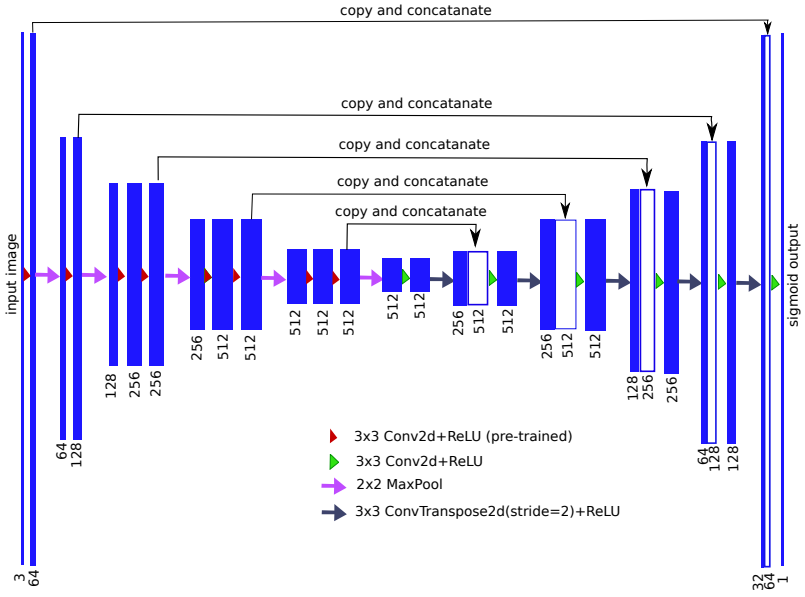


Abbildung 2: Architektur des TernausNet nach Iglovikov and Shvets (2018)

Der hier vorgestellte Ansatz basiert auf dem TernausNet von Iglovikov and Shvets (2018). Der Aufbau des Netzes, dargestellt in Abbildung 2, setzt sich zusammen aus einem Encoder und einem Decoder. Der Encoder ist ein typisches CNN, bei dem in mehreren Schritten aus Faltungsoperationen (Convolution) und Dimensionsreduktion (Pooling) die Eingabedaten komprimiert und klassifiziert werden. Im verwendeten TernausNet wird als Encoder das VGG16 Netzwerk nach Simonyan and Zisserman (2014) verwendet und für diesen Beitrag auf die Unterscheidung von zwei Klassen - Riss und Nicht-Riss - umtrainiert. Dabei wurden verfügbare Bilddatenbanken wie Zou et al. (2012) und eigene pixelgenau markierte Bilder verwendet.
Der Decoder ist dafür zuständig, die Riss/Nicht-Riss Klassifizierung des Encoders auf die Pixelebene zu verfeinern. Dafür wird ein „umgekehrtes“ Netzwerk angeschlossen, das eine Klassifizierung für jedes Pixel berechnet. Dabei werden nicht nur die Informationen aus dem vorigen Schritt verwendet, sondern auch die höher aufgelösten Informationen aus dem korrespondierenden Schritt des Encoders, dargestellt durch die Pfeile in Abbildung 2. Das Ergebnis ist eine Wert zwischen 0 und 1 für jedes Pixel des Eingabebildes. Der Wert eines Pixels stellt die Wahrscheinlichkeit dar, dass dieses Pixel zu einem Riss gehört. Je näher der Wert an 0 oder 1 ist, desto sicherer ist sich das Netzwerk mit seiner Aussage, während Werte um 0.5 eine neutrale Aussage bedeuten.

3.4 Fusion und Gewichtung der Segmentierung

Die Antworten des Netzwerkes werden mit der Homografie aufeinander registriert und die Informationen für einzelne Pixel miteinander verglichen. Dafür wurden verschiedene Regeln entwickelt, korrespondierende Pixel gemeinsam zu betrachten.

- *Durchschnitt:* $\frac{x_1+x_2}{2}$ Der Durchschnitt beider Vorhersagen gibt beiden gleiches Gewicht. Sichere Erkennungen ziehen das Ergebnis in ihre Richtung
- *Maximum:* $max(x_1,x_2)$ Diese Regel behält die höhere Risswahrscheinlichkeit bei. Dies funktioniert gut bei CNN, die wenig falsche Detektionen haben und unterstützt den Ansatz, dass es schlimmer ist, einen Riss nicht zu erkennen, als eine nicht gerissene Stelle falsch als Riss zu klassifizieren.
- *Produkt*: $x_1 \times x_2$ Die Multiplikation bevorzugt Klassifikationen nahe 0, da sie höhere Werte neutralisieren können.

Während die obigen Regeln beiden Werten gleiches Gewicht geben, vertrauen die folgenden Regeln Werten stärker, die näher an 0 oder 1 sind. Dafür werden zuerst alle Werte mit $y = 2x-1$ in das Intervall $(-1,1)$ überführt und anschließend bei der Normalisierung wieder zurück in das Intervall $(0,1)$.

- *Kubisch:* $y_{fus} = \sqrt[3]{y_1^3+y_2^3}$, reduziert den Einfluss von unsicheren und verstärkt konfidente Aussagen
- *Quintisch:* $y_{fus} = \sqrt[5]{y_1^5+y_2^5}$, reduziert den Einfluss von unsicheren und verstärkt konfidente Aussagen noch stärker
- *Logarithmisch:* $y_{fus} = -\sum_{i=1}^{2} sign(y_i) \cdot ln(1-|y_i|)$

Abbildung 3 stellt die Ergebnisse der Kombination exemplarisch für die quintische Regel dar. Die erste Abbildung stellt für jedes x_1,x_2 Paar die Kombination farblich dar, wobei Rot 0 und Grün 1 bedeutet. Die weiteren Graphen stellen die Verläufe für signifikante Werte für x_1 dar. Wenn eine Antwort sehr konfident ist, bekommt diese deutlich mehr Gewicht, wenn

beide Antworten gleich sind, ist auch das Ergebnis gleich und wenn sich beide Antworten widersprechen, kommt eine unsichere Aussage heraus.

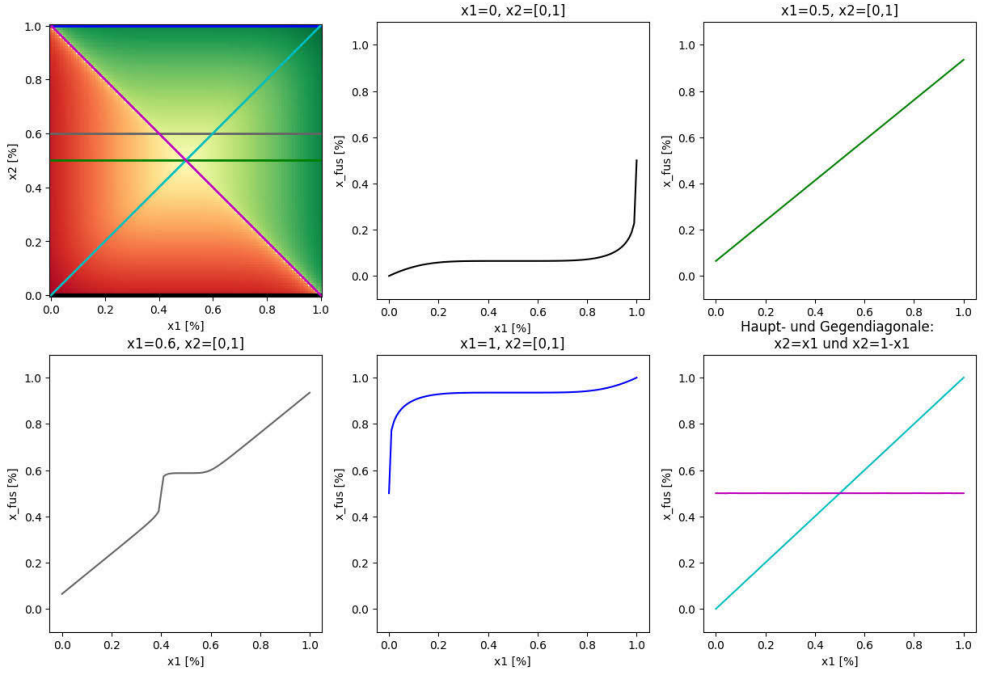
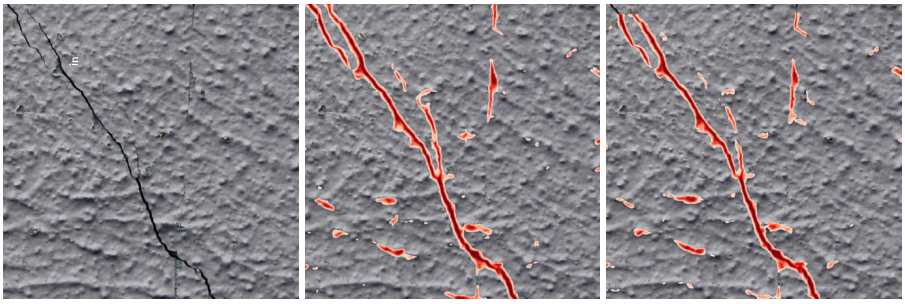


Abbildung 3: Überblick über das Verhalten der quintischen Kombination. Die Farbe des Graphen entspricht der Farbe der zugehörigen Linie im ersten Plot, entlang der die kombinierten Werte aufgetragen sind. Horizontale Achse in Prozent.

4 Auswertung

Die qualitative Auswertung in Abbildung 4 zeigt, dass die Ideen der Regeln auch in der Umsetzung sichtbar sind. Der Durchschnitt zeigt nur Detektionen, die in beiden Bildern auftauchen, das Maximum behält alle Detektionen und das Produkt eliminiert solche, die nur in einem Bild sind. Methoden, die auch die Konfidenz beachten, funktionieren ebenfalls gut. Sie verwerfen unsichere Aussagen für sichere. Widersprüchliche Aussagen werden in eine unsichere kombiniert.



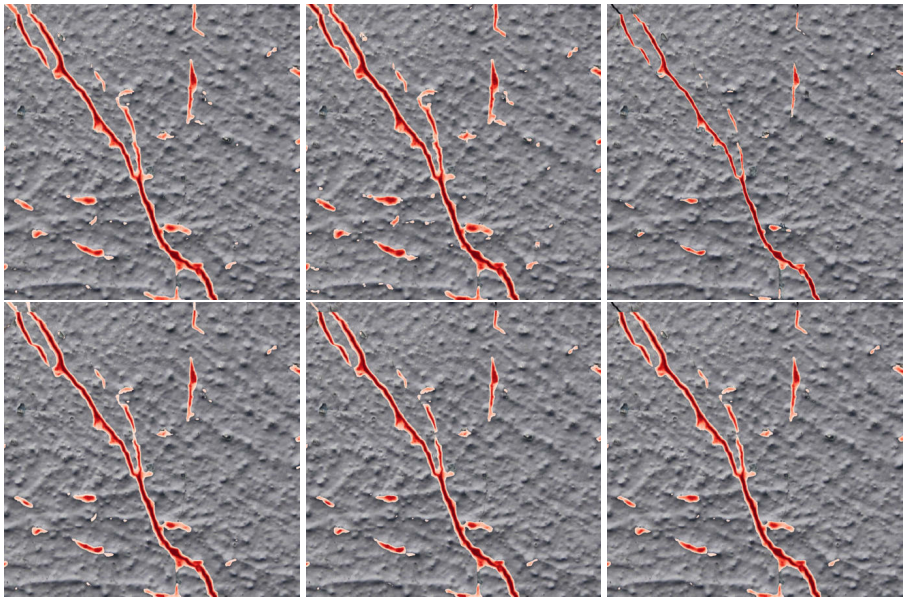


Abbildung 4: Ergebnisse der Kombination: **1.** Original **2.** Detektion Einzelbild 1 **3.** Detektion Einzelbild 2 (transformiert) **4.** Durchschnitt **5.** Maximum **6.** Produkt **7.** Kubisch **8.** Quintisch **9.** Logarithmisch

Für die quantitative Auswertung werden als Metriken Average Precision (AP), F-Measure (F1) und Intersection-over-Union (IoU) nach Eisenbach and Stricker (2017) verwendet. AP betrachtet den gemittelten Anteil der richtig-positiven Detektionen an allen positiven Detektionen, ist ein generelles Maß für die Qualität eines Klassifizierers und hier ausschlaggebend. Tabelle 1 zeigt die Auswertung von 6 Mio. Pixeln in überlappenden Bildern. Es zeigt sich, dass sich die Fusion auszahlt. Alle Kombinationen liefern bessere Ergebnisse als die Detektion im Einzelbild. Der Durchschnitt bietet die größte Verbesserung mit über 90% AP.

Kombination	**AP [%]**	**F1 [%]**	**IoU [%]**
Einzelbild 1	85.1	81.1	68.1
Einzelbild 2	86.9	80.0	66.6
Durchschnitt	90.5	83.0	71.0
Maximum	88.8	82.7	70.5
Produkt	88.2	82.9	70.8
Kubisch	89.6	83.5	71.6
Quintisch	88.9	83.4	71.6
Logarithmisch	88.8	83.6	71.9

Tabelle 1: Quantitative Ergebnisse der Auswertung

Die Kombination mehrerer Antworten verbessert die Erkennung, gleichzeitig ist der Einfluss des konkreten Algorithmus nicht entscheidend. Besonders komplexe Verfahren funktionieren nicht besser als einfache.

5 Bewertung und Ausblick

Die Auswertung der Ergebnisse hat gezeigt, dass die Risserkennung durch die Fusion mehrerer Vorhersagen verbessert wird. Unter Verwendung der verfügbaren Geometrieinformationen werden die Informationen der Einzelbilder pixelweise aufeinander registriert und anhand verschiedener Regeln unterschiedlicher Komplexität kombiniert. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Verbesserung relativ unabhängig von der gewählten Regel ist, da komplexere Regeln nicht zwangsweise gegenüber einfachen Regeln verbessern. Dies bestätigt die Ergebnisse von Heideklang (2018), dass schon einfache algebraische Kombination gute Ergebnisse liefert.
Unter Verwendung der geometrischen Informationen, die zur Verfügung stehen, wird die Vielzahl an Daten, die in der UAS basierten Bauwerksaufnahme entstehen, besser genutzt. Dies zeigt einen weiteren Mehrwert dieser modernen Technologie, mit der große Datenmengen erzeugt und ausgewertet werden können.

Im Rahmen dieses Beitrages wurden nur Verfahren betrachtet, die einzelne Pixel miteinander kombinieren. Die Einbeziehung der Nachbarschaft in die Fusion ist vielversprechend, um die Genauigkeit weiter zu verbessern, da so kleine Messungenauigkeiten bei der Transformation ausgeglichen werden können. Genauso können mehr als nur zwei Bilder gleichzeitig betrachtet werden, da eine Stelle am Bauwerk in der Regel in mehr als zwei Bildern aus UAS Aufnahmen sichtbar ist.
Außerdem ist es ein vielversprechender Ansatz, statt fest definierter Regeln für die Kombination einen Metaklassifizierer zu trainieren, der die Fusion übernimmt. Neuronale Netze können sehr komplexe Funktionen ausführen, die deutlich mehr Informationen in die Entscheidung einbeziehen als die hier gewählten einfachen Regeln.
Weiterhin können Ergebnisse aus dieser Arbeit auch für die Verbesserung der Erkennung im Einzelbild verwendet werden. Die hochaufgelösten Bilder werden für die Risserkennung in der Regel in kleinere Stücke unterteilt und die Ergebnisse anschließend kombiniert. Wenn die Bilder so unterteilt werden, dass sich die Einzelteile überlappen, kann auch diese Kombination mittels der hier vorgestellten Verfahren durchgeführt werden, um die Erkennung zu verbessern. So kann beispielsweise der Einfluss von Falschklassifizierungen reduziert werden, die in den Randbereichen der Ausschnitte entstehen können.
Die Grundidee dieser Arbeit, Registrierung und Vergleich von Bildern verschiedener Blickpunkte, kann auch auf unterschiedliche Aufnahmezeitpunkte ausgeweitet werden. So können Bilder der gleichen Stelle über längere Zeiträume miteinander verglichen und Veränderungen an erkannten Rissen pixelgenau verfolgt werden. Dies kann die langfristige Prognose der Bauwerkssicherheit unterstützen.

Literatur

Agisoft, St Petersburg, R. (2019), ‘Agisoft Metashape’, *Professional Edition* .

Cha, Y.-J. and Choi, W. (2017), ‘Deep learning-based crack damage detection using convolutional neural networks’, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* **32**(5).

Eisenbach, M. and Stricker, R. (2017), How to get pavement distress detection ready for

deep learning? A systematic approach, *in* '2017 international joint conference on neural networks (IJCNN)', IEEE, pp. 2039–2047.

Hallermann, N., Taraben, J. and Morgenthal, G. (2018), BIM related workflow for an image-based deformation monitoring of bridges, *in* 'Proceedings (IABMAS 2018), 9-13 July 2018, Melbourne, Australia', CRC Press, p. 157.

Heideklang, R. (2018), 'Data fusion for multi-sensor nondestructive detection of surface cracks in ferromagnetic materials'.

Iglovikov, V. and Shvets, A. (2018), 'Ternausnet: U-net with VGG11 encoder pre-trained on imagenet for image segmentation', *arXiv preprint arXiv:1801.05746* .

Kersten, J., Rodehorst, V., Hallermann, N., Debus, P. and Morgenthal, G. (2018), Potentials of autonomous UAS and automated image analysis for structural health monitoring, *in* '40th IABSE Symposium, Nantes', pp. S24–119.

Liu, Y., Yao, J., Lu, X., Xie, R. and Li, L. (2019), 'Deepcrack: A deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation', *Neurocomputing* **338**, 139–153.

Morgenthal, G., Hallermann, N., Kersten, J., Taraben, J., Debus, P., Helmrich, M. and Rodehorst, V. (2019), 'Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges', *Automation in Construction* **97**, 77–95.

Pauly, L., Hogg, D., Fuentes, R. and Peel, H. (2017), Deeper networks for pavement crack detection, *in* 'Proceedings of the 34th ISARC', IAARC, pp. 479–485.

Ronneberger, O., Fischer, P. and Brox, T. (2015), U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation, *in* 'International Conference on Medical image computing and computer-assisted intervention', Springer, pp. 234–241.

Schönberger, J. L. (2016), Structure-from-motion revisited, *in* 'Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition', pp. 4104–4113.

Siebert, S. and Teizer, J. (2014), 'Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system', *Automation in Construction* **41**, 1–14.

Simonyan, K. and Zisserman, A. (2014), 'Very deep convolutional networks for large-scale image recognition', *arXiv preprint arXiv:1409.1556* .

Wang, P. and Huang, H. (2010), Comparison analysis on present image-based crack detection methods in concrete structures, *in* '2010 3rd International Congress on Image and Signal Processing', Vol. 5, IEEE, pp. 2530–2533.

Yang, F., Zhang, L., Yu, S., Prokhorov, D., Mei, X. and Ling, H. (2019), 'Feature pyramid and hierarchical boosting network for pavement crack detection', *arXiv preprint arXiv:1901.06340* .

Zou, Q., Cao, Y., Li, Q., Mao, Q. and Wang, S. (2012), 'Cracktree: Automatic crack detection from pavement images', *Pattern Recognition Letters* **33**(3), 227–238.

Untersuchung des Potenzials der Unity-Engine für Entfluchtungssimulationen auf Basis der RiMEA

Timo Bittner[1] and Christian-Dominik Thiele[2]

[1,2]Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · TU Darmstadt · Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt
[1]E-Mail: bittner@iib.tu-darmstadt.de
[2]E-Mail: thiele@iib.tu-darmstadt.de

Der vorliegende Beitrag untersucht das Potenzial der Entwicklungsumgebung Unity in Verbindung mit Methoden des Building Information Modeling, um auf Basis der Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen (RiMEA) Simulationen für die Evakuierung von Gebäuden durchzuführen. Zu diesem Zweck wird zunächst die generelle Eignung der Unity-Engine anhand der in der RiMEA beschriebenen Testfälle untersucht, um anschließend über die Einbindung von IFC-Gebäudemodellen einen konkreten Anwendungsfall für ein Bestandsgebäude zu realisieren. Die Erkenntnisse werden im Kontext möglicher Ansätze für die ingenieurmäßige Beurteilung brand-schutztechnischer Belange diskutiert.

Keywords: Sicherheitsforschung, Brandschutz, Entfluchtungssimulation, Unity, Building Information Modeling

1 Einleitung

Der Sicherheitsforschung kommt in der jüngeren Vergangenheit stetig wachsende Bedeutung zu, auch in Verbindung mit der voranschreitenden Digitalisierung. So beschäftigt sich das Sicherheitsforschungsprogramm der Bundesregierung mit der Entwicklung innovativer Lösungen, die die zivile Sicherheit in der Bundesrepublik Deutschland erhöhen. Ein zentrales Ziel ist es hierbei, „die Chancen und Potenziale der digitalen Transformation für die Entwicklung ziviler Sicherheitslösungen nutzbar zu machen“ (BMBF, 2018). Teil solcher Überlegungen sind seit jeher auch die Belange brandschutztechnischer bzw. sicherheitsrelevanter Betrachtungen, zu denen unter anderem die Evakuierung von Gebäuden im Brandfall zählt. Hierzu gibt es zahlreiche bauliche, aber auch organisatorische Vorgaben und Maßnahmen, deren Einhaltung bzw. Umsetzung die Betreiber eines Gebäudes nachweisen müssen, um entsprechende Genehmigungen für den Betrieb zu erhalten. Die digitale Transformation eröffnet diesbezüglich im Rahmen der Methodik des Building Information Modeling neue Möglichkeiten, anhand eines ingenieurmäßigen Vorgehens Untersuchungen basierend auf digitalen Gebäudemodellen durchzuführen. Entfluchtungsanalysen für ein konkretes Bauwerk können so einen Eindruck über die Implikationen baulicher oder organisatorischer Maßnahmen vermitteln oder dazu beitragen potenzielle Schwachstellen des gegenwärtigen Zustandes zu identifizieren. In diesem Beitrag soll die Nutzung von digitalen Gebäudemodellen im IFC-Format in Verbindung mit der Game-Engine Unity für die Durchführung von mikroskopischen Entfluchtungsanalysen untersucht werden, da der hohe Grad an Individualisierbarkeit einer solchen Entwicklungsumgebung für einen solchen Ansatz vielversprechend erscheint.

2 Stand der Wissenschaft und Technik

Personenstromsimulationen für die brandschutztechnische Beurteilung gehen bereits mehrere Jahrzehnte zurück und fokussierten sich zunächst auf makroskopische Modelle. Diese basieren auf einem fluiddynamischen Ansatz, die Bewegung von Personen wird hier als statischer oder dynamischer Fluss angenommen. Die Berechnungen erfolgen in der Regel recht schnell, basieren allerdings auch auf teilweise stark vereinfachten Annahmen Rogsch (2012). In der jüngeren Vergangenheit hat sich daher mit der steigenden Leistung computergestützter Verfahren die Anwendung mikroskopische Modelle stärker verbreitet. Dabei werden einzelne Personen mit jeweils unterschiedlichen Eigenschaften betrachtet (vgl. Abbildung 1). Diese individuelle Betrachtung ermöglicht gezielte und detaillierte Rückschlüsse sowie einen hohen Grad an Anpassbarkeit, bedingt aber gleichzeitig rechenintensivere Prozesse, insbesondere bei großen Personenzahlen.

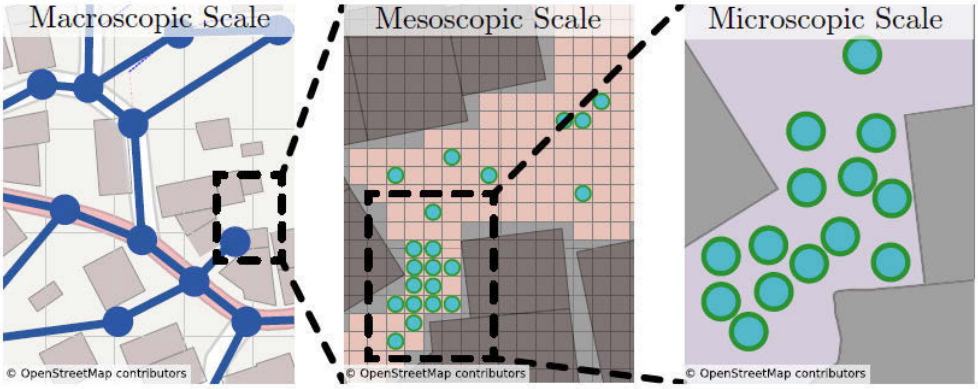


Abbildung 1: Ansätze für die Simulation von Personenbewegungen Biedermann and Esser (2016)

Für die mikroskopische Analyse existieren unterschiedliche Modelle und Algorithmen Rogsch (2012). Generell sind derartige Betrachtungen den leistungsbasierten Ingenieurmethoden zuzurechnen, die bislang in den geltenden baurechtlichen Vorschriften im Brandschutz nicht vorgesehen sind (vgl. Abbildung 1). Die Abstimmung eines solchen ingenieurmäßigen Vorgehens bedarf somit einer engen Abstimmung mit Genehmigungsbehörden und Brandschutzingenieuren Tilly (2011). In Deutschland bilden somit baurechtliche Vorschriften wie die MBO, MHHR oder MVStättV und allgemeine Vorgaben wie die DIN 18009-1[1] die Grundlage entsprechender Beurteilungen, konkrete präskriptive Vorschriften für die Anwendung ingenieurmäßiger Simulationen existieren allerdings zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht. Hier stehen bspw. ungeklärte Haftungsfragen einer flächendeckenden Anwendung noch im Wege. Es gibt jedoch Bestrebungen, die vorhandenen Potenziale der digitalen Methoden nutzbar zu machen, wie z.B. den Normentwurf DIN 18009-2[2] sowie zahlreiche weitere Untersuchungen und Erkenntnisse in diesem Zusammenhang accu:rate GmbH (2019).

[1] Brandschutzingenieurwesen – Teil 1: Grundsätze und Regeln für die Anwendung
[2] Brandschutzingenieurwesen – Teil 2: Personensicherheit und Räumungssimulationen (Entwurf)

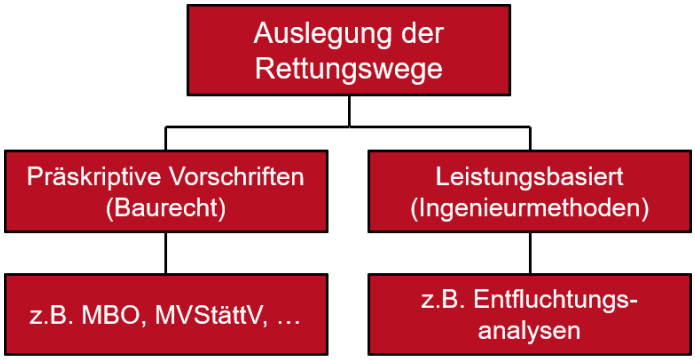


Abbildung 2: Nachweiswege für die Auslegung der Rettungswege nach Tilly (2011)

Einen weiteren Ansatzpunkt stellt die „Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen“ (RiMEA) dar, in der über wesentliche Kenngrößen für die Kategorien *Geometrie* und *Population* konkrete Vorschläge für die Anwendung dieser Ingenieurmethode gemacht werden, um die Nutzung solcher Verfahren in der Praxis voranzutreiben und die Akzeptanz weiter zu erhöhen. Die Richtlinie bezieht sich auf eine „simulationsgestützte Entfluchtungsanalyse [...] zur Bestimmung der Entfluchtungsdauer von baulichen Anlagen und Freiflächen [...] und zur Überprüfung der Konzeption und Leistungsfähigkeit von Flucht und Rettungswegen“ RiMEA e.V. (2016). In Bezug auf die geometrischen Zusammenhänge ist das Potenzial der Verwendung digitaler Gebäudemodelle hervorzuheben, da diese eine direkte Einbindung von Aspekten wie der Anordnung von Ebenen, Geschossen, Hindernissen, Wänden, Treppen, Rampen, Türen und Ausgängen sowie deren (Nicht-)Erreichbarkeit bzw. (Nicht)Begehbarkeit ermöglichen. Weiterhin ist künftig eine stärkere Verbreitung derartiger digitaler Grundlagen anzunehmen. Bezüglich der Werte für die zu entfluchtenden Personen umfasst die RiMEA wesentliche Aussagen, indem bspw. bestimmte Grundgrößen wie Gehgeschwindigkeiten oder Reaktionszeiten anhand empirisch ermittelter Daten abgeleitet werden. Zudem werden Aussagen über die individuelle Repräsentation von Personen getroffen sowie Richtwerte für universelle Algorithmen bzw. Regeln für Entscheidungen und Bewegungen festgelegt. Damit bildet die RiMEA gegenwärtig einen der wenigen Anhaltspunkte für die Anwendung mikroskopischer Entfluchtungssimulationen. Die Richtlinie gibt zudem im Rahmen der bislang durchgeführten Testfälle einen Überblick über gängige in diesem Bereich verwendete Software. Hier sind ASERI, crowd:it, FDS+evac, PedGo und Viswalk zu nennen RiMEA e.V. (2017), weitere Beispiele sind Building EXODUS, EVACNET4 oder Simulex Chiu and Shiau (2016).

Die Nutzung einer Umgebung wie Unity bietet sich an dieser Stelle insbesondere wegen der guten Eignung für die Abbildung individueller Eigenschaften an, was es dem Benutzer ermöglicht, praktisch alle Elemente der Simulation zu beeinflussen. Während die Engine zunächst primär für die Entwicklung von Spielen vorgesehen war, hat sich Unity mittlerweile als branchenübergreifendes Werkzeug für Bereiche wie Film & TV, X-Reality, Automobil-, Transport- und Fertigungsindustrie sowie in der AEC-Sparte (Architecture, Engineering & Construction) etabliert Unity Technologies (2019). Diesbezüglich werden Aspekte wie Grafik/Visualisierung, Sound/ Audio, Networking/Mehrbenutzer, Physikberechnungen oder auch

grafische Benutzeroberflächen miteinander kombiniert. Die zuvor erwähnte Beeinflussung erfolgt größtenteils über die Verwendung eigener Skripte. Ansatzpunkt für die Evakuierung sind dabei zunächst die in Unity enthaltenen Möglichkeiten für Navigation und Wegfindung, mit denen die selbstständige Bewegung von Personen umgesetzt werden kann. Wesentliche Bestandteile sind das zugrundeliegende Wegenetz (Navigation Mesh, kurz *NavMesh*) und der sich darauf bewegende *NavMeshAgent*. Die eigentliche Wegfindung, mit der ein Agent den Pfad zu einem Ziel berechnet, basiert in Unity auf dem Algorithmus des A*-Pathfinding (Unity Technologies, 2019b). Hierbei wird eine Feld-Kosten-Berechnung durchgeführt, wobei der günstigste Pfad dem kürzesten Weg zum Ziel entspricht. In Verbindung mit der Physik-Engine, mithilfe derer diverse Kollisionsabfragen erfolgen, und dem Anfertigen einiger weniger vorgefertigter Objekte (sog. *Prefabs*), bspw. einem Agenten, der sowohl über eine *NavMeshAgent*-Komponente als auch eine visuelle sowie physikalische Repräsentation verfügt, gelangt man so in kurzer Zeit zu einer lauffähigen Anwendung. Dieses Potenzial wurde bereits im Zuge anderer Arbeiten aufgegriffen. Chiu and Shiau (2016) nutzten Unity für eine Vergleichsstudie im Rahmen von Entfluchtungssimulationen mit älteren Bevölkerungsgruppen. Rahouti et al. (2017) betrachteten mithilfe von Unity die Implikationen einer assistierten Evakuierung in einem Krankenhaus. Dobrowolski (2017) nutzte die Entwicklungsumgebung für die Visualisierung von Ergebnissen der Personenstromsimulation CrowdSim, wobei nicht die nativen Möglichkeiten der Unity-Engine (*NavMesh* bzw. *NavMeshAgent*) verwendet wurden.

Die in diesem Kapitel geschilderten Zusammenhänge unterstreichen das Potenzial der Nutzung digitaler Methoden im Allgemeinen und der Unity-Umgebung für mikroskopische Entfluchtungsanalysen im Speziellen. Für die weitere Untersuchung wird das Konzept der entwickelten Unity-Anwendung vorgestellt und anhand der Testfälle der RiMEA evaluiert.

3 Entfluchtungssimulationen mit Unity und RiMEA

Im Folgenden soll eine Übersicht über die Funktionsweise sowie den grundsätzlichen Ablauf der in Unity durchgeführten Entfluchtungssimulation gegeben werden. Zunächst erfolgt der Import eines BIM-Modells in die Unity-Umgebung. Hierbei wurde die zugrundeliegende Geometrie als IFC-Datei exportiert und anschließend mit IfcConvert IfcOpenShell.org (2017) in ein 3D-Format überführt, welches von Unity unterstützt wird. Bei den vorliegenden Untersuchungen wurde Collada (*.dae*) aufgrund des geringen Informationsverlustes als geeignet befunden. Nach dem Import werden gemäß der Kategorie Geometrie der RiMEA die begehbaren Flächen definiert, um anschließend den *NavMesh* berechnen zu können. Dieser Vorgang erfolgt in Unity automatisch und erwies sich auch mit komplexeren BIM-Modellen als unkompliziert. Um ein durchgängiges Wegenetz zu gewährleisten, werden zunächst alle Türen als offen angenommen. Die Personen, auch als Agenten bezeichnet, können entweder bereichsweise gezielt in der Szene platziert (z.B. in Stuhlreihen) oder zufallsbasiert flächig auf dem *NavMesh* verteilt werden. Eine Positionierung auf dieser begehbaren Fläche – begrenzt bspw. durch Wände und Möbel – ist zwingend notwendig, damit die Bewegung der Agenten im virtuellen Gebäude möglich ist. Haben alle in der Szene platzierten Personen den Bereich verlassen, ist die Simulation beendet und der Durchlauf wird inklusive der Gesamtentfluch-

tungsdauer ausgewertet. Aus diesem Grund ist sicherzustellen, dass alle Agenten über mindestens einen gültigen Weg zum Ziel verfügen, da der Durchlauf sonst nie endet. Die zuvor beschriebenen Eingangsgrößen wie Gehgeschwindigkeit und Reaktionszeit sollen, insofern nicht durch die spezifische Nutzung des Gebäudes abweichend, über die Population gemäß Richtlinie verteilt sein. Hierfür kann für alle Agenten eine durchschnittliche Geschwindigkeit mit einer zufälligen Abweichung mit definierter Ober- und Untergrenze festgelegt werden. Gleiches gilt analog für die Reaktionszeit, welche festlegt, wann nach Ausbruch des Brandes bzw. Auslösen des Feueralarms ein Agent mit der Evakuierung beginnt. Für die mikroskopische Betrachtung wird wie erwähnt jeder Parameter für jeden Agent individuell gesetzt. Die abschließende Bearbeitung umfasst die Definition der möglichen Ziele, d.h. Bereiche außerhalb des kritischen Gebiets, zu denen sich die Agenten bewegen sowie das Hinzufügen sog. *Collider* in Unity. Mit diesen Kollisionszonen kann bspw. festgelegt werden, was passieren soll, wenn ein Agent den Bereich betritt oder verlässt. Im vorliegenden Fall wurde damit die Verringerung der Gehgeschwindigkeit auf Treppen gemäß der RiMEA erreicht. Wird ein *Collider* als „Trigger“ gesetzt, erfolgt keine physikalische Kollision, d.h. die Agenten können den Bereich nach wie vor durchschreiten. Zusätzliche Schritte können abhängig vom Gebäudemodell oder auch optionalen individuellen Erweiterungen nötig werden.

Wird die Entfluchtung gestartet, so wird mit dem Programmstart der Weg eines jeden Agenten zum (nach Luftlinie) nächsten Ziel berechnet. Es wurden hierbei zwei verschiedene Ansätze implementiert. Zum einen die einmalige Berechnung zum Programmstart, zum anderen die nach definierter Zeitspanne wiederholte Berechnung. Die Ansätze werden im Zuge der Betrachtung der Testfälle weiter diskutiert. Nach Ablauf der jeweiligen Reaktionszeit beginnen die Agenten mit der Evakuierung und bewegen sich wie zuvor erläutert zum nächstgelegenen Ziel. Mit der Bewegung auf den entsprechenden Flächen und der Festlegung von Parametern für jeden individuellen Agenten sind die grundlegenden Anforderungen der RiMEA in den Kategorien Geometrie und Population vorerst erfüllt, womit nun das Potenzial dieser Herangehensweise genauer untersucht werden kann. Um die Qualität bzw. Verlässlichkeit der Simulation zu bestimmen, wurden in der RiMEA für genau diese Ermittlung 15 Testfälle definiert. Diese wurden mit der Unity-Engine (Version 2018.3.14f1) durchgeführt, die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Durchführung der Testfälle mit Unity nach Anhang 1 RiMEA e.V. (2016)

#	**Beschreibung**	**Testergebnis**
1	Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit in einem Gang	Erfüllt
2	Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppauf	Erfüllt
3	Beibehalten der vorgegebenen Gehgeschwindigkeit treppab	Erfüllt
4	Messung des Fundamentaldiagrammes	Teilweise erfüllt
5	Reaktionsdauer	Erfüllt
6	Bewegung um eine Ecke	Erfüllt
7	Zuordnung der demographischen Parameter	Erfüllt
8	Parameteranalyse	Erfüllt
9	Eine Menschenmenge verlässt einen großen öffentlichen Raum	Nicht erfüllt
10	Zuweisung von Rettungswegen	Teilweise erfüllt
11	Wahl des Rettungsweges	Teilweise erfüllt
12	Auswirkung von Engstellen	Erfüllt
13	Stau vor einer Treppe	Erfüllt
14	Routenwahl	Teilweise erfüllt
15	Bewegung einer großen Menge Fußgänger um eine Ecke	Erfüllt

4 Analyse der Testfälle und Anwendung der Erkenntnisse

Die durchgeführten Tests zeigen, dass die Unity-Umgebung für derartige ingenieurmäßige Analysen definitiv über grundlegendes Potenzial verfügt, solche mikroskopische Untersuchungen durchzuführen. Zu den mit „Erfüllt“ gekennzeichneten Testfällen sind an dieser Stelle keine weiteren Ausführungen notwendig, das Ergebnis fällt im Sinne der RiMEA wie erwartet aus. Anzumerken sei jedoch, dass einige Tests nur in Teilen oder gar nicht quantifizierbar und somit gewisse Interpretationsfreiheiten bei der Bewertung des Ergebnisses vorhanden oder sinnvolle Annahmen zu treffen sind. Für Fälle, deren Geometrie Treppen umfasst, wurde das einfache Treppenmodell (Halbierung der Gehgeschwindigkeit in der Ebene) verwendet. In Test 4 war festzustellen, dass unter üblichen Bedingungen die Durchläufe erwartungsgemäß erfolgen. Einige der Vorgaben zu diesem Testfall unterliegen der zuvor angesprochenen Interpretationsfreiheit, wobei diese hier zu wesentlichen Unterschieden bei der Auslegung führt, was auch anhand der abweichenden Durchführung in den anderen Testumgebungen RiMEA e.V. (2017) deutlich wird. Eine abschließende Aussage zu diesem Testfall kann somit nicht getroffen werden. Der neunte Test hingegen legt ein Problem des gewählten Ansatzes dar: Die physikalische Repräsentation der Agenten verhindert eine gleichmäßige Evakuierung an den Engstellen (Türen), es kommt zu Stauungen, welche sich lediglich zufallsbasiert auflösen. Hier werden Agenten durch die Physik-Engine mit überhöhten Geschwindigkeiten durch Öffnungen bzw. Engstellten gedrängt, ein regulärer Fluss stellt sich bei höheren Personendichten nicht ein. Für eine adäquate Durchführung von Entfluchtungsanalysen wäre für derartige Szenarien eine Anpassung erforderlich. In Test 10 verhalten sich die Agenten zunächst nicht wie gefordert, so entfluchten bspw. Personen aus Raum 5 zum Hauptausgang oder auch aus Raum 10 zum sekundären Ausgang (vgl. RiMEA, S.45). Dies liegt darin begründet, dass das nächstgelegene Ziel wie erläutert per Luftlinie und nicht in Abhängigkeit von der Länge des zurückzulegenden Weges berechnet wird. Mit einfachen Anpassungen des Algorithmus (z.B. Zwischenziele oder Vorgabe je Raum) ist der Testfall

jedoch erfolgreich. Ähnliches gilt für Test 11: Wird der in Kapitel 3 erwähnte Ansatz mit wiederholter Evaluation des nächstgelegenen Ziels genutzt, tritt das erwartete Verhalten ein. Dies ist dadurch bedingt, dass Agenten, die sich infolge der Stauungen vor Ausgang 1 näher an Ausgang 2 (vgl. RiMEA, S.46) befinden, letzteren dann bei erneuter Berechnung wählen. Zu Test 14 sei abschließend anzumerken, dass ohne weitere Anpassungen durch den zugrundeliegenden A*-Algorithmus immer die kürzeste Route über ein anderes Stockwerk (vgl. RiMEA, S.49) gewählt wird. Da dieses Verhalten prinzipiell variierbar ist (Zwischenziele, Collider, Anpassung der Feldkosten für A*-Berechnung), kann das Testergebnis jedoch gleichermaßen mit „konfigurierbar“ bewertet werden. Hier sollten die Einstellungen für eine Simulation nach ingenieurmäßigem Ermessen an die jeweiligen Bedürfnisse bzw. Rahmenbedingungen angepasst werden, um ein sinnvolles Ergebnis zu erreichen.

Abbildung 3: Gebäude L5|01, TU Darmstadt Lichtwiese, in Autodesk Revit (li.) und Unity (re.) Tilly (2011)

Dies zeigt sich auch bei der Übertragung der gewonnenen Erkenntnisse auf ein Praxisbeispiel. Zu diesem Zweck wurde eine solche Simulation mit einer komplexeren Geometrie basierend auf dem BIM-Modell eines Bürogebäudes (s. Abbildung 3) exemplarisch umgesetzt. Zunächst wurde das Gebäude wie in Kapitel 3 beschrieben nach Unity importiert, wobei alle Bauteile fehlerfrei übernommen wurden. Anschließend wurden in einem optionalen Schritt einige optische Hilfestellungen (farbliche Hervorhebung von als begehbar vorgesehenen Flächen, teilweise transparente Wände für einen verbesserten Überblick sowie Brandort und Brandmeldezentrale) ergänzt. Für die Berechnung des Wegenetzes wurden alle begehbaren Flächen festgelegt, um darauf basierend den NavMesh zu erzeugen. Damit ist die Nachbearbeitung des BIM-Modells in Unity ist abgeschlossen. Im Folgenden werden wie im dritten Abschnitt erläutert die Ziele (s. Abbildung 3 rechts, grüne Bereiche) festgelegt, die sich in diesem Fall auf der Südseite des Gebäudes befinden und vom Erdgeschoss über eine Außentreppe zu erreichen sind. Für die beiden zentralen Treppenhäuser wird wie oben erwähnt die halbe Geschwindigkeit angesetzt. Die Agenten wurden zufällig im Gebäude verteilt und vor den jeweiligen Durchläufen mit individuellen Werten versehen. Die Simulationen verliefen dank der zuvor durchgeführten RiMEA-Testfälle erfolgreich, erwartungsgemäß stieg bzw. sank die mittlere Entfluchtungsdauer, wenn Parameter wie Geschwindigkeit verringert bzw. erhöht wurden. Auffällig war dabei die maßgebliche Beeinflussung der Dauer durch Personen, die weit entfernt von den Zielen platziert waren (z.B. 5. OG) und denen eine niedrige Gehgeschwindigkeit zugeteilt wurde. Der daraus resultierende Abstand zu den anderen Agenten bedingt, dass bspw. Stauungen keinen wesentlichen Einfluss auf die Gesamtdauer haben, da kritische Bereiche von den langsamen Personen mit deutlichem zeitlichem Versatz erreicht werden und sich entsprechende Zustände dann oftmals aufgelöst haben. Daher stellt sich die Frage, ob bei derartigen Analysen mit Unity das Augenmerk nicht eher auf

der Betrachtung solcher Bereiche, in diesem Fall z.B. den beiden zentralen Treppenhäusern, während des gesamten Evakuierungsvorgangs liegen sollte. Das Potenzial für einen solchen Ansatz konnte an diesem Bestandsgebäude veranschaulicht werden.

5 Fazit und Ausblick

Die vorliegende Arbeit hat gezeigt, dass die generelle Machbarkeit mikroskopischer Entfluchtungsanalysen mit der Unity-Engine gegeben ist. Das Potenzial derartiger Untersuchungen mit Unity ist insbesondere durch den hohen Grad der Anpassbarkeit an individuelle Bedingungen bzw. Betrachtungen sowie die Berücksichtigung realer Gegebenheiten durch die Einbindung von BIM-Modellen begründet. Ferner sind durch die ursprüngliche Ausrichtung als Spieleentwicklungsumgebung umfassende Möglichkeiten zur interaktiven Visualisierung gegeben, wodurch im Zuge eines Simulationsdurchlaufes Schwachstellen direkt identifiziert und mögliche Maßnahmen angegangen werden können. Unity stellt hier somit ein mächtiges Werkzeug dar, das bspw. als Entscheidungshilfe für sicherheitsrelevante Betrachtungen genutzt werden kann. Dies liegt jedoch auch im Ermessen der verantwortlichen beteiligten Akteure wie z.B. Brandschutzplanern, da in Deutschland bislang keine konkreten bzw. verbindlichen Vorgaben für die Verwendung solcher Ansätze existieren. Das dies zukünftig denkbar ist, zeigen aber sowohl ähnliche Herangehensweisen mit anderer Software als auch die RiMEA selbst. Als mögliche nächste Schritte wären entsprechend eine softwareseitige Optimierung und anschließende vollumfängliche Durchführung der Testfälle sowie die abschließende quantitative Verifizierung mit Daten aus reellen Evakuierungsübungen zu nennen. Zudem sind Erweiterungen der Simulation denkbar, so dass bspw. nicht nur der mathematisch kürzeste Weg genommen wird, sondern auch Faktoren wie Stauungen, mangelnde Ortskenntnisse oder Ergebnisse anderer relevanter Betrachtungen Berücksichtigung finden. Hier sind als Beispiel Berechnungen mit FDS (Fire Dynamics Simulator) anzuführen, auf Basis derer kritische Zonen in Unity definiert werden könnten, um eine weitergehende Analyse jenseits der Gesamtentfluchtungszeit zu ermöglichen.

Literatur

accu:rate GmbH (2019), ‘Fact Check DIN 18009-2 Räumungssimulationen’.
URL: *https://www.accu-rate.de/de/din-18009-2/*

Biedermann, D. and Esser, S. (2016), Is Macroscopic Resolution Enough? - A Study about the Use of Different Spatial Scales in Pedestrian Dynamics.

Chiu, Y.-P. and Shiau, Y.-C. (2016), ‘Study on the Application of Unity Software in Emergency Evacuation Simulation for Elder’, **21**(2), 232–238.
URL: *http://link.springer.com/10.1007/s10015-016-0277-6*

Dobrowolski, M. (2017), ‘Crowd Evacuation Simulator and Visualisation Using Unity3D’.
URL: *https://softwarehut.com/crowd-evacuation-simulator-visualisation-using-unity3d/*

IfcOpenShell.org (2017), 'IfcConvert - IfcOpenShell'. Part of the open source BIM collective.
URL: *http://ifcopenshell.org/ifcconvert.html*

Rahouti, A., Lovreglio, R., Dias, C. and Datoussaid, S. (2017), 'Simulating Assisted Evacuation using Unity3D'.

RiMEA e.V. (2016), 'RiMEA - Richtlinie für Mikroskopische Entfluchtungsanalysen - Version 3.0.0'.
URL: *https://rimeaweb.files.wordpress.com/2016/06/rimea_richtlinie_3-0-0_-_d-e.pdf*

RiMEA e.V. (2017), 'RiMEA - Analysen / Testfälle'.
URL: *https://rimea.de/de/rimea-projekt/analysen-testfaelle/*

Rogsch, C. (2012), 'Simulationsmethoden für Brandschutz und Evakuierung: Grundlagen - Anwendung - Erweiterung'.
URL: *http://elpub.bib.uni-wuppertal.de/edocs/dokumente/fbd/sicherheitstechnik/diss2012/rogsch/dd1210.pdf*

Tilly, R. (2011), 'Evakuierungsberechnungen vor dem Hintergrund baurechtlicher Vorschriften - Verfahren zur sicheren Anwendung von Evakuierungsberechnungen'.
URL: *https://www.hhpberlin.de/assets/files/Fachbeitraege/Evakuierung_druck.pdf*

Unity Technologies (2019), 'Unity Solutions'.
URL: *https://unity.com/solutions*

Evaluierung von Verfahren zur Indoor-Navigation eines humanoiden Roboters

Lukas Nadenau und Jan Martens

Geodätisches Institut und Lehrstuhl für Bauinformatik & Geoinformationssysteme,
RWTH Aachen University, Mies-van-der-Rohe Straße 1, 52074 Aachen
E-Mail: lukas.nadenau@rwth-aachen.de, jan.martens@gia.rwth-aachen.de

Roboter gewinnen in der Industrie zunehmend an Bedeutung und können zukünftig auch für Anwendungen im Bauwesen eine wichtige Rolle spielen. Neben den bereits in der Fertigungsindustrie weit verbreiteten Industrierobotern, werden zunehmend auch humanoide Roboter entwickelt. Letztgenannte könnten als hochmobile Einheiten beispielsweise zukünftig auf Baustellen körperlich schwere oder gefährliche Arbeiten unterstützen bzw. übernehmen, um den Menschen zu entlasten. Eine wesentliche Voraussetzung für den autonomen bzw. teilautonomen Betrieb von mobilen Robotern ist jedoch die Möglichkeit der präzisen Bestimmung der Position und Orientierung des Roboters im Bauwerksumfeld. Das Thema dieses Beitrags sind erste Untersuchungen zur automatischen Positionierung eines humanoiden Roboters sowie das Schaffen von Grundlagen für die automatisierte Navi-gation – im vorliegenden Fall – durch ein Gebäude. Die vorgestellten Konzepte wurden anhand des Roboters „NAO“ von Softbank Robotics erprobt und sollen die Grundlage für weitere Arbeiten schaffen. Der NAO erweist sich hierbei als äußerst praktikabel, da er bereits erfolgreich in Robotik-Wettbewerben wie dem RoboCup eingesetzt wird und seine Schnittstellen eine Programmierung mit verschiedenen Sprachen wie Java, Python und C++ zulassen. Der Schwerpunkt für die praktische Umsetzung liegt auf dem Einsatz von Java und Softwarebibliotheken wie OpenCV für Computer Vision und der Schnittstelle NAO zum Ansprechen und Steuern des Roboters. Vorgestellt und diskutiert werden insbesondere eine Methode zur Pfadsuche mithilfe einer vorhandenen Hinderniskarte und die Umsetzung des berechneten Bewegungspfades innerhalb von Gebäuden. Dies umfasst eine Analyse von Abweichungen vom geplanten Bewegungspfad. Um diese Abweichungen zu korrigieren und zusätzlich das Kidnapped Robot Problem zu lösen, werden zusätzlich geeignete Verfahren zur Positionskorrektur anhand der eingebauten Odometrie und durch Computer Vision behandelt und ein Ausblick auf den Einsatz weiterer Verfahren gegeben.

Keywords*:* Robotik, NAO, Indoor Navigation, Pfadsuche, Computer Vision

1 Einleitung

Das automatisierte Bauen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Neben fortschrittlicher Software können vor allem autonome oder teilautonome Systeme die Automatisierung der Bauprozesse beschleunigen. Autonome Fahrzeuge oder Roboter können beispielsweise die manuelle Datenerfassung (z.B. für die as-built/as-is Datenerfassung) zukünftig deutlich vereinfachen. Schon heute gibt es Drohnen, die Baustellen überfliegen, so dass auf der Basis der

gesammelten Bilder 3D-Computermodelle erzeugt werden können [1]. Für viele Anwendungen ist jedoch die ausschließliche Erfassung aus der Luft aufgrund von Verdeckungen nicht ausreichend, so dass eine alternative oder ergänzende Datenerfassung mittels terrestrischer Systeme notwendig ist. In diesen Kontext ordnet sich das hier beschriebene Projekt ein. Neben von Menschen getragenen oder radgebundenen Erfassungssystemen könnten zukünftig bspw. auch humanoide Roboter die autonome terrestrische Datenerfassung unterstützen.

Das Ziel des Projektes ist die Untersuchung eines humanoiden Roboters – im vorliegenden Fall der NAO – zur automatisierten Erkundung und Nutzung seiner Kamera zur Dokumentation seiner Umgebung. In einem ersten Schritt geht es darum, sich mit der Programmierung des Roboters und mit grundlegenden Konzepten der Indoor-Navigation vertraut zu machen. Die NAOqi-Schnittstelle erlaubt die Programmierung des Roboters u.a. mit Java. Für Bild-verarbeitungsoperationen kann OpenCV verwendet werden. Diese beiden Tools werden ge-nutzt, um einen Routingalgorithmus für den NAO umzusetzen, womit dieser auf Grundlage einer Karte Pfade ablaufen kann. Des Weiteren wird eine Methode zur Positionierung des NAO anhand von in der Umgebung angebrachten Marken vorgestellt und diskutiert.

Zuletzt wird ein Ausblick auf die weiterführenden Lokalisierungsmethoden der visuellen Odometrie und SLAM gegeben, die zukünftig am NAO erprobt werden sollen.

2 Technik und Algorithmen

Der NAO ist ein humanoider Roboter der Firma Softbank Robotics. Er ist ca. 58 cm groß und wiegt ca. 5,4 kg. Alle Gelenke zusammengenommen bringt er es in der vorliegenden Version (V5 H25) auf 25 Freiheitgrade. Im NAO ist diverse Technik gebündelt: Die Kamera MT9M114 liefert 30 Bilder pro Sekunde mit einer Auflösung von 1,2 Megapixeln. Je ein Ultraschallsender- und -empfänger pro Seite können die vordere Umgebung des Roboters in einem Radius ca. 2,5 m abtasten. Ein Gyroskop nimmt die Drehung des Körpers, ein Accele-rometer dessen Beschleunigung auf. Die Motorenbewegungen werden durch Potentiometer erfasst. Der ATOM-Z530-Prozessor (1,6 Ghz) betreibt ein angepasstes Linux-Betriebssystem [2].

Abbildung 1: Der NAO. Der humanoide Roboter verfügt über eine Vielzahl an Technik und Sensoren. (Quelle: Aldebaran documentation)

2.1 Programmierschnittstellen

Der NAO kann über die NAOqi-Schnittstelle über C++, Python und Java angesprochen werden [3]. Softwarekomponenten können entweder direkt auf dem NAO oder auf einem externen System, das sich per WLAN mit dem Roboter verbindet, ausgeführt werden. Rechenauf-wendige Prozesse können so auf leistungsstärkere Systeme ausgelagert werden. Die sogenannten Modul-Klassen der Schnittstelle sind verschiedenen Kategorien zugeordnet (Core, Motion, Audio, Video, PeoplePerception, Sensors, Trackers, …), welche die ganze Band-breite an Funktionalität des NAO abbilden.

„Motion“ beinhaltet Module, mit deren Hilfe der Roboter Bewegungen ausführt. Bewegungen umfassen sowohl die Ansprache einzelner Gelenkmotoren als auch das Durchführen vorgefertigter Bewegungsabläufe, wie z.B. das Hinsetzten, das Aufstehen, verschiedene Gesten und natürlich die Fortbewegung im aufrechten Gang. Im Kontext dieser Arbeit steht die Fort-bewegung im Fokus. NAOqi macht es dem Nutzer vergleichsweise leicht, indem den ent-sprechenden Methoden lediglich Zielpositionen in Relation zur Roboterposition übermittelt werden müssen, damit der Roboter sich fortbewegt. Die Schnittstelle übersetzt die gewünschte Bewegung automatisch in eine Abfolge von Schritten.

Beim Fortbewegen kontrolliert sich der Roboter teilweise kontinuierlich selbst. Sensoren nehmen die Bewegungen der Elektromotoren auf und vollziehen so nach, inwieweit der NAO die vorgegebenen Befehle umsetzt. Daraus wird eine Odometrie-Funktion abgeleitet, welche die relative Positionsänderung des Roboters anhand seiner Bewegungsabläufe nachvollzieht.

Ein weiteres Feld ist das Sehen („Vision“). Der NAO verfügt über zwei Kameras (1,2 MP, 30 fps), die Bilder seiner Umgebung erfassen können. Sie sind im Gesicht des Roboters verbaut und dort auf der Mittelachse übereinander angeordnet. Aufgenommene Bilder kann NAOqi direkt auswerten. So existieren Funktionen zur Erkennung von Bar- und QR-Codes, Gesichter, Personen und Gesten. Außerdem unterstützt der NAO die visuelle Odometrie (siehe unten).

OpenCV ist eine Open Source-Bibliothek zur Bildverarbeitung [4]. In diesem Kontext wurde sie dazu verwendet, als Bilder gespeicherte Umgebungskarten einzulesen, die Pfadsuche zu erleichtern (siehe unten, A*-Algorithmus) und Positionierungsberechnungen durchzuführen (siehe unten, Positionierung mit Marken). Sie ist in C, C++, Python und Java verfügbar. Mit OpenCV können Bilder eingelesen, Filter- und Transformationsoperationen angewendet und Merkmale in den Bilddaten erkannt werden. Ebenso können Videos aufgenommen und Bewegungen sowie Objekte darin verfolgt werden.

Die Bibliothek ist in verschiedene Pakete unterteilt. „Core“ enthält grundlegende Datenstrukturen, in denen unter anderem Bilder gespeichert werden. „Image processing“ kann Bilder verarbeiten, filtern, transformieren, Bildhistogramme erstellen und Farbraumbearbeitungen vornehmen. Es wurde verwendet, um Bilder einzulesen und zu bearbeiten. Mit „Calib3d“ können Kameras kalibriert und die Position einer Kamera in Relation zu einem Objekt ge-schätzt werden.

2.2 Pfadsuche

Der A*-Algorithmus wurde zur Suche eines optimalen Pfades in einer grob skizzierten Umgebung verwendet [5]. Entwickelt wurde er 1968 von Peter Hart, Nils Nilsson und Bertram Raphael. Die Umgebungskarte liegt als Binärbild vor, welches für die Pfadsuche als Graph interpretiert wird. Pixel werden hierfür als Knoten verwendet, die über Kanten mit Nachbar-pixeln verbunden sind (Abbildung 2). Es geht darum, einen kürzesten Pfad durch einen Graphen G zu finden, der aus Knoten V und Kanten E besteht.

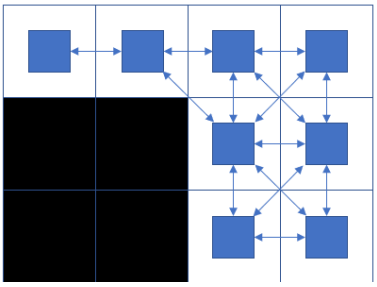


Abbildung 2: Ausschnitt einer binären Umgebungskarte. Weiße Felder sind begehbar und werden als Knoten für die Pfadsuche interpretiert, schwarze Felder nicht.

Zu Beginn der Pfadsuche werden ein Startknoten s und ein Zielknoten z bestimmt. Der Al-gorithmus kennt lediglich die Abstände benachbarter Knoten. Also beginnt er, die Nachbar-knoten von s zu betrachten und weist ihnen die Pfadkosten zu, die er benötigt, um sie zu erreichen. Der A*-Algorithmus bewertet die Nachbarknoten nicht nur nach ihrer Entfernung vom Startknoten, sondern schätzt ebenfalls ab, wie weit es von ihnen aus noch zum Ziel ist. Insgesamt werden die Nachbarknoten n mit der Funktion $f(n) = g(n) + h(n)$ bewertet. Die Funktion $g(n)$ gibt dabei wie beschrieben die Kosten an, die es braucht, um von s aus zu n zu gelangen und $h(n)$ ist ein Maß für die Entfernung von n zu z. $h(n)$ bedient sich dabei in unserem Fall der euklidischen Distanz. Sobald alle Nachbarn des Startknotens betrachtet wurden, kommt dieser in eine geschlossene Liste. Die Nachbarknoten landen in der offenen Liste. Die offene Liste enthält alle Knoten, deren Nachbarn noch nicht vollständig erkundet sind. Der beschriebene Vorgang müsste also für alle Knoten der offenen Liste wiederholt werden. Die Bewertung der Knoten erlaubt es aber, sich nun immer nur des Knotens der offenen Liste anzunehmen, der am besten geeignet scheint, d.h. mit dem geringsten $f(n)$-Wert, beschrieben ist. So sammeln sich mit den Iterationen die vollständig erkundeten Knoten in der geschlossenen Liste. Sobald der Zielknoten in der geschlossenen Liste landet, ist der kürzeste Pfad gefunden.

Dieses Vorgehen haben Hart et al. in einen Pseudocode umgesetzt:

1) Markiere Start s als „offen“.
2) Wähle den offenen Knoten n, dessen f (n)-Wert am geringsten ist.
3) Wenn alle Nachbarn von n geschlossen sind, markiere n als „geschlossen“ und be-ende den Algorithmus.
4) Ansonsten berechne die f -Werte der Nachbarn von n und markiere diese Nachbarn als „offen“. Nachbarn, die bereits geschlossen sind, werden nur als „offen“ markiert, falls der neu ermittelte f -Wert kleiner ist als ihr bisheriger f -Wert. Markiere n als „geschlossen“. Gehe zu Schritt 2.

Im vorliegenden Fall wurden die Kantengewichte des Graphen so gewählt, dass der Algorithmus nach Möglichkeit begrenzende Ecken und Ränder (=Wände) meidet. So soll ein Großteil unbekannter Hindernisse wie etwa Einrichtungsgegenstände in Innenräumen tendenziell gemieden werden. Diese Gewichtung wurde mit einer Distance-Transform-Funktion [6] erzielt, welche in OpenCV berechnet wurde. Kanten, die sich auf eine nicht begehbare Stelle der Karte zubewegen, werden dadurch „verteuert“.

2.3 Positionierung mit Marken

Der NAO soll sich im Falle eines Abweichens vom Bewegungspfad selbstständig lokalisieren können. Ein mögliches Verfahren dazu ist die Positionierung mit Marken an festen, dem Roboter bekannten Positionen [7]. In der Umsetzung sollen rechteckige QR-Codes in der Umgebung angebracht werden, deren Umrisse der NAO erkennen soll, um seine Position zu ermitteln. Auf diese Weise kann der Roboter sich selbst dann lokalisieren, wenn er innerhalb eines Bewegungsablaufs unerwartet verschoben wird („Kidnapped Robot Problem“) [8].

Als Grundlage hierfür wird das sogenannte „Perspective-n-Point“-Problem [7][9] gelöst. Beim „Perspective-n-Point“-Problem geht es darum, die Position einer kalibrierten Kamera relativ zu einer Ansammlung n bekannter 3D-Punkte zu bestimmen. Die Position der Kamera besteht aus der Translation in x-, y-, und z-Richtung und aus den Rotationen um die x-, y- und z-Achse. Zusammen ergeben sich also sechs Freiheitsgrade. Mathematisch lösbar wird das Problem ab einer Anzahl drei 3D-Punkten. Jeder der 3D-Punkte hat ein Abbild auf der Bildebene (x,y-Koordinatensystem), das auf einer Geraden mit 3D-Punkt und Kamerafokus liegt. Über die Projektionsmatrix der Kamera lässt sich hierdurch eine Zuordnung von 3D-Punkten in der Welt und 2D-Punkten auf der Bildebene erstellen. Eine relative Positionsab-stimmung des NAO zu den Punkten in der Umgebung wie sie durch QR-Codes definiert werden, ist somit möglich.

3 Analyse und Diskussion

Für die Analyse wurde eine Testumgebung für den Roboter aufgebaut und Testläufe mit dem NAO durchgeführt. Es zeigte sich dabei jedoch, dass beim Absolvieren eines vorgegebenen Pfades die tatsächliche Route des NAO erhebliche Abweichungen zur Soll-Trajektorie aufweist. Schon bei kurzen Strecken mit wenigen Richtungsänderungen kommt es zu deutlich sichtbaren Fehlern.

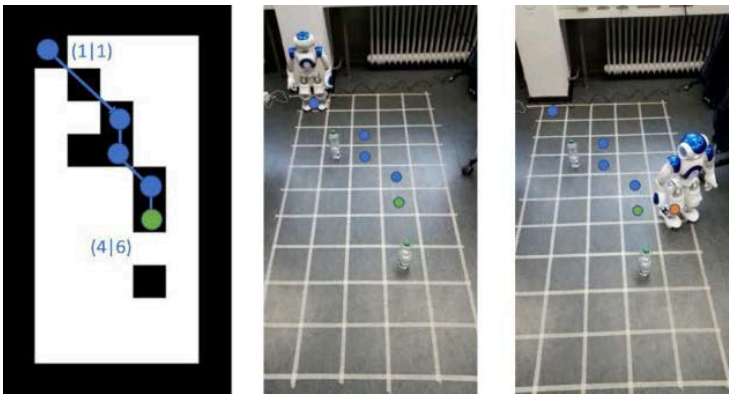


Abbildung 4: Experiment zum Ablaufen eines Pfads. Links: Binärkarte mit eingezeichnetem Pfad. Mitte: Startposition und Wegmarken. Rechts: Der NAO kommt im falschen Feld an.

Die Abbildung 4 verdeutlicht die Problemstellung an einem Beispiel: Der NAO startet in (1|1) und soll in (4|6) auskommen. Dazu geht er einige Schritte vorwärts, führt einige Drehungen aus und endet schließlich. Das Zielfeld (4|6) erreicht er nicht, stattdessen steht er größtenteils in (5|6). Die Felder sind 20cm x 20cm groß. Somit liegt er etwa 20cm vom Ziel entfernt und ist um ca. 30° gegenüber der Zielorientierung (senkrecht, wie zu Beginn) gedreht.

Es ergibt sich zusätzlich das Problem, dass die Odometrie-Funktion des NAO die Abweichungen nicht erfasst. Odometrie vollzieht die Fortbewegung eines Systems über die Beobachtung dessen Antriebsystems nach. Da das Antriebssystem keine Fehler anzeigt, liegen die Gründe für die Abweichungen in externen Faktoren. Es ist zu beobachten, dass die Bewegung des NAO einem Schlupf unterliegt, d.h. der Roboter insbesondere beim Abstoßen vom Boden für einen neuen Schritt oft leicht wegrutscht. Letztlich spielt der Grund für die Abweichungen aber nur eine untergeordnete Rolle. Unabhängig davon, mit welcher Genauigkeit der NAO Bewegungsbefehle ausführt, sollte er als autonom agierende Einheit in der Lage sein, seine Position zu bestimmen und eventuelle Abweichungen zu korrigieren.

Dafür eignet sich die Positionierung mit Marken nicht. In den Tests erkannte der NAO die QR-Codes nicht sehr zuverlässig. Schwierigkeiten bereiteten ihm vor allem das Erkennen auf größere Entfernung (>1,5 m) und das Erkennen von um die Vertikale gedrehten Codes. Außerdem kann nicht davon ausgegangen werden, dass der Roboter eine mit ausreichend großen QR-Codes ausgestattete Umgebung vorfinden werden. In der Positionierung bedarf es also einer verbesserten Methode.

Der NAO ist als humanoider Roboter anderen mobilen Einheiten (Drohnen, Rover) unterlegen, was Bewegungsfreiheit und Sensorgenauigkeit angeht. Dennoch kann auch bei diesen nicht von Perfektion ausgegangen werden. Die Problematiken der Bewegungsungenauigkeiten und Positionierungsmethoden existieren in der Robotik im Allgemeinen. Somit sind die hier vorgestellten Ansätze gut übertragbar auf zukünftige, anspruchsvollere Anwendungen.

4 Ausblick

Eine Verbesserung des Positionierungsansatzes könnte die visuelle Odometrie darstellen [10]. Bei der visuellen Odometrie wird die Bewegung eines Roboters allein mithilfe einer oder mehrerer an ihm montierten Kameras nachvollzogen. Ähnlich wie bei der klassischen Odometrie, werden bei der visuellen Odometrie inkrementelle Änderungen zwischen zwei Frames einer Bildstrecke erfasst. Über diese Änderungen kann dann die Bewegung des Roboters nachvollzogen werden. Hierfür werden in jedem Frame Feature Points erkannt (z.B. mit dem Corner-Detector von Harris und Stephens [11]) und verfolgt (z.B. mit dem Kanade-Lucas-Tomasi (KLT) Feature-Tracker [12]).

Die oben bei der Positionierung mit Marken beschriebene geometrische Situation wird hier praktisch um ein zweites Frame erweitert, wobei anstelle von QR-Codes die Feature Points verfolgt werden. Aus dem Zusammenhang der Bild- und Weltpunkte lässt sich eine Translation und Rotation des Roboters ermitteln. Somit ist es möglich, dass der Roboter bei bekann-ter Startposition eine relative Positionierung anhand der laufenden Kamera vornehmen kann. Die NAOqi-Schnittstelle bietet hierfür bereits die Möglichkeit, visuelle Odometrie zu betrei-ben. Ein Test dieser Funktion steht jedoch noch aus. Es stellt sich dabei die Frage, ob der NAO bei diesem kamerabasierten Verfahren ähnlich schwach abschneidet, wie bei der Posi-tionierung der Marken oder ob er, weil die Features leichter zu erkennen sind, zufriedenstel-lende Ergebnisse liefert.

SLAM („simultanious localisation and mapping“) [13] erweitert diesen Ansatz, indem in jedem Schritt die zukünftige Position aufgrund des aktuellen Bewegungsbefehls geschätzt wird (Vorhersageschritt). Die Schätzung wird dann mithilfe diverser Sensorik überprüft (Korrek-turschritt). Für den Korrekturschritt kann die visuelle Odometrie eingesetzt werden. Auch andere Sensoren wie Ultraschall oder Beschleunigungsmesser können zusätzlich zur Hilfe genommen werden, was dem Prinzip der Sensorfusion entspricht. Insbesondere monotone Oberflächen, dunkle Bereiche und Spiegelungen können einem rein kamerabasierten Kon-zept Probleme bereiten. Deshalb wird es wichtig sein, für den Korrekturschritt auch den Ult-raschallsensor, das Gyroskop (zur Messung von Drehungen) und/oder das Accelerometer (zur Messung der Beschleunigung) des NAO einzubeziehen. Der Ultraschallsensor kann zu-dem dazu eingesetzt werden, Hindernisse, die vor dem Roboter auftauchen, zu orten.

SLAM ist somit ein vielversprechender Ansatz, verspricht er doch, alle Sensoren des NAO zu nutzen, um mögliche Positionierungsfehler während der Navigation auszugleichen.

Literatur

[1] 3D-Modellierung für die Überwachung und Förderung von Baustellen. In: https://www.parrot.com/ (https://www.parrot.com/business-solutions-de/bauwesen/3d-modellierung-fur-die-uberwachung-und-forderung-von-baustellen, 04.06.2019)

[2] NAO - Technical overview. In: Aldebaran documentation (http://doc.aldebaran.com/2-1/fa-mily/robots/index_robots.html, 17.12.2018).

[3] NAOqi Framework. In: Aldebaran documentation. (http://doc.aldebaran.com/2-1/ref/in-dex.html, 17.12.2018).

[4] OpenCV. In: OpenCV.org (https://opencv.org/, 04.06.2019).

[5] Hart, P.E., Nilsson, N.J., Bertram, R., 1968. A Formal Basis for the Heuristic De-termination of Minimum Cost Paths. In: IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics (Volume: 4, Issue: 2, July 1968). S. 100-107.

[6] Kimmel, R., Kiryati N., Bruckstein, A.M., 1996. Sub-pixel distance maps and weighted distance transforms. In: Journal of Mathematical Imaging and Vision. S. 223-233.

[7] Lepetit, V., Moreno-Noguer, F., Fua, P., 2008. EPnP: An Accurate O(n) Solution to the PnP Problem. Springer Science+Business Media.

[8] Engelson, S.P., McDermott, D.V., 1992. Error Correction in Mobile Robot Map Learning. Proceedings 1992 IEEE International conference on Robotics and Automation.

[9] Wolfe, W.J., Mathis, D., Sklair, C.W., Magee, M., 1991., The perspective view of three points. In IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. S. 66-73

[10] Singh, A., 2015. Monocular Visual Odometry using OpenCV. In: avisingh599.github.io (https://avisingh599.github.io/vision/monocular-vo/, 04.06.2019).

[11] Harris, C. und Stephens, M., 1988. A Combined Corner and Edge Detector. In: Proceedings of Fourth Alvey Vision Conference. S. 147 – 151.

[12] Tomasi, C. und Kanade, T., 1991. Detection and Tracking of Point Features. In: International Journal of Computer Vision 9(3). S. 137 – 154.

[13] Leonard, J.J., Durrant-Whyte, H.F., 1991, Simultaneous map building and localization for an autonomous mobile robot. In: Proceedings IROS ’91: IEEE/RSJ International Work-shop on Intelligent Robots and Systems ’91.

Einsatz von VR-Technologien in BIM/GIS

Steven Schürstedt[1] and Andreas Geiger[2]

[1]Institut für Automation und angewandte Informatik · Karlsruher Institut für Technologie · E-Mail: steven.schuerstedt9@kit.edu
[2]Institut für Automation und angewandte Informatik · Karlsruher Institut für Technologie · E-Mail: andreas.geiger@kit.edu

Virtuelle Realität (VR) bezeichnet die Darstellung der Wirklichkeit in einer in Echtzeit computergenerierten, interaktiven virtuellen Umgebung. Im Bereich der Bauwirtschaft stellt die virtuelle Realität ein immer wichtiger werdendes Werkzeug zur Visualisierung und zur Unterstützung der Bauprozesse dar.

Die VR-Technologie ermöglicht es Baudetails oder Probleme leichter und schneller zu erkennen, Größenverhältnisse besser einschätzen zu können und sich in komplexen Umgebungen besser zu orientieren. Hierzu zählen beispielsweise komplizierte Verläufe von Leitungssystemen, Lagebeziehungen von Bauteilen und Gebäuden, oder virtuelle Begehungen von Gefahrenbereichen.

Inhalt dieser Arbeit ist die Anbindung des Softwarewerkzeuges IFCExplorer an die virtuelle Realität unter Verwendung von aktuellen VR-Technologien. Der IFCExplorer ist ein Softwarewerkzeug zur Analyse und zur Visualisierung von semantischen Datenmodellen aus den Bereichen BIM (*Building Information Modelling*) und GIS (Geographische Informationssysteme). Vergleichbare Softwarewerkzeuge besitzen häufig den Nachteil, dass wichtige Bauteil- bzw. Gebäudeinformationen der unterstützten Datenmodelle nicht oder nur unvollständig berücksichtigt werden, da der Fokus meist auf der visuellen Darstellung liegt.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Implementation erfolgt mittels des OpenVR SDK und der SteamVR Runtime von Valve. Es wird aufgezeigt welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen und welche Schritte notwendig sind um eine bestehende Anwendung auf Basis von OpenGL und C++ mit aktueller VR-Technologie zu nutzen. Im Zuge der Implementation werden die Visualisierungsalgorithmen des IFCExplorers optimiert und an die neuen Anforderungen angepasst. Das Resultat ist neben der VR Anbindung eine deutliche Performance-Steigerung und ein besseres visuelles Erscheinungsbild.

Keywords: VR, BIM, GIS

1 Einleitung

In den letzten Jahren hat - ausgelöst durch die digitale Transformation - ein großer Umbruch in der Bauwirtschaft begonnen. Die BIM-Arbeitsmethode setzt sich zunehmend in Planungsbüros durch, wodurch sich die Arbeitsweise vom 2D-Zeichnen zum objektorientierten 3D-Modellieren verändert. Um BIM Planungsdaten auszutauschen, hat sich der openBIM Standard IFC (*Industry Foundation Classes*) von buildingSMART durchgesetzt. Ein Großteil der BIM-fähigen Softwarewerkzeuge unterstützt diesen Standard, insbesondere die CAD (*Computer Aided Architectural Design*) Modellierungswerkzeuge sind in der Lage IFC Datensätze zu erzeugen.

Neben detaillierten Gebäudedaten im Format IFC werden für viele Anwendungsfälle auch Informationen zu Nachbargebäuden auf Stadt- oder Quartiersebene benötigt. Hier hat sich das GIS (Geo Informations Systeme) Datenmodell CityGML des Open Geospatial Consortium

(OGC) etabliert. Entsprechende Datensätze werden von Kommunen oder den Vermessungsverwaltungen der Bundesländer bereitgestellt. Mit der am Institut für Automation und angewandte Informatik entwickelten Anwendung IFCExplorer ist die Integration unterschiedlicher Datenmodelle aus den Bereichen BIM und GIS in einer gemeinsamen Szene möglich. Auf Abbildung 1 ist eine aus IFC und CityGML zusammengesetzte Szene zu sehen (Benner et al., 2013).

Im Rahmen dieser Veröffentlichung wird aufgezeigt, wie der IFCExplorer um eine VR-Funktionalität erweitert wird. Mit der bisherigen Grafikengine werden die von OpenGL 1.1 bereitgestellten Funktionalitäten zur stereoskopischen 3D-Darstellung auf Projektionswänden oder 3D-Monitoren genutzt. Eine Anbindung an aktuelle VR-Brillen wie die Modelle HTC Vive, Oculus Rift oder Microsoft Hololense ist damit nicht möglich. Aus diesem Grund werden die Möglichkeiten und Voraussetzungen zur Anbindung aktueller VR-Brillen an eine bestehende Anwendung wie den IFCExplorer aufgezeigt.

Im Wissenschaftlichen Bereich kann VR als Werkzeug zur Darstellung von Wissen verstanden werden. Bspw. entwickelt die Firma Nanome Software, die es ermöglicht Moleküle und andere chemische Verbindungen in VR darzustellen, mit den Ziel diese besser verstehen zu können. Durch die räumliche Darstellung können Zusammenhänge erkennbar werden, die vorher verborgen oder nur schwer zu erfassen sind. Ein anderes Anwendungsgebiet ist die Mathematik. Mit der Software Calcflow können Mathematische Konzepte wie Vektoren, Matrizen, Kreuzprodukt und mehrdimensionale Analysis durch eine VR-Brille betrachtet werden. Hier ist das Ziel gerade Studenten und Schülern einen leichteren Zugang zu diesen Themen zu ermöglichen und ein intuitives Verständnis zu fördern (Nanome, 2019).

Im Baubereich wird VR als Marketinginstrument, Kommunikationstool oder Trainingsumgebung eingesetzt. Als Kommunikationstool wird VR eingesetzt um Missverständnisse zwischen im Bauprozess involvierten Parteien zu vermeiden. Oftmals fehlt einzelnen Parteien die Expertise, um herkömmliche Baupläne interpretieren zu können. Mit der Virtuellen Realität kann ein Gebäude betreten werden, bevor es tatsächlich realisiert wird. Dies schafft vor allem für Nicht-Experten ein natürliches Verständnis des Bauprozesses (ALLVR, 2018). In der Bausicherheit können komplizierte und gefährliche Arbeitsvorgänge in einer verzeihenden virtuellen Umgebung simuliert und trainiert werden um so die Sicherheit zu erhöhen.

2 Stand der Technik

Unter der dem Begriff der Virtuellen Realität (VR) versteht man die Abbildung der Wirklichkeit in eine computergenerierte Umgebung. Das erste Konzept einer mit einem Computer verbundenen VR-Brille wurde bereits im Jahre 1965 durch Ivan Sutherland (MIT) präsentiert. Für das Erzeugen des räumlichen Eindrucks wird für das rechte und linke Auge jeweils ein eigenes Bild berechnet. Diese beiden Bilder sind leicht versetzt zueinander, wodurch der Tiefeneindruck entsteht. Dieser Mechanismus kommt sowohl bei Großbildleinwänden (Stereo Projektion), speziellen 3D-Räumen, CAVE genannt, (*Cave Automatic Virtual Environment*) oder auch bei HMD (*Head-Mounted-Display*) wie Video- bzw. VR-Brillen zum Einsatz. Im Laufe der letzten Jahre haben sich VR-Brillen - angetrieben durch die Spieleindustrie - auch

Abbildung 1: Integrierte Szene aus BIM/GIS Daten

im Konsumermarkt etabliert und lassen sich, eine leistungsfähige Grafikkarte vorausgesetzt, an handelsüblichen PCs betreiben. Darüber hinaus setzt sich in den letzten Jahren insbesondere in den Bereichen Werbung und Produktpräsentation Mixed Reality oder Augmented Reality durch. Dabei wird ein computergeneriertes Bild in die Wirklichkeit integriert. Im Baubereich werden seit mehreren Jahren vermehrt digitale Gebäudemodelle eingesetzt. Die Digitalisierung von Gebäuden ebnet den Weg zur Nutzung von VR-Technologien im Bauwesen.

Zurzeit existieren mehrere Anwendungen, die die Visualisierung von Gebäudemodellen in VR unterstützen. Erwähnenswert ist hierbei der BIMXplorer.

Der BIMXplorer ist ein kommerzielles Plugin für Autodesk Revit und Standalone Viewer für IFC-Daten. Um ein Gebäudemodell in der Virtuellen Realität betrachten zu können, ist eine Nvidia Grafikkarte und SteamVR notwendig. Die semantischen Daten werden vom BIMXplorer rudimentär repräsentiert. Im VR-Modus ist ein Fortbewegen über einen Teleportations- oder Flugmodus möglich. Der BIMXplorer bietet mehrere interessante Interaktionsmöglichkeiten über Controller mit Gebäudemodellen. Es ist beispielsweise möglich, einen Abstand zwischen zwei Punkten zu messen oder eine Clippingplane zu definieren (Johansson, 2016).

3 Implementation

Grundlage der VR-Technologie ist das Stereoskopische Sehen. Durch den Abstand der Augen wird jedes Objekt aus einem leicht veränderten Winkel betrachtet. Dadurch entsteht eine Parallaxe, die umso kleiner wird, je weiter das Objekt entfernt liegt. Die Kombination der beiden unterschiedlichen Bilder führt dann zum räumlichen Sehen. Eine VR-Brille versucht diesen natürlichen Vorgang zu simulieren. Für jedes Auge wird eine computergenerierte Szene in einem leicht verschobenen Winkel berechnet, deswegen ist es notwendig jeden Renderdurchlauf mindestens zweimal durchzuführen. Die beiden berechneten Bilder werden dann

für das jeweilige Auge mittels einer Linse ausgeben. Die Linse bricht das Licht auf eine Art und Weise in der es auf der Netzhaut als scharfes Bild abgebildet wird. In VR-Brillen werden hierfür oftmals Fresnel-Linsen verwendet, um das Sichtfeld zu vergrößern. Durch den Einsatz von Linsen entstehen optische Fehler im Bild, die Verzeichnung (*Distortion*) und chromatische Aberrartion (*Chromatic Aberration*), die dann von der verwendeten SDKs (*Software Development Kit*) korrigiert werden müssen. Neben der 3D-Darstellung besitzen VR-Brillen Headtracking, um den immersiven Eindruck weiter zu verstärken. Über an der Brille angebrachte Sensoren wird jede Kopfbewegung getrackt und über ein SDK an die Software übermittelt. So ist es möglich, sich frei in einer Szene umzusehen. Über Controller besteht die Möglichkeit mit der Szene zu interagieren (Doerner et al., 2013).

Für die Implementation einer VR-Brille existieren verschiedene SDKs, die stark von der jeweiligen Plattform und der verwendeten Hardware abhängen. Für den PC existieren momentan unter anderem das Oculus SDK für die Oculus Rift, OpenVR für HTC-Vive und über eine extra Software-Schnittstelle auch für Oculus und Windows Brillen und Windows Mixed Reality für Windows AR- und VR-Brillen. SDKs ermöglichen eine einfache Kommunikation zwischen Software und Hardware, ohne dass einem Entwickler alle Details über die verwendete VR-Brille bekannt sein müssen.

Da VR-Brillen unter anderem im Unterhaltungsbereich erfolgreich sind, bieten viele GameEngines wie Unity3D und Unreal eine VR-Unterstützung an. GameEngines spielen auch für BIM/GIS eine Rolle und werden in verschiedenen Softwarelösungen eingesetzt. (Nandavar et al., 2018)

Der IFCExplorer basiert auf einer eigenen Grafik-Engine, die für semantische Datenmodelle optimiert ist. Im Zuge der Implementation wird die Grafik-Engine um die VR-Technologien erweitert. Dafür wurde das OpenVR SDK verwendet, da es zurzeit am meisten VR-Brillen unterstützt.

Nach dem Öffnen eines Gebäudemodells ist über ein Einstellungsmenü der VR-Modus aktivierbar. Nach einer Prüfung, ob alle benötigen Geräte verbunden sind und Steam und SteamVR vorhanden sind, wird der VR-Modus gestartet.

3.1 Implementation mit OpenVR

OpenVR ist eine von der Valve Corporation entwickelte API (*Application Programming Interface*) und dient als Schnittstelle zwischen Anwendung und Hardware. OpenVR ermöglicht so eine unabhängige Kommunikation zwischen den beiden Elementen. Mit OpenVR ist es möglich, VR-Brillen von verschiedenen Herstellern anzusteuern ohne den Programmcode anpassen zu müssen. Konkret sind dies alle VR-Brillen, die den OpenVR-Treiber implementieren, so beispielsweise die HTC Vive, Oculus Rift oder Windows Mixed Reality Headsets.

OpenVR ist in zwei Schichten unterteilt: der eigentlichen API und einem Treiber. Die API kommuniziert mit SteamVR, welches als Zwischenplattform fungiert. SteamVR wiederum kommuniziert mit dem OpenVR Treiber. Damit eine VR-Brille mit OpenVR bzw. SteamVR kompatibel ist, muss der OpenVR Treiber für das Gerät implementiert sein. Ebenfalls benötigt ein Anwender SteamVR, um Anwendungen mit OpenVR nutzen zu können.

$$OpenVR- > SteamVR- > OpenVR-Driver- > HMD$$

SteamVR bietet ein einfaches Interface, um aktuelle Verbindungsinformation zu VR-Brille, Controller und Tracking Boxen anzuzeigen, und ermöglicht die Durchführung einer Raumvermessung. Mit der Raumvermessung wird die Größe des getrackten Bereiches festgelegt (Valve, 2019).

Standardmäßig benötigt eine VR-Anwendung für eine korrekte Bildanzeige die Position der VR-Brille und der Controller sowie eine spezielle Projektions- und Transformationsmatrix, welche unter anderem den Augenabstand (auch *inter pupillary distance*, kurz IPD, genannt) und die von der Brille unterstütze Auflösung, sowie den maximal möglichen Sichtbereich der Linsen berücksichtigt. Die Position der VR-Brille im realen Raum gibt sowohl die Position als auch die Blickrichtung der virtuellen Kamera vor.

Um OpenVR in den IFCExplorer zu integrieren, war es notwendig, die auf der Fixed-Function-Pipeline beruhende OpenGL-Implementation zu erneuern. Dies hat zwei Gründe: Einerseits benötigt das Rendern in VR effiziente Strukturen, um hohe Frameraten erreichen zu können. Während bei normalen Anwendungen 30 - 60 fps (*frames per second*) ausreichend sind, sind bei VR-Anwendungen 60 fps als Minimum empfohlen, um Effekte wie Motion-Sickness zu verhindern. Die Auswirkung von physischen Aktionen wie dem Bewegen des Controllers oder der VR-Brille sollte mit einer sofortigen Anpassung des ausgegebenen Bildes korrespondieren. Wenn die FPS zu niedrig ist, kann es passieren das Bildinformationen vom Betrachter schneller verarbeitet werden als sie ausgegeben werden. So erhalten die verschiedenen Sinnesorgane widersprüchliche Informationen zur räumlichen Lage und Bewegung und dies kann zu Motion-Sickness führen (Johansson et al., n.d.). Andererseits benötigt OpenVR neuere Computergrafik-Konzepte, die mit der Fixed-Function-Pipeline nicht umsetzbar sind. Eine Anwendung, die OpenVR mit OpenGL verwenden möchte, sollte mindestens Version 3.1 von OpenGL unterstützen.

Um ein Gebäudemodell auf einer VR-Brille anzuzeigen werden folgenden Schritte von der Software durchlaufen: Als erstes wird ein beliebiges Gebäudemodell vom IFCExplorer eingelesen und in ein OpenGL 3D-Modell konvertiert. Das 3D-Modell wird nun dreimal gesondert gerendert: einmal für die normale Bildschirmausgabe und zweimal für die VR-Brille. Hier wird für jedes Auge ein eigenes Bild berechnet. Dies ist notwendig, da Projektions- und Transformationsmatrix für jedes Auge unterschiedlich sind. Die so berechneten Bilder werden in Texturen gespeichert, welche dann an OpenVR übergeben werden (*render to texture*). Die SteamVR Runtime übernimmt dann automatisch alle weiteren Schritte, wie beispielsweise die Korrektur der Linsenverzerrung, und gibt das finale Bild dann über die VR-Brille aus (Abbildung 2).

Standardmäßig ist das ausgegebene 3D-Modell aus einer Orbit-Ansicht sichtbar. Die VR-Brille steuert lediglich die Blickrichtung; ein Bewegen in der Szene ist nur mit der Maus möglich. Um einen immersiveren Eindruck vom Gebäude zu bekommen, bietet der IFCExplorer den Walk-Mode an. Hier wechselt die Sicht in eine Ego-Perspektive und es ist möglich, mit den Pfeiltasten langsam durch ein Gebäude zu laufen. In Zukunft soll hier ein Bewegen mit einem Controller möglich sein.

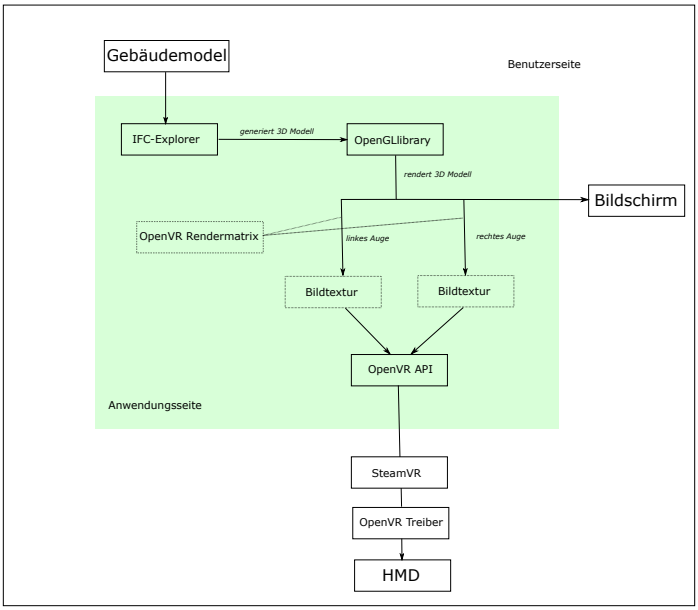


Abbildung 2: System Architektur

3.2 OpenXR

OpenXR ist eine lizenzfreie und offene Spezifikation der Khronos Group, die in der Version 0.90 am 18. März 2019 veröffentlicht wurde. OpenXR soll die Entwicklung für Augmented Reality (AR) und VR vereinheitlichen. An OpenXR arbeitet ein Konsortium aus bekannten Branchengrößen wie Windows, Epic Games, Collabora und Facebook.

Die Idee hinter OpenXR ist die Verhinderung der Fragmentation des VR/AR Marktes. Gerade plattformübergreifend existieren eine Vielzahl an unterschiedlichen API's, so zum Beispiel Oculus Mobile und Google Daydream für mobile Geräte, OpenVR und Oculus SDK für PC und PSVR für Playstation. Dies engt den Markt für VR ein, da entschieden werden muss, für welche Plattform entwickelt werden soll, oder aufwändige Portierungen durchgeführt werden müssen. Für den Benutzer von VR schränkt dies die Anzahl der verfügbaren VR-Anwendungen ein es ist nicht gewährleistet dass eine bestimmte Anwendung mit jeder VR-Brille nutzbar ist. OpenXR soll als neuer AR/VR Standard diese Probleme angehen.

OpenXR besteht aus der OpenXR API und dem OpenXR Device Plugin Interface. Die OpenXR API kommuniziert mit einer herstellerspezifischen XR Runtime (so z.B. SteamVR), diese kümmert sich beispielsweise um die Anpassung der Linsenverzerrung. Diese Informationen gehen dann zum Device Plugin Interface, welches mit dem entsprechenden Geräte-Treiber kommuniziert, um Positionsdaten von Controller und VR-Brille abfragen zu können.

$OpenXRAPI -> XR-Runtime -> OpenXRDevicePluginInterface -> Geräte-Treiber -> HMD$

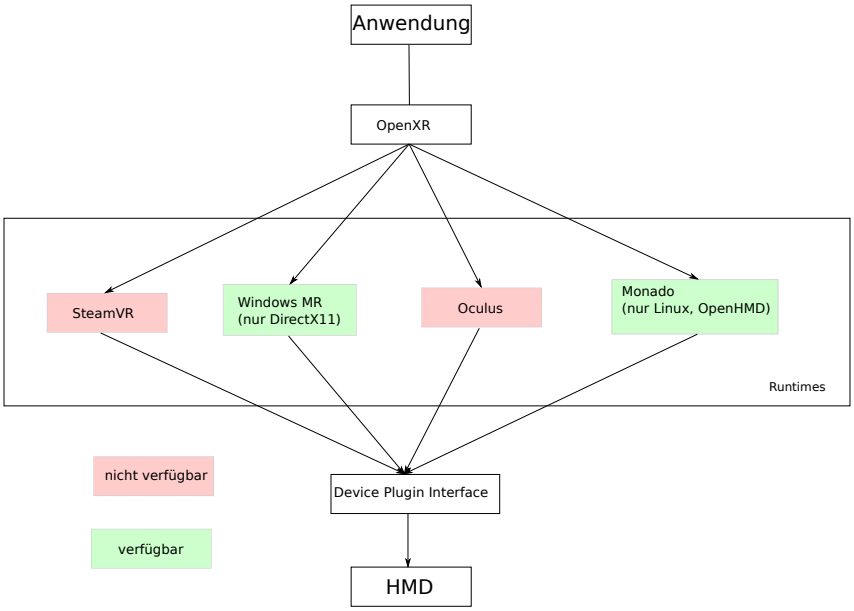


Abbildung 3: OpenXR-Datenfluss

In der aktuellen Entwicklung von OpenXR existiert nur die API, das Device Plugin Interface wird in einer späteren Version hinzugefügt. Bisher gibt es zwei Runtimes, die OpenXR unterstützen: Windows MR und Monado (siehe Abbildung 3, Stand Juni 2019). Weitere Runtimes sollen in Zukunft folgen.

Für BIM bietet OpenXR eine vielversprechende Lösung, um mit relativ wenig Entwicklungsaufwand eine auf allen Geräten laufende Anwendung zu entwickeln. Gerade das Zusammenführen von AR und VR auf einer API ist ein spannender Ansatz, der viel Entwicklungsaufwand ersparen kann (Khronos, 2019).

4 Ausblick

Die Integration der VR-Technologien im IFCExplorer befindet sich noch in der Entwicklung. Erste Ergebnisse zeigen das große Potential von VR, aber viele Fragen bleiben noch offen. In der weiteren Entwicklung soll die Interaktion mit der VR-Szene über Controller verstärkt werden und für den Baubereich nützliche Funktionen implementiert werden. In kombinierten Szene aus BIM/GIS Daten entsteht die Problematik sich sowohl im Gebäude, also auch im Außenbereich mit angemessener Geschwindigkeit zu bewegen. Hier sind verschiedene Geschwindigkeitsmodi denkbar. Für eine realistische Bewegung in einer Szene ist auch eine Kollisionskontrolle notwendig. Weiterhin soll die Implementation in Zukunft auf OpenXR basieren, um auch einen AR-Modus zu unterstützen. Da der IFCExplorer die OpenGL API

benutzt, ist dies erst möglich, wenn eine entsprechende Runtime vorhanden ist. In einem AR-Modus könnten virtuelles und reales Gebäude überlagert dargestellt werden, sodass die vorhanden semantischen Informationen eingeblendet werden können.

Literatur

ALLVR (2018), Virtual Reality bei der Planung und Vermarktung von Bau-und Immobilienprojekten, Technical report.
URL: *https://www.allvr.net/dokumente/ALLVR_Whitepaper.pdf (letzer Abruf: Juni 2019)*

Benner, J., Geiger, A., Häfele, K. H. and Küppel, H. (2013), IFCExplorer - Ein Werkzeug für die Integration unterschiedlicher raumbezogener semantischer Daten, *in* 'Geoinformatik', Universität Heidelberg.

Doerner, R., Broll, W., Grimm, P. and Jung, B. (2013), *Virtual und Augmented Reality (VR/AR), Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*, Springer.

Johansson, M. P. (2016), *From BIM to VR : the design and development of BIMXplorer*, Chalmers University of Technology, Gothenburg.

Johansson, M., Roupé, M. and Tallgren, M. V. (n.d.), From BIM to VR Integrating immersive visualizations in the current design process, *in* 'Fusion-Proceedings of the 32nd eCAADe Conference-Volume 2', pp. 261–269.

Khronos (2019), 'OpenXR'.
URL: *https://www.khronos.org/openxr (letzer Abruf: Juni 2019)*

Nandavar, A., Petzold, F., Nassif, J., Schubert, G. and Ag, B. (2018), INTERACTIVE VIRTUAL REALITY TOOL FOR BIM BASED ON IFC Development of OpenBIM and Game Engine Based Layout Planning Tool-A Novel Concept to Integrate BIM and VR with Bi-Directional Data Exchange, Technical report.

Nanome (2019), 'Calcflow'.
URL: *https://github.com/matryx/calcflow (letzer Abruf: Juni 2019)*

Valve (2019), 'OpenVR'.
URL: *https://github.com/ValveSoftware/openvr/wiki/API-Documentation (letzer Abruf: Juni 2019)*

Visualisierung stochastischer Phänomene bei einfachen strukturmechanischen Problemen mit Hilfe virtueller Realität

Torsten Ilsemann[1], Thomas Potthast[1], Philipp Moritz[1] und Christoph Eckert[1]

[1]Institut für Risiko und Zuverlässigkeit · Leibniz Universität Hannover · Callinstraße 34 · 30167 Hannover · E-Mail: ilsemann@irz.uni-hannover.de, potthast@irz.uni-hannover.de, moritz@irz.uni-hannover.de, eckert@irz.uni-hannover.de

Im Bauwesen hat die stochastische Modellierung von Belastungen und Materialien für die Risiko- und Sicherheitsanalyse tragender Bauwerke in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. In diesem Zusammenhang werden Belastungen und Materialien als stochastische Größen modelliert, welche die mechanischen Eigenschaften eines deterministischen Systems auf vielfältige Weise beeinflussen, aus denen stochastische Verformungen resultieren. Im Rahmen dieser Arbeit werden Methoden zur Visualisierung einfacher mechanischer Systeme unter Berücksichtigung stochastischer Phänomene mithilfe virtueller Realität vorgestellt, um eine intuitivere und verbesserte Vorstellung für stochastische Probleme im Bauwesen zu generieren. Die Methoden werden anhand einfacher Beispiele aus der Strukturmechanik erarbeitet, deren Grundlage die Ergebnisse einer Monte Carlo Simulation sind.

Keywords: Stochastische Strukturmechanik, Monte-Carlo-Simulation, Virtuelle Realität, Visualisierung

1 Motivation

Die Bedeutung stochastischer Fragestellungen im Bauwesen hat in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen und unterliegt bis heute intensiver Forschung. Dabei können mechanischen Eigenschaften eines deterministischen Systems durch stochastische Größen auf mannigfaltige Weise beeinflusst werden. Beispielsweise ist in diesem Zusammenhang die stochastische Modellierung schwankender Belastungssituationen, Materialeigenschaften geometrischen Implikationen und Modellungenauigkeiten zur Berechnung der Lebensdauer eines Bauwerkes zu nennen (Luo et al., 2017). Als Resultat solcher Untersuchungen ergeben sich im Allgemeinen stochastische Verschiebungen. Die Interpretation derartiger Ergebnisse kann durch eine Vielzahl von Visualisierungen unterstützt werden. Eine Möglichkeit dazu bietet die Virtuelle Realität (VR), welche Einzug in unterschiedliche Bereiche des Ingenieurwesens gefunden hat, z.B. dafür sei auf das Building Information Modelling verwiesen (Hilfert and König, 2016). Darauf aufbauend gilt es weitere Darstellungsformen zu weiteren Problemstellungen, welche einen höheren Abstraktionsgrad verlangen, zu erarbeiten. Eine Möglichkeit ist dabei die stochastische Strukturmechanik, die trotz der stark gestiegenen Rechenleistung für hochkomplexe deterministische Modelle kaum handhabbar sind (Stefanou, 2009). Den Ursprung der stochastischen Mechanik bietet die Monte-Carlo-Simulation (MCS) (Shinozuka, 1972), bei der ein deterministisches Modell mit hinreichend vielen Realisierungen des stochastischen Inputs, die aus ihren Verteilungen resultieren, wiederholt berechnet wird. Je nach Modell kann die Berechnung wenige Millisekunden, falls eine analytische Lösung vorliegt, oder selbst auf Hochleistungsrechnern mehrere Stunden, falls ein hochdimensionales

Finite Element Model zugrunde liegt, dauern. Die MCS dient als Referenz bis heute der Validierung neuer Methoden. Ein intuitiver und anschaulicher Zugang in die Thematik der stochastischen Simulation ist daher wünschenswert, um die komplexen Zusammenhänge vor allem bei mehreren voneinander stochastischen Eingabegrößen besser zu verstehen. in diesem Fall erscheint die Methode der VR vielversprechend, weil sie die 3D-Visualisierung um zusätzliche Dimensionen, wie zum Beispiel der Interaktion erweitert. Im beste Wissen der Autoren ist dieser Forschungsbereich weitestgehend unberührt. Zu nennen sind hier lediglich die Arbeiten zur Visualisierung von Unsicherheiten empirischer Daten (Potter et al., 2011; Kinkeldey et al., 2014; Brodlie et al., 2012), die festgestellten, dass die Darstellung dieser eine Dimensionsänderung hervorruft .
Der Fokus dieser Arbeit liegt daher zunächst in der Visualisierung einfacher stochastischer, strukturmechanischer Modelle und ist wie folgt aufgebaut: In Abschnitt zwei werden wesentliche Aspekte der Euler-Bernoulli Balkentheorie beschrieben, welche die mathematische Grundlage des deterministischen Systems darstellt. Darauf aufbauend werden die Komponenten für die Visualisierung der Implementierung und eine stochastische Simulation im dritten Abschnitt zusammengetragen und durchgeführt. Die Ergebnisse werden in Abschnitt vier erläutert. Im letzten Abschnitt wird die Arbeit zusammengefasst und beurteilt, sowie Ausblicke auf weitere Forschung gegeben

2 Euler-Bernoulli Balkentheorie

In diesem Abschnitt werden die mechanischen Grundlagen der Euler-Bernoulli Balkentheorie erläutert, welche die Balkenbiegung unter Lastauftrag, mithilfe von vereinfachenden Modellannahmen, mathematisch beschreibt.

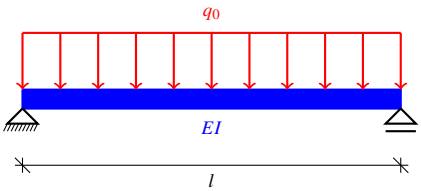


Abbildung 1: Einfach gelagerter Balken

Der einfach gelagerteBalken en ist ein grundlegendes System der Mechanik, siehe Abb. 1. Im folgenden werden die Materialparameter des Balkens, das Elastizitätsmodul E und das Flächenträgheitsmomentes I über die gesamte Länge l und den Querschnitt als homogen angesehen. Belastet wird der Balken durch eine homogene Flächenlast q_0. Nach (Gross et al., 2014, S. 120ff) wird die Durchbiegung $w(x)$ eines Einfeldträgers beliebiger Lagerung durch vierfache Integration aus $EIw^{IV} = q_0$ bestimmt. Durch Betrachtung der Randbedingungen werden die Integrationskonstanten ermittelt und aufgelöst, wodurch sich die folgende Funktion der Biegelinie ergibt:

$$w(x) = \frac{q_0 l^4}{24EI}\left[\left(\frac{x}{l}\right)^4 - 2\left(\frac{x}{l}\right)^3 + \left(\frac{x}{l}\right)\right]. \tag{1}$$

Die maximale Durchbiegung w_{max} in der Mitte des Balkens ist gegeben durch:

$$w_{max} = w\left(\frac{l}{2}\right) = \frac{5}{384}\frac{q_0 l^4}{EI}. \tag{2}$$

3 Stochastische Simulation

In diesem Abschnitt werden stochastische Grundlagen dargelegt, welche zur Beschreibung stochastischer Phänomene notwendig sind. Zunächst wird hierzu das Konzept der Zufallszahlen erläutert. Darauf aufbauend werden Verteilungen charakterisiert, welche die Streckenlast, sowie das Elastizitätsmodul beschreiben. Basierend auf den zuvor genannten Grundlagen wird das Vorgehen der MCS erläutert.

3.1 Verteilung der Eingabegrößen

Flächenlast

Nach (Spaethe, 1992, S. 14) können Lasten q_0, für deren zeitlichen Verlauf innerhalb der Nutzungsdauer eines Bauwerkes meist nur der Extremwert relevant ist, als extremwertverteilt beschrieben werden. Im Folgenden werden die Parameter der *Typ I* Extremwertverteilung (EX I) betrachtet, weil diese in der Zuverlässigkeitstherorie tragender Baukonstruktionen zur stochastischen Modellierung von Belastungen bevorzugt werden. Die Parameter a und u der Verteilung, siehe (Spaethe, 1992, S. 26 ff), werden aus dem Mittelwert μ und der Standardabweichung σ ermittelt:

$$\sigma_{X_{exp}} = \frac{\pi}{a\sqrt{6}} \Rightarrow a = \frac{\pi}{\sqrt{6}\,\sigma_{X_{exp}}} \tag{3}$$

$$\mu_{X_{exp}} = u + \frac{0.577216}{a} \Rightarrow u = \mu_{X_{exp}} - \frac{0.577216}{a} \tag{4}$$

Elastizitätsmodul

Der Modellparameter E soll einer logarithmischen Normalverteilung (LNV) unterliegen. Diese wird zur Darstellung von Festigkeits- oder anderen Materialeigenschaften verwendet, da sie im positiven Wertebereich definiert ist. Die komplette Herleitung dieser Verteilung, sowie weitere Ausführungen sind (Spaethe, 1992, S. 25 ff.) zu entnehmen. In dem vorliegenden Beispiel wurde eine 3-parametrische, logarithmische Normalverteilung gewählt, da ein Minimalwert x_0 für das kleinste Elastizitätsmodul angesetzt werden kann. Die zur Modellierung

notwendigen Lageparameter μ_u und σ_u werden aus μ_x , σ_x und x_0 berechnet:

$$\sigma_u = \sqrt{ln\left(1+\left(\frac{\sigma_x}{\mu_x - x_0}\right)^2\right)} \tag{5}$$

$$\mu_u = ln(\mu_x - x_0) - \left(\frac{\sigma_u^2}{2}\right) \tag{6}$$

3.2 Monte-Carlo-Simulation

Die Monte-Carlo-Simulation ist ein iteratives Verfahren, dass mithilfe von Zufallszahlen stochastische Probleme lösen kann. Grundlage sind die Mehrfachberechnungen von Zufallsexperimenten. Es lassen sich deterministische Kennwerte durch die MCS mitunter schneller lösen als durch Nutzung analytischer Lösungsverfahren, da immer eine analytische Lösung existiert (Müller-Gronbach et al., 2012, S. V). Für die MCS werden die Streckenlast q_0 und das Elastizitätsmodul E als stochastisch verteilte Modellparameter des einfach gelagerten Balkens betrachtet, siehe Abschnitt 3.1. Das zugrundeliegende Zufallsexperiment sei in diesem Zusammenhang die Auswertung der Biegelinie (1) mit allen möglichen Kombinationen aus jeweils n-mal erzeugten, extremwert- und logarithmisch normalverteilten, Pseudozufallszahlen q_0 und E. Resultierend werden n^2 Zufallsexperimente ausgeführt.

3.2.1 Parameter des Balkens und der Verteilungen

Für die MCS werden Parameter für den Balken definiert und entsprechende Variablen in Matlab erzeugt und zugewiesen. Der Balken habe eine Länge von $l = 10,0m$, sowie einen Recheckquerschnitt mit einer Breite von $b = 0,1m$ und einer Höhe von $h = 1,0m$. Der für die spätere Berechnung notwendige Balken-Parameter des Flächenträgheitsmomentes I wird automatisch nach definierter Funktion für den IPE-Querschnitt berechnet. Die Mittelwerte, Standardabweichungen und Minimalwerte der Verteilungen für die Streckenlast q_0 und das Elastizitätsmodul E sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Parameter, Gl. (3-6) , der Extremwertverteilung, sowie der logarithmischen Normalverteilung, werden entsprechend berechnet.

Tabelle 1: Kenngrößen der Eingabewerte

i	$\mu_{X_i} = E[X_i]$	$\sigma_{X_i} = \sqrt{Var[X_i]}$	x_{0i}	**Typ**	**Einheit**
1	210000	$\mu_{X_i}/20$	180000	LNV	$\frac{N}{mm^2}$
2	18	2	-	EX I	$\frac{N}{mm}$

3.2.2 MCS in Matlab

Für jede Verteilung wird ein eigenes Set an n- gleichverteilen Pseudozufallszahlen aus dem Intervall $(0,1)$ erzeugt, die im Anschluss durch die Inversionsmethode in die Extremwerverteilung und logarithmische Normalverteilung transformiert werden. Die Umsetzung der

MCS geschieht über die Auswertung der Biegelinie, Gl. (1). Alle n Zufallszahlen der einen Verteilung werden mit allen n Zufallszahlen der anderen Verteilung kombiniert. daraus resultieren werden n^2 Zufallsexperimente, d.h. Berechnungen analytischen Lösung der Biegelinie, durchgeführt. Die n^2 Ergebnisse der Biegelinie $w(x)$, werden als CSV-Datei gespeichert.

4 VR-Visualisierung stochastischer Phänomene

Im folgenden Abschnitt wird die Visualisierung der Ergebnisse aus der MCS mit Matlab, siehe 3.2.2 vorgestellt um einen intuitiven Zugang zu den Ergebnissen der vorangegangenen stochastischen Simulation zu gewinnen. Diese wird durch eine Spiele-Umgebung generiert, welche die Autoren zur Visualisierung der VR-Umgebung nutzen.

4.1 Unity

Unity ist eine plattformübergreifende Spiele-Engine und Entwicklungsumgebung, welche umfangreiche Möglichkeiten für die Spieleentwicklung bietet (Unity Technologies, 2019). 3D-Modelle, Skripte, Vorlagen (Assets), Texturen, Programmpakete und viele weitere Bestandteile der späteren Anwendung können in einem Editor importiert und bearbeitet werden. Zum Abschluss kann das gesamte Projekt zu einer fertigen Anwendung und als eigenständiges Programm kompiliert und exportiert werden (Schulz, 2014). Aufgrund dieser vielfältigen Möglichkeiten wird Unity für die Umsetzung von VR-Anwendungen bevorzugt. Zu Beginn wird eine einfache Umgebung erstellt, in welcher sich der Anwender im fertigen Spiel frei bewegen kann. Zur Steuerung wird eine First-Person Ansicht gewählt. Die Umsetzung erfolgt über ein externe Vorlage aus dem Unity-Asset-Store.

4.2 Visualisierung

Da in Unity keine Möglichkeit der Erstellung komplexer geometrischer Objekte vorhanden ist, müssen diese in einer eigenständigen 3D-Grafiksoftware erstellt werden. Für die Biegung von Objekten wird ein hoch aufgelöstes Gitternetz benötigt, welche die Biegung möglichst realitätsnah darstellt.

Für die Balkenbiegung wird auf das externe Programmpaket ”Deform” für Unity zurückgegriffen (Keenan, 2019). Dieses ermöglicht beliebige Deformationen von komplex vernetzten Objekten, sodass die Biegelinie definiert und der Balken gebogen werden kann. Über die Skalierung dieses Objektes in der entsprechenden Raumdimension kann die Biegung des Trägers verändert werden. Für den Import der Simulationsdaten aus der CSV-Datei wurde ein Skript geschrieben, welches die Daten in ein zweidimensionales Array liest und zeitabhängig die Biegung des Balkens ändert. Jede Zeile repräsentiert einen Simulationsdurchlauf. Die Zeitskalierung erlaubt das Ändern eines gewissen Zeitintervalls, das vergehen muss, bevor eine neue Durchbiegung angezeigt werden darf. Die Biegelinienskalierung erlaubt die nachträgliche Vergrößerung der Biegelinie, sodass feine Änderungen gut abbildbar sind. Zur Darstellung der Flächenlast wurde ein halb-transparenter Quader über dem Balken platziert, wobei die Belastungsrichtung zusätzlich mit Pfeilen gekennzeichnet wird. Die Größe des Quaders skaliert simultan zur Flächenlast, welche den Balken im aktuellen Biegezustand be-

lastet. So ist ein intuitiver Zugang zur Last-Deformations-Korrelation möglich. An den Seiten des eigentlichen Modells befinden sich die Abbildungen des statischen Systems (vgl. Abb. 1), der Verteilungen der Zufallsvariablen (vgl. (3.1)) als Grafik, welche vom Anwender in Verbindung mit dem Head-Up-Display erschlossen werden können. Über ein weiteres Skript werden die Quantilwerte der Simulation eingelesen. Je nach Zugehörigkeit der Durchbiegung in einen bestimmten Quantilbereich wird der Balken anders gefärbt, da die Darstellung einer Farbe in einer Visualisierung hilfreich für das Gesamtverständnis ist (Kinkeldey et al., 2014). Die Visualisierung der Simulationsergebnisse geschieht zeitlich über die Biegung des Trägers. Nach definierter Zeit wird ein neuer Biegezustand mit entsprechenden Werten und Farben eingeblendet.

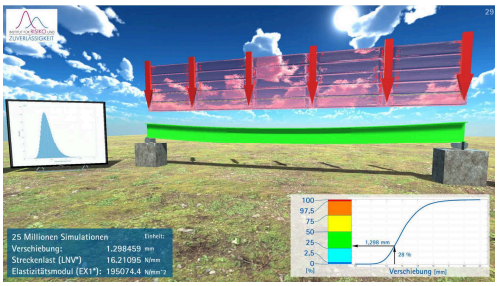


Abbildung 2: Screenshot aus der Anwendung.

4.3 Head-Up-Display

Da nach Loïc Caroux (2016) die Einblendung eines permanenten Head-Up-Displays (HUD) im Spielfenster einen positiven Einfluss auf das Visualisierungsverständnis des Anwenders hat, wird dieses über die Einblendung der Simulationsparameter am linken unteren Displayrand implementiert. Die Werte werden über entsprechende Skripte aus dem lokalen Daten-Array geladen und individuell für jede einzelne Biegung angezeigt. Am rechten unteren Displayrand wird die Verteilungsfunktion abgebildet, welche alle Simulationen umfasst. Die Quantilbereiche (2,5, 25, 50, 75, 97,5)sind entsprechend markiert. Jedem neuen Biegezustand werden über animierte Zeiger der Verschiebung dem passenden Quantilbereich visuell zugewiesen. Abbildung 2 zeigt die entwickelte VR-Umgebung mit Balken, Streckenlast und HUD.

4.4 User-Interface

Zusätzlich wurde ein einfaches Haupt- und Pausenmenü erstellt, welches dem Anwender Einstellungsmöglichkeiten zur Biegelinienskalierung, der Zeitskalierung, dem sowie eines Spielresets bietet.

4.5 Spielzeitproblem

Eine hohe Anzahl an Durchläufen der MCS ist nötig, um eine optimale Güte der Simulation zu erhalten. Jedoch kann in der Spielzeit nicht der gesamte Simulationsdurchlauf dargestellt werden. Dieses ”Spielzeitproblem” sei anhand eines kurzen Rechenbeispiels erläutert: Bei

einer üblichen Größe von $n = 2,5 \cdot 10^6$ Realisierungen und einer Aktualisierungsrate von 0.3 Sekunden pro Simulation ergeben sich circa 8d 16h und 20min theoretische Spielzeit bis die Skripte das Daten-Array einmal durchlaufen haben und sich wiederholen würden. Die Simulationen, welche dem Anwender in der Spielzeit angezeigt werden, sind nicht repräsentativ für den gesamten Simulationsumfang. Grund ist ein lineares Abschreiten beim Einlesen der Simulationen aus dem Daten-Array heraus. Ein zufällig gleichverteiltes Auslesen des Arrays ist eine Lösung. Zusätzlich werden keine Simulationen doppelt angezeigt. Somit kann die Repräsentativität der angezeigten Simulationen in der Spielzeit gewährleistet werden.

5 Fazit

In dieser Arbeit wurde eine Visualisierungsmöglichkeit stochastischen Phänomenen bei einem einfachen strukturmechanischen Problemen mit Hilfe VR umgesetzt. Zu Beginn wurde die Euler-Bernoulli Balkentheorie am Beispiel des einfach gelagerten Balkens, sowie die stochastischen Grundlagen erläutert, um damit eine MCS mit Matlab durchzuführen. Die gewonnenen Simulationsdaten wurde mithilfe der VR-Entwicklungsumgebung Unity visualisiert. Die Visualisierung hat einen intuitiveren und spielerischen Zugang zu den zugrundeliegenden stochastischen Phänomenen im virtuellen Raum ermöglicht. Der Vorteil einer VR-Umgebung ist eine direkte immersive Wirkung auf den Anwender, welcher sich in der virtuellen Welt frei um das Modell bewegen und dieses erkunden kann. Durch die dynamische Änderung der Biegelinie können dem Anwender die stochastischen Einflussgrößen E und q_0 sowie die resultierende stochastische Biegung $w(x)$ nahegebracht werden. Es wird ein intuitiver und anschaulicher Zugang zu der zugrundeliegenden Thematik eröffnet. Ferner wird darauf hingewiesen, dass sich zunächst bewusst auf ein simples mechanisches System beschränkt wurde, welches akademischer Natur ist. In diesem lassen sich die zufälligen Systemantworten anschaulich darstellen. Während der Entwicklung hat sich herausgestellt, dass dieses einfache Beispiel sehr gut in einer thematisch passenden Einführungsveranstaltung präsentiert werden kann, um vor allem Studenten einen spielerischen Zugang zu abstrakten Methoden zu ermöglichen. Auf dem bisherigen aufbauend, könnte der nächste Schritt in der Darstellung komplexerer mechanischer Systeme sowie Materialparameter liegen. Zudem bestehen noch Verbesserungsmöglichkeiten in der direkten Interaktivität zwischen Anwender und Modell, sowie einer möglichen Echtzeit-Simulation. Diese sollen in Zukunft implementiert werden. Des Weiteren ist im Bauingenieurswesen vor allem die Zuverlässigkeitsanalyse und die damit verbundene Versagenswahrscheinlichkeit von besonderer Bedeutung. Die Fokussierung aus selten eintretende Phänomeme könnte daher eine weitere Forschungsrichtung sein. Insgesamt eröffnet sich ein großes Feld an Visualisierungsmöglichkeiten, um weitere Problemstellung der Strukturmechanik unter Verwendung numerischer Verfahren mit stochastischen Einflüssen zu erarbeiten.

Literatur

Brodlie, K., Osorio, R. A. and Lopes, A. (2012), A Review of Uncertainty in Data Visualization, *in* 'Expanding the Frontiers of Visual Analytics and Visualization', Springer, pp. 81–109. DOI: 10.1007/978-1-4471-2804-5_6.

Gross, D., Hauger, W., Schröder, J. and Wall, W. A. (2014), *Technische Mechanik 2, Elastostatik*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-40966-0.

Hilfert, T. and König, M. (2016), 'Low-Cost Virtual Reality Environment for Engineering and Construction', *Visualization in Engineering* **4**(1), 2. DOI: 10.1186/s40327-015-0031-5.

Keenan, W. (2019), 'DEFORM: A Fully-Featured Deformer System for Unity', https://github.com/keenanwoodall/Deform. Aufgerufen am 2.06.2019.

Kinkeldey, C., MacEachren, A. M. and Schiewe, J. (2014), 'How to Assess Visual Communication of Uncertainty? A Systematic Review of Geospatial Uncertainty Visualisation User Studies', *The Cartographic Journal* **51**(4), 372–386. DOI: 10.1179/1743277414Y.0000000099.

Loïc Caroux, K. I. (2016), 'Influence of Head-Up Displays' Characteristics on User Experience in Video Games', *International Journal of Human-Computer Studies* (87), 65–79. DOI: 10.1016/j.ijhcs.2015.11.001.

Luo, Y., Yan, D.-h., Yuan, M. and Lu, N.-w. (2017), 'Probabilistic Modeling of Fatigue Damage in Orthotropic Steel Bridge Decks under Stochastic Traffic Loadings', *Journal of Highway and Transportation Research and Development (English Edition)* **11**(3), 62–70. DOI: 10.1155/2016/4712593.

Müller-Gronbach, T., Novak, E. and Ritter, K. (2012), *Monte Carlo-Algorithmen*, Springer-Verlag. ISBN: 978-3-540-89140-6.

Potter, K., Rosen, P. and Johnson, C. R. (2011), From Quantification to Visualization: A Taxonomy of Uncertainty Visualization Approaches, *in* 'IFIP Working Conference on Uncertainty Quantification', Springer, pp. 226–249. DOI: 10.1007/978-3-642-32677-6_15.

Schulz, H. (2014), *Welten-Baukasten: Erste Schritte mit der Spiele-Entwicklungsumgebung Unity*, c't 2014, Heft 14, Heise Zeitschriften Verlag. EAN: 4018837004890.

Shinozuka, M. (1972), 'Monte Carlo Solution of Structural Dynamics', *Computers & Structures* **2**(5-6), 855–874. DOI: 10.1016/0045-7949(72)90043-0.

Spaethe, G. (1992), *Die Sicherheit Tragender Baukonstruktionen: Zweite, verbesserte Auflage*, Springer-Verlag, Wien. ISBN: 3-211-82335-2.

Stefanou, G. (2009), 'The Stochastic Finite Element Method: Past, Present and Future', *Computer methods in applied mechanics and engineering* **198**(9-12), 1031–1051. DOI: 10.1016/j.cma.2008.11.007.

Unity Technologies (2019), 'Unity', https://unity3d.com/de/unity. Aufgerufen am 25.06.2019.

Durchgängige Interoperabilität in BIM-basierten Workflows durch den Einsatz von Webschnittstellen

Marlena Block[1] and Philipp Hagedorn[2]

[1]Lehrstuhl für Industrial Sales Engineering · Ruhr-Universität Bochum · Universitätsstr. 150 · Bochum · E-Mail: marlena.block@ruhr-uni-bochum.de
[2]Lehrstuhl für Informatik im Bauwesen · Ruhr-Universität Bochum · Universitätsstr. 150 · Bochum · E-Mail: philipp.hagedorn-n6v@ruhr-uni-bochum.de

Interoperabilität im Bauwesen wird maßgeblich durch die Nutzung von offenen Dateiformaten erreicht, die durch die Etablierung von Building Information Modeling auch unter dem Term openBIM subsumiert werden. Der Begriff openBIM bezeichnet dabei im Gegensatz zu proprietären Dateiformaten den standardisierten, offenen und modellbasierten Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Bauprojektbeteiligten und deren spezifischen Softwareprodukten. Dennoch wird der dateibasierte Informationsaustausch nach dem openBIM Prinzip nicht von allen Softwareprodukten im Bauwesen unterstützt und ist stellenweise auch nicht sinnvoll umsetzbar. Eine Alternative zum dateibasierten Informationsaustausch stellt die Übertragung von Informationen über REST-basierte Webschnittstellen dar, deren Mehrwert für die Interoperabilität durch die Entwicklung eines überfachlichen Konzeptes herausgestellt wird.

Keywords: BIM, REST, Workflows, Interoperabilität, Schnittstellen

1 Einleitung und Motivation

Das Bauwesen unterscheidet sich von anderen Industrien insbesondere durch die Diversität der Prozesse, Systeme und Beteiligten, wodurch ein herstellerunabhängiger Datenaustausch im Sinne einer durchgängigen Interoperabilität erschwert wird (Borrmann et al., 2018). Im Bauwesen wird Interoperabilität durch die Nutzung offener Dateiformate, vor allem durch die Industry Foundation Classes (IFC), erreicht. Der Ansatz der offenen Austauschformate im Bauwesen wird auch als openBIM bezeichnet. Der Begriff openBIM bedeutet dabei im Gegensatz zu proprietären Dateiformaten den standardisierten, offenen und modellbasierten Datenaustausch zwischen unterschiedlichen Bauprojektbeteiligten und deren spezifischen Softwareprodukten. Dennoch wird dieser Austausch nach dem openBIM Prinzip nicht von allen Softwareprodukten im Bauwesen unterstützt (Du Juan and Zheng, 2014).

Darüber hinaus ist ein dateibasierter Datenaustausch für die in der BIM-Methodik geforderte Kollaboration zum Teil nicht sinnvoll umsetzbar, vor allem wenn mit mehreren Beteiligten zeitgleich an Bauwerksmodellen gearbeitet werden soll (Afsari et al., 2016). Eine Alternative zum dateibasierten Informationsaustausch stellt der Austausch von Informationen über REST-basierte Webschnittstellen dar. Aufgrund neuer Cloud-Technologien und der zunehmenden Anzahl an Cloud-fähigen Anwendungen steigt auch der Bedarf bauspezifische Softwareprodukte mit Webschnittstellen zu versehen (Afsari et al., 2016). Insgesamt lässt sich die kollaborative Arbeitsweise mit BIM so als Grundlage und Treiber des Informationsaustausches mit Webschnittstellen sehen.

Unter einer Webschnittstelle wird eine Programmierschnittstelle (API) zwischen Systemen verstanden, die auf dem Hypertext Transfer Protocol (HTTP) basiert. Eine Möglichkeit zur

Umsetzung von Webschnittstellen ist der Representational State Transfer (REST). Grundsätzlich beschreibt das REST Programmierparadigma eine zustandslose Client-Server-Kommunikation, die es erlaubt, in einem festgelegten Schema mit gekapselten Komponenten eine maschinenlesbare Kommunikation aufzubauen (Fielding, 2000). Gegenüber dem dateibasierten Austausch bietet die Implementierung einer REST-basierten Schnittstelle den Vorteil, gezielt nur auf benötigte Ressourcen zuzugreifen, die bei einer Anfrage in festgelegten Schemata beispielsweise als XML zurückgeliefert werden. Vorteile dieser REST-Webschnittstellen ergeben sich durch das Abrufen von dedizierten Daten bzw. zustandslosen Ressourcen für mobile oder Webanwendungen. Besonders für den Einsatz in Workflows mehrerer Anwendungen profitieren Entwickler und Nutzer durch eine erhöhte Austauschbarkeit einzelner Komponenten auf Basis standardisierter Webschnittstellen. Die Relevanz von REST-Schnittstellen wird auch in der Forschung erkannt, wobei ein wesentlicher Bestandteil in der Spezifikation von Schnittstellen hinsichtlich der Auffindbarkeit, Zugänglichkeit, Interoperabilität und Wiederverwertbarkeit liegt (Zaveri et al., 2017).

Im Rahmen des Forschungsprojekts Software Reference Architecture for openBIM Services (BIMSWARM) wird eine offene Plattform für das Bauwesen entwickelt, welche ihre Nutzer mit der Bereitstellung und Verknüpfung von zertifizierten Anwendungen, Diensten und Katalogen dabei unterstützt, ganzheitliche, digitale Wertschöpfungsketten aufzubauen. Innerhalb des Projektes existieren zwei unterschiedliche Schwerpunktsetzungen für die Entwicklung einer BIMSWARM Programmierschnittstelle. Zum einen wird eine Portal-API implementiert, mit welcher der Zugriff auf Plattformdienste, wie z. B. das Workflowmanagement, ermöglicht werden soll. Zum anderen wird die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Anwendungen und Diensten, wie in diesem Beitrag beschrieben, unterstützt. Diese Schnittstelle wird als Interprodukt-API bezeichnet und soll im wesentlichen bestehende offene BIM-Standards zur Verbesserung der Interoperabilität integrieren.

In diesem Beitrag steht die konzeptionelle und technische Umsetzung einer API zum Austausch von Informationen auf Basis offener Standards im Vordergrund. Darüber hinaus werden spezifische REST-Schnittstellen beispielsweise zur standardisierten Anbindung von Visualisierungsanwendungen, von Datenkatalogen, wie z. B. Objektkatalogen oder Klassifikationen, von Common Data Environments (CDE) und zur Kollaboration bereitgestellt. Hierdurch sollen insbesondere kleinere Softwareentwickler und ihre Softwareprodukte zur Erfüllung spezifischer Aufgaben in den BIM-Workflow integriert werden können.

2 Hintergrund

In der Softwaretechnik bezeichnet der Begriff Interoperabilität eine verlustfreie Übertragung von Daten zwischen zwei Systemen und deren identische Interpretation. Interoperabilität ist nur dann möglich, wenn die durch Zeichen dargestellten Informationen in einer spezifischen Sprache interpretiert werden können, die einen bestimmten Kontext berücksichtigt (Ricaurte et al., 2018). Die Bedeutung von Interoperabilität im Bauwesen ist durch den Einsatz digitaler Technologien und Methoden gestiegen und wird insbesondere durch die Vielzahl der Teilnehmer, Aufgaben und Prozesse innerhalb des Bauprozesses angetrieben (Muller et al., 2017). Dennoch belegen Lai and Deng (2018) in einer Studie mit realen Projektdaten und ver-

schiedenen Anwendungen eine eingeschränkte Interoperabilität für den umfangreichen und flächendeckenden Einsatz von BIM. Ein umfassender Literaturüberblick über die Dimensionen von Interoperabilität im Bauwesen wurde von Poirier et al. (2014) zusammengestellt, worin die Gesamtheit der Interoperabilität in technische, organisatorische und prozessuale Interoperabilität gegliedert wird. Im technischen Bereich kann darüber hinaus syntaktische und semantische Interoperabilität unterschieden werden (Steel et al., 2012). Hierbei ist die Syntax die Fähigkeit eines Softwaresystems, die ausgetauschten Dateien erfolgreich nach einer einheitlichen Schemasprache und Schemamodellierung zu übersetzen. Die Semantik stellt darüber hinaus die Fähigkeit eines Systems dar, die übersetzten Daten auf die gleiche Weise zu interpretieren wie das ursprüngliche exportierende System. Die semantische Interoperabilität steht vermehrt im Fokus der Forschung und Entwicklung in den letzten Jahren (Poirier et al., 2014). Die syntaktische Interoperabilität bildet jedoch die Basis für einen Informationsaustausch und wird in dieser Arbeit auf der Ebene von Webschnittstellen und offenen Standards genauer beleuchtet.

Unter dem openBIM Leitsatz werden offene Standards für den Datenaustausch im Bauwesen insbesondere für die Arbeit mit Bauwerksmodellen zusammengefasst. Im Gegensatz zu proprietären Dateiformaten leisten offene Standards wie das Dateiaustauschformat IFC einen maßgeblichen Beitrag zur Interoperabilität im Bauwesen (Du Juan and Zheng, 2014). Neben der Übertragung von Modelldaten gibt es weitere dateibasierte Austauschformate, wozu das BIM Collaboration Format (BCF), Model View Definitions (MVD), aber auch Informationscontainer wie der Multimodellcontainer (MMC) zählen. Das BCF dient dem Austausch von Änderungen, Konflikten und Annotationen innerhalb von Bauwerksmodellen zur modellbezogenen Kommunikation und Kollaboration. Um hierbei einen Datenaustausch mit Projektbeteiligten über einen zentralen Server etablieren zu können, stellt buildingSMART mit der BCF REST API Version 2.1 basierend auf dem Dateiaustauschformat BCF v.2.1 eine quelloffene Programmierschnittstelle zur Verfügung (buildingSMART, 2018).

Um die BIM-Interoperabilität zu erhöhen, wird in Deutschland eine openCDE-API-Spezifikation definiert, um sowohl Funktionsumfang als auch den offenen Datenaustausch zwischen Plattformen verschiedener Anbieter von Cloud-basierten Kollaborationsplattformen festzulegen. Die Ende März 2019 verabschiedete „DIN SPEC 91391 Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) für BIM Projekte - Funktionen und offener Datenaustausch zwischen Plattformen unterschiedlicher Hersteller“ behandelt Anforderungen an Schnittstellen zwischen CDEs und solche, die zwischen CDEs und weiteren Softwareprodukten aus konzeptueller Sicht eingesetzt werden (DIN SPEC 91391, 2019).

Ein weiterer aktueller Ansatz zur Verbesserung der modellbasierten Zusammenarbeit mittels Webschnittstellen wurde von Afsari (2018) veröffentlicht, der IFC-Daten zwischen Webanwendungen und einer darin vorgestellten CDE nahtlos über eine REST-API austauscht. Da die Relevanz von Web-Technologien im Bauwesen weiter steigt, stellt die Autorin in ihrer Arbeit auch eine IFC-Serialisierung in der JSON-Notation für einen verbesserten webbasierten Datentransfer bereit. Diese Arbeit von Afsari (2018) ist die Grundlage für eine allgemeingültige IFC REST API. Insgesamt zeigt die Recherche, dass das Problem der fehlenden Interoperabilität im Bauwesen relevant ist. Weitere Beiträge, die dieses Problem adressieren, stellen ebenso spezifische Lösungen zum Datenaustausch im Bauwesen mittels REST-Schnittstellen vor.

3 Methode

Im Rahmen dieses Beitrags erfolgt eine strukturierte Erhebung von Anforderungen aus realen Anwendungsfällen. Das Vorgehen bedient sich etablierter Konzepte aus dem Bereich der Softwaretechnik (Balzert, 2009). Im Fokus steht die Identifikation einer möglichst umfangreichen Menge von Anforderungen an eine REST-Schnittstelle zur Unterstützung der Interoperabilität von bauspezifischen Softwareprodukten. Eine weitere Anforderung aus dem zuvor genannten Projekt ist die anwendungsfallbezogene Berücksichtigung der Übertragen von Inhalten (Schnittstelle für die Inhaltsintegration) und von zu visualisierenden Daten (Schittstelle für die Visualisierung). Beide Themen begünstigen den Einstieg in die Anforderungsanalyse mittels einer interaktiven Präsentation. Bei der in einer Expertenrunde Erwartungen und Anforderungen explorativ erhoben werden. Zeitgleich werden gültige sowie anwendungsfallbezogene Spezifikationen analysiert. Bestehende Softwareprodukte aus den Bereichen AIA-Modellierung, Mengen- und Kostenberechnung und Betrieb werden hinsichtlich ihrer Informations- und Datenanforderungen untersucht. Der Einsatz von Experteninterviews in diesen Bereichen unterstützt die Untersuchung (vgl. Abb. 3 links).

Aus dem Anforderungspool atomarer, unsortierter, funktionaler sowie nicht-funktionaler Anforderungen heraus erfolgt eine Spezifikation. Die zuvor vereinzelten Anforderungen werden zu funktionalen Modulen zusammengefasst. Die Kategorisierung nach bekannten Anforderungskatalogen, wie DIN SPEC 91391 sowie die bestehender APIs (vgl. Abschnitt 2), werden hierbei berücksichtigt. Den nächsten Schritt stellt die Konzeptionierung einer geeigneten Bereitstellungsmöglichkeit gebündelter, spezifischer APIs für Softwareentwickler und ihre Softwareprodukte dar. Hierbei kommen besonders nicht-funktionale Anforderungen zum Tragen.

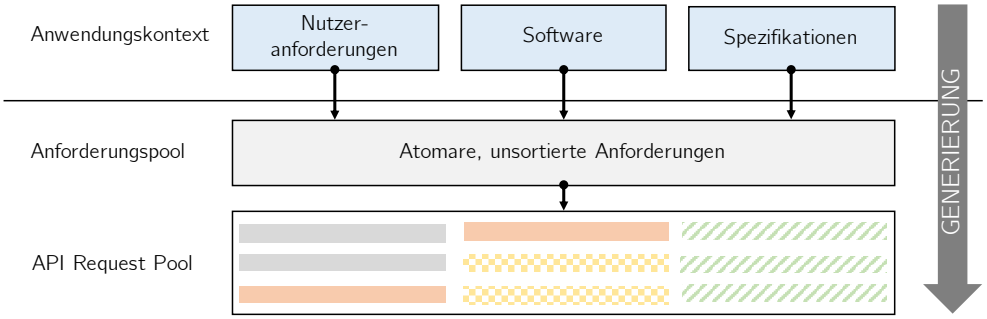


Abbildung 1: Kontextabhängige Anforderungsanalyse

4 Konzept

Nach der Auswahl und Durchführung der Methode zur Bündelung der funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen wird im Folgenden ein Konzept für die Strukturierung von APIs unter Anwendung des Fassadenmusters entworfen. Auf Basis dessen wird der API Request Pool entwickelt. Auf Grundlage der funktionalen Anforderungen an die Pro-

duktkommunikation werden im wesentlichen zwei Funktionsbereiche isoliert, die sich in die Gruppen Datentransfer und Modellinteraktion unterteilen. Während sich im Umfang dieser Arbeit der Austausch von Dateien zwischen Softwareprodukten auf die Bereiche von Dateien ohne Metadaten und Containern mit Metadaten fokussiert, werden für die Modellinteraktion die Funktionsbereiche der geometrischen Visualisierung, der geometrischen und semantischen Inhaltsintegration und der modellbasierten Nutzerkommunikation berücksichtigt (vgl. Abb. 2). Die Anforderung, dass die umzusetzende API einfach zu implementieren und übersichtlich gestaltet sein soll, erlaubt die Nutzung des Entwurfsmuster Fassade. Das Fassadenmuster erlaubt den Zugriff auf Funktionen des darunter liegenden Subsystems, ohne dass dieses in seiner Komplexität bekannt sein muss respektive ohne direkten Zugriff darauf zu ermöglichen. Zudem bietet sich mit der Nutzung dieses Konzeptes die Einbindung von Zugriffsregelungen an (Eilebrecht and Starke, 2019).

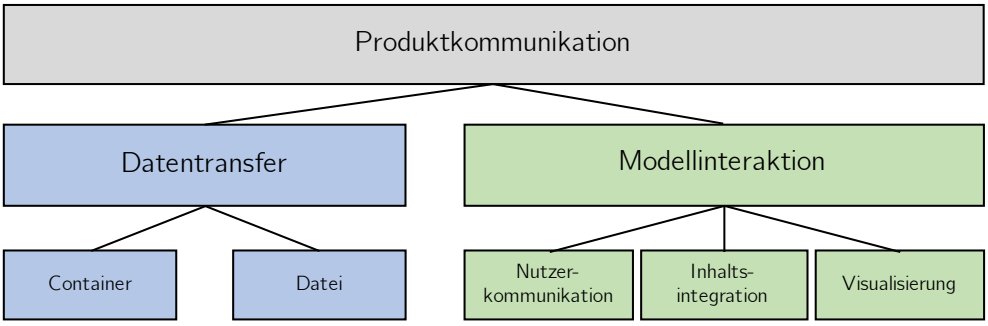


Abbildung 2: Spezialisierungen der Produktkommunikation im Kontext der Interprodukt-API

Die Erweiterung des API Request Pools wird als begleitender Entwicklungsprozess verstanden. Dieser soll durch die Definition von Konventionen für API-Namensgebung, Operationen und Anfrageparametern unterstützt werden. Was wiederum durch die Nutzung der OpenAPI 3.0 Spezifikation (OAS) unterstützt wird, die eine standardisierte, sprachunabhängige Möglichkeit zur Festlegung von RESTful APIs definiert und die die Funktionen eines Webservices maschinell lesbar und für den Menschen interpretierbar gestaltet. Die Umsetzung erfolgt als JSON-serialisierte Spezifikation, die mittels eines Codegenerators interpretiert und weiterverarbeitet werden kann. Dieses Vorgehen unterstützt die projektspezifische Anforderung zur geeigneten Bereitstellung, Verbreitung, Veröffentlichung und Dokumentation. Durch die Rekombination der JSON Spezifikation innerhalb des API Request Pools lassen sich schnell prototypische Sequenzen und clientseitig individualisierte Fassaden generieren.

5 Anwendungsfall

Im Rahmen des Forschungsprojektes wird der Anwendungsfall der Modellvisualisierung und -interaktion als API prototypisch implementiert und in Workflows evaluiert. Die Schnittstelle für die Visualisierung ermöglicht die Übertragung von Modelldaten aus einer Anwendung zu einem externen Visualisierungsdienst und darüber hinaus verschiedene Szenarien der Modellinteraktion. Ein expliziter Workflow dieses Anwendungsfalls wird in Tab. 1 dargestellt.

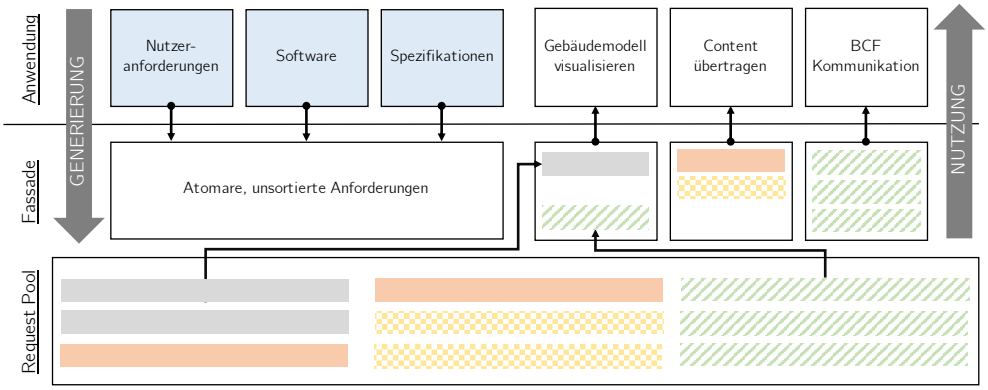


Abbildung 3: Anwendungsfallspezifische Erstellung einer API

Die Modelldaten können im Workflow sowohl in einem adressierbaren Speicher zur Verfügung stehen (z. B. in einer gemeinsamen Datenumgebung) oder direkt via Datentransfer vom Client an den Dienst übertragen werden.

Hierfür werden in Schritt 1 der dateibasierte Datenaustausch oder der containerbasierte Datenaustausch aus dem API Request Pool herangezogen. In den Schritten 2 und 3 werden Funktionen aus der BCF-API genutzt, um den Blickwinkel auf das visualisierte Bauwerksmodell einzustellen und eine Menge von Objekten farblich hervorzuheben. Das Erstellen eines Screenshots des Modells über die Webschnittstelle im vierten Schritt wurde von der Expertenrunde als Mehrwert identifiziert. Im letzten Prozessschritt wird der aufgenommene Screenshot wieder zurück in den Datenspeicher übertragen bzw. in den Modellcontainer integriert, wofür in der Fassade die benötigte Funktion aus der openCDE-API verwendet wurde.

Workflow: Snipping von hervorgehobenen Elementen		
Nr.	**Schritt**	**API**
1	Modellübertragung zum Visualisierungsdienst	openCDE
2	Setzen des Blickwinkels auf das Bauwerksmodell	BCF-API
3	Hervorheben von Elementen	BCF-API
4	Erstellen eines Screenshots der hervorgehobenen Elemente	VisAPI
5	Übertragen des Screenshots zurück in den Modellcontainer	openCDE

Tabelle 1: Mögliche Komposition der Schnittstelle für die Visualisierung im Anwendungsfall Modellvisualisierung und -interaktion

In diesem Anwendungsfall implementiert die Fassade der Schnittstelle für die Visualisierung eine Teilmenge der Funktionen des API Request Pools, welche gleichermaßen auch in der API der Nutzerkommunikation Anwendung finden können (vgl. Abb. 3). Somit ergibt sich die Möglichkeit, Funktionen in unterschiedlichen Kontexten und Anwendungsfällen wiederzuverwenden. Ein Beispiel hierfür ist die Funktion des Hervorheben von Modellelementen im Kontext des in Tab. 1 genannten Anwendungsfalls, die auch in der Übertragung von BCF-Issues oder im Kontext einer Bauablaufsimulation angewendet werden könnte. Die konkrete

Generierung einer Schnittstelle für die Visualisierung mittels einer Fassade ermöglicht das Erstellen von Funktionsrümpfen. Diese können anschließend auf Seiten von Softwareprodukten in den BIM-Workflow integriert werden. Die Funktionsfähigkeit kann sichergestellt werden, wenn der externe Visualisierungsdienst die gelieferten Modelldaten konform zum Schema interpretieren kann. Die Funktionalität von wiederverwendeten API Requests muss durch den bereitgestellten Webservice durch eine komponentenweise, unabhängige Implementierung der einzelnen REST-Funktionen gewährleistet sein.

6 Schlussfolgerung

Die Generierung von Mehrwerten durch die Einbindung von Webservices sowie die Befähigung der Hersteller zur einfachen Vernetzung ihrer Produkte stellen die vorrangige Motivation dieser Arbeit dar. Eine medienbruchfreie Übertragung von konsistenten Gebäudeinformationen über alle Instanzen der Planung, Bauausführung und des Betriebes steht im Fokus der Verbesserung der durchgängigen Interoperabilität in BIM-basierten Workflows. Generell unterstützen der Einsatz von Webschnittstellen und die vorrangige Berücksichtigung von offenen Standards auch zukünftig die Anschlussfähigkeit von Softwareprodukten.

Das hier dargestellte Konzept zur Schnittstellenspezifikation unterstützt den Prozess der Implementierung in bauspezifische Softwareprodukte und wird im Forschungsprojekt weiter vorangetrieben. Das Gesamtkonzept fördert dabei die Verbreitung und Umsetzung des openBIM-Gedankens. Die Verwendung von Webschnittstellen im Bauwesen ist national wie international von hoher Relevanz und bedarf künftig weiterer Forschung in Hinblick auf die Gewährleistung von Interoperabilität.

Danksagung

Das diesem Bericht zugrundeliegende Forschungs- und Entwicklungsprojekt wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) innerhalb des Technologieprogramms „Smart Service Welt II" gefördert und vom Projektträger Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Köln, betreut. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Literatur

Afsari, K. (2018), ‘Standard-based Data Interoperability of the Building Information Model in Cloud’, *54th ASC Annual International Conference* .

Afsari, K., Eastman, C. and Shelden, D. (2016), Cloud-based bim data transmission: Current status and challenges, *in* ‘Proceedings of the 33th International Symposium on Automation and Robotics in Construction’.

Balzert, H. (2009), *Lehrbuch der Softwaretechnik: Basiskonzepte und Requirements Engineering*, 3. auflage edn, Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg.

Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2018), *Building Information Modeling - Technology Foundations and Industry Practice*, Springer International Publishing, Cham.

buildingSMART (2018), 'Web service specification for BIMCollaboration Format', `https://github.com/buildingSMART/BCF-API`. Accessed: 2019-06-03.

DIN SPEC 91391 (2019), *Gemeinsame Datenumgebungen (CDE) für BIM-Projekte - Funktionen und offener Datenaustausch zwischen Plattformen unterschiedlicher Hersteller*, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

Du Juan and Zheng, Q. (2014), 'Cloud and Open BIM-Based Building Information Interoperability Research', *Journal of Service Science and Management* **07**(02), 47–56.

Eilebrecht, K. and Starke, G. (2019), *Patterns kompakt: Entwurfsmuster für effektive Softwareentwicklung*, Springer, Berlin, Heidelberg.

Fielding, R. T. (2000), *Architectural Styles and the Design of Network-based Software Architectures*, Dissertation, University of California.

Lai, H. and Deng, X. (2018), 'Interoperability Analysis of IFC-Based Data Exchange Between Heteogeneous BIM Software', *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT* **24**(7), 537–555.

Muller, M. F., Garbers, A., Esmanioto, F., Huber, N., Loures, E. R. and Canciglieri jun., O. (2017), 'Data Interoperability Assessment Though IFC For BIM In Structural Design – A Five-Year Gap Analysis', *JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT* **23**(7), 943–954.

Poirier, E. A., Forgues, D. and Staub-French, S. (2014), 'Dimensions of Interoperability in the AEC Industry', *Construction Research Congress 2014* pp. 1987–1996.

Ricaurte, D. M. T., Cabezas, M. K. V. and Jaramillo, C. M. Z. (2018), 'Towards a Terminology Unification in Software Interoperability', *44th Euromicro Conference on Software Engineering and Advanced Applications* pp. 478–485.

Steel, J., Drogemuller, R. and Toth, B. (2012), 'Model interoperability in building information modelling', *Software System Modeling* **11**, 99–109.

Zaveri, A., Dastgheib, S., Wu, C., Whetzel, T., Verborgh, R., Avillach, P., Korodi, G., Terryn, R., Jagodnik, K., Assis, P. and Dumontier, M. (2017), smartAPI: Towards a More Intelligent Network of Web APIs, *in* 'The Semantic Web', Springer International Publishing.

A model for building information management of structural inspections

Jakob Taraben[1]

[1]Professur Modellierung und Simulation - Konstruktion · Bauhaus-Universität Weimar · Marienstraße 13 · 99423 Weimar · E-Mail:jakob.taraben@uni-weimar.de

The inspection of existing structures in defined time intervals is an important process for maintenance and to plan or reduce cost and time intensive reconstruction works. During each inspection task a set of heterogeneous data of the structure, for example images, 3D scans, sensor data or building models from planning processes, is collected to enable a comprehensive evaluation. The analysis towards a building condition assessment requires a detailed documentation of the acquired data sets. Furthermore, linking inspection data sets among each other and to building simulation models could give valuable information and lead to a focused and effective analysis. This article presents a data model for the documentation and management of building models and inspection data. Therefore, geometrical and time dependent properties are used to classify the data sets and link to building models. Furthermore, a strategy for the linking of dynamically adapting subsets of scanning data, such as 3D point clouds or meshes, is described. To show the potentials and limits of the developed methodology, a case study of an image based inspection is used exemplarily.

Keywords: building inspection, BIM, data modeling, condition monitoring

1 Introduction

Inspections of existing buildings and infrastructure supported by modern technology, such as a sensor network, Unmanned Aerial System (UAS) or laser scanning, generates a large set of heterogeneous data describing mechanical or geometrical properties of the as-is state. In combination with as-planned building and simulation models from the planning process or previous inspection analyses, an evaluation of the surveyed structure is enabled (Morgenthal et al., 2019). This requires a comprehensive documentation of the acquired data, its relations among each other and to the simulation models used for a set of analyses. Therefore, a model representing inspection data that includes geometric and time dependent classifications, a description of subsets and relations between single model elements is needed. For an effective use of established algorithms with a large set of different simulation tools the proposed data model has to support a high level of interoperability. In Building Information Modeling (BIM) a popular approach is a common data model holding semantic and geometric description as well as collections of properties for building elements and materials. The buildingSMART organization provides the Industry Foundation Classes (IFC) as a software independent object based data model standardized under ISO 16739:2013 (*Industry Foundation Classes Release 4 (IFC)*, 2013). For the planning process, a wide range of software compatible to the format exists, but the integration or linking of large life cycle data from building surveys is supported insufficiently (Volk et al., 2014). However, extensions of the model, as shown for a Structural Health Monitoring (SHM) system by Smarsly and Tauscher (2016), allow for the integration of monitoring hardware components to the building model.

For bridge inspections Tanaka et al. (2016) propose an IFC based workflow introducing a format extension and various interfaces for a visualization and analysis tool chain. Limitations occur during the representation of large monitoring data such as point clouds from laser scanning or images in the IFC as investigated by Taraben et al. (2018). Furthermore, it could cause incompatibilities with specialized software or information loss from the conversion process. To keep all data individually in their own formats, a method for the linking of building descriptions is proposed in the multi model approach (Scherer and Schapke, 2014), where various application models are referenced in a so called container based on .xml-files. Another concept for linked building data (Hoeber et al., 2015) leads to the Information Container for Data Drop (ICDD) that stores relations and metadata in the ontology related .rdf-files. Both approaches enable the classification of model groups and the detailed representation of static relations among model elements based on its unique identifier (ID). Unsorted point clouds, meshes or images created during inspection tasks usually do not provide such IDs which allows only a referencing of the entire object. Besides that, the relation modeling based on IDs excludes the integration of spatial or time dependent links.

This article shows an approach towards a data model for the description of geometric, functional and time dependent classification and relation of large building inspection data and simulation models based on the mentioned multi model concept. It is shown how different representations of buildings and elements are semantically linked and prepared for an effective comparison or transfer to external analysis tools. Additionally, geometric links independent of IDs and the definition of dynamic adaptable data subsets are introduced. Finally, an exemplary case study shows the potentials of the methods for a bridge inspection data set combining an Finite Element Model (FE-Model), point clouds from a photogrammetric reconstruction, image sets acquired by UAS and structural damage information.

2 Data model for inspection tasks

As previously described, a heterogeneous data set describing properties of the structure is produced during an inspection task. Each state of acquired data or a model, which is stored to a specific file, is referred as *data resource* further on. A common characteristic of this acquired data is the geometric representation (e.g. sensor position for sensor data, coordinates for a point cloud, building element geometry for a simulation model). At this point, the distinction between abstracted model geometry (e.g. from FE-Model) and real geometry from surveys, scans or three dimensional (3D) reconstructions is important. Additionally, time references on a discrete timestamp or for a time span are related to each acquired data (e.g. image captured on a discrete timestamp, weather data acquired for a defined timespan). For a comprehensive documentation of an inspection and effective preparation for the use on analysis tools the data model should provide

- a geo-reference for each *data resource*,
- the acquisition time of each *data resource*,
- a separate geometric representation besides the raw data or building model in a common format, e.g. Wavefront-OBJ (OBJ) or Stanford Triangle Format (PLY),

- the complete history of congruent data from previous inspections and
- geometric and time dependent filters.

Therefore, the basic principles of the multi model approach (Scherer and Schapke, 2014) are used as a basis for an extended schema modified for the description of inspection data. A detailed view on this schema is shown in Figure 1 consisting of a *model container* for references on the actual *data resources* grouped in *model data*, *link models* for the description of relations among the *model data*, *snapshots* for dynamic data subsets and *boundaries* for the linking of geometric data without IDs.

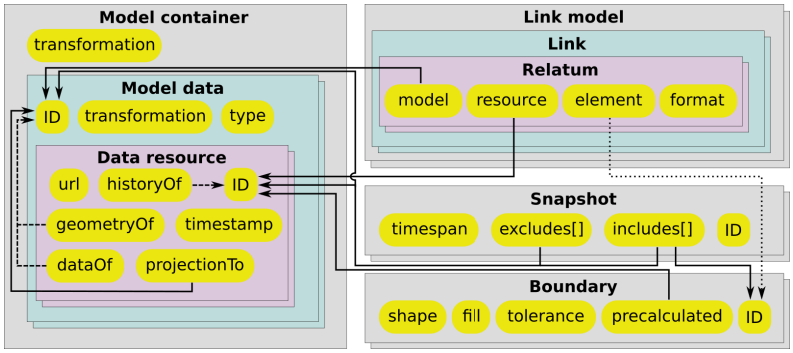


Figure 1: Overview on the proposed data model and the used attributes (yellow boxes). The corresponding IDs for relating attributes are indicated by arrows (solid: points on an ID of another model group, dashed: points on an ID of the same model group, dotted: optional for this attribute).

The components are stored as zipped JavaScript Object Notation (JSON) files and specified in a JSON Schema (*Specification JSON Schema*, 2018) for validation.

2.1 Model container

The *model container* includes a set of models (represented by *model data*) and a transformation matrix describing the transformation from a defined project coordinate system into world coordinates. A *model data* entity describes all states of a group of acquired data (e.g. point cloud of a building, sensor data, image sets) or simulation models applied for condition assessment (e.g. FE-Model, building physics simulation, traffic simulation) as a set of *data resources*. In the process, *data resources* that originate from past inspections or planning are retained in the model even after the integration of more recent recordings and thus depict the condition history of the structure. Additionally, a transformation matrix is stored also in the *model data*, which indicates the coordinate transformation from the project coordinate system into local model coordinates. Due to the combination of modeled geometries and detailed condition recordings (abstracted and real geometry, or as-planned and as-is state), it is necessary to project captured 3D geometries onto the abstracted surface (e.g. for transferring point cloud details into the local coordinate system of an FE-Model or matching older 3D features on a current deformed geometry). The *data resources* are defined by

- a *url* that points to an associated file,

- the *historyOf* that refers to an ID of another *data resource* in the same *model data* representing the subsequent state of the model (if not defined, the *data resource* is considered as current state),
- the *geometryOf* for the extracted geometry of a model (e.g. in a simple format as OBJ),
- the *dataOf* for the corresponding model definition (the mechanical description of an FE-Model in a proprietary format),
- the *projectionTo* pointing to the corresponding projection target for the projection of geometrical information on a model surface.
- a *timestamp* indicating the date of a survey or modeling and
- a unique data resource *ID*.

As previously described, the separation of actual data and geometric description is a helpful step for automated interfaces to analysis software. Thus, geometric operations do not require the interpretation of a specific model and can be performed on the simple geometry.

The design of the *model container* compared to the multi model (Scherer and Schapke, 2014) approach was modified in terms of a more detailed *data resource* description enabling references on previous inspections, the coordinate transformation and the *timestamp* definitions. The link model for the description of model element relations was integrated into the JSON scheme without any modifications of the structure. There, *relatums* are modeled as references to the *model data* and internal ID of model *elements* and collected in a *link* object.

2.2 Boundary links

The existing design of links in the *link model* only supports models that consist of elements assigned to unique IDs. Usually, large point clouds or 3D meshes are not equipped with IDs. In order to be able to link parts of such geometries with other models, a *boundary* shape can be defined, as shown in Figure 1 consisting of

- a *shape* defined as an OBJ block inside the JSON file,
- the *fill* parameter indicating whether all points inside the *shape* are considered or not,
- the *tolerance* parameter indicating the distance within points are still assumed to belong to the surface,
- a reference to a *precalculated* geometry as data resource ID and
- a boundary *ID* for references.

For links between geometric subsets defined through boundaries, the *relatum* contains the boundary ID instead of the internal model element ID. Figure 2 shows the effect of various parameter combinations for a boundary. Thus, large amounts of data from laser scans or photogrammetric 3D reconstructions can be sectioned and referenced according to building sections or structural components and used effectively for subsequent analysis tools.

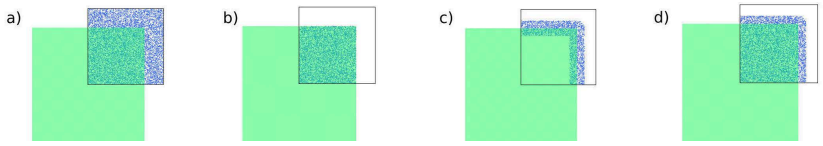


Figure 2: Schematic view on the boundary variations: a) original data of defined boundary (green) and a point cloud (blue), b) only points inside the boundary are considered (*fill*=true, *tolerance*=0.0), c) only points at the boundary surface are considered (*fill*=false, *tolerance*=0.1), d) combination of interior and surface points (*fill*=true, *tolerance*=0.1).

2.3 Snapshot definition

For an effective condition assessment, it is necessary to assign a collection of acquired building recordings to a certain date or timespan. Thus, the stored data history has to be divided into inspection times and compared with the current state. The definition of snapshots enables such a time dependent data collection. It is defined by

- a *timespan* that defines the optional start and the end date of the time interval resources should be included,
- a list of *excludes* that are excluded model or resource IDs even if their *timestamp* matches the defined *timespan* (the opposite would be a dynamic list of *includes* containing the remaining data resources),
- a list of *includes* that are statically included model or resource IDs, all other models are ignored, and
- a snapshot *ID* that is used to refer to the data collection.

Figure 3 exemplary shows the assignment of an inspection dataset to several snapshot designs. In the example each inspection task contains the acquisition of a set of images (I) and the photogrammetric reconstruction of a 3D point cloud (C). Additionally, an existing FE-Model (F) is taken from the planning process and updated where necessary. Detected damages are kept in a damage model (D).

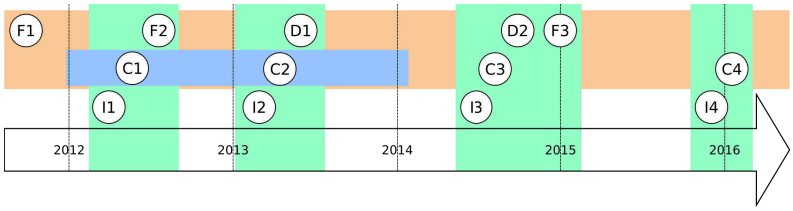


Figure 3: Schematic view of snapshot definitions on a timeline, example 1: each inspection task (green) where only the timespan is defined, example 2: all point clouds from the years 2012 and 2013 (blue, timespan=[2012, 2014], includes=[C]), example 3: all models included except the captured images (orange, excludes=[I]).

If not included explicitly, data resources without a defined timestamp are ignored in this procedure. If the *timespan* is defined only by the end date, all data resources with the latest *timestamps* are included to the snapshot. Consequently, newly added data resources do not have to be explicitly assigned to already defined snapshots. The actual dataset results from query.

3 Case study

The following case study is intended to illustrate how the developed data model is used for inspection tasks. The related data acquisition and analysis is described in detail by Morgenthal et al. (2019). It contains the UAS-based image acquisition of a railway bridge, which were processed in a photogrammetric 3D reconstruction. The resulting geo-referenced point cloud of the entire structure was used for the automated calculation of flight paths for detailed recordings. Detected visual damages in the captured images are projected and localized on the surface of a corresponding FE-Model as shown by Taraben and Helmrich (2018). In the case study, the FE-Model is assumed as a model derived from the planning process, which is updated with each inspection task. Localizing damages from the inspection, an update of the geometric and mechanical properties of the FE-Model for a more precise modeling is enabled. Figure 4 shows a collection of the acquired data and models used for an image-based anomaly detection for a selected bridge pier. The definition of the coordinate transformation from the local coordinate system of the FE-Model on the geo-referenced point cloud can be determined by identified markers on the structure or methods such as Iterative Closest Point (ICP). The determined transformation is assigned as a matrix to the corresponding *model data*.

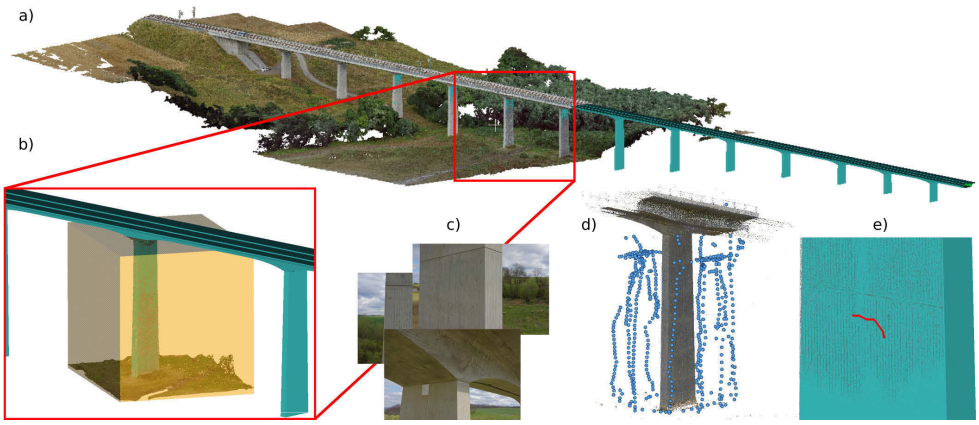


Figure 4: Collection of acquired inspection data: a) an overview point cloud of the entire bridge structure registered on the geometry of an FE-Model, b) selection of a single pier using the *boundary* definition, c) image set (600 images) acquired by a UAS along a planned flight path, d) the point cloud and camera positions (blue) of the reconstructed detailed bridge pier, e) a selected anomaly mapped on the FE-Model surface.

In the presented case study, the detailed recordings of the single bridge pier were executed at two different dates (*year1* and *year2*). For the second recording, example anomalies were marked in the image set, interpolated to 3D coordinates and projected on the FE-Model surface. This allows to perform a finite element analysis taking into account the selected anomalies. The history of all acquired data including the initial overview and boundary selection expressed in the proposed data model is shown in Figure 5. The collection of the data re-

source history in single models allows a quick comparison of different states. Links between the individual models are created automatically through the application of the process chain (e.g. link between image data set and point cloud through photogrammetric 3D reconstruction). Figure 5 also shows the application of the *boundary* definition (as also shown in Figure 4b) for the focused inspection of building sections by using only a selected part of the entire point cloud for flight path planning. Furthermore, the projection of the damage geometry on the surface of the FE-Model is modeled by using *projectionTo*, from which updates of the analysis model or visualizations can be derived.

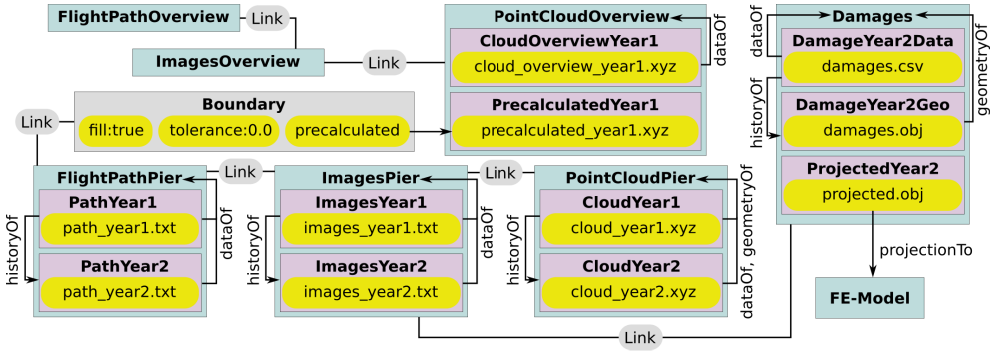


Figure 5: The exemplary data from the presented case study modeled in the proposed data model. Each recorded data or building model is represented as a *data resource* (purple) with a referenced location (yellow) collected in *model data* (blue).

Additionally, the definition of *snapshots* helps to get an effective access to the data subsets corresponding to the different inspection dates (*year1* and *year2*), as shown in Figure 6. Those subsets help to get an overview of the acquired data in the single inspection and for the creation of reports.

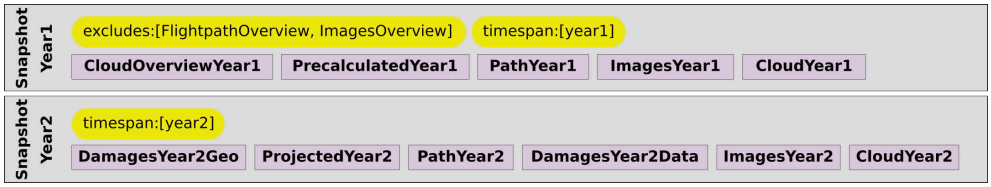


Figure 6: Snapshots for the case study data of *year1* and *year2*. The snapshot for *year1* additionally excludes the flight path and images from the overview data acquisition of the bridge structure to keep only the detailed inspection in the *snapshot*.

4 Conclusion

The comprehensive and consistent documentation of inspection tasks is an important part of the building maintenance. The proposed data model provides an approach to manage such data, which involves the linking of large geometric data, such as point clouds or 3D meshes, the description of data updates from recent inspections, transformation into other coordinate

systems or projections, and the grouping of time dependent subsets. The case study shows an exemplary structural inspection described in the developed format. Currently, the data model is not compatible or convertible in established solutions, such as ICDD or IFC, since it is defined in its own JSON format. Furthermore, no unified logic to query data, such as a query language, was introduced. Therefore, the use for analysis methods is dependent to the interpretation of the format. For the practical structural inspection, a benefit would be automatically generated reports or instruction plannings that can be extracted from such a model by a user-friendly interface.

References

Hoeber, H., Alsem, D. and Willems, P. (2015), The management of information over the life-cycle of a construction project using open-standard BIM, *in* '32nd CIB W78 Conference', pp. 295–301.

Industry Foundation Classes Release 4 (IFC) (2013), `http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4/final/html/`. Accessed: 2019-05-01.

Morgenthal, G., Hallermann, N., Kersten, J., Taraben, J., Debus, P., Helmrich, M. and Rodehorst, V. (2019), 'Framework for automated UAS-based structural condition assessment of bridges', *Automation in Construction* **97**, 77–95.

Scherer, R. and Schapke, S.-E. (2014), *Informationssysteme im Bauwesen 1*, Springer Vieweg.

Smarsly, K. and Tauscher, E. (2016), Monitoring information modeling for semantic mapping of structural health monitoring systems, *in* '16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering', pp. 11–18.

Specification JSON Schema (2018), `https://json-schema.org/specification.html`. Accessed: 2019-05-01.

Tanaka, F., Hori, M., Onosato, M., Date, H. and Satoshi, K. (2016), Bridge information model based on IFC standards and web content providing system for supporting an inspection process, *in* '16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering', pp. 1140–1147.

Taraben, J., Brust, P., Debus, P., Morgenthal, G. and Tauscher, E. (2018), Approach for the IFC based integration of life cycle data and processes in building information models, *in* '17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering', pp. 944–950.

Taraben, J. and Helmrich, M. (2018), Methode zur automatisierten Verortung von Inspektionsdaten aus bildbasierten Bauwerksprüfungen, *in* 'Forum Bauinformatik 2018', pp. 89–96.

Volk, R., Stengel, J. and Schultmann, F. (2014), 'Building Information Modeling (BIM) for existing buildings - literature review and future needs', *Automation in Construction* **38**, 109–127.

Eignung verschiedener Datenmodelle für den Austausch digitaler Modelle eines Bahnsteigs

Verena Wolf[1] and Štefan Jaud[2]

[1]Obermeyer Planen + Beraten GmbH · Hansastraße 40 · 80686 München · Germany · E-Mail: ga76fat@mytum.de
[2]Chair for Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · Germany · E-Mail: ga24yuk@mytum.de

Für den interoperablen Austausch des digitalen Bauwerkmodells zwischen den verschiedenen Akteuren eines Projektes werden Datenmodelle verwendet. In der Infrastruktur werden durch großräumig lineare Projekte andere Anforderungen an die Datenmodelle gestellt als im Hochbau. Die Datenmodelle sollten für einen erfolgreichen Austausch semantische und geometrische Anforderungen erfüllen, diese resultieren aus BIM-Anwendungfsällen (AwF). Um die Eignung der Datenmodelle bewerten zu können wird ein Konzept entwickelt und angewandt. Als Beispiel werden die von BIM4INFRA2020 definierten AwF verwendet und der Bedarf verschiedener Anforderungen in Bezug auf AwF eingeschätzt. Die Datenmodelle werden überprüft, ob diese die Anforderungen unterstützen. Folgende Vertreter aus geometrischen und semantisch-geometrischen Datenmodellen wurden ausgewählt und verglichen: DXF, OBJ, IFC2x3, IFC4x1 und CityGML. Bei der Anwendung des Konzeptes haben sich die semantisch-geometrischen Datenmodelle, unter denen IFC4x1 als am besten geeignet erwiesen.

Keywords: BIM, Datenmodelle, IFC, CityGML, DXF, OBJ

1 Einleitung

1.1 Datenaustausch

Das Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur beauftragt die Arbeitsgemeinschaft BIM4INFRA2020 für die wissenschaftliche Unterstützung bei der Einführung der BIM-Methode. BIM4INFRA2020 entwirft Empfehlungen um das Leistungsbild für Projekte, die mit der BIM-Methode durchgeführt werden zu konkretisieren. Eine Empfehlung beschreibt die verschiedenen AwF. Diese unterstützen die Projektbeteiligten beim Erreichen der BIM-Ziele, bspw. Planungssicherheit und Schnittstellenkoordination. Die AwF umfassen von AwF 1 Bestandserfassung über AwF 3 Visualisierung und AwF 10 Kostenschätzung bis hin zu AwF 20 Nutzung zum Betrieb und zur Erhaltung wichtige Anwendungen in den verschiedenen Leistungsphasen (BIM4INFRA2020, 2018).

Um den verschiedenen AwF gerecht zu werden, können die Informationen des digitalen Bauwerkmodells mit Datenmodellen ausgetauscht werden. Dieser Beitrag konzentriert sich auf die nativen Datenmodelle der Infrastruktur. Für die Umsetzung der BIM-Methode nach dem Stufenplan ist die Verwendung der nativen Datenmodelle existenziell. Ziel des vorliegenden Konzeptes ist es herauszufinden, ob derzeit die BIM-Methode für die Bahnsteigplanung durchgeführt werden kann. Dabei wird untersucht, welches Datenmodell für die Durchführung einer Bahnsteigplanung mit der BIM-Methode am besten geeignet ist. Um das definierte Ziel zu erreichen wird ein Konzept entwickelt, dass die verschiedenen Datenmodelle bewer-

tet. Hierfür werden allgemeine, semantische und geometrische Anforderungen an die Datenmodelle in verschiedenen AwF definiert. Diese resultieren aus der Untersuchung der AwF der BIM-Methode und der Beschreibung der Datenmodelle. Die Unterstützung der Anforderungen in den Datenmodellen wird geprüft und der Bedarf der Anforderungen in den jeweiligen AwF festgelegt. Dadurch können zum einen die Entwickler der Datenmodelle Erkenntnisse über die Fähigkeiten der verschiedenen Datenmodelle gewinnen. Zum anderen kann bei der Durchführung der BIM-Methode in den Auftraggeberinformationsanforderungen das beste Datenmodell für das jeweilige Projekt gewählt werden.

1.2 Literaturüberblick

Für die Bewertung der verschiedenen Datenmodelle wird als Hauptliteratur möglichst die offizielle Dokumentation bzw. Spezifikation des Datenmodells verwendet. Die Bewertung der Datenmodelle aus dem Bereich der Geoinformatik in Verknüpfung mit der BIM-Methode wird von Nejatbakhsh (2017) durchgeführt. Sie stellt die Datenmodelle LandXML und CityGML gegenüber. Brüggemann und von Both (2015) vergleichen ebenfalls das Datenmodell CityGML, jedoch mit IFC. Datenmodelle, die sich mehr auf die Infrastruktur konzentrieren sind OKSTRA, IFC und LandXML. Diese werden von Ji (2014) und Amann (2015) betrachtet. Des Weiteren wägen Heckner und Wirth (2014) und McGlinn et al. (2019) verschiedene geometrische Volumenmodelle bzw. Kerne gegeneinander ab. Die zuvor genannte Literatur ist eine gute Basis, um einen Überblick über die Modelle zu erlangen, jedoch keine Grundlage, um sich für ein Datenmodell in einer bestimmten Anwendung entscheiden zu können. Dafür wird eine Methode benötigt, die die Datenmodelle in Bezug auf ihre Anforderungen im jeweiligen AwF evaluiert. Einen ersten Ansatz für eine Bewertung führt Wu et al. (2017) mit verschiedenen BIM-Reifegradmethoden aus.

2 Methodik

In der Literatur wurde keine geeignete Methodik gefunden. Deshalb wird eine eigene Methodik entwickelt. Der Leitgedanke dabei ist, die Datenmodelle mit Hilfe der Anforderungen, die aus den verschiedenen AwF resultieren zu bewerten. Dazu wird überprüft ob die Anforderung vom jeweiligen Datenmodell unterstützt wird und dabei vom AwF benötigt wird. Daraus ergibt sich die Eignung des Datenmodells in der BIM-Anwendung.

2.1 Anforderungen

Die Anforderungen der Datenmodelle basieren auf den BIM-Anwendungen. In diesem Beitrag werden die AwF von BIM4INFRA2020 verwendet (vgl. Kap. 1.1). Diese werden strukturiert nach allgemeinen, semantischen und geometrischen Anforderungen. Die verschiedenen Anforderungen werden von Wolf (2019) detailliert definiert, sie basieren auf folgender Literatur: (Wallner und von Both, 2017; Brüggemann und von Both, 2015; Verein Deutscher Ingenieure e.V., 2018; BIM4INFRA2020, 2018; Borrmann und Berkhahn, 2015; Obergrießer, 2017; Markič et al., 2018; Borrmann et al., 2017; McGlinn et al., 2019; Bracht et al., 2018; buildingSMART International Limited, 2018; buildingSMART International, 2019)

2.2 Entscheidungen

Die Bewertung von Datenmodellen erfolgt mit dem Konzept, dass in Abb. 1 dargestellt wird. Die Indizes werden definiert mit *i* für Datenmodell, *j* für Anforderung, *k* für AwF. Dabei gilt: $i \in \mathbb{N}$, $j \in \mathbb{N}$, $k \in \mathbb{N}$.

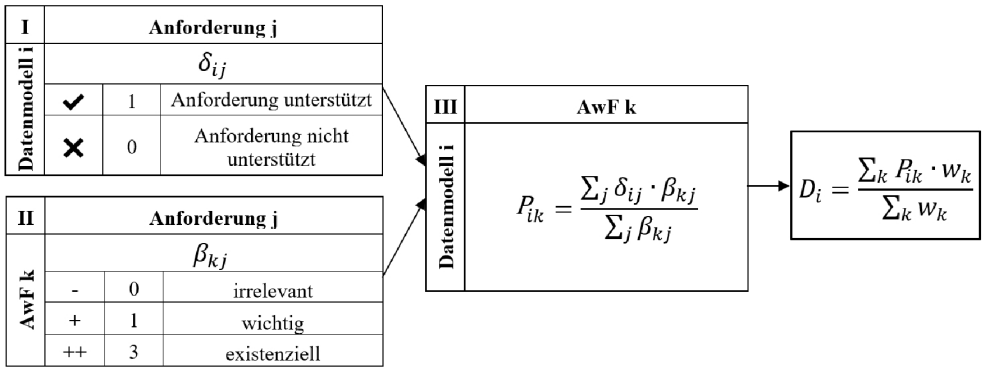


Abbildung 1: Entwickeltes Konzept für eine Datenmodellbewertung mit AwF, Datenmodellen und deren Anforderungen hinsichtlich der Eignung bei der BIM-Methode

Oben links in Abb. 1 ist Tab. I dargestellt, hier wird eine Fallunterscheidung durchgeführt. Dabei werden *i*-Datenmodelle überprüft, ob diese jeweils Anforderung *j* unterstützen oder nicht unterstützen. Unten links in Abb. 1 werden dieselben Anforderungen *j* wie in Tab. I mit β bewertet in Bezug auf den Bedarf der Anforderung *j* im jeweiligen AwF *k*. Die Gewichtung des Bedarfs kann variabel definiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die klassische Dreipunkteregel, angelehnt an die Punkteverteilung im Fußball, gewählt. Die Bezeichnungen sind „irrelevant“, „wichtig“ oder „existenziell“.

2.3 Gegenüberstellung

Aus Tab. II wird mit der Klassifizierung in Abb. 1 der maximale Bedarf mit Hilfe einer Punktzahl von AwF *k* über alle Anforderungen je Datenmodell ermittelt. Die absolute Eignung α_{ik} stellt die erreichte Punktzahl des Datenmodells über alle vom jeweiligen AwF benötigten (wichtige oder existenzielle) Anforderungen und dabei vom Datenmodell unterstützten Anforderungen dar. Es gilt, bspw. in dieser Arbeit wie in Tab. II, die Wertung 0, 1 und 3. Die Auswertung der *i*-Datenmodelle in Bezug auf *k*-AwF wird in Tab. III mit den zuvor ermittelten Werten mit einer Division aus dem maximalen Bedarf und der absoluten Eignung durchgeführt. Das entspricht einem prozentualen Wert *P* bzw. der relativen Eignung, die angibt, wie gut das Datenmodell den jeweiligen AwF abdeckt. Das Datenmodell eignet sich vollumfassend, wenn der Quotient 100 % ergibt. Der endgültige Mittelwert D_i in Abb. 1 ergibt sich aus dem Mittelwert aller benötigten *k*-AwF eines Datenmodells. Die *k*-AwF können mit einer Wertung w_k gewichtet werden. Für eine allgemeine Wertung in diesem Beitrag wird der Faktor w_k für alle AwF auf eins gesetzt.

3 Datenmodelle

Die Speicherung und der Austausch semantischer und geometrischer Informationen der Objekte wird mit Hilfe der Datenmodelle realisiert. Diese können in Datenmodelle mit geometrischen und semantisch-geometrischen Inhalten eingeteilt werden. Im Rahmen dieses Beitrags werden DXF und OBJ als Vertreter der geometrischen Datenmodelle und IFC2x3, IFC4x1 und CityGML als semantisch-geometrische Datenmodelle verwendet (siehe Tab. 1).

Tabelle 1: Allgemeine Informationen über die betrachteten Datenmodelle.

Format	Version	Veröffentlichungsjahr	Verantwortliche	nativ	ASCII	binär	XML	Zertifizierung	Dokumentation	Internationalität
DXF	2018	2018	Autodesk Inc.	✓	✓	✓	×	×	✓	✓
OBJ	3.0	?	Wavefront Technologies	✓	✓	×/ ✓	×	×	✓	✓
IFC 2x3	2x3	2007	buildingSmart International Ltd.	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓
IFC 4x1	4x1	2018	buildingSmart International Ltd.	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CityGML	2.0	2012	Open Geospatial Consortium Inc.	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓

Im Folgenden werden die Quellen der Datenmodelle aufgelistet:

- DXF: (Autodesk, 2018; Bracht et al., 2018; Heckner und Wirth, 2014; May, 2018; Safe Software, 2019)
- OBJ: (Heckner und Wirth, 2014; Murray und van Ryper, 2019; Victoria, 2016; Wavefront, 2019)
- IFC: (buildingSMART International Alliance for Interoperability, 2007; buildingSMART International Limited, 2018; buildingSMART International, 2019)
- CityGML: (Andrae et al., 2016; Coors et al., 2014; Gröger et al., 2012; Nejatbakhsh, 2017; Open Geospatial Consortium, 2019)

Die Datenmodelle unterstützen verschiedene Anforderungen (vgl. Kap. 2.1), diese können in semantische Anforderungen in Tab. 2 und in geometrische Anforderungen in Tab. 3 eingeteilt werden. Es wird der Bedarf der Anforderung im jeweiligen AwF beispielhaft für zwei AwF dargestellt. Diese sind AwF 3 Visualisierung und AwF 10 Kostenschätzung und Berechnung.

4 Ergebnisse und Diskussion

Je mehr für den AwF benötigte Anforderungen vom jeweiligen Datenmodell unterstützt werden, desto besser eignet sich das Datenmodell. In Tab. 4 wird das Ergebnis dargestellt.

Tabelle 2: Unterstützung (✓ ja, × nein) und Bedarf (++ existenziell, + wichtig −, irrelevant) der semantischen Anforderungen der Datenmodelle (vgl. Kap. 3).

Format	ind. Schemaerw.	ind. Attribute	räuml. für physische Elemente	Typisierung	Dokumentation von Bauleistungen	Mängelinformation	räuml. Beziehung der Entitäten	parametr. Abh.	Visualisierung	Mat./Farbeigensch.	4D-Planung	5D-Planung	Infrastruktur	DGM	Achse	Bahnsteig
DXF	×	✓	×	×	×	×	×	✓	✓	✓	×	×	×	×	×	×
OBJ	×	×	×	×	×	×	×	×	✓	×	×	×	×	×	×	×
IFC 2x3	×	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	×	×	×
IFC 4x1	×	✓	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×
CityGML	✓	✓	✓	✓	×	×	✓	×	✓	✓	×	×	✓	✓	✓	×
AwF 3	−	−	−	−	−	−	−	−	++	++	−	−	−	−	−	−
AwF 10	−	+	+	+	−	−	+	+	+	+	+	++	+	+	+	+

Tabelle 3: Unterstützung(✓ ja, × nein) und Bedarf (++ existenziell, + wichtig, − irrelevant) der geometrischen Anforderungen der Datenmodelle (vgl. Kap 3).

Format	Kurven	Polylinie	Bézierkurve	NURBS	Achsengeometrie	Flächenmodell	Triang. Abb.	Volumenmodell explizit	BRep	Volumenmodell implizit	CSG	Extrusions- und Rotationsverfahren	Positionierung	Georeferenzierung	projektspezifisches, Koordinatensyst.	Achsbezug
DXF	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×/✓	×
OBJ	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓	×	×	×	×	×	✓	×	✓	×
IFC 2x3	✓	✓	✓	×	×	✓	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
IFC 4x1	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CityGML	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓	✓	×	×	×	✓	✓	✓	×
AwF 3	+	+	+	++	+	+	+	−	−	−	−	−	−	−	−	−
AwF 10	+	+	+	++	+	+	+	+	+	−	−	−	−	−	−	−

Die semantisch-geometrischen Datenmodelle IFC2x3, IFC4x1 und CityGML stellen sich als die besten Datenmodelle heraus über alle AwF. Das ist ein erwartetes Ergebnis, da die Datenmodelle neben geometrischen auch semantische Anforderungen abdecken. Bei den geometrischen Datenmodellen ist DXF im allgemeinen besser geeignet als OBJ.

Ein AwF, der bei der Analyse der verschiedenen AwF heraussticht, ist die Visualisierung. Es ist gut zu erkennen, dass die geometrischen Datenmodelle für diese Art der Anwendung ausgelegt sind, da diese den geometrisch orientierten AwF sehr gut erfüllen. Zwischen den einzelnen AwF existieren Synergien, bspw. erfüllen die Datenmodelle den AwF 7 Erstellung

Tabelle 4: Eignung der Datenformate im jeweiligen Anwendungsfall in [%].

	Anwendungsfall																				
Format	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	Σ
DXF	55	52	93	65	52	34	58	42	44	46	49	49	58	58	46	53	35	46	47	48	52
OBJ	35	33	93	43	39	26	50	33	44	34	31	34	40	50	30	44	26	36	33	41	40
IFC 2x3	55	65	67	70	65	72	50	58	52	74	74	79	75	50	74	56	58	59	61	48	63
IFC 4x1	**88**	**93**	**100**	**95**	**93**	**85**	**88**	**78**	**74**	**97**	**95**	**98**	**98**	**88**	**93**	**78**	**77**	**82**	**81**	**72**	**88**
CityGML	70	63	67	76	87	45	67	61	67	57	51	49	73	67	43	69	48	56	61	66	62

von Entwurfs- und Genehmigungsplänen im gleichen Umfang wie AwF 14 Erstellung von Ausführungsplänen. Dies lässt sich auf die gleichen Anforderungen zurückführen, die an die AwF gestellt werden. Die Bewertung der Datenmodelle erfolgt in diesem Beitrag auf Grundlage der einzelnen Dokumentationen der Datenmodelle. Nur wenn die jeweilige Entität in der Dokumentation beschrieben ist, wird die Entität als unterstützt bewertet. Jedoch kann die Dokumentationsgrundlage unzureichend sein oder die Anforderung kann nicht eindeutig mit ja oder nein bewertet werden. Dies macht eine eindeutige Bewertung schwierig und erfordert eine detailliertere Unterteilung. Außerdem sind die Datenformate sehr komplex und es bedarf Einarbeitungszeit die Datenformate vollumfassend zu verstehen. IFC ist auf Grund vieler Entitäten unübersichtlich und es ist schwierig jede Entität zu berücksichtigen.

Je nach Projekt werden Anforderungen auf Grundlage der AwF und Datenmodelle getroffen. Je nach Anwendung oder Bedarf können diese jedoch variieren. Die Bedarfsbewertung der definierten Anforderungen bei den jeweiligen AwF basiert auf persönlicher Einschätzung und den jeweiligen Informationsanforderungen. Die Bewertung von 0,1 und 3 kann je nach Ziel der Studie verändert werden. Die Anforderungen könnten detailliertere Bahnsteig Entitäten beschreiben, da jedoch keines der Datenmodelle Bahnsteige in der Planung umfassend unterstützt, ist dies nicht aussagekräftig. Letztendlich lässt sich zusammenfassen, dass die Datenmodelle, AwF und Anforderungen je nach Informationsanforderungen verändert werden können. Mit Hilfe des entwickelten Konzeptes können weitere Analysen durchgeführt werden. Dabei können die Datenmodelle variieren und die AwF angepasst werden. Aus anderen Datenmodellen und AwF können neue Anforderungen resultieren. Außerdem kann der Bedarf der jeweiligen Anforderung im AwF je nach Projekt variieren.

5 Fazit

Das Ergebnis auf die Forschungsfrage, ob der Austausch von Bahnsteigrelevanten geometrischen und semantischen Entitäten mit der BIM-Methode möglich ist, muss verneint werden. Das liegt daran, dass die Datenmodelle nicht ausreichend sind. Das beste der untersuchten Datenmodelle ist IFC4x1, da dieses neben den geometrischen Anforderungen auch semantische abdeckt und am weitesten entwickelt ist. Wobei auch dieses keine Entitäten des Bahnsteiges besitzt. In der Weiterentwicklung von IFC sind mit IFCRail in der Version 5 Entitäten für die Bahnsteige vorgesehen. Mit der BIM-Methode sollte ein interoperabler Austausch zwischen den verschiedenen Projektbeteiligten gewährleistet sein. Im Falle eines offenen,

detaillierten Standards, dass alle relevanten Anforderungen abdeckt, kann dies ermöglicht werden. Daraus kann ein sehr großer Nutzen im Verlauf des Projektes gezogen werden.

Danksagung

Dieser Beitrag ist ein Auszug aus der Masterarbeit der Erstautorin. Sie dankt OBERMEYER Planen+Beraten GmbH für die hilfreichen Kommentare und Hinweise während des Schreibens sowie für die finanzielle Unterstützung dieser Publikation.

Literatur

Amann, J. und Borrmann, A. (2015), Open BIM for Infrastructure – mit OKSTRA und IFC Alignment zur internat. Standardisierung des Datenaustauschs, *in* 'Tagungsband zum 6. OKSTRA-Symposium'.

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

Autodesk (2018), 'AutoCAD User's Guide'. 03.04.2019.
URL: *http://help.autodesk.com/view/ACD/2018/ENU*

BIM4INFRA2020 (2018), 'Umsetzung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen" AP 1.2 „Szenariendefinition" und AP 1.3 „Empfehlung"'. 10.04.2019.
URL: *https://bim4infra.de/wp-content/uploads/2018/09/AP1.2-AP1.3_BIM4INFRA_Bericht-Stufenplan.pdf*

Borrmann, A., Amann, J., Chipman, T., Hyvärinen, J., Liebich, T., Muhič, S., Mol, L., Plume, J. und Scarponcini, P. (2017), 'IFC Infra Overall Architecture Project Documentation and Guidelines'.
URL: *https://www.buildingsmart.org/wp-content/uploads/2017/07/08_bSI_OverallArchitecure_Guidelines_final.pdf*

Borrmann, A. und Berkhahn, V. (2015), Grundlagen der geometrischen modellierung, *in* A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, eds, 'Building Information Modeling', Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 25–41.

Bracht, U., Geckler, D. und Wenzel, S. (2018), 'Datenmanagement und Softwarewerkzeugklassen'.

Brüggemann, T. und von Both, P. (2015), 3D-Stadtmodellierung: CityGML, *in* A. Borrmann, M. König, C. Koch und J. Beetz, eds, 'Building Information Modeling', Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, pp. 177–192.

buildingSMART International (2019), 'Technical Resources'. 10.04.2019.
URL: *https://technical.buildingsmart.org/*

buildingSMART International Alliance for Interoperability (2007), 'IFC2x3'. 09.04.2019.
URL: *https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC2x3/TC1/HTML/*

buildingSMART International Limited (2018), 'Industry Foundation Classes 4.1.0.0'. 10.04.2019.
URL: *https://standards.buildingsmart.org/IFC/RELEASE/IFC4_1/FINAL/HTML/*

Coors, V., Gröger, G., Häfele, K.-H. und Casper, E. (2014), 'Handbuch für die Modellierung: Teil 1: Grundlagen (Regeln für valide GML Geometrie-Elemente in CityGML)'. 05.04.2019.
URL: *https://files.sig3d.org/file/ag-qualitaet/201311_SIG3D_Modellierungshandbuch_Teil_1.pdf*

Gröger, G., Kolbe, T. H., Nagel, C. und Häfele, K.-H. (2012), 'OGC City Geography Markup Language (CityGML) Encoding Standard', (2.0.0). 04.02.2019.
URL: *http://www.opengis.net/spec/citygml/2.0*

Heckner, H. und Wirth, M. (2014), 'Vergleich von Dateiformaten für 3D-Modelle: CEDIFA Bericht 7'. 28.02.2019.
URL: *http://cedifa.de/wp-content/uploads/2014/05/07_3D-Modell-Formate.pdf*

Ji, Y. (2014), 'Durchgängige Trassen- und Brückenplanung auf Basis eines integrierten parametrischen 3D-Infrastrukturbauwerksmodells'. 03.05.2019.
URL: *https://mediatum.ub.tum.de/doc/1224662/1224662.pdf*

Markič, Š., Donaubauer, A. und Borrmann, A. (2018), Enabling Geodetic Coordinate Reference Systems in Building Information Modeling for Infrastructure, *in* 'Proceeding of the 17th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering', Tampere, Finland.

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

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

Murray, J. D. und van Ryper, W. (2019), 'Wavefront OBJ File Format Summary'. 01.03.2019.
URL: *http://www.fileformat.info/format/wavefrontobj/egff.htm*

Nejatbakhsh, N. (2017), Interoperability of traffic infrastructure planning and geospatial information systems, PhD thesis, Technische Universität Dresden.

Obergrießer, M. (2017), *Digitale Werkzeuge zur integrierten Infrastrukturbauwerksplanung*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.

Open Geospatial Consortium (2019), 'Compliance navigation'. 05.04.2019.
URL: *http://www.opengeospatial.org/resource/products/compliant*

Safe Software (2019), 'Autodesk AutoCAD DWG/DXF (ACAD) Geometry Support'. 25.03.2019.
URL: *https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_ReadersWriters/acad/Geometry-Support-acad.htm*

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

Victoria (2016), 'The DWG File Specification'. 03.04.2019.
URL: *https://www.scan2cad.com/dwg/file-spec/*

Wallner, S. und von Both, P. (2017), BIM Tools Overview: Target group- and processoriented examination of free BIM tools, *in* A. Fioravanti, S. Cursi, S. Elahmar, S. Gargaro, G. Loffreda, G. Novembri und A. Trento, eds, 'ShoCK! - Sharing of computable knowledge!'.

Wavefront (2019), 'B1. Object Files (.obj)'. 04.04.2019.
URL: *http://www.cs.utah.edu/ boulos/cs3505/obj_spec.pdf*

Wolf, V. (2019), Entwicklung eines Konzeptes zur Bewertung digitaler Datenmodelle am Beispiel einer Bahnsteigplanung, Master's thesis.

Wu, C., Xu, B., Mao, C. und Li, X. (2017), 'Overview of BIM Maturity measurement tools'.

A semantic model for additive manufacturing of concrete structures

Patricia Peralta Abadia[1], Everett M. Mthunzi[1] and Sebastian Heine [2]

[1]Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar · Coudraystraße 7 · 99423 Weimar
E-Mail: {patricia.peralta.abadia, mondliwethu.everett.mthunzi}@uni-weimar.de

[2]F.A. Finger Institute for Building Material Engineering · Bauhaus University Weimar
Coudraystraße 11 · 99423 Weimar · E-Mail: sebastian.heine@uni-weimar.de

Although recent approaches towards automating construction processes take advantage of additive manufacturing (AM), challenges regarding data modeling of AM of concrete structures have been identified. The challenges confirm that current data models are inadequate for three-dimensional (3D) printing of concrete structures with high geometric precision. As a solution to mitigate this deficiency and optimize data modeling for AM of concrete structures, the research presented in this paper proposes a printing information model (PIM), a semantic model defining AM process, geometry, and material information input parameters together with relationships between the parameters. As will be shown in the paper, the PIM proposed in this study adequately defines all information relevant to AM of concrete struc-tures and has the potential to improve data modeling concepts currently deployed for 3D concrete printing in engineering.

Keywords: Additive manufacturing (AM), printing information model (PIM), 3D concrete printing, semantic modeling, building information modeling (BIM).

1 Introduction

The architecture, engineering, and construction industry faces performance, productivity, and sustainability challenges. Implementing industrial three-dimensional (3D) printing, also referred to as additive manufacturing (AM), is an emerging approach for automating construction processes, corollary to the development of printable concrete (Buswell et al., 2018). The American Society for Testing and Materials defines AM as a process of joining materials to make objects from 3D model data, usually layer upon layer (ASTM, 2012). Generally, AM methods are subdivided into methods based on extrusion, and methods based on selective binding (Nerella et al., 2016). Significant advancements in AM hardware and materials have been achieved to produce concrete structures with adequate structural performance and a certain degree of geometrical precision. In addition, sensing technologies have been matured, enabling sensors recording and analyzing parameters autonomously (Dragos et al., 2018; Smarsly & Law, 2014). Several AM technologies have been developed that use extrusion-based AM methods, which are preferred for large-scale concrete printing, such as contour crafting (CC) and concrete printing (CP). For selective binding-based AM methods, the main exponent is D-shape, which uses cement as binding agent (Lim, et al., 2012).

Data modeling for AM is mainly based on traditional solutions, such as standard tessellation language (STL) and G-code (ISO 6983-1) (Bonnard et al., 2018).

Currently, standard AM data modeling approaches can cause information breaks along the modeling process by decomposing digital models into several data formats to be readable by 3D printers. Current standard file formats, including STL, additive manufacturing format (AMF) and 3D manufacturing format (3MF), may cause redundancy, information loss and inconsistencies, thus requiring new data formats. Furthermore, when considering time-dependent viscous mate-rial, such as concrete, material information plays an important role in defining process settings, toolpaths, and computer numerical control (CNC) commands. The current data modeling approaches limit concrete printing to a process with a long trial-and-error learning curve to determine the ideal process settings and printing strategies. The main challenge therefore, is to understand the interaction of AM processes, material, and geometry input parameters to establish optimal information flow.

A new data model is required, enabling smoother information flow without information breaks that describes AM input parameters, adequately allowing real-time monitoring of material properties and adjustments of process parameters. This study aims at formally describing information flow, input parameters, and interactions between input parameters, representing a step necessary for standardizing 3D concrete printing data models for AM in civil engineering. Using a semantic model as a formal basis, an approach based on building information modeling (BIM) is implemented for conceptual validation, inheriting geometry inputs specified in BIM, and incorporating all parameters and parameter interactions required to generate CNC commands. The rest of the paper is organized as follows. The proposed semantic model, the printing information model (PIM), is presented in Section 2, describing parameters and fundamental interprocess dependencies for concrete printing. In Section 3, the validation of the semantic model through a BIM-based approach is presented, using a laboratory-scale 3D concrete printer. The paper concludes with a summary and an outlook on potential future work.

2 A semantic model for additive manufacturing of concrete structures

The semantic model defines all elements of AM of concrete structures, clearly describing how each of the elements interact and associate with each other to systematically represent specifications of 3D concrete printing jobs. In this section, first a concise review of extrusion-based AM of concrete structures is outlined. Reviewing concrete printing with a systematic perspective, AM main elements are identified together with relationships and interactions between the elements. Extrusion-based AM of concrete structures can be divided into two main components: Printing hardware and printing material. For each component, process, material, and geometry input parameters are identified. The semantic model therefore represents the collected information in the form of diagrams. An overview of the main components of AM of concrete structures and the proposed semantic model, i.e. the “printing information model”, is presented in the following subsections.

2.1.1 Main components of additive manufacturing of concrete structures

Printing hardware

Most concrete printers have adopted the fused deposition modeling (FDM) printing method, also referred to as “layered extrusion”. In FDM printing, concrete is mixed and pumped into a hose, which is connected to a printing head attached to a motion-controlled printing system. While the concrete is still fluid, it is extruded through a nozzle and starts solidifying by itself in a chemical reaction. Key elements of printing hardware, regarding AM data modeling, are pump system, printhead, and motion-controlled printing system.

The pumping system should be able to transport a concrete mix from the mixing unit to the nozzle, without segregation and bleeding. Pumping is influenced by the viscosity of a concrete mix. For detailed information on relationships regarding the pump system, the interested reader is referred to Bos et al. (2016) and Paul et al. (2018). The printhead consists of several parts, including one or multiple nozzles, allowing the concrete to be printed at a desired location with a desired speed under a desired angle. Printhead speed, nozzle shape and orientation, and height of the printhead above the printing surface are parameters that affect the print quality of the filament layers (e.g. filament dimensions, buildability, and mechanical properties). The motion-controlled printing system processes the CNC commands, and also monitors and adjusts performance using sensor technologies.

Printing material

Concrete printing involves concrete as printing material and a reinforcement solution to provide ductility and tensile strength as well as to reduce cracking in printed objects. The concrete composition determines the suitability of a mix with respect to printing processes and properties of the finished object. Slow setting reactions in printed concrete have strong interactions with the applied process parameters and printing strategy (Bos et al., 2016). In addition, the printing strategy affects the way reinforcement can be installed or incorporated. Interactions between concrete material properties and process parameters, together with the print size, are relevant to the way the printing process should be conducted, particularly for stability of objects during printing. The design of objects and printing strategy influences the green and the finished object properties and reinforcement solution (Bos et al., 2016).

Key rheological properties for concrete mixes provide the characteristics necessary for a concrete to be printable. In Paul et al. (2018), the five key rheological properties are discussed in detail besides relationships with process parameters and mechanical properties of fresh concrete (e.g. shear stress, viscosity, and green strength). Printable concrete mixes should be extrudable and buildable, where each layer of filament can retain shape once in place and can adhere to (and carry the load of) subsequent layers.

Concrete mix designs and printing processes affect the desired mechanical properties of a finished AM 3D concrete print object (Buswell et al., 2018; Paul et al., 2018; Bos et al., 2016). There is a direction dependency, where the anisotropy in the material defines the fail-ure of the structure. Detrimental changes in the printing quality of upper layers and interfaces compromise the strength of the concrete, mainly due to hardening and loss of moisture of the concrete mix over time. Consequently, anisotropic proprieties of printing material, layer interval time as well as printing speed and printing strategy significantly influence load-bearing capacity of the printed components.

2.1.2 A printing information model (PIM)

The goal of developing the semantic model is to include all printing information necessary for 3D concrete printing, enabling traceability of the data exchange between elements of the data model. The PIM describes all elements and parameters involved in 3D concrete printing, employing a unified modeling language (UML)-based, object-oriented modeling approach. The elements and parameters are categorized coherently into classes, and the relationships are defined semantically. As part of the PIM, the information flow of digital data from 3D digital models to CNC codes is described. As a result, the PIM represents an understandable and instantiable model for future code applications. For example, the PIM can be imple-mented in further studies for technology-independent semantic descriptions of buildings using a BIM-based approach, e.g. based on the Industry Foundation Classes (IFC) standard. The IFC have been matured into a formalism to describe building information models not only of buildings or infrastructure, but also sensor systems (Theiler & Smarsly, 2018), wastewater treatment plants (Söbke et al., 2018), cyber-physical systems (Fitz et al., 2019), cognitive buildings (Ibanez et al., 2019), or digital roads (Mirboland & Smarsly, 2019).

The relationships between the different parameters documented in the literature (Bonnard et al., 2018; Bos et al., 2016; Paul et al, 2018), as descibed earlier, are used as basis for developing the PIM. A UML class diagram is used to describe the structure of the PIM, depicting the inter-process relationships and 3D printing attributes, elements and parameters, which can be instantiated. Figure 1 presents a general overview of the PIM describing the printing information necessary for 3D concrete printing. The PIM comprise three main components, following process, geometry, and material information to be described: *Process_Information*, *Geometric_Information*, and *Material_Information*. The *Process_Information* abstract class includes printing settings data and monitoring data of a concrete extrusion process, and it is further categorized into *PumpSystemData*, *PrintheadData*, *ToolpathData*, *FilamentData* and *ControlData* subclasses. The abstract class *Geometric_Information* provides a geometrical description of a 3D digital model, inherited from 3D digital models. The geometry information includes the subclasses *Dimension*, *Point*, *GeometricObject* and *ContourLine*, resulting in a complete geometrical description.The *Material_Information* abstract class refers to materials implemented in the printing process, such as concrete (*ConcreteData*) and reinforcement (*ReinforcementData*). The concrete data includes *MaterialSpecifications*, *MixDesign*, and *MaterialProperties*.

A UML activity diagram is used to describe the information flow in the PIM, depicting the data exchange between 3D printing elements using 3D digital models as input. Figure 2 presents the general information flow. The information flow starts with the information extracted from a 3D digital model and with user-defined parameters (i.e. process parameters). The toolpath is generated combining the user-defined parameters and the geometry representation extracted from the 3D digital model. The toolpath can be modified by changing the user-defined parameters until it fulfills the desired geometrical precision. Once the toolpath is accepted, it is used to generate the CNC code, which incorporates the material properties. Finally, if no modifications are needed, the CNC code is sent to the 3D printer.

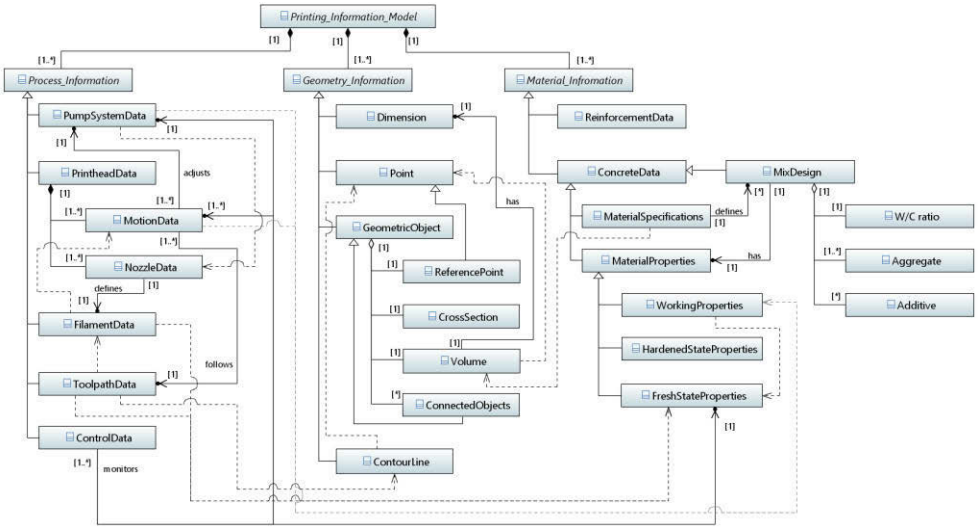


Figure 1: PIM class diagram

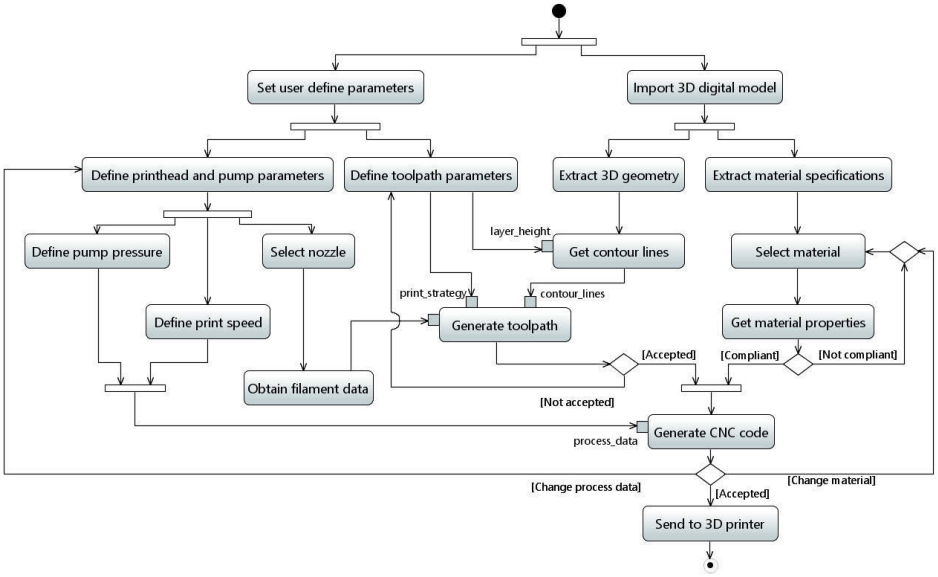


Figure 2: PIM information flow diagram

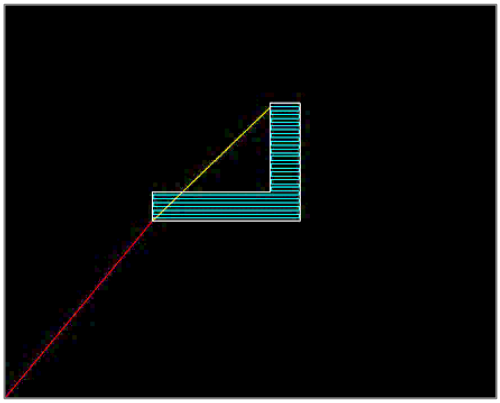
3 Conceptual validation for a BIM-based concrete printing

To implement the PIM into a BIM schema, a conceptual validation of the PIM is performed on a laboratory-scale 3D concrete printer. Therefore, BIM-based digital models are taken as geometry input to provide geometry descriptions, which are used later to validate the stated relationships by generating a CNC code. Most BIM tools are capable of exporting models to a neutral file format (e.g. STL, AMF), which can be converted into CNC code. Extrapolating geometry representations and material specifications from IFC files is also possible for a manual extraction of model data. In this study, a manual extraction of model data is used for a conceptual validation test.

A code application is developed in Java for the conceptual validation that instantiates an instance of the PIM for a specific 3D concrete printer. The code application incorporates algorithms for slicing, toolpath definition, and CNC commands generation, and it allows visualization of the generated data. The inputs are user-defined parameters and the extracted model data from a BIM model, while the output is a CNC code readable by the 3D concrete printer. The slicing algorithm solves the plane intersection problem between a cutting plane and the faces of the extracted geometric object, generating contour lines for each layer. The toolpath definition algorithm implements a raster scanning approach to determine the infill of the geometric object for each layer, and defines movements of the printhead using a user-defined printing strategy and filament data for geometric precision. The CNC commands generation algorithm incorporates the process data, i.e. printhead and pump parameters, material properties and the defined toolpath. Variations in the material properties are considered by modifying factors applied to printhead and pump parameters.

The conceptual validation test is performed for an L-shaped small scale concrete wall of 10 cm height and a base of 60×80×20 cm designed using a BIM software application and a 400×300×300 cm laboratory-scale 3D concrete printer, which is capable of extruding concrete filaments up to 20 cm thick. A CNC code is generated, visualizing printing data devised for verification of the printing strategy and geometrical precision. In Figure 3, the results of the conceptual validation test are shown. The slicing algorithm implemented is limited to prisms defined as “Swept Solid” entity in the IFC for generating contour lines. The scanning distance of the toolpath definition algorithm is defined by the thickness of the filament. The CNC code has a start, an ending command block, and printing command blocks that control the manufacturing process.

The parameters and relationships defined in the PIM, together with the digital information flow (Figure 1 and Figure 2) are instantiated in the code application. For example, in the user-defined parameters, the *PumpSystemData* and *NozzleData* dependencies on *WorkingParameters* are defined within the working ranges of the pump pressure. The *FilamentData* and *NozzleData* association is stated when the nozzle geometry (i.e. size and shape), together with the user-defined layer height, are used to define the filament properties. The *MotionData* executes the *ToolpathData*, extruding the corresponding amount of material with the respective printing speeds and accelerations, which consider the *FreshStateProperties* using modifying factors. Through the generation of a CNC code as a conceptual validation test, the inter-process relationships provide traceability and a clear understanding of the printing process.



```
;Layer 40.0
G1 Z40.0 F10800
G1 E1.2 F2100
G1 X100.0 Y60.0 E1.568
G1 X100.0 Y100.0 E1.2544
G1 X90.0 Y100.0 E0.3136
G1 X90.0 Y70.0 E0.9408
G1 X50.0 Y70.0 E1.2544
G1 X50.0 Y59.775 E0.3136
M204 S1000.0
G1 F900.0
G1 X50.225 Y61.099999999999945
G1 X99.775 Y61.099999999999945 E1.5538880000000002
G1 X99.775 Y62.39999999999994 E0.04076799999999991
G1 X50.225 Y62.39999999999994 E1.5538880000000002
G1 X50.225 Y63.69999999999994 E0.04076799999999991
G1 X99.775 Y63.69999999999994 E1.5538880000000002
G1 X99.775 Y64.99999999999994 E0.04076800000000013
G1 X50.225 Y64.99999999999994 E1.5538880000000002
G1 X50.225 Y66.29999999999994 E0.04076799999999991
G1 X99.775 Y66.29999999999994 E1.5538880000000002
G1 X99.775 Y67.59999999999994 E0.04076799999999991
G1 X50.225 Y67.59999999999994 E1.5538880000000002
G1 X50.225 Y68.89999999999993 E0.04076799999999991
G1 X99.775 Y68.89999999999993 E1.5538880000000002
G1 X99.775 Y70.19999999999993 E0.04076799999999991
G1 X90.225 Y70.19999999999993 E0.29948800000000037
```

a) Toolpath visualization b) CNC code output

Figure 3: Results of the conceptual validation test

4 Summary and conclusions

A printing information model has been developed serving as a formal basis to standardize the description of process, geometry, and material information input parameters of AM of concrete structures. A literature review has been conducted and analyzed to determine the main elements, relationships, and associations of process, geometry, and material information input parameters for 3D concrete printing. It has been demonstrated that the PIM sufficiently describes the inter-process relationships between identified elements semantically, resulting in an instantiable model for data modeling. Furthermore, the implementation of a laboratory-scale 3D printer has demonstrated that the PIM adequately defines AM main parameters and fundamental relationships, which can be translated into a CNC code. Further validation is required with respect to inheritance of geometrical information from standardized data models, such as the IFC. In future work, a digital model may be developed that implements the PIM to generate CNC codes from BIM-based models, whose inputs are the parameters for 3D concrete printing, and that can incorporate sensor data for process monitoring and real-time adjustments.

Acknowledgments

The authors would like express their sincere appreciation to the German Research Foundation (DFG) for supporting this research through grant SM 281/12-1. Major parts of this work have been conducted in the “Structural Health Monitoring Laboratory”, sponsored by the European Union through the European Fund for Regional Development (EFRD) and the Thuringian Ministry for Economic Affairs, Science and Digital Society (TMWWDG) under grant 2016 FGI 0009, whose support is gratefully acknowledged. Any opinions, findings, conclusions, or recommendations expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of DFG, EFRD, or TMWWDG.

References

ASTM. (2012). F2792. 2012 Standard terminology for additive manufacturing technologies. West Conshohocken, PA, US: ASTM International.

Bonnard, R., Hascoët, J.-Y., Mognol, P., & Stroud, I. (2018). STEP-NC digital thread for additive manufacturing: data model, implementation and validation. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 31(11), 1141-1160.

Bos, F. P., Wolfs, R. J., Ahmed, Z. Y., & Salet, T. A. (2016). Additive manufacturing of concrete in construction: Potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping, 11(3), 209-225.

Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. Cement and Concrete Research, 112(2018), 37-49.

Dragos, K., Theiler, M., Magalhães, F., Moutinho, C. & Smarsly, K., 2018. On-board data synchronization in wireless structural health monitoring systems based on phase locking. Structural Control and Health Monitoring, 25(11), e2248.

Fitz, T., Theiler, M. & Smarsly, K., 2019. A metamodel for cyber-physical systems. Advanced Engineering Informatics, 41(2019), 100930.

Ibanez, S., Fitz, T. & Smarsly., K., 2019. A semantic model for wireless sensor networks in cognitive buildings. In: Proceedings of the ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering. Atlanta, GA, USA, 06/17/2019.

Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. Automation in Construction, 21(2012), 262-268.

Nerella, V. N., Mechtcherine, V., Krause, M., & Näther, M. (2016). 3D printing technology for onsite construction. Concrete Plant International, 4(2016), 36-41.

Mirboland, M. & Smarsly, K., 2019. A semantic model of intelligent transportation systems. In: Proceedings of the 26th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE). Leuven, Belgium, 06/30/2019.

Paul, S., van Zijl, G., Tan, M., & Gibson, I. (2018). A review of 3D concrete printing systems and material properties: Current status and future research prospects. Rapid Proto-typing Journal, 24(4), 784-798.

Smarsly, K. & Law, K. H., 2014. Decentralized Fault Detection and Isolation in Wireless Structural Health Monitoring Systems using Analytical Redundancy. Advances in Engineering Software, 73(2014), pp. 1-10.

Söbke, H., Theiler, M., Tauscher, E. & Smarsly, K., 2018. BIM-based description of wastewater treatment plants. In: Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE). Tampere, Finland, 06/05/2018.

Theiler, M. & Smarsly, K., 2018. IFC Monitor – An IFC extension for modeling structural health monitoring systems. Advanced Engineering Informatics, 37(2018), pp. 54-65.

Zhang, J., & Khoshnevis, B. (2013). Optimal machine operation planning for construction by Contour Crafting. Automation in Construction, 29(2013), 50-67.

A methodology to determine and classify data sharing requirements between OpenBIM models and energy simulation models

Janakiram Karlapudi[1] and Suraj Shetty[2]

Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Straße 31a · 01069 Dresden · E-Mail:janakiram.karlapudi@tu-dresden.de, suraj_sunil_kumar.shetty@tu-dresden.de

Energy analysis at different stages of a building's life-cycle allows designers and engineers to make proper design decisions, which will enhance the efficiency and energy saving measures. However, energy analysis of a building using traditional methods at every stage of the project is time-consuming and more labor intensive. Thus, energy simulations of buildings are rarely introduced in all design stages of the project. This study focuses on data transfer process from BIM model (Revit) to energy simulation model (IES<VE>) using OpenBIM meta-data model - Industry Foundation Classes (IFC) as an exchangeable file format. This data sharing process simplifies the complexity in energy modeling and allows to investigate different design alternatives in each phase of the building's life-cycle. To investigate the efficiency and completeness of this data transfer process, a demonstration of data sharing is carried. By evaluating the results from the demonstration, efficiency gaps are identified in the data transferred process. A detailed investigation on the cause of efficiency gaps in data sharing is carried out and incorporated in this paper.

Keywords: BIM, energy model, IFC, data sharing, efficiency gaps

1 Introduction

Building Information Modeling (BIM) leads to significant changes of the design process by introducing building energy analysis in the early stage of the project and thereby bridging the distance between evolution and design (Karen M and Douglas, 2014). BIM models contain a large range of information regarding the product and process. The linking of these BIM models to building energy models will enable an access to the information required for energy simulation and eliminates the need for creating an energy simulation model (Moon et al., 2011). This integration creates a large range of advantages in the energy modeling process.

- BIM-based energy analysis allows iterative simulations for a wide range of scenarios to be performed within a short period of time.
- The time saving from the reproduction of the energy simulation model could be spent on the simulation and design options (Moon et al., 2011).
- The geometrical changes in the BIM model can be easily reflected in the energy analysis model by recreating or generating the energy model quickly with the help of BIM program.

This research starts with an investigation of different approaches and methodologies for energy simulation in buildings and performs a categorization of these methodologies according to the scope and complexity of data processing. The major purpose of these investigations is to analyze the information requirements for energy simulations.

In the process of integration between BIM models and simulation models, efficient data sharing is the key concept to establish the successful implementation of the data transfer process. The efficiency in data sharing is improved along with the development of a BIM meta-data model or a data exchange schema such as IFC. So, the research further continued with the investigation of data sharing requirements for the OpenBIM model (IFC), in order to transfer the analyzed information to an energy simulation model.

Furthermore, a demonstration of the data exchange is performed to analyze or map the investigated results with the practical data transfer process. All the information requirements are incorporated into a building information model as input parameters to leverage the model and then the data transfer process is carried out to investigate the potential of BIM-based energy modeling.

2 Building Energy Simulation

Building energy simulation is a methodology to assist engineers, designers and operators to provide more value on the comfort and needs of building owners and occupants. The energy simulation process is a method to analyse the energy consumption of buildings which will assist in making appropriate design decisions.

2.1 Categorization of Energy Simulation Models

There are several types of energy simulation models used to perform energy consumption calculations. All these models are categorized according to three major principles (Table 1).

Table 1: Phenomena analyzed for building energy simulation (Menzel, K; Ploennigs, 2015)

Physical Principles	**Level of Abstraction**	**Time-dependency**
Thermal Radiation	Mono-Zone Models	Steady-state Simulation Models
Conduction	Multi-Zone Models	Dynamic Simulation Models
Convection/Advection	Zonal Models	
	CFD Models	

Mono-Zone Models represent the highest level of abstraction, i.e. the lowest level of details. Generally, these kinds of simplified models are used in the early design stages for the calculation of the energy consumption. **Multi-Zone Models** are mostly similar to the Mono-Zone models in terms of modeling the outer shell of the building but additionally, spaces are modeled to separate the building into different analysis zones.

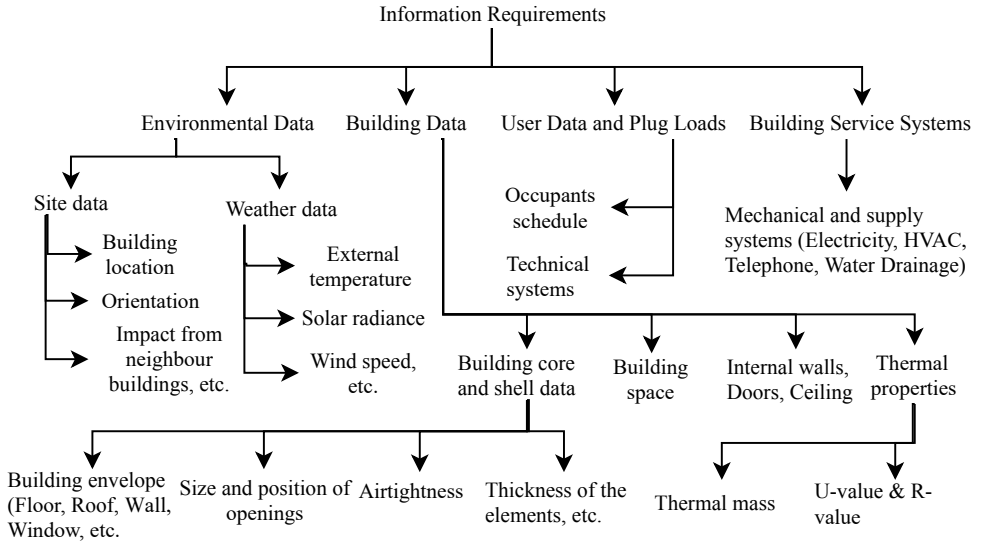


Figure 1: Information requirements for building energy simulations

In the case of **Zonal Models**, a single space operated under a set of constraints is divided or decomposed into multiple modeling zones. **CFD** (Computational Fluid Dynamic) model is a micro level investigation. It provides an option to model a single space with high granularity using a high level of data. CFD analysis provides a greater understanding of the airflow and the heat transferring processes occurring within and around the building spaces (Wimmer et al., 2018).

The difference between **Steady-state** and **Dynamic simulations** is dependent on the input parameters. For Steady-state simulations, all the input parameters are constant throughout the simulations. For Dynamic simulations, the input parameters vary over time during the simulations.

The requirement of input data for energy simulation is dependent on the different design phases of the building's life-cycle. Figure 1 represents some basic information requirements to set up an energy simulation model which is used to determine the energy consumption of the building. These requirements are identified based on complex types of simulation models such as multi-zone model and dynamic simulation model. The same data will be incorporated in the BIM model for the demonstration of the data transfer process. Similarly, the data sharing requirements for this information are investigated in the OpenBIM meta-data model to verify the quality of the data transfer process.

3 Data Sharing Requirements - IFC

buildingSMART proposes an open data scheme called IFC to store, manage and exchange the building information between multiple stakeholders throughout the life cycle of any built en-

vironment irrespective of the software being used (BuildingSMART, 2016). This information exchange format allows data interoperability between BIM models and energy simulation models and also increases the transparency of the data transfer process, since the language is both machine and human readable (Bahar et al., 2013).

In order to achieve successful data sharing, the IFC schema is defined or structured based on two major modeling concepts namely Inheritance Hierarchy and Objectified Relationships. Inheritance facilitates the introduction of hierarchies in the BIM model and is an alternative way to arrange the model components in BIM. It supports the reuse of modeling concept (code) since one class (child) is based on another class (parent). Objectified Relationships is another major modelling method in the IFC data schema. *IfcRelationship* entity is the super type for all relationships in the IFC data schema.This entity defines the relationships among different entities, elements and properties.

After the clear understanding of IFC modeling concepts, this research further continues with investigating the data sharing requirements defined in the IFC schema (ISO16739-1 (2018)) with respect to the energy simulation domain to enable an efficient data transfer process. IFC schema is inherently complex and extensive to carry most of the exchange data. Similarly, a BIM model can be equipped with enormous data related to all disciplines of the construction industry, but all data is not necessary for a specific business process. For this purpose, Model View Definitions (MVD) were introduced by buildingSMART to share specific data for a particular process based on the requirements. MVD is a subset of IFC schema, which supports or specifies data exchange requirements for a particular process (ISO29481-1 (2016)).

An investigation is performed to identify data entities defined in IFC schema (ISO16739-1 (2018)) particularly for the information requirements defined in section 2. Similarly, the other part of the investigation is to identify the relationships between these entities defined in the IFC schema, which completes the definition of BIM data in IFC format. Later, these investigation results are used to map with the demonstrated example building's (section 4) IFC file to verify the quality and efficiency of the data transfer process. These results can be used as a reference to identify whether the data is transferring according to the IFC standard definitions or not.

4 Data Sharing Demonstration

A demonstration of data sharing between a BIM tool (Revit) and an energy simulation tool (IES<VE>) using IFC as an interoperability file format is performed to investigate the following,

- Level of data sharing (quality of data it is going to transfer),
- Implementation of meta-model data schemas in a BIM tool (Revit) for data export process,
- Capability or adaptability of simulation tool (IES<VE>) to import the data from IFC.

4.1 BIM model

A three-storey simple office building (refer to Figure 3) with three different spaces or rooms in each floor is modeled in Autodesk Revit 2019 and is incorporated with all the necessary information (mentioned in Figure 1) required for energy simulation. This comprehensive BIM model is exported from Revit to IFC file format for further import processes.

Figure 2: Data transfer methodology

4.2 Data investigation with model viewer

The Solibri Model Viewer tool is used to import the IFC file for the purpose of a data quality check by verifying the available data in the IFC file exported from Revit (three-storey simple office building). This data quality analysis is performed based on the successful import of building geometry, spaces, systems, openings, schedules, material, etc. to Solibri Model Viewer. Based on the investigation results, it is observed that most of the information modeled in Revit is successfully exported to IFC and the same is imported to Solibri Model Viewer. For example, the geometry of the building, material and construction details are efficiently transferred to the IFC file format.

On the other hand, some issues regarding the representation of space type and shading device in the building are identified in Solibri Model Viewer. The IFC schema treats space type as a building type object (*IfcSpaceType*) but in this example it is not represented as a type object, which can be observed in the components list mentioned in "Default" hierarchy of Solibri. It is observed that space type of a particular space is defined as a property which is mentioned under Energy Analysis options in Solibri. After a thorough investigation of the IFC STEP (Standard for the Exchange of Product Model Data) file, it is found that even in the IFC file the space type is defined as a property for a space using *IfcPropertySingleValue* entity in IFC schema. Further, this investigation is extended to check the modeling criteria of space type in the BIM Model. It is noticed that during the process of modeling in Revit, the space is defined as an object for the room and the space type is defined as an object property for that space. Furthermore, some more properties (like area per person, occupancy schedule, heat gains, etc.) are defined as a property of a space based on the space type.

Similarly, another issue observed is with parapet wall and roof extensions of building (BIM Model) in Solibri. In general, these type of shading elements in the building needs to be treated as a shading device (*IfcShadingDevice*) according to IFC schema. However, in Solibri, the parapet wall is represented as a wall element (*IfcWall*) and roof extensions are defined as roof elements (*IfcRoof*). By the verification of IFC STEP file, it is clear that none of the building elements are defined using *IfcShadingDevice* entity and it is observed that even in Revit, there is no option to define any element particularly as a shade.

4.3 Data quality verification in energy simulation model

After verification of the quality of input data using model viewer tool, the verified data is transferred to the energy simulation tool (IES<VE> 2018) (refer to Figure 2). The intent of this process is to investigate the data import capabilities of IES from IFC and to verify the quality of imported data in simulation tool.

4.3.1 Evaluation of Results

The data quality verification is performed by analyzing the results of the data transfer process and the evaluated results are presented in different categories mentioned below.

Import statistics

IES application generates a statistical report after every successful process of data import. This report represents the details about area and volume for each space, elements bounded by the space and its intersections. This statistical report is used to perform a comparison between modeled data and imported data. Based on this comparison, a difference in values of both area and volume between BIM model space and the energy simulation model space is identified. It is noticed that the volume difference between the BIM model and IES model is in a range of 10% - 15% and it may cause the design of over sized building services system in energy simulation.

The difference of area and volume between both models is because of the difference in area calculation process. In IES, area calculation is performed by using center to center distance between the walls whereas in Revit, this calculation is performed using clear distance between the walls. It implies that in IFC import process, IES only imports center line coordinates of the element and places a 2-D virtual surface exactly at the center of the element for energy analysis purposes.

Geometry and Orientation

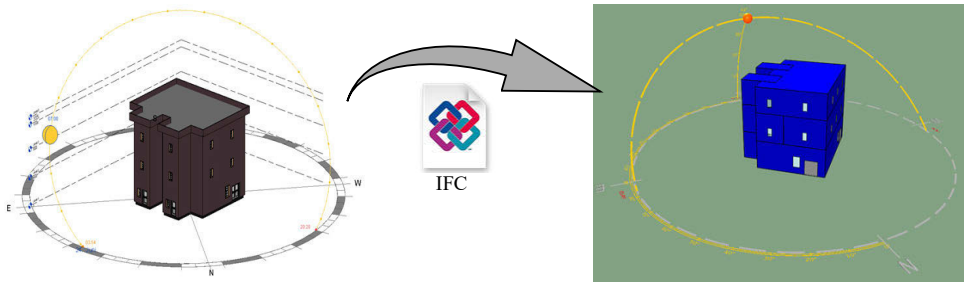


Figure 3: Data transfer from BIM model to energy simulation model

The data transfer methodology using IFC successfully imports the geometry, space and lo-

cation details of the building to IES. Figure 3 represents the orientation of building which is different when compared to the BIM model. The modeled orientation of the building is 320 degrees to the true north but in IES, the building is oriented at an angle of 40 degrees to the true north. This difference can be observed by comparing the models shown in Figure 3. The error in building orientation may be due to insufficient compatibility between Revit and IFC regarding angle of rotation assigned to the BIM model.

The roof extensions and the parapet wall in the BIM model are not imported to IES from IFC even though the details regarding these elements are present in the IFC file (see Figure 3). The main reason for this issue is that the IES doesn't import elements which are not bounded by any space in the model. The solution for this issue is to define non space bounded elements as local shadings in the model. But, in the case of Revit to IFC export process, these non space bounded elements (roof extensions, parapet wall) are exported as building element (section 4.2) instead of local shadings. This export issue causes the problem of importing those elements into IES.

Construction Details and Thermal Profile

After successful verification of the data in IES, it is observed that the construction details mentioned in the BIM model are not imported to the IES from IFC. By thorough investigation of IFC STEP file, it is noticed that, Revit successfully exported all construction details to IFC but IES is not capable of importing those details from IFC. In the IFC import process, IES is not importing building services systems as this information is not attached to the zones directly. IES successfully imports space types modeled in the BIM model although these are not defined according to IFC schema. With the help of these space types, IES redirects to its' own libraries and assigns similar space types to the spaces in the IES model. Occupant, lighting and power schedules are also not imported from IFC. It is observed that even Revit does not export information regarding schedules to IFC.

5 Conclusion

This research started with the intention of enabling seamless data transfer from BIM model to BES model with the help of IFC file format. In this paper, intensive investigations are performed to identify the information required for energy simulations and on data sharing requirements of IFC to transfer this information successfully. A demonstration of data sharing is performed by selecting an example of an office building and by incorporating all the investigated information needs for energy simulation to this example building. An analysis of the data transfer process is carried out by comparing the demonstration results with the investigated data sharing requirements. The purpose of this comparison is to identify whether the data is transferring to the simulation model according to IFC standard definitions or not. Similarly, a comparison is performed between the data transferred to IES and the modeled data in Revit to identify quality and completeness of the data transfer process. It is observed that IES successfully imports the geometry of elements and details of spaces defined in the building. But on the other hand, some of the information regarding shading elements, material and construction details, and thermal properties linked to space type are not successfully

transferred to IES. Similarly, certain space volume differences are found between BIM and simulation models.

Majorly there are some issues with Revit to import the data such as shading element, space types and schedules to IFC file format. This could be due to "export layer set" defined in Revit. This study concentrated on the definition of this export layer set according to data transfer requirements and also on the investigation of lack of entities in IFC for the energy simulation process. This study also concentrates on the failure of IES in case of importing material, construction details from IFC. Furthermore, the research is extended to data transfer activities related to structural analysis domain in terms of identifying the feasibility of adapting IFC for data transfer process between technical specialists in the respective domain.

References

Bahar, Y., Pere, C., Landrieu, J. and Nicolle, C. (2013), 'A Thermal Simulation Tool for Building and Its Interoperability through the Building Information Modeling (BIM) Platform'.

BuildingSMART (2016), 'IFC Introduction', https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/. Accessed: 29/07/2019.

ISO16739-1 (2018), *Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries – Part 1: Data schema*, ISO.

ISO29481-1 (2016), *Building information models - Information delivery manual – Part 1: Methodology and format*, ISO.

Karen M, K. and Douglas, N. (2014), *Building Information Modeling, BIM in Current and Future Practice*, John Wiley & Sons, Inc.

Menzel, K; Ploennigs, J. (2015), *Information Technology for Energy Systems in Buildings*, University College Cork, Cork.

Moon, H. J., Choi, M. S., Kim, S. K. and Ryu, S. H. (2011), 'Case Studies for the Evaluation of Interoperability between A BIM based Architectural Model and Building Performance Analysis Program', *International Building Performance Simulation Association* .

Wimmer, R., Frisch, J., van Treeck, C., Maile, T., Bazjanac, V., O'Donnell, J., Muhic, S. and Pinheiro, S. (2018), 'MVD based information exchange between BIM and building energy performance simulation', *Automation in Construction* **90**(February), 91–103.

Monitoring strategies for personalized heating, venti-lation, and air conditioning: A work in progress report

Everett M. Mthunzi[1] and Hayder Alsaad[2]
[1]Bauhaus University Weimar · Coudraystr. 7 · 99423 Weimar
E-Mail: mondliwethu.everett.mthunzi@uni-weimar.de
[2] Bauhaus University Weimar · Coudraystr. 13B · 99423 Weimar
E-Mail: hayder.alsaad@uni-weimar.de

Productivity and task performance are influenced by psycho-physiological sensations that a workforce may perceive, particularly in indoor workspace environments. Personal comfort in this regard plays an important role, contributing to comfort experienced by workspace occupants. To establish concepts that can guarantee optimal thermal conditions in indoor workspace environments, advancing monitoring strategies for personalized heating, ventilation, and air conditioning (HVAC) is essential. Monitoring environmental parameters in indoor workspace environments provides a basis for estimating the comfort occupants' experience. Although tried and true, traditional monitoring strategies are not prudent, neglecting personal comfort occupants may conceive, strictly regulating thermal environmen-tal workspace conditions based on predefined temperature and humidity set-points. The study presented in this paper introduces a work in progress, outlining a preliminary concept for implementing a HVAC monitoring strategy that considers personal comfort, being cost-effective and easy to adopt. The concept concentrates on personalized comfort monitoring, using Internet of Things to establish a strategy that holds, as part of its feature-list, the ability to learn and adapt to occupant preferences, i.e., a strategy that is adept to cloud computing.

Keywords: Heating, ventilation, and air conditioning (HVAC), Internet of Things (IoT), personalized comfort monitoring, cloud computing

1 Introduction

Personal comfort in indoor workspace environments is important for ensuring the psycho-physiological well-being of workspace occupants (Ferreira et al., 2012). Although there is no universally accepted definition for indoor workspace environmental comfort (Zhang et al., 2011), personal comfort influences workspace occupant productivity and task performance. Guo and Zhou (2009); Ying et al. (2011); Zhang et al. (2011) outline the importance of ideal indoor workspace environments, highlighting the key role that thermal comfort plays in influencing workspace occupants comfort. In this regard, a recourse to research related to heating ventilation and air conditioning (HVAC) systems is necessary to advance strategies for establishing sustainable comfortable working conditions.

HVAC systems consist of sensors and actuators, regulating thermal environmental parameters for indoor workspace zones of interest. HVAC-regulated environmental parameters include temperature, mean radiant temperature (MRT), air flow, and atmospheric humidity, with HVAC systems aiming toward facilitating ideal indoor conditions for workspace oc-

cupants. Research and development related to managing HVAC systems has led to development of building automation systems (Kastner et al., 2005). In building automation systems, automated supervisory control utilizes HVAC monitoring of workspace environmental parameters (Ying et al., 2011). Traditional building automation systems evaluate temperature and humidity, supervising control based on invariant temperature and humidity set-point parameters (Vastamäki et al., 2005; Kande et al., 2011).

Guo and Zhou (2009) have reported workspace occupants experiencing adverse environmental sensations resulting from inflexibility of invariant set points as a monitoring strategy. To address this limitation, Revel et al. (2015) have proposed a strategy for monitoring personalized thermal comfort (with focus on workspace environments), utilizing the predicted mean vote (PMV) as a basis for comfort estimation. PMV comfort estimation utilizes humidity, air temperature, MRT, and air velocity in addition to clothing level and metabolic rates to estimate how warm or cold occupants feel on a discrete scale from -3 to 3. In PMV-based comfort estimation, positive PMV values indicate occupants being warm, negative PMV values indicate occupants being cold, and near-zero PMV values indicating occupants experiencing thermal neutrality. With PMV as a basis for comfort estimation, Ferreira et al. (2012) take a step further, proposing neural network-based PMV estimation for predictive control of HVAC systems.

Despite the advances made in monitoring personalized comfort based on evaluation and assessment of PMV, no evidence exists indicating incorporation of such advances into existing proprietary HVAC management strategies. Despite the aforementioned inadequacies, building investors continue to rely on traditional, well-established, proprietary HVAC building automation systems. Therefore, to achieve HVAC control that can be easily adopted in practice, optimally effective monitoring strategies interoperable with proprietary systems need to be established. Research towards cost-effective and interoperable monitoring strategies for personalized environmental systems are essential to achieve effective comfort estimation and thermally ideal indoor workspace environments.

As a work in progress, the preliminary research presented in this paper considers a cost-effective strategy for monitoring personalized comfort, proposing Internet of Things (IoT)-enablement together with its benefits. The concept considers emergent non-proprietary sensors and microchip technologies (Guo et al., 2011). The remainder of this paper is structured as follows. In Section 2, the concept of Internet of Things (IoT) and cloud computing as a basis for an optimally efficient HVAC monitoring strategy is presented. Section 3 details initial considerations for developing the proposed smart-sensor HVAC data acquisition hardware system. Section 4 presents work in progress hardware development, showcasing a prototypical smart-sensor HVAC data acquisition hardware system. Finally, Section 5 concludes the paper, describing potential future work.

2 Internet of Things (IoT) and cloud computing as a basis for HVAC monitoring strategies

Following the identified non-interoperable disparity between state-of-the-art monitoring strategies and supervisory control for HVAC systems, this section outlines the conceptual monitoring strategy. The strategy proposes implementation of advent IoT and cloud computing technologies to address interoperability drawbacks, concluding the section with detailing the implementation methodology.

As a convention for most buildings, HVAC supervisory control is based on buildingwide proprietary monitoring systems. Despite sound advances, stakeholders remain reluctant to consider state-of-the-art monitoring strategies, defaulting to traditional proprietary buildingwide HVAC monitoring systems (Feldmeier and Paradiso, 2010). In this regard, non-interoperability is a major drawback that must be addressed to establish "end-to-end" HVAC monitoring and control strategies, where end-to-end refers to closed-loop automated monitoring and control of HVAC regulated parameters. Saltik and Zeitz (2018) evidence industrial building automation system manufacturing conglomerates looking to invest in end-to-end strategies and adopt IoT-enabled strategies. Siemens acquiring Comfy (a company that concentrates on end-to-end personalized comfort monitoring) indicates the industrial inclination towards interoperable HVAC personal comfort monitoring strategies. IoT and cloud computing as a basis for the proposed monitoring strategy are presented below.

2.1 IoT and cloud computing assignment

IoT has revolutionized communication and real-time monitoring for smart systems (Legatiuk et al., 2017; Smarsly et al., 2019), in addition to other benefits (Dragos and Smarsly, 2016), providing a basis for interoperable real-time supervision over proprietary and non-proprietary systems alike. Although advent non-proprietary HVAC monitoring strategies incorporate IoT technologies, the benefits of IoT remain limited to real-time communication and monitoring. To this effect, advances in non-proprietary HVAC monitoring strategies, being based on IoT alone, do not contribute toward automated supervisory control.

Beyond IoT-based cloud servers and storage, cloud computing offers a platform for an essential subsequent step, extending IoT-based monitoring strategies to enable automated real-time supervisory control. Cloud computing facilitates complex analysis of data on IoT-based cloud servers. This complex analysis characteristic enables implementation of emergent industrial automation techniques (e.g., machine learning) in real time.

2.2 Implementation methodology

Aiming towards establishing a monitoring strategy for HVAC that contributes towards end-to-end HVAC monitoring strategies, the proposed concept employs non-proprietary HVAC system hardware components, focusing on IoT enablement for interoperability and cloud computing for real-time automated supervisory control for HVAC systems. In addition to emphasis on accuracy, focus is placed on continuous and synchronous sensor data acquisition. As the first step towards developing a non-proprietary HVAC monitoring hardware system (for validating the proposed concept), Section 3 details selection criteria for cost-effective non-proprietary HVAC monitoring smart sensor hardware system.

3 Hardware design

A smart sensor-based hardware system is essential for data acquisition, i.e., recording of HVAC-regulated environmental parameters. For optimally effective HVAC monitoring, evaluation of proprietary and non-proprietary sensors is presented in this section. Accurate determination of PMV values and consequent comfort estimation is contingent on sensor specification. This section presents comparative analysis of proprietary and non-proprietary sensors, contrasting proprietary and non-proprietary sensors. With cost, rated accuracy, and digital interface as contrast criteria, this section presents considerations for evaluating PMV related environmental parameters. Tables [1-3] categorizes the evaluated sensor considerations.

Table 1 presents humidity sensors, the QFM2160 humidity sensor (manufactured by Siemens), a standard HVAC proprietary sensor, is contrasted against the SHT10 (manufactured by Sensirion) and the DHT22 (manufactured by Adafruit Industries) humidity sensors, which are low-cost non-proprietary sensors. Table 2 shows air velocity sensors: The TSI 9515 and E-AV-K HVAC proprietary air velocity sensors are contrast against the EE671, a low-cost non-proprietary sensor. Table 3 lists air temperature sensors: The X-DTHS-P, a standard proprietary HVAC air temperature sensor, is contrast against the BMP280 and DS18B20 low-cost non-proprietary sensors. For concision, other proprietary and non-proprietary sensors are not listed in the table. From the presented information, maximum marginal accuracy discrepancy between the standard proprietary sensors and a low-cost non-proprietary sensors can be deduced as follows:

- Humidity: ±1%
- Air velocity: ±0.485 m/s
- Air temperature: ±0.1 °C

Table 1: Comparative analysis of humidity sensors

Sensor	Classification	Estimated cost	Accuracy	DC interface
QFM2160	Proprietary	€ 229.00	± 3% RH	13 V to 35 V
SHT10	Non-proprietary	€ 53.49	± 3% RH	3.0 V to 5.5 V
DHT22	Non-proprietary	€ 3.88	± 2% RH	3.0 V to 5.5 V

Table 2: Comparative analysis of air velocity sensors

Sensor	Classification	Estimated cost	Accuracy	DC interface
TSI 9515	Proprietary	€ 609.33	±0.015 m/s	10 V to 29 V
E-AV-K	Proprietary	€ 370.98	±0.500 m/s	3.0 V to 5.5 V
EE671	Non-proprietary	€ 162.80	±0.500 m/s	10 V to 29 V

Table 3: Comparative analysis of temperature sensors

Sensor	Classification	Estimated cost	Accuracy	DC interface
X-DTHS-P	Proprietary	€ 71.95	±0.4 °C	3.0 V to 5.5 V
BMP280	Non-proprietary	€ 3.87	±1.0 °C	3.0 V to 5.5 V
DS18B20	Non-proprietary	€ 3.61	±0.5 °C	3.0 V to 5.5 V

For evaluating mean radiant temperature, a technique outlined by Thorsson et al. (2007) is to be adopted, implementing a flat black globe thermometer. The technique has been proven adequately accurate and cost-effective.

4 Prototypical PMV sensor system

This sections describes preliminary work in prototyping a smart-sensor hardware system, showcasing initial hardware development work. On-board system intelligence is embedded employing the MCU ESP8266 manufactured by Espressif Systems, a 32-bit reduced instruction set computer (RISC) microprocessor. The ESP8266 facilitates an IEEE 802.11 b/g/n Wi-Fi interface, a distinct feature having support for the full TCP/IP stack. As the proposed monitoring strategy is based on IoT and cloud computing, the inherent Wi-Fi complex interface provides significant benefit. Figure 1 illustrates initial hardware prototyping based on the MCU ESP8266 manufactured by Espressif Systems, deploying the DHT22 and the BMP280, both manufactured by Adafruit Industries.

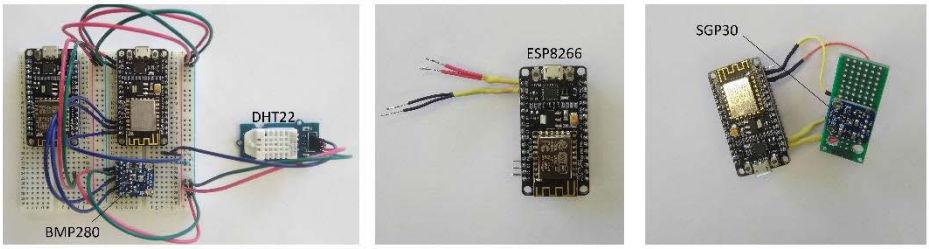


Figure 1: Initial microcontroller-based embedded development

5 Summary and conclusions

In this paper, preliminary work towards establishing a sound monitoring strategy for personalized HVAC has been presented. Initial design considerations have been outlined, highlighting the benefits of incorporating IoT and cloud computing technologies. As potential future work, ongoing work will focus on establishing accurate data acquisition, efficient data processing, and implementation of cloud computing to facilitate complex data analysis.

6 Acknowledgements

This research is partially supported by the German Research Foundation under grant SM 281/12-1 and by the German Federal Ministry of Transport and Digital Infrastructure under grant VB18F1022A. Major parts of this work have been conducted in the “Structural Health Monitoring Laboratory”, sponsored by the European Union through the European Fund for Regional Development (EFRD) and the Thuringian Ministry for Economic Affairs, Science and Digital Society (TMWWDG) under grant 2016 FGI 0009.

References

Dragos, K. and Smarsly, K. (2016). Distributed adaptive diagnosis of sensor faults using structural response data. Smart Materials and Structures 25(10), 105019.

Feldmeier, M. and Paradiso, J. A. (2010). Personalized HVAC control system. In: Proceedings of the IEEE Internet of Things. Tokyo, Japan, 11/29/2010.

Ferreira, P. M., Silva, S. M., Ruano, A. E., Négrier, A. T. and Conceição, E. Z. (2012). Neural network PMV estimation for model-based predictive control of HVAC systems. In: Proceedings of the IEEE International Joint Conference on Neural Networks. Brisbane, Australia, 10/06/2012.

Guo, H., Low, K. S. and Nguyen, H. A. (2011). Optimizing the localization of a wireless sensor network in real time based on a low-cost microcontroller. IEEE Transactions on Industrial Electronics 58(3), 741-749.

Guo, W. and Zhou, M. (2009). Technologies toward thermal comfort-based and energy-efficient HVAC systems: A review. In: Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics. San Antonio, TX, USA, 11/10/2009

KaJ., Ray, A. and Narayanan, V. (2011). Energy efficient environment control system using wireless condition monitoring. In: Proceedings of the IEEE 8th International Conference and Expo on Emerging Technologies for a Smarter World. New York, NY, USA, 02/11/2011.

Kastner, W., Neugschwandtner, G., Soucek, S. and Newman, H. M. (2005). Communication systems for building automation and control. Proceedings of the IEEE 93(6), 1178-1203.

Legatiuk, D., Dragos, K. and Smarsly, K. (2017). Modeling and evaluation of cyber-physical systems in civil engineering. Proc. Appl. Math. Mech. 17(1), 807-808.

Revel, G. M., Arnesano, M. and Pietroni, F. (2015). A Low-Cost Sensor for Real-Time Monitoring of Indoor Thermal Comfort for Ambient Assisted Living. Boca Raton, Florida, USA, CRC Press.

Saltik, A. and Zeitz, N. (2018). Workplace app Comfy joining Siemens to create personalized and responsive buildings. Online available: https://www.siemens.com/press/en/feature/2018/buildingtechnologies/2018-06-building-robotics.php?content[]=BT (Accessed: June 14, 2019).

Smarsly, K., Fitz, T. and Legatiuk, D. (2019). Metamodeling wireless communication in cyber-physical systems. In: Proceedings of the 26th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. Leuven, Belgium, 06/30/2019.

Thorsson, S., Lindberg, F., Eliasson, I. and Björn, H. (2007). Different methods for estimating the mean radiant temperature in an outdoor urban setting. International Journal of Climatology 27(14), 1983-1993.

Vastamäki, R., Sinkkonen, I. and Leinonen, C. (2005). A behavioural model of temperature controller usage and energy saving. Personal and Ubiquitous Computing 9(4), 250-259.

Jazizadeh, F., Kavulya, G., Klein, L, Jin, Y., Becerik-Gerber, B. (2011). Continuous sensing of occupant perception of indoor ambient factors. In: Proceedings of the 2011 ASCE International Workshop on Computing in Civil Engineering. Miami, FL, USA, 06/22/2011.

Zhang, H., Arens, E. and Pasut, W. (2011). Air temperature thresholds for indoor comfort and perceived air quality. Building Research and Information 39(2), 134-144.

Workflow-Engine zur Optimierung komplexer Ingenieuraufgaben

Michael Polter
Institut für Bauinformatik · Technische Universität Dresden · Nürnberger Str. 31a · 01062 Dresden ·
E-Mail: Michael.Polter@tu-dresden.de

Am Institut für Bauinformatik der TU Dresden wurde eine intelligente Workflow-Engine zur automatisierten Ausführung komplexer Workflows unter Nutzung bereits vorhandener, heterogener Software und verteilter Hardware-Infrastruktur entwickelt. Sie ermöglicht die Automatisierung von Prozessen verschiedenster Aufgabenbereiche, wie beispielsweise der Entwurfsoptimierung oder der kontinuierlich aktualisierten Vorhersage über Schadensausbreitung an Bauwerken. Dadurch wird eine wichtige Voraussetzung für die Einführung verbesserter Methoden zur Entwurfsoptimierung und Bauwerksüberwachung durch automatisierte Kombination von Werkzeugen in komplexen Workflows geschaffen.

Keywords: Cloud, Grid, ICDD, Workflow Engine, virtuelles Labor

1 Einleitung

Sowohl die Optimierung von Gebäudeentwürfen durch Systemidentifikationen als auch die intelligente Langzeitüberwachung bestehender Gebäude sind nach wie vor aufwändige Verfahren, die eine Vielzahl von Arbeitsschritten beinhalten. Dabei kommt unterschiedliche Software für die Vorverarbeitung bzw. Generierung der numerischen Bauwerksmodelle, die Simulation und die Nachbearbeitung der Berechnungsergebnisse zum Einsatz. Für einige dieser komplexen Problemstellungen existieren kombinierte Software-Werkzeuge, die jedoch meist von einem einzelnen Anbieter stammen und in Form komplexer Software-Suiten gerade für KMU (kleine und mittlere Unternehmen) hohe Investitionen bei der Beschaffung bzw. unüberschaubare laufende Lizenzkosten verursachen. Ingenieurbüros besitzen jedoch normalerweise ein aufgabenorientiertes, über die Zeit gewachsenes Repertoire an Spezialwerkzeugen unterschiedlicher Anbieter, was eine manuelle und somit fehleranfällige Abarbeitung aufeinanderfolgender Arbeitsschritte durch den Ingenieur notwendig macht.

Mit zunehmender Unterstützung des BIM-Prozesses durch Unternehmen und Software werden außerdem neue standardisierte Formate zum Datenaustausch benötigt. Der ISO Standard 21597 für Information Containers for Data Delivery (ICDD), umgangssprachlich als „Multimodell“ bezeichnet, definiert bereits heute ein standardisiertes Datenaustauschformat zwischen Ingenieuren bzw. Software-Werkzeugen.

Das Konzept des *virtuellen Labors* soll Unternehmen unterstützen, indem unter anderem Ingenieurprozesse unter Nutzung des bereits vorhandenen Bestandes an Hardware und Software automatisiert und optimiert werden. In diesem Paper wird die Workflow-Engine als zentraler Bestandteil des Virtuellen Labors beschrieben. Sie führt vordefinierte, aus den Unternehmensprozessen abgeleitete Workflows aus und automatisiert die Daten- und Kontrollflüsse zwischen den integrierten Software-Komponenten. Damit wird nicht nur die

Ausführungszeit von Prozessen, sondern auch die Fehleranfälligkeit durch menschliche Eingaben verringert. Das Rest des Papers ist wie folgt gegliedert: Abschnitt 2 beschreibt die Funktionsweise der Workflow Engine. Dazu wird zunächst auf die Formalisierung von Workflows und anschließend ihre Interpretation und Ausführung eingegangen. Darauf folgt die Beschreibung der Integration von Dritt-Software und Hardware, wobei technische Details der Workflow Engine aufgrund des beschränkten Umfangs des Papers ausgespart werden. In Abschnitt 3 wird abschließend eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf geplante Weiterentwicklungen gegeben.

2 Workflow Engine für virtuelles Labor

Die entwickelte Workflow-Engine ist ein Werkzeug für Software-Entwickler, um kostengünstige, an die spezifischen etablierten Prozesse eines KMU angepasste Software-Lösungen zu erstellen. Sie ist keine Software-Anwendung, welche direkt durch die Ingenieure genutzt wird, sondern immer als Bestandteil eines größeren Systems (virtuelles Labor) zu sehen, welches baukastenartig durch einen beauftragten Entwickler erstellt wird (Polter & Scherer, 2018).

Das virtuelle Labor ist ein Konzept für eine web-basierte Ingenieurplattform für KMU im Bauwesen, deren Ziel die effizientere Gestaltung bzw. Unterstützung typischer Prozesse während des gesamten Gebäudelebenszyklus ist. Dies soll erreicht werden durch die Bereitstellung einer Browser-basierten grafischen Benutzungsoberfläche, mit deren Hilfe der Ingenieur online, standort- und endgeräteunabhängig, auf verschiedene Werkzeuge zugreifen kann. Die Rechenlast wird dabei transparent für den Nutzer auf Netzwerkressourcen verteilt und belastet nicht das Endgerät. Im Gegensatz zum ONELAB (Geuzaine et al., 2013) ermöglicht eine zentrale Datenbasis nicht nur die Automatisierung sich wiederholender Prozesse unter Einbeziehung mehrerer Software-Produkte, sondern auch einen einfachen Datenaustausch zwischen verschiedenen Akteuren eines Prozesses. Detailliertere Informationen zu einer Beispielimplementierung des virtuellen Labors sind unter Polter et al., 2016 zu finden.

2.1 Workflow-Beschreibung

In der Praxis ist die Arbeit von Ingenieuren geprägt durch sich immer wiederholende Problemstellungen, wie z.B. Statikberechnungen, thermische Simulationen oder Strömungssimulationen. Werden diese allgemeinen Problemstellungen verfeinert, bilden sie die Arbeitsprozesse eines Ingenieurbüros und darin enthaltene Elementaraufgaben ab.

Die Aufgabe des beauftragten Entwicklers ist die Abbildung der einzelnen Aufgaben dieser Unternehmensprozesse in abstrakte Workflows.

Die Engine stellt hierfür eine vordefinierte Auswahl allgemeiner Workflow Steps zur Verfügung, aus denen der Entwickler den Workflow zusammensetzen kann. Abstrakte Workflows bestehen aus der Aneinanderreihung von Dateneingabe, Rechenoperationen, Datenspeicherung und Datenausgabe, wobei die einzelnen Schritte 0 bis n mal und in unterschiedlicher Reihenfolge vorkommen können.

Die im Folgenden erläuterten abstrakten Worfkflow Steps kapseln jeweils wiederum selbst atomar ablaufende, automatisierbare Prozesse:

- **Dateneingabe-Prozesse** lösen einen entsprechenden Nutzerdialog aus, in welchem der Nutzer zum Upload oder der Auswahl bestimmter Dateneingaben oder zur Spezifikation von Steuerungsinformationen aufgefordert wird. Diese Schritte stehen meist am Anfang eines Workflows oder unterbrechen die automatische Ausführung des Workflows entsprechend. Daten können in Form von Multimodellen (ICDDs) bereitgestellt werden, zu deren Interpretation die Workflow-Engine das am Institut für Bauinformatik der TU Dresden entwickelte ICDD-Framework nutzt.
- **Datenspeicherungs-Prozesse** bestehen aus den Teilaufgaben I) Ansteuerung der Datenbank, II) Authentifikation, III) optional Konvertierung der Daten in ein bestimmtes Format, IV) Definition und Ausführung der Datenbankoperation, V) Überprüfung des Erfolgs und ggf. automatische Wiederholung der Schritte II) – V) bei Misserfolg. Alle diese Einzelschritte können abstrakt definiert und automatisch ausgeführt werden. Der Entwickler muss hierfür lediglich den Datenbankadapter zur Verfügung stellen, welcher die konkrete API der verwendeten (relationalen) Datenbank kapselt. Für die meisten Datenbankimplementierungen stehen hierfür vorgefertigte Bibliotheken zur Verfügung, die nur noch integriert werden müssen.
- **Berechnungs-Prozesse** kapseln die Berechnung/Simulation eines bestimmten Problems. Dafür verwendet das Unternehmen i.d.R. bereits erworbene Software-Produkte, welche auf die Lösung eines bestimmten Problems spezialisiert sind. Diese Software soll nun in den entsprechenden Workflow Steps automatisch aufgerufen und ausge-führt werden. Dafür spezifiziert der Entwickler sogenannte *Engines*, welche einen Verbund aus verfügbarer Hardware (z.B. Computer im lokalen Netzwerk, Cloud-Ressourcen) und darauf installierter Software repräsentieren. Jedem Berechnungs-Workflow Step wird nun eine dieser *Engines* zugeordnet, wobei darauf zu achten ist, dass diese auch die für die Berechnung notwendige Dritt-Software enthält. Beispiele für die Definition solcher Engines werden in Abschnitt 2.4 gegeben. Berechnungs-Steps können aber auch die Aggregation, Filterung oder automatische Auswertung ei-ner Menge von Berechnungsergebnissen repräsentieren. Wird dazu keine externe Software benötigt, so werden die notwendigen Operationen automatisch auf die zur Verfügung stehende Hardware-Infrastruktur verteilt.
- **Datenausgabe-Prozesse** stellen bestimmte Daten gemäß des modellierten Prozesses für den Nutzer bereit, entweder durch visuelle Darstellung oder zum Download.

Diese o.g. Teilprozesse können nun vom Entwickler zu beliebigen Workflows zusammengesetzt werden. Derzeit wird dies noch über die Implementierung einer entsprechenden Java-Klasse realisiert, die eine Schablone für die Erstellung eines Workflows-bietet. Dazu werden Objekte der vorgefertigten (oder selbst implementierten) Workflow Steps erstellt und mit Hilfe ihrer Methoden konfiguriert (z.B. Angabe der Engine bei Berechnungs-Steps bzw. der Zieldatenbank bei Datenspeicherungsprozessen). Anschließend werden Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Schritten durch die Angabe von Vorgänger(n) und Nachfolger(n) bestimmt.

In zukünftigen Versionen bekommt zunächst der Entwickler und später auch der Ingenieur die Möglichkeit, Workflows über eine grafische Oberfläche zusammensetzen.

2.1.1 Generierung von Eingabedaten

Oftmals beinhalten Prozesse zur Bauwerksplanung, Optimierung und Überwachung Parameterstudien bzw. Systemidentifikationen, welche mit Hilfe von Massensimulationen durchgeführt werden. Parametrisierte Ausgangsmodelle werden hierbei durch die Änderung einzelner Parameterwerte variiert und anschließend beispielsweise Statik oder Strömungen simuliert, um die ideale Wertebelegung zu ermitteln. Die einzelnen Modellkandidaten werden bisher vom Ingenieur per Hand erzeugt und sequentiell berechnet, was die Anzahl der Kandidaten und folglich die Genauigkeit der Ergebnisse sehr eingeschränkt.

Die entwickelte Workflow-Engine unterstützt die nutzerfreundliche Generierung und verteilte Berechnung von Modellkandidaten, indem die Parametervariationen in einem einzigen Modell (*Variationsmodell*) definiert und die einzelnen Modellkandidaten daraus automatisch erzeugt werden. Eine ausführliche Beschreibung das Variationsmodells und Generierungsprozesses sprengt den Rahmen dieses Artikels und wird in zukünftigen Veröffentlichungen beschrieben. Eine erste Version des Variationsmodells für IFC-Modelle wird in Luu et al., 2018 beschrieben.

2.2 Workflow-Interpretation

Die abstrakten Workflow-Beschreibungen werden im nächsten Schritt durch die Engine in Ausführungs-Workflows überführt (Abb. 1). Die Aufgabenbeschreibungen der einzelnen Workflow Steps werden hierbei in konkrete, durch Software ausführbare Jobs gekapselt, die dann von den entsprechenden Komponenten der Workflow-Engine bearbeitet werden. Solche Jobs umfassen beispielsweise die Extraktion / Integration von Daten aus / in Multimodelle(n) durch die auf dem ICDD-Framework basierende Multimodell-Engine, die Erstellung von Batch-Dateien für die Modellberechnung mit Dritt-Software durch die entsprechenden Adapter bis hin zur Verteilung der Jobs und Übertragung der Eingabe- / Ausgabedaten auf die entsprechende Ziel-Hardware. Die Unterstützung von Multimodel-len zur Übertragung von Daten nach dem ISO Standard 21597-1 ist insofern vorteilhaft für die Integration externer Software-Werkzeuge, da diese voraussichtlich in Zukunft vermehrt Importschnittstellen für das standardisierte Format zur Verfügung stellen werden. Dies macht die Adaption von Drittsoftware-APIs für den Entwickler um ein vielfaches einfa-cher, da der gesamte Prozess auf eine einzige, permanent aktualisierte Datenstruktur zugrei-fen kann. Derzeit werden Multimodelle jeweils spezifisch für verschiedene Aufgaben er-stellt und lediglich zur Datenübertragung genutzt. Sollte zukünftig im Zuge der Weiterentwicklung des Standards sowie von Software-Werkzeugen auch eine Persistierung von Daten in Multimodellen sinnvoll sein, so kann diese durch Erstellung eines entsprechenden Workflow-Steps realisiert werden. Hierbei ist jedoch auf potentielle Inkonsistenzen durch konkurrierenden Zugriff parallel ausgeführter Prozesse auf ein Multimodell zu achten.

2.3 Workflow-Ausführung

Auf Basis der spezifizierten Abhängigkeiten der Workflow Steps, führt die Workflow-Engine die einzelnen Schritte automatisch aus. Unterbrochen wird diese Ausführung nur dann, wenn eine manuelle Eingabe durch den Nutzer erforderlich ist, ein Workflow Step aufgrund eines Fehlers nicht ausgeführt werden kann oder der Nutzer die Ausführung manuell unterbricht.

Die Berücksichtigung von Abhängigkeiten zwischen Vorgänger- und Nachfolger-Jobs erfolgt über das Observer-Entwurfsmuster. Die einzelnen Workflow Steps registrieren sich

als *Observer (Beobachter)* bei ihrem Vorgänger. Ist ein Workflow Step beendet, so gibt er dies in Form eines „*Finished*"-Events bekannt, welches von den nachfolgenden Steps (den *Beobachtern*) registriert wird und ihre Abarbeitung auslöst. Hat ein Workflow Step mehrere Vorgänger, so wird bei der Registrierung des „*Finished*"-Events eines Vorgängers zunächst der Status der anderen Vorgänger überprüft. Die Ausführung beginnt erst dann, wenn alle Vorgänger erfolgreich beendet sind. Haben mehrere Workflow Steps exakt den gleichen Vorgänger, so werden sie durch die Workflow Engine durch Verteilung auf die zur Verfügung stehende Hardware parallel ausgeführt, was die Gesamtbearbeitungszeit des Workflows reduziert.

Abbildung 1 zeigt die Überführung eines abstrakt beschriebenen Prozesses durch den Entwickler zunächst in eine abstrakte Workflow-Spezifikation, welche dann durch Konfiguration der einzelnen Schritte (durch Zuordnung der jeweiligen Engine) zur einem konkreten Ausführungs-Workflow wird. Hierbei wird deutlich, dass abstrakte Prozess-Schritte auf mehrere konkrete Workflow-Schritte abgebildet werden können. Werden beispielsweise durch einen Prozess-Schritt Daten erzeugt, so wird nach dem zugeordneten Berechnungs-Schritt jeweils noch eine Datenspeicherungsaktion zur Persistierung der erzeugten Daten ausgeführt.

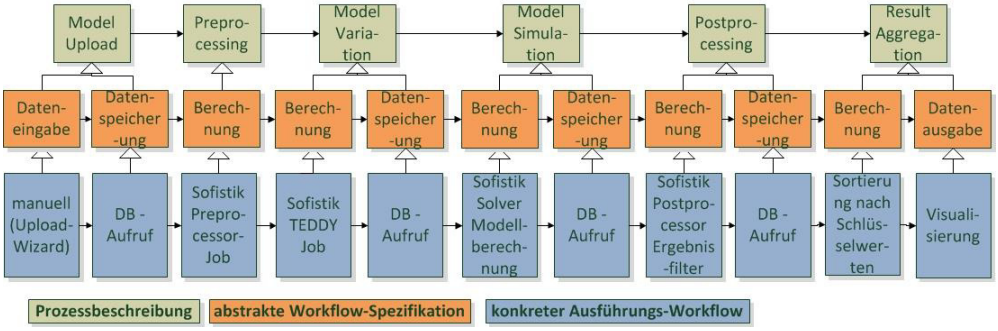


Abbildung 1: Überführung einer abstrakten Prozessbeschreibung in einen ausführbaren Workflow

2.4 Integration von Dritt-Software und Hardware

Externe Software-Werkzeuge werden durch die Engine über Batch-Dateien ausgeführt, welche die entsprechenden Kommandozeilenbefehle enthalten. Diese werden in Adapterkomponenten erzeugt, welche die Kommandozeilen-API der Software beinhalten. Die Batch-Dateien werden dann zusammen mit den Eingabedateien auf die Ziel-Hardware der gewählten Engine übertragen und dort ausgeführt. Die Ansteuerung verteilter, heterogener Hardware wird über integrierte Middleware realisiert, welche ebenfalls mit Hilfe von Adaptern angesteuert wird.

Sowohl Software- als auch Hardware-Adapterkomponenten sind Prozess- und aufgabenunabhängig und können somit in verschiedenen Workflows wiederverwendet werden. Der Prototyp der Workflow-Engine wird mit bereits vorgefertigten Adapterkomponenten ausgeliefert für:

- Hardware
  - UNICORE[1] Middleware für ein privates Grid aus lokalen Computern
  - jClouds[2]-basierter Adapter für die Nutzung von Public Cloud (derzeit konfiguriert für Amazon Web Services)
  - VTLS-Plattform[3] zur Ausführung von strukturellen Analysen
- Berechnungs-Software
  - Sofistik[4]
  - Atena[5]
- Datenbank
  - HSQLDB[6] als Adapter für eine relationale Datenbankimplementierung

Weitere Software kann durch den Entwickler durch die Definition einer neuen Engine und die Implementierung einer entsprechenden Adapterkomponente integriert werden. Um die Kompatibilität der Adapter mit der Engine zu gewährleisten, werden Adapterschablonen bereitgestellt, welche die Signaturen zu implementierender Methoden vorgeben, die dann vom Entwickler mit dem API-spezifischen Code der Fremd-Software gefüllt werden müssen (Abbildung 2).

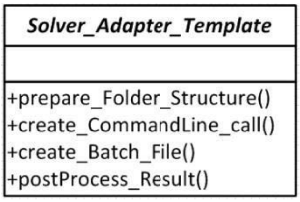


Abbildung 2: Java-Schablone für Solver Adapter mit den zugehörigen Methodensignaturen

Die Auswahl vorgefertigter Adapter wird im Rahmen unserer Forschungsprojekte stetig erweitert. Abbildung 3 zeigt die Einbettung der Workflow Engine in den Orchestration Manager und die Interaktion mit anderen Komponenten des virtuellen Labors. Die *external components* bezeichnen hierbei Komponenten des virtuellen Labors, die je nach verwendeter Hardware bzw. Datenverwaltungslösung transparent für die Workflow Engine austauschbar sind. Die Workflow Engine ist in Java implementiert und daher prinzipiell betriebssystemunabhängig. Die Adapter-Templates sind derzeit für MS Windows ausgelegt, da die überwiegende IT-Infrastruktur in KMU über dieses Betriebssystem verfügt und somit als verteiltes Berechnungs-Backend für die Workflow Engine genutzt werden kann. Verwendete Dritt-Software muss derzeit über die Windows-Kommandozeile steuerbar sein, um durch die Workflow Engine angesteuert werden zu können. Eine Migration auf UNIX ist durch den Austausch der Adapterkomponenten möglich.

[1] https://www.unicore.eu/

[2] https://jclouds.apache.org/

[3] http://vtls.cervenka.cz/

[4] https://www.sofistik.com/

[5] https://www.cervenka.cz/products/atena/

[6] http://hsqldb.org/

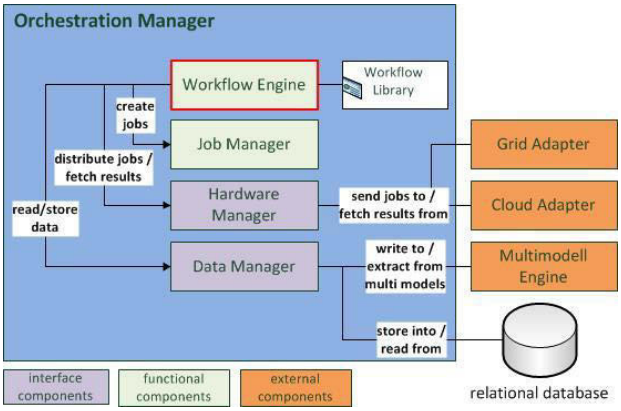


Abbildung 3: Einbettung und Interaktion der Workflow Engine mit anderen Komponenten des virtuellen Labors

2.5 Anwendung der Workflow Engine zur Brückenüberwachung

Die entwickelte Workflow Engine kommt u.a. im Projekt „*cyberBridge: BIM-basiertes cyberphysikalisches System zur Brückenbeurteilung*“ zum Einsatz. Abbildung 4 zeigt den vereinfachten Prozess der kontinuierlichen Brückenüberwachung in diesem Projekt und verdeutlicht das Automatisierungspotential der kontinuierlich ausgeführten Prozessschritte .

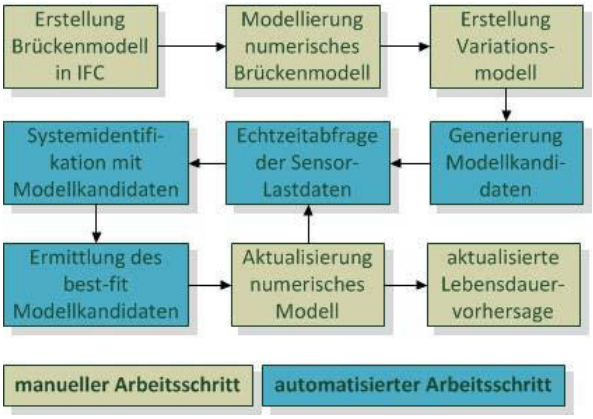


Abbildung 4: Automatisierung der Echtzeit-Brückenüberwachung

3 Zusammenfassung und Ausblick

Unterstützung und Optimierung der Ausführung von Ingenieuraufgaben durch Automatisierung bei gleichzeitiger Erhaltung der Wettbewerbsfähigkeit ist eine wichtige Voraussetzung für die Einführung neuer Methoden in jedem Abschnitt des. Viele davon existieren

seit langem in der Theorie, waren aber bisher aufgrund der Komplexität bei manueller Ausführung zu teuer und fehleranfällig. Die in diesem Paper vorgestellte Workflow Engine unterstützt im Rahmen des virtuellen Labors KMU im Bauingenieurwesen bei der Ausführung komplexer Workflows unter Verwendung bereits vorhandener Software- und Hardware-Ressourcen. Sie bietet dem Ingenieur nicht nur Möglichkeiten zur Generierung von Eingabedaten, sondern erlaubt auch eine automatische Persistierung der im Prozess entstehenden Daten. Multimodelle nach ISO 21597 zum Datenaustausch werden bereits unterstützt, was zukünftig einen Vorteil für die Kompatibilität mit neuen Software-Produkten und damit der Akzeptanz der Workflow-Engine und des virtuellen Labors insgesamt darstellt.

Forschungsschwerpunkte sind derzeit vor allem die effizientere Nutzung von Multimodellen durch eine automatisierte Erstellung von Links zwischen Elementarmodellen eines ICDD. Weiterhin soll die Akzeptanz der Workflow Engine durch eine vereinfachte Bedienung bzw. Konfiguration erhöht werden. Die derzeitige Modellierung eines Workflows über Java-Klassen soll abgelöst werden durch einen grafischen Editor, der das Zusammensetzen und die Konfiguration der einzelnen Schritte wesentlich erleichtert.

Acknowledgements

Die in diesem Paper beschriebene Forschung wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung als Teilprojekt „*BIM- und wissensbasiertes Framework für Brückenbeurteilung*“ (Kennzeichen 01QE1712C) des Forschungsprojektes „*E – cyberBridge: BIM based Cyber-physical System for Bridge Assessment*“ gefördert.

Literatur

Geuzaine, C., Henrotte, F., Remacle, J. F., Marchandise, E., Sabariego, R. (2013). ONELAB: Open Numerical Engineering LABoratory, In: Proceedings of the 11th Collo-que National en Calcul des Structures, 2013, Giens, Frankreich.

Luu, N. T., Hamdan, A., Polter, M., Mansperger, T., Scherer, R. J.: A Variation Model Method for Real Time System Identification in Bridge Health Monitoring, In: Proceedings of the IABSE 2018 Copenhagen, Juni 25-27 2018, Kopenhagen, Dänemark.

Polter, M., Scherer, R. J., 2018. Towards the application of the BIMgrid Framework for Aged Bridge Behavior Identification, In: Proceedings of the 12th European Conference on Product & Process Modelling (ECPPM 2018), September 12-14, Kopenhagen, Dänemark.

Polter, M., Ismail, A., Scherer, R. J., Grille, T., Hamdan, A., Luu, N. T. 2016. Virtuelles Ingenieurlabor – SOAbasiertes Informationssystem zur Integration von Grid-/Cloud Rechenleistung und BIM Informationsmanagement, Projektbericht, Technische Informationsbibliothek (TIB). Verfügbar auf: https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A872575926/Schlussberichtzum-Vorhaben-Virtuelles-Ingenieurlabor/. Letzter Zugriff: Dezember 2017.

Ein Vergleich von LoD-Konzepten im Infrastrukturbau

Andreas Fehrenbach[1] and Štefan Jaud[2]

[1]WTM Engineers GmbH · Johannisbollwerk 6-8 · 20459 Hamburg · Germany · a.fehrenbach@wtm-hh.de

[2]Chair for Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: ga24yuk@mytum.de

Level of Development (LoD)-Konzepte bilden eine bedeutsame Kommunikationsgrundlage für die am Building Information Modeling (BIM)-Projekt beteiligten Personen. In diesem Artikel werden je ein Konzept für Brücken-, Straßen-, Tunnel- und Schleusenbauwerke verglichen. Eine Vielzahl an Eingriffen in die BIMForum-Referenzstruktur erschweren die Anwendbarkeit, da Projektbeteiligte eine große Anzahl unterschiedlicher Ansätze verstehen müssen. Eine Verbindung der LoD zu den Leistungsphasen (LPH) wird kritisch gesehen, da dadurch sogenannte LoD-###-Modelle entstehen. Ohne präzise Festlegung der Attributbestimmung wird eine Überladung des Modells mit nicht benötigten Informationen gefördert. Zudem wird eine eindeutige Abgrenzung der Begriffe LoD und Level of Geometry (LoG) empfohlen, um eine Vermischungen der ursprünglichen Definitionen auszuschließen. Insgesamt wird erkannt, dass LoD-Konzepte im Infrastrukturbau noch mehr Aufmerksamkeit erfordern, da noch kein einheitliches Verständnis vorliegt.

Keywords: BIM, LOD-Konzept, LOD, LOG, LOI, Infrastruktubau, BIM-Anwendungsfälle

1 Einleitung

Hausknecht and Liebich (2016) erkannten, dass der zielorientierte Austausch von Bauwerksinformationen mit Hilfe von Building Information Modeling (BIM)-Modellen nur dann missverständnislos erfolgen kann, wenn alle Projektbeteiligten eine einheitliche Sprache sprechen. In Bezug auf den Informationsgehalt von digitalen 3D-Modelle erfolgt die Kommunikation unter Hinzunahme sogenannter Level of Development (LoD)-Konzepte zur Beschreibung des geometrischen und semantischen Modellinhalts. Konzepte dieser Art stellen eine bedeutsame Kenngröße zur Bestimmung des zu erbringenden Leistungsumfanges innerhalb der BIM-Anwendung dar. Zusätzlich informieren die Konzepte den Modellempfänger über die Zuverlässigkeit der übermittelten Informationen und der daraus resultierenden Möglichkeiten zur Verwendung des BIM-Modells. Die BIM-Methode steckt im Infrastrukturbau noch in der Findungsphase, sodass bereits LoD-Konzepte entwickelt wurden, die sich aber in ihren Ansätzen unterscheiden. Der vorliegende Beitrag befasst sich mit den Vor- und Nachteilen bestehender Konzepte.

2 Grundlagen

Der Grundgedanke der LoD entstand beim Softwarehersteller Vico Software, der im Jahr 2004 nach einem Weg suchte, die Vollständigkeit und Verlässlichkeit von digitalen Bauwerksmodellen mitzuteilen (Bedrick, 2008). Mithilfe von LoD wird der steigende Informationsgehalt entlang des Designprozesses eines Modellelements in sechs Leveln von LoD100–500

beschrieben (BIMForum, 2018). Die geringste Modellierungstiefe ist das LoD100. Die digitale eins-zu-eins-Nachbildung des in der Realität gebauten Gebäudes erhält dagegen den höchsten Modellierungsgrad LoD500 (as-built Zustand). Nach Definition von BIMForum (2018) erfolgt der Levelaufbau konsistent, d. h. jedes höhere Level enthält alle Informationen der vorherigen Level. Für die Definitionen der LoD wird auf die aktuelle LOD-Specifiaction des BIMForum (2018) verwiesen.

Bei der Beschreibung des Informationsgehalt wird zwischen dem geometrischen und semantischen Detaillierungsgrad unterschieden. Der geometrische Detaillierungsgrad wird mit Level of Geometry (LoG) bezeichnet; der Input an semantischen Informationen mit Level of Information (LoI) (Hausknecht and Liebich, 2016). Level of Information (LoI) beschreiben Informationen, die nicht geometrischer Natur sind, sondern bspw. alphanumerisch wie die Betonfestigkeitsklasse. Die Projektspezifität, das jeweilige Fachmodell und die Anwendungsfälle (AwF) üben unter anderem Einfluss auf die notwendige Informationstiefe eines Modellelements aus. Im Gegensatz zum LoG wird eine generische Abstufung der LoI selten vorgenommen und die Attribute bspw. in Form von Attribut-Tabellen festgelegt.

BIM4INFRA2020 (2017) definiert zwanzig AwF, die beschreiben, auf welche Weise und zu welchem Zweck BIM-Modelle im Projekt genutzt werden. Die ergebnisbezogene Formulierung unterstützt die Identifikation der geforderten Leistung und korreliert daher mit den LoG und LoI. Mit AwF können die Kernprozesse der Projektrealisierung definiert und anschließend auf das modellbasierte Arbeiten übertragen werden. Bspw. benötigt eine Visualisierung weniger semantische Informationen als eine Kostenberechnung. Demgegenüber stellt die Ableitung von Ausführungsplänen große Anforderungen an die geometrische Detaillierung. Die AwF üben somit einen erheblichen Einfluss auf den geometrischen und semantischen Informationsgehalt aus.

3 Vorstellung verschiedener Konzepte für Infrastrukturprojekte in Deutschland

Es werden vier Konzepte aus dem Infrastrukturbau vorgestellt, die in den letzten drei Jahren in Deutschland in Masterarbeiten erarbeitet wurden. Tabelle 1 gibt einen Überblick über die vier vorgestellten Konzepte. In den genannten Veröffentlichungen wird die LoD-Specification des BIMForum (2018) als Referenz angegeben. Innerhalb der Konzepte werden unterschiedliche Ansätze zur Beschreibung des Modellinhalts verfolgt.

In BIMForum (2018) richtet sich die Beschreibung der LoD auf das Bauwerksmodell und einzelne Bauteile bzw. Elemente aus. Dieser Ansatz wird als *elementbezogener Ansatz* bezeichnet.

In Deutschland verfolgen verschiedene Autoren (vgl. Verband Beratender Ingenieure (2016); Goldenbaum (2017); Papantonakis (2018)) das Ziel, die internationale LoD-Struktur dem deutschen Preisrecht nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) anzupassen. Mit einer eins-zu-eins-Zuordnung der LoD zu den Leistungsphasen (LPH) erhalten alle Elemente eines Modells und innerhalb einer LPH den gleichen Detaillierungsgrad, so-

Tabelle 1: Gegenüberstellung der unterschiedlichen Konzepte.

Veröffentlichung	Veränderung gegenüber der BIMForum Referenzstruktur (2018)	Konzept definiert für:	Zuordnung LOD zu LPH	Attributbestimmung	Definition des LOD
Mini (2016)	LOG 100 erfordert kein BIM-Modell; kein LOG 350; zusätzliches LOG 450 für Fertigbauteile	elementbezogen für Bauteile des Brückenbaus	Orientierungswerte	elementbezogen über LOG und AwF	LOD = LOG + LOI; LOD ist „wie überlegt Verknüpfung zwischen LOG und LOI ist“
Goldenbaum (2017)	kein LOD 200	Fachmodelle des Straßenbaus	ja	nicht vorgenommen	LOE = LOG + LOI; LOD bleibt bestehen
Papantonakis (2018)	zusätzliches LOG 0; kein LOD 350	Bereichsmodell für Querschnitt Tunnelbauwerk	ja	bereichsmodellbezogen über LPH, AwF und LOG	LOD = LOG + LOI; keine Abgrenzung
Fehrenbach (2018)	keine Veränderungen	elementbezogen für Bauteile des Schleusenbaus; Zusammenfassen von Bauteilen im LOG 100–200 zu Bauteilgruppen	nein	elementbezogen über AwF und LPH	LOD, LOG und LOI werden gesondert betrachtet

Tabelle 2: Schematische Darstellung der Attribut-Tabelle nach Mini (2016) mit Attributbestimmung für einzelne Bauteile in Abhängigkeit des AwF und des jeweiligen LoG.

Bauteil X	LoG X			LoG Y		
	AwF X	AwF Y	…	AwF X	AwF Y	…
Attribut 1	X			X	X	
Attribut 2				X		
⋮						

fern nicht der Hinweis an eine Mindestanforderung gegeben ist. Das BIMForum bezeichnet diese Modelle als LoD-###-Modelle. Die #-Symbole stehen für ein beliebiges LoD (z. B. LoD-300-Modell). Diese Herangehensweise wird als *fachmodellbezogener Ansatz* bezeichnet (Fehrenbach, 2018).

Erfolgt die Definition für einen räumlichen Ausschnitt des Bauwerksmodells, wird dieser Ansatz als *bereichsmodellbezogen* bezeichnet (Fehrenbach, 2018). Ein Bereichsmodell kann aus verschiedenen Fachmodellen bestehen. Ein Beispiel ist das Modell eines Tunnelquerschnitts, das aus dem Trassenmodell der Versorgungsleitungen, dem Massivbaumodell und weiteren zusammengesetzt sein kann.

Mini (2016) trifft die Auswahl der modellierten Bauteile mit dem Klassifikationssystem der Straßeninformationsdatenbank ASB-ING und richtet die LoG an die Anforderungen der Richtzeichnungen für Ingenieurbauten (standardisierte Detaillösungen für die Konstruktion von Brückenbauteilen). In Tabelle 2 ist eine schematische Darstellung der Attribut-Tabelle nach Mini (2016) abgebildet. Die ‚X‘ kennzeichnen die erforderlichen Attribute. Mini (2016) ordnet dem LoG100 keine semantischen Informationen zu.

Tabelle 3: Schematische Darstellung der Attribut-Tabelle nach Papantonakis (2018) für den Querschnitt eines Tunnelbauwerks. Attributbestimmung für jeweilige LPH mit zugehörigem LoD über AwF

Bereichsmodell X	LPH X, LoD X		
	Attribut 1	Attribut 2	...
AwF X	X	X	
AwF Y		X	
⋮			

Tabelle 4: Schematische Darstellung der Attribut-Tabelle nach Fehrenbach (2018) für einzelne Bauteile. Auflistung der benötigten Attribute je nach AwF und LPH werden.

Bauteil X	LPH 1	LPH 2	...
AwF X	Attribut 1	Attribut 1	
	Attribut 2	Attribut 3	
AwF Y	Attribut 1	⋮	
⋮			

Goldenbaum (2018) untersucht die Kongruenz zwischen den LoD-Definitionen des BIMForums, den Anforderung an den Modellinhalt aus dem Straßenbau und den LPH nach HOAI. Eine Variantenuntersuchung beantwortet die Frage, ob eine strukturierte oder eine unstrukturierte Anpassung der internationalen LoD-Struktur an die HOAI vorzunehmen ist. Anschließend nimmt Goldenbaum (2017) eine Neudefinition der LoD für den Straßenbau vor und wendet das Konzept in einem Praxisbeispiel an.

Papatonakis (2018) verfolgt das aus der Geoinformatik bekannte Prinzip der Generalisierung, bei der kleinere oder unbedeutende Elemente erst mit zunehmendem Detaillierungsgrad modelliert werden. Der schematische Aufbau einer Attribut-Tabelle nach Papantonakis (2018) ist in Tabelle 3 dargestellt. Die vom Autor vorgenommene Zuordnung der LoD zu den LPH spiegelt sich auch in der Attribut-Tabelle wieder.

Fehrenbach (2018) folgt in dem LoD-Konzept für Schleusen dem Ansatz aus dem Positionspapier Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2017), nach dem Bauteile in den LoG100 und 200 zu Bauteilgruppen zusammen gefasst und erst im LoG300 einzeln aufgeführt werden. Bspw. wird bei der Modellierung einer Spundwand, erst ab einem LoG300 zwischen einzelnen Spundbohlen unterschieden und diese modelliert. Fehrenbach (2018) untersucht die Randbedingungen zur Bestimmung der minimalen Anzahl an Attributen. Das dafür entwickelte Tabellenschema ist auf Bauteile ausgerichtet und ermittelt die Attribute aus der Querverbindung von AwF und entsprechender LPH (siehe Tabelle 4).

Tabelle 5: Zuordnung der LoD zu den LPH nach Papantonakis (2018); Mini (2016) sowie der LPH zu den LoD nach Goldenbaum (2017). Fehrenbach (2018) spricht sich gegen eine Zuordnung aus.

Goldenbaum (2017)				Mini (2016)	Papantonakis (2018)
—		LPH 1		LoD 100	LoD 0
LoD 100		LPH 2		LoD 200	LoD 100
LoD 300–350		LPH 3		LoD 300	LoD 200
LoD 400	→	LPH 4	→	LoD 300	LoD 200
LoD 500		LPH 5		LoD 400, 450	LoD 300
—		LPH 6–7		—	LoD 300
—		LPH 8		—	LoD 400
—		LPH 9		—	LoD 500

4 Vergleich und Diskussion der vorgestellten Konzepte

4.1 Unterschiedliche Ansätze

Fachgebiete, die nicht standardisierte Bauteile oder Bauteile ohne Regelquerschnitt behandeln, erfordern eine gesonderte Betrachtung, da durch die Möglichkeit der individuellen Formgebung viele Variationen entstehen. Eine große Anzahl an geometrisch unähnlichen Varianten und die dazu parallel steigende Anzahl an geometrischen Beschreibungen, führt zu einem komplizierten Konzept. Aus diesem Grund bietet sich in diesem Fall ein bauteilübergreifendes oder fachmodellbezogenes Konzept an. Goldenbaum (2017) schließt daher eine elementbezogenes Konzept für Projekte mit einer großen Anzahl an unikalen Bauteilen mit geringer Wiederholungsrate aber komplizierten Geometrien aus.

Mit einer unflexiblen Struktur wird der Aspekt der Anwendbarkeit vernachlässigt. Insbesondere Modelle von Variantenuntersuchungen erfordern die Möglichkeit einer einfachen und schnellen Anpassung bei Planungsänderungen. Der aus Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2017) übernommene Aufbau von Fehrenbach (2018) ermöglicht in frühen LPH auf Planungsänderungen reagieren zu können, da nur eine geringe Anzahl an Modellelementen angepasst werden muss.

4.2 Die Zuordnung der LoD zu den LPH der HOAI

Die Diskussion über einen fachmodell-, bereichsmodell- oder elementbezogenen Ansatz wird von den Überlegungen über eine Zuordnung der LoD zu den LPH beeinflusst. Tabelle 5 zeigt die unterschiedlichen Herangehensweisen und Zuordnungen der LoD zu den LPH der Autorenschaft. Mini (2016) gibt keine Zuordnung der LoD zu den LPH vor, sondern Orientierungswerte an. Goldenbaum (2017) ordnet im Gegensatz zu Mini (2016) die LPH den LoD zu und nicht die LoD den LPH. Papantonakis (2018) ordnet die LoG direkt den LPH zu. Fehrenbach (2018) spricht sich gegen eine Zuordnung aus.

Eine Gegenüberstellung wie in Tabelle 5 vorgenommen ist nur bedingt aussagekräftig, da verschiedene Baugewerke andere Gewichtungen der LPH haben. Es kommt hinzu, dass die Autorenschaft unterschiedliche Ausprägungen der LoD definieren.

Papantonakis (2018) sucht in seinem Konzept bewusst die Nähe zu den Leistungsbildern der HOAI. Das BIMForum (2018) spricht sich explizit gegen die dadurch entstehenden LoD-###-Modelle aus. Nach den Modellierungsleitsätzen nach Hausknecht and Liebich (2016) sind je Planungsphase nur die Informationen in ein BIM-Modell einzufügen, die für die Bewertung entwurflicher Fragen relevant sind. Mit der Erstellung von LoD-###-Modellen ist nicht kontrollierbar, welche Informationen ins Modell gelangen. Eine freie Zuordnung der LoG und Attribute zu den LPH, ermöglicht eine Modellierung gemäß der gewählten AwF.

Goldenbaum (2017) weist den LPH den LoD zu und erhält ein starres Gefüge mit einer Nichtübereinstimmung aus Planungsleistungen und Mindestanforderungen an den Modellinhalt. In der Arbeit wird daher eine Diskrepanz aus den Anforderungen an die Planungsleistung und den Vorgaben aus dem LoD des BIMForums erkannt. Der Verband Beratender Ingenieure (2016) formuliert dazu passend: *[...], dass das Leistungsbild der HOAI den Modellierungsgrad bestimmt und nicht umgekehrt.*

Der geometrische Detaillierungsgrad kann mit den Maßstäben einer Zeichnung verglichen werden (Borrmann et al., 2015). Der Maßstab wird vom Planersteller so gewählt, dass die zu übermittelnden Informationen erkennbar dargestellt sind. Aus diesem Grund werden auch in der traditionellen Planungsmethode verschiedene Maßstäbe in einer LPH verwendet.

4.3 Attributtabellen

In BIMForum (2018) werden die semantischen Eigenschaften eines Bauteils nicht spezifiziert, sondern in der Anmerkung *nicht grafische Informationen können ebenfalls an das Modellelement angehängt werden* je LoD ergänzt. Das BIMForum (2018) gibt an, dass die LoG in keinem Zusammenhang zum semantischen Informationsgehalt eines Objekts stehen. Aus diesem Grund verzichtet das BIMForum (2018) in der LOD-Specification 2018 erstmals auf eine Bestimmung der Attribute in Form von „Attribut tables“.

Fehrenbach (2018) gibt an, dass eine Entkopplung von LoI und LoG eine freie Zuordnung der Attribute zu den AwF ermöglicht. Dennoch erkennt Fehrenbach (2018), dass trotz getrennter Ermittlung von semantischen und geometrischen Informationen, beide unweigerlich in Verbindung stehen. Bspw. kann die Oberflächenneigung großer Massivbauelemente wie der Kammerwand einer Schleuse als Attribut angehängt oder im 3D-Modell abgebildet werden.

Die Erstellung einer generischen LoI-Struktur unterstützt die Ermittlung der Mindestanzahl an Attributen nicht. Durch allgemeine Formulierungen besteht die Gefahr der Überladung des Modells mit nicht benötigten Informationen. Der Leitsatz aus Hausknecht and Liebich (2016): *Wir modellieren nur so detailliert wie benötigt. Es wird nur die Aussage definiert, die zu der jeweiligen Projektphase relevant ist* ist somit nicht eingehalten.

4.4 Abgrenzung von LOG zu LOD

Es sind Unterschiede in der Interpretation der Formel LoD = LoG + LoI nach Hausknecht and Liebich (2016) erkennbar.

Mini (2016) beschreibt das LoG wie folgt: *Im Gegensatz beschreibt der LoD, wie durchdacht die Verknüpfung der geometrischen Darstellung und dem Modell hinzugefügten semantischen*

Informationen ist. Dadurch wird von der Autorin eine Abgrenzung zwischen LoD und LoG erreicht.

Goldenbaum (2017) bewirkt diese Begriffsabgrenzung, wenn auch implizit, durch die Einführung des Begriffs Level of Enrichment, der als Hyperonym von LoI und LoG fungiert. Die Definition des LoD bleibt somit bestehen und der Aspekt der Verlässlichkeit von Modellinhalten erhalten.

In **Papantonakis (2018)** wird diese Begriffsabgrenzung nicht explizit vorgenommen und das LoD steht als Hyperonym für LoG und LoI. Dadurch hat das LoD im Vergleich zu der Definition von Mini (2016) und Goldenbaum (2017) keine eigene Stellung und enthält keine selbständige Aussage.

Fehrenbach (2018) erkennt die Vermischung der Definitionen von LoD und LoG und fordert eine strikte Trennung zwischen der Beschreibung der Geometrie und der Verlässlichkeit der Informationen. Weiter spricht sich Fehrenbach (2018) gegen die Verwendung des Begriffs LoI aus, da LoI keine generische Beschreibung erhalten und die Bezeichnung Level somit irreführend ist.

Der in Drittens angesprochene Sachverhalt wird deutlich, wenn man beachtet, dass das LoI von der Autorenschaft als nicht zu quantifizierende Größe beschrieben ist und in deren Veröffentlichungen keine Abstufung des LoI existiert. Danach suggeriert Papantonakis (2018) mit der Verwendung der Formel LoD = LoG + LoI, dass ein LoG100 dem LoD100 entspricht. Der Aspekt der Verlässlichkeit der Informationen geht dadurch für das LoD verloren. Die unterschiedliche Auffassung des Begriffs LoD von Papantonakis (2018) wird durch die Verwendung des Begriffs „Platzhalterkörper“ in der Definition seines LoD400 deutlich. Mit Blick auf eine rein geometrische Beschreibung kann der Begriff verwendet werden, mit Blick auf die Verlässlichkeit jedoch nicht. Mit Verwendung der Formel LoD = LoG + LoI geht verloren, dass das LoD mehr ist als nur die Summe seiner Teile.

5 Fazit

Die Erstellung von präzisen, elementbezogenen Konzepten ist zeitaufwendig und dennoch ist ein exakte Kommunikationsgrundlage anzustreben. Aus vagen Formulierungen ergeben sich Unschärfen, die zu einem negativen Ergebnis führen und gegebenenfalls eine nachträgliche Bearbeitung erfordern. In den nächsten Jahren wird eine iterative Bestimmung der Anforderungen über den Projektverlauf unvermeidlich sein, da heutzutage eine vordefinierte Festlegung von relevanten Informationen aufgrund fehlender Erfahrungswerte kaum möglich ist.

Ein digitales Bauwerksmodell kann innerhalb einer LPH Elemente mit verschiedenen LoG enthalten. Damit soll die notwendige Flexibilität geschaffen werden, die die besonderen Anforderungen der verschiedenen Fachmodellen und denen eines unikalen Projektes berücksichtigt sowie anwendungsfallgerechtes Modellieren zulässt. Der geometrische und semantische Modellinhalt wird demnach durch die BIM-AwF bestimmt, die projektspezifisch in einer AIA festgehalten werden.

Die Mindestanzahl der Attribute ist eine entscheidende Kennzahl zur Bestimmung des zu erwartenden Arbeitsumfangs des Modellerstellers. Zudem wird auf diese Weise vermieden Informationen zu veröffentlichen, die zum Zeitpunkt der Übermittlung noch unter Verschluss zu halten sind.

5.1 Danksagung

Die Autoren möchten sich bei der WTM Engineers GmbH und dem BMVI für die finanzielle Unterstützung bedanken.

Literatur

Bedrick, J. (2008), 'Organizing the Development of a Building Information Model', *AECbytes* pp. 1–4.

BIM4INFRA2020 (2017), 'Umsetzung des Stufenplans „Digitales Planen und Bauen" AP 1.2 „Szenariendefinition" und AP 1.3 „Empfehlung"'. unter: www.bim4infra.de/downloads/ (abgerufen am 21.09.2018).

BIMForum (2018), LOD Spec 2018 Guide, Richtlinie, BIMForum. unter: www.bimforum.org/lod (abgerufen am 10.08.2018).

Borrmann, A., König, M., Koch, C. and Beetz, J. (2015), *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*, VDI-Buch, Springer Fachmedien Wiesbaden.

Fehrenbach, A. (2018), Definition von Modellinhalten für BIM-Modelle von Schleusenbauwerken für ausgewählte BIM-Anwendungsfälle der Planung, Master's thesis, Technische Universität München.

Goldenbaum, S. (2017), Prüfung der Anwendbarkeit gegenwärtiger LOD-Definitionen zum modellbasierten Arbeiten im Straßenbau im Vergleich zum Hochbau, Masterthesis, Hochschule für Technik Stuttgart.

Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2017), BIM im Spezialtiefbau, Technical report, Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V.

Hausknecht, K. and Liebich, T. (2016), *BIM-Kompendium - Building Information Modeling als neue Planungsmethode*, Fraunhofer IBR Verlag.

Mini, F. (2016), Entwicklung eines LoD Konzepts für digitale Bauwerksmodelle von Brücken und dessen Implementierung, Masterthesis, TU München.

Papantonakis, D.-S. (2018), Entwicklung eines Konzepts zur Beschreibung der Level of Detail zur Anwendung der Building Information Modeling Methode für Tunnelbauwerke, Masterthesis, Ruhr-Universität Bochum.

Verband Beratender Ingenieure (2016), BIM-Leitfaden für die Planerpraxis, Technical report, Verband Beratender Ingenieure.

Interactive Design of Noise Protection Walls

Fabian Pfitzner[1], Ivan Bratoev[2], and Štefan Jaud[1]

[1]Chair for Computational Modeling and Simulation · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: fabian.pfitzner@tum.de (Pfitzner); ga24yuk@mytum.de (Jaud)
[2]Chair of Architectural Informatics · Technische Universität München · Arcisstraße 21 · 80333 München · E-Mail: ivan.bratoev@ai.ar.tum.de

The design of noise protection walls alongside an infrastructure asset currently involves long hours of simulation and complex computations. This represents a huge burden in the early design stages, where all information is vague and an emphasis is laid on quick comparisons rather than precise results. This paper presents an interactive noise simulation tool to be used in the early design stages. It expands the Collaborative Design Platform (CDP) and builds upon the Interactive Alignment Plugin presented at the 30^{th} Forum Bauinformatik. The main aim is to enable intuitive and quick evaluation of design variants of positions and dimensions of noise barrier walls. The noise calculation is performed according to the RLS-90 norm which provides simplified formulas for quick estimation of traffic noise on roads. The results of the developed simulation tool were tested with examples provided in the RLS-90 norm and show agreement within 1 % deviation.

Keywords: noise simulation, BIM, infrastructure

1 Introduction

1.1 Motivation

Conventional methods of noise calculation often involve complex, long-term calculations. On the one hand, this is due to the large number of the influencing parameters and, on the other hand, the requirements that are too high. Especially in early design stages, it is often unnecessary to include every small detail in calculations. It is rather important to create a quick overview in order to recognise whether a construction measure is necessary or not. For carrying out fast noise calculations alongside the road, only a few parameters are required. In order to avoid irrelevant factors, a number of the characteristics are neglected, e.g. the surface quality of the road.

In the area of noise simulation there are many points for involving optimisation concepts. The motivation for developing this plugin resulted from improving old obsolete proceedings, described above. A simple and fast noise calculation is a great relief for early design decisions and could fundamentally change the planning of structural noise barrier systems in the future. Furthermore the process of incorporating Building Information Modelling (BIM) methods in the construction industry can be enhanced.

1.2 Collaborative Design Platform // CDP

The CDP provides the ability to perform real-time computer analysis intuitively. The table is based on two principles. On the one hand, it promotes the embedding of the creative process. This allows simulations and analyses to be carried out even in the early design stages. On

the other hand, it also provides easy creation and design of user-friendly tools. An example of this is the visual programming language, which enables the user to perform analyses and simulations without implementing code Schubert and Petzold (2017).

The basic idea of the table presented in Figure 1 is to provide an interactive platform for early work phases. The focus lies on physical models, such as blocks, with a touch surface. Changes in the model have a direct influence on the simulation in real time and the calculated results are displayed instantly (Schubert, 2012).

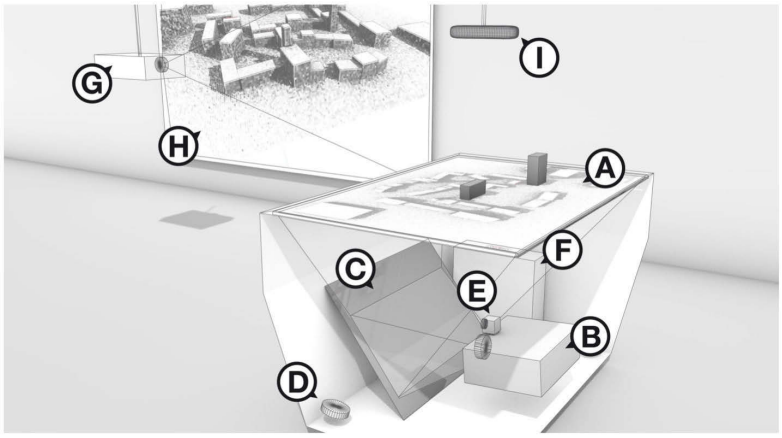


Figure 1: CDP-Table with matt projection surface (A), projection image (B), mirror (C), infrared emitters (D), infrared camera (E), computer (F), projector (G), and screen (H) (Schubert, 2012).

The hardware was developed with the above principles in mind. The system is self-made and offers a multi-touch surface as a basis. With the help of the Diffused Illumination (DI) technology the recognition of any objects is made possible. The interactive table has a matt projection surface on which an image is projected from below and redirected via a mirror. The projection surface is illuminated with infrared emitters. The underside of the projection surface is recorded via the mirror with an infrared camera. Objects and touches are visible on the infrared camera image. Using the Microsoft Kinect camera, objects placed on the table can be scanned as a 3D point cloud. In combination with the camera image it is possible to create a 3D model (Schubert, 2012).

Finally, a computer processes the camera data for the projection image. In addition to the display of two-dimensional information, it is also possible to display a three-dimensional representation of the design for better understanding. The plugins are connected via middleware (written in C++). Data communication, interaction as well as visualisation of the calculation results run completely through the host application, which provides the required data (Schubert, 2012).

2 Basics of Noise Calculation

Noise can be described with elasto-dynamic waves and vibrations. A human being can perceive noise as sound pressure in a range of 0.0002 to 20 Pascal (NALS/NATG, 2009). The sound pressure can be logarithmically adapted to the sound pressure level. In the RLS-90 standard, the sound level is characterised as sound pressure level and defined in decibel [dB] (Bundesministerium für Verkehr, 1990). Basically, all noise levels are evaluated depended on frequency, due to the sensitivity of the human hearing (Häupl et al., 2017).

Noise calculations according to the road centreline are carried out using average noise levels, differentiated between night and day cycles. It is also important to consider terms like emission (the emitting noise location) and immission (the exposure noise location) (Bundesministerium für Verkehr, 1990). The different noise levels can be illustrated with isophones which are curves with the same noise level and are derived from the 40-phon isophone (Häupl et al., 2017).

For receiving proper results of noise calculations a special case of the conventional methods RLS-90 norm has to be applied. Therefore the slicing method is used, which divides the curve into many sections (Bundesministerium für Verkehr, 1990). The number of sections depends on the smallest distance s between the location of immission and the location of emission. It must be pointed out that a maximum section length of 0.5 s travel time is allowed. The medium level $L_{m,i}$ for a single section i can be described with:

$$L_{m,i} = L_{m,E} + D_l + D_s + D_{BM} + D_B \ , \tag{1}$$

where $L_{m,i}$ stands for average level of segment i, $L_{m,E}$ for emission level, D_l for adjustment considering the section length, D_s for distance and air absorption, D_{BM} for soil and meteorological attenuation, and D_B for topographical and structural conditions.

The components of (1) have to be evaluated individually. The emission level $L_{m,E}$ is described by:

$$L_{m,E} = L_m^{25} + D_v + D_{Stg} + D_E \ , \tag{2}$$

where L_m^{25} stands for medium level (25), D_v for maximum speed correction, D_{Stg} for slope correction and D_E for correction of mirror sound sources. The emission position is assumed to be in the middle of the section at a height of 0.5 m above the centreline. The medium level L_m^{25} refers to a horizontal distance of 25 metres, a road surface of unribbed mastic asphalt, a maximum permissible speed of 100 km/h, an incline or slope of not more than 5 % and a free propagation of sound (Bundesministerium für Verkehr, 1990). This results in the following equation:

$$L_m^{25} = 37{,}3 + 10 \log(M\,(1 + 0{,}082\,p)) \ , \tag{3}$$

where M stands for average number of vehicles per hour and p for proportion of trucks. The averaging level L_m^{25} of (3) is corrected by additional parameters mentioned in (2); however, these are neglected for faster computing times.

Since the sections do not necessarily have the same length, the emission level must be adjusted by factor D_l:

$$D_l = 10 \log(l) \ , \tag{4}$$

where l is section's length. It is also important for the calculations to acknowledge the adjustment for distance and air absorption. This component is required to consider the changes to the noise level due to different distances between emission and immission point. The distance and air absorption factor D_s is defined as follows:

$$D_s = 11,2 - 20\log(s) - \frac{s}{200}\ , \tag{5}$$

where s stands for distance between emission and immission point in metres. Finally, the components D_{BM} and D_B, which are included in (1) are defined. D_{BM} describes the ground and meteorology attenuation. In order to keep the computational effort within limits, this factor is ignored. For determining whether a structural condition is required in view of sound insulation, it is nevertheless necessary to include the level change due to topographical and structural conditions D_B. Due to simplifications this factor can be described as the negative shield dimension D_z, which results in the following:

$$D_B = -D_z = -10\log(3 + 80\,z\,K_w)\ , \tag{6}$$

where z stands for the shielding factor and K_w for weather correction to compensate the noise beam deflection.

In order to complete the noise calculation for an immission point, the noise values calculated with (1) can be logarithmically added. The sections can be summarised with:

$$L_m = 10\log\sum_i 10^{0,1\,L_{m,i}}\ , \tag{7}$$

where L_m stands for medium noise level of the complete road and $L_{m,i}$ for that of segment i.

Since this plugin is only intended for noise calculation in the early design stages some factors are neglected. Thus a minimisation of the computing effort is achieved and irrelevant precision can be bypassed. This makes it possible to determine the medium level at the place of immission for each single location, alongside the RLS-90 norm. To display the computed results as isophones on the table, a grid calculation is needed. The programming aspects to do so are described in the following section.

3 Implementation

Figure 2 shows a brief overview of the tool structure and its functionality. At first, every user has the option to pick a specific region via OpenStreetMaps from which the existing buildings are loaded. An alignment can be drawn with the functions of the interactive alignment tool, presented on the 30^{th} Bauinformatik Forum (Markič et al., 2018).

Subsequently, the sketch data is passed to the developed Noise-Plugin. A noise simulation is started and illustrated with isophones upon the CDP-table. On the basis of the created noise image, the user has the option to place a block on the table to denote the position and orientation of the noise barrier. Through placement of blocks calculations are restarted and the noise expansion picture updated. After finding the best position for the noise barrier,

the data can be saved in an Industry Foundation Classes (IFC)-file. It is also possible to create a screenshot of the noise image, to gain a stable reference for future validation and documentation (Pfitzner, 2019).

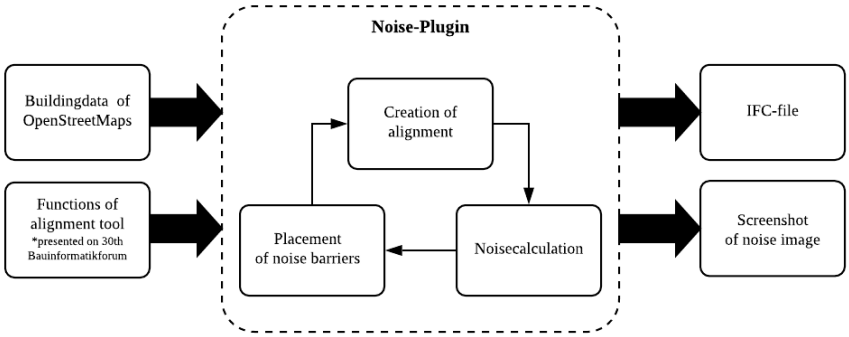


Figure 2: Process of the noise tool

The plug-in was designed following the principles of object-oriented programming and an overview of the classes is shown in Figure 3. The *NoiseSimulation* class builds the parent class of all sub-classes. This class only appears in the main program. The sub-classes are all marked with the keyword Noise-, to assign a certain affiliation.

The members of the *NoiseSimulation* class are *Truckshare, AverageCarPerHour, DayMode, BuildingMode*. *Truckshare* describes the truck-share of a single simulation and is declared as a double value. *AverageCarPerHour* is the so-called *durchschnittlicher täglicher Verkehr (DTV)*, which describes the daily average traffic considered in one year. *DayMode* and *BuildingMode* are both booleans and are responsible for switching between day and night mode and deciding whether buildings are included in the calculations or not.

On part of the sub-classes generates the NoiseRender class. This class is responsible for all visible content. It includes drawing the axis, buildings and the coloured noise areas. The class inherits all information from the super class *NoiseSimulation* and passes the data to its sub-classes. To achieve this process we had to create enumerations, where objects like *NoisePoint* and *NoiseCurveSegment* can be saved. Those classes are not only meant for keeping their 2D locations, but also to simplify the intricate computations, pass further information and get better performance.

All calculations are done by the *NoiseSimulation* class. At first all members need to be initialised. Therefore a grid of *NoisePoints* is created. The distance between each point is 10 meter, which turned out to be an optimum between precision and performance, furthermore it's also used within calculations of the Bavarian noise maps by the Bayrisches Landesamt für Umwelt (2013).

Before running the simulation it's important to divide the complete alignment in single curve segments. The length of each segment is depending on the location of the nearest noise point.

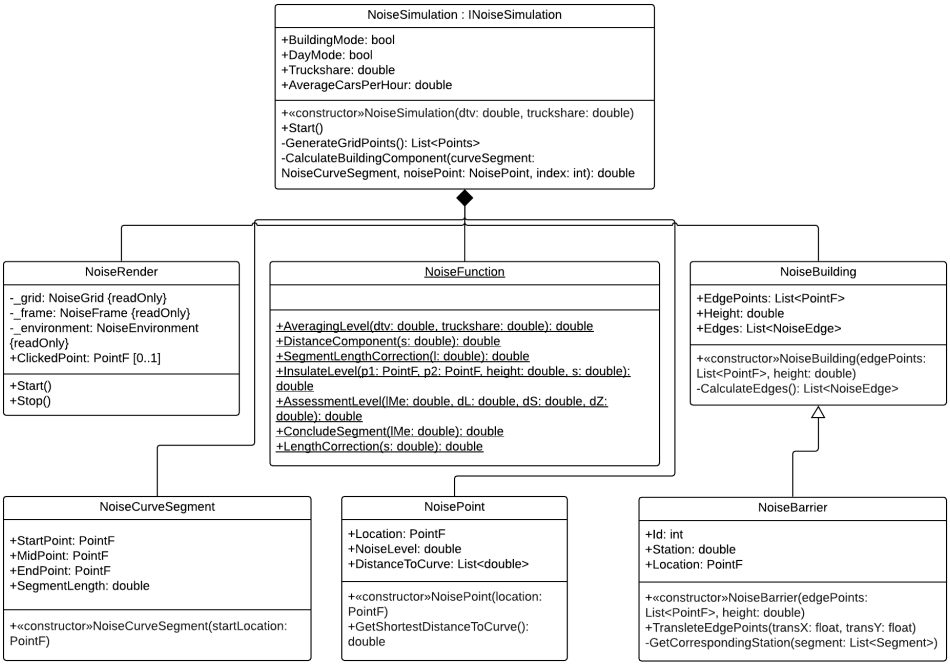


Figure 3: UML-diagram of the noise tool

After creating a grid full of *NoisePoints* and splitting the alignment in several parts, computations can be started. The slicing method is applied to each point. The noise level can be computed with the help of the static classes *NoiseFunction* and *AuxiliaryFunction*, which are mostly collections of formulas.

The simulation also provides the possibility to read in building data from Open-Street-Maps. This can be done with the *NoiseBuilding* class. Each building has a certain amount of edges and edge points, which are saved in separated lists, and also defined by their individual classes.

The *NoiseBarrier* class derives from the *NoiseBuilding* class and can additionally be located by its station along the alignment. This is especially important for the later IFC-saving part. Taken a closer look each noise barrier object gets stored in an IFC-file, with the help of an *IfcExport* class. This class associates the geometry of noise walls using *IfcLinearPlacement* and *IfcWall*. This is carried out with the help of the IFC Engine dynamic link library, which provides a collection of external saving methods (RDF Ltd., 2019).

The buildings and barriers are also included in the noise calculations. By placing a block on the CDP-table all data gets passed to a newly created noise barrier object, which will be added to a list of noise barriers. After that a new noise calculation, including the recently added buildings, will be started. The calculated data gets immediately transferred to the NoiseRender class, which results in a noticeable change of the noise image within a second.

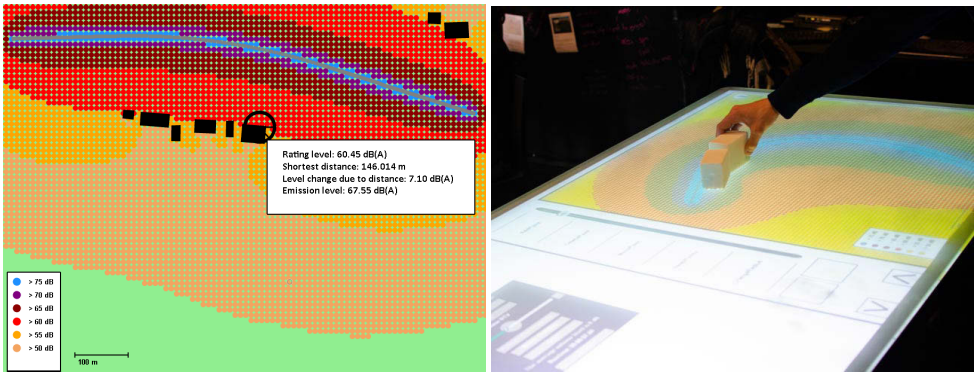
4 Verification

For validation purposes, we implemented the possibility to check the noise data of a certain point. By picking one of the grid points a pop-up window with all the information displays. This makes it much easier to control the results at a specific location.

According to the immission location of an example within the RLS-90 standard, a measuring point at a distance of approximately 146 m was selected Bundesministerium für Verkehr (1990). The assessment level on the route is 60.6 decibel(dB)(A), the level change due to all distance factors is 7.1 dB(A) and the emission level is 67.7 dB(A).

The small deviations to the values of the RLS-90 sample calculation are to be justified with the fact that it is difficult to both select a point with exactly the same distance and redraw the road precisely. Nevertheless, the results showed a highly satisfactory agreement.

To get further validation, we also took a comparison to the Bavarian noise maps. The generated noise images also revealed a remarkable rate of compliance (see Figure 4).



(a) Comparison to RLS-90 (b) Intuitive planning process

Figure 4: Interactive Noise Tool

5 Conclusions

In our study we present an interactive design tool for noise simulations. The main idea of creating this tool was to simplify and optimise the noise calculation process. With the help of the plug-in it is now possible to obtain good results in a timely manner, together with having an intuitive interaction with the simulation tool.

The tool offers both the possibility to create a noise image along a traffic route as well as enables an intuitive placing process for noise barriers, as you can see in Figure 4. This arranges unrestricted possibilities of free positioning and planning. Overall it not only provides an overview of the noise situation along an alignment, but also the influence of a noise protection measure. At the same time, the position of the noise barrier can be stored in an IFC-file along the alignment designed using Markič et al. (2018).

There are two options for further development. First, a screenshot can be created to show the influence of the noise barrier and the resulting noise image as a deduction between before and after to further support the designer. Second, additional design norms could be incorporated to support other design projects.

Acknowledgements

This paper is a spin off of the Bachelor Thesis written by the first author. He would like to thank the SSF Ingenieure AG for financing this publication and OBERMEYER Planen+Beraten GmbH for helpful comments and guidance during the writing.

References

Bayrisches Landesamt für Umwelt (2013), 'Straßenverkehrslaerm bayern', `https://www.lfu.bayern.de/laerm/eg_umgebungslaermrichtlinie/kartierung/index.htm`. state: 25.05.2019.

Bundesministerium für Verkehr (1990), *Richtlinien für den Lärmschutz an Straßen RLS-90*, Forschungsgesellschaft für Strassen-und Verkehrswesen. [in German].

Häupl, P., Homann, M., Kölzow, C., Riese, O., Maas, A., Höfker, G. and Christian, N. (2017), *Lehrbuch der Bauphysik: Schall-Wärme-Feuchte-Licht-Brand-Klima*, Springer-Verlag. [in German].

Markič, Š., Schlenger, J. and Bratoev, I. (2018), Tangible alignment design, *in* 'Proc. of the 30th Forum Bauinformatik', Weimar, Germany.

NALS/NATG (2009), *DIN 1320, Akustik*. [in German].

Pfitzner, F. (2019), Intuitiver Lärmschutzwandentwurf entlang einer Trasse in frühen Entwurfsphasen, Bachelor's thesis, Technische Universität München. [in German].

RDF Ltd. (2019), 'IFC-Engine Documentation', `http://rdf.bg/ifcdoc/CS64/sdaiOpenModelBN.html`. state: 30.05.2019.

Schubert, G. (2012), Early Design Support: Interaktive Simulationen in frühen Entwurfsphasen., PhD thesis, Technische Universität München, Lehrstuhl Architekturinformatik. [in German].

Schubert, G. and Petzold, F. (2017), 'Visual programming meets tangible interfaces - generating city simulations for decision support in early design stages'.

Describing road intelligent transportation systems using building information modeling

Mahsa Mirboland

Computing in Civil Engineering · Bauhaus University Weimar · Coudraystr. 7 · 99423 Weimar · E-Mail: mahsa.mirboland@uni-weimar.de

Intelligent transportation systems (ITS), facilitating efficient commutes and convenient mobility, are key elements of smart cities. In recent years, simulation platforms have been employed to study specific road ITS applications. Although several research efforts have been conducted to design road ITS simulation platforms, semantic descriptions serving as a basis for designing road ITS simulation platforms have not yet been fully addressed. In this paper, a semantic model for road intelligent transportation systems is proposed, providing a formal basis for road ITS simulation platforms. First, background information on road ITS is briefly explained, followed by the description of the proposed semantic model. Next, an extension of the Industry Foundation Classes (IFC) schema is discussed as basis for ITS simulation platforms using building information modeling. The paper concludes with a summary and an outlook on future formalization efforts.

Keywords: Intelligent transportation systems, semantic modeling, vehicular clouds, building information modeling, Industry Foundation Classes

1 Introduction

Coupling physical and computational subsystems in vehicles, vehicular cyber-physical systems (VCPS) comprise all physical, computing, and networking processes related to intelligent transportation systems. An intelligent transportation system (ITS) is a combined application of vehicular cyber-physical systems. Intelligent transportation systems represent vehicles as intelligent VCPS components with on-board sensing/actuating, computing, and communication capabilities. Constituting key elements of smart cities, intelligent transportation systems offer safer commutes and more efficient mobility in terms of time and cost, lessen adverse impacts on the environment, and increase convenience and quality of life. Intelligent transportation systems are applicable to all modes of transport, e.g. road, aviation, maritime, and railway transport.

Road intelligent transportation systems refer to land-based systems that use roads as travel routes. A road ITS comprises several elements with different types and capabilities, numerous data-sharing processes with intermittent and temporary connections, and various applications, all resulting in a complex and heterogeneous system. Therefore, to develop road intelligent transportation systems, it is vital to design simulation platforms that can monitor and evaluate road ITS performance. Simulation platforms integrate behavioral models of different use cases to investigate road ITS capabilities, design flaws and potential improvements, and future mobility demands.

In the last decade, researchers have employed simulation platforms to study different road ITS applications. Boschian et al. (2011) have proposed a reference framework of intermodal transportation systems with an information management layer between different modes of transport.

The reference framework integrates a simulation module and forms a platform for operational processes. A model-driven engineering framework that can develop road ITS simulations has been proposed by Fernández-Isabel and Fuentes-Fernández (2015). The framework comprise ITS data models for traffic simulations and sensor network components and guidelines on how to use the data models for different simulations, such as traffic lights control. Datta et al. (2016) have presented a road ITS semantic-based framework containing building blocks and software elements that describe different ITS-related operational phases.

Several studies have also been conducted on road ITS simulation platforms with focus on simulating traffic-related applications (Ghariani et al., 2014). However, formal descriptions of road intelligent transportation systems that provide a basis for simulation platform design have received little attention (Mirboland & Smarsly, 2019). To define a formal basis for simulation platforms, every aspect pertinent to road intelligent transportation systems must be analyzed and translated into a standardized formulation. Open standardized data formats, such as the Industry Foundation Classes (IFC), may be employed to formally define infrastructure information. However, the current IFC schema has few entities that may be used for defining road ITS components not related to infrastructure, such as vehicles or communication networks.

In this paper, a semantic model to formally describe road intelligent transportation systems is presented. First, background information relevant to road ITS components and requirements is presented. Next, upon elucidating the proposed semantic model, an IFC extension based on mapping the semantic model in the current IFC schema is discussed. The paper concludes with a summary and potential further standardization and formalization efforts.

2 Background

In this section, focusing on road ITS-underlying physical and computational components, background information needed for semantic modeling of road ITS is briefly discussed. Road ITS architecture, applications, infrastructure, and communication networks are illuminated in the following subsections.

2.1 VANET and vehicular clouds

A vehicular ad-hoc network (VANET) is a network paradigm based on vehicle-to-anything (V2X) and infrastructure-to-infrastructure (I2I) communications. Self-forming VANETs with intermittent and autonomous connections result in diverse ITS topologies that change frequently (Dixit et al., 2016). Therefore, different data routing protocols and security standards are employed to guarantee data transmissions and communications integrity between network nodes. Merging the VANET paradigm with the Internet of Vehicles initiated the idea of vehicular clouds, where underutilized resources of vehicles are shared through V2X communications to run decentralize computing processes and to provide location-based services (Eltoweissy et al., 2010). Edge computing (EC), vehicular cloud computing (VCC), and information-centric networking (ICN) are main characteristics of vehicular clouds that grant robust data sharing and cloud formation. Figure 1 depicts an example of vehicular cloud formations.

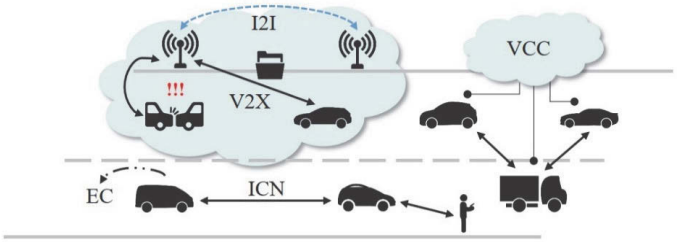


Figure 1: An example of vehicular cloud formations

With recent advances in the automotive industry, vehicles are enabled to absorb information from the environment and to perform decentralized computational processing, i.e. edge computing, handling time-sensitive operations in an efficient manner (Atchison, 2018; Gerla et al., 2014). VCC is the mechanism that combines and accesses underutilized on-board units in the vicinity to run location-based applications. In other words, VCC decreases road ITS deployment costs by distributing the computing load between network nodes and avoiding the use of expensive centralized computing infrastructure (Whaiduzzaman et al., 2014). ICN is a data-networking paradigm that puts emphasis on the content of data packets by decoupling the packets from publisher node IP addresses. Several ICN architectures and messaging protocols exist that specify standardized, machine-readable naming and beacon exchange between network nodes (Ahlgren et al., 2012; Wan et al., 2014).

2.2 Road ITS applications

Road ITS applications are designed to grant safety for ITS users and goods, to lessen adverse environmental impacts, and to advance convenient mobility scenarios (Mirboland & Smarsly, 2018). The European Telecommunications Standards Institute standard (ETSI EN 302 665) classifies road ITS applications into “traffic efficiency”, “road safety”, and “other applications”. However, with respect to topics and use cases, road ITS applications can be grouped into “traffic and fleet logistics management”, “telematics”, “maintenance management”, and “infotainment”. Some examples of different ITS applications with respect to topics and categories are listed in Table 1.

Table 1: Road ITS applications

Topics	Categories (ETSI EN 302 665)	Examples
Traffic and fleet logistics management	Traffic efficiency	Optimized traffic signals, road traffic information, hazard warnings, packet tracking systems, navigation
Telematics	Traffic efficiency, road safety	Driver-assistant systems, intra-vehicle monitoring, autonomous driving, navigation
Maintenance management	Road safety, other applications	Damage detection or infrastructure, winter road services, disaster management
Infotainment	Other applications	Internet-based applications, gaming and news platforms, multimedia libraries

2.3 Intelligent road infrastructure

Functional elements with on-board sensing/actuating, computing, and communication resources that together build the ITS architecture are termed hereinafter “ITS stations”. In general, ITS stations are categorized into fixed or mobile stations according to ETSI EN 302 665. Fixed ITS stations are further grouped in central ITS stations, i.e. control centers or base stations for authorities or institutional decision-making operations, and roadside ITS stations, e.g. traffic shields, cameras, and poles. Mobile ITS stations constitute personal ITS stations, e.g. tablets and smart phones, and vehicles ITS stations, including all vehicle types, e.g. trucks, cars, and bikes.

It is assumed that all ITS stations are composed of four main on-board units: Sensing unit, computing unit, communication unit, and power unit. The sensing unit may contain sensing technologies pertinent to traffic detection systems or sensors to detect environmental changes. The computing unit represents main processing and storage devices, while radio transceivers, beacons, and Wi-Fi routers form the communication unit. The power unit includes different power supply means that may co-exist to deliver energy to ITS stations. Moreover, ITS stations may comprise control devices and actuators to manage traffic signals and flow on specific routes and structures.

2.4 Communication networks

Vehicles with on-board wireless communication capabilities can cooperatively connect to other network nodes via V2X communications, i.e. cooperative-ITS (C-ITS) communications (Gerla, 2012). According to the ETSI EN 302 636-3 standard, ITS communication (ITSC) networks comprise external networks (i.e. connections between ITS stations) and internal networks (i.e. connections within each ITS station). The architectures of both ITS external and internal networks are depicted in Figure 2.

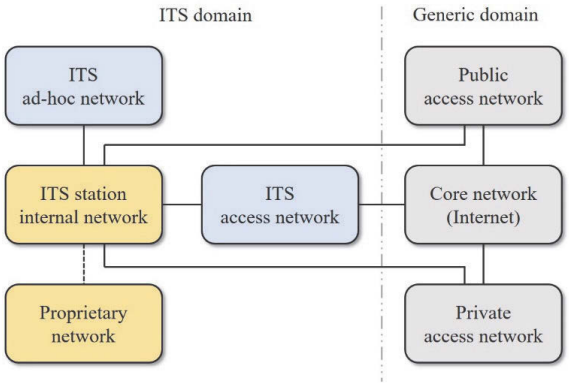


Figure 2: Road ITSC internal (orange) and external (blue and grey) networks

The ITS external network architecture comprises an ITS domain and a generic domain. The ITS ad-hoc network presents wireless C-ITS communications between mobile and roadside ITS stations, while the ITS access network represents connections between fixed ITS stations. In generic domain, private and public access networks grant secure data services to authorized groups of users and public users, respectively.

The ITS internal network architecture represents functional networking components of ITS stations and the proprietary network. The latter presents the connection between all physical equipment, such as sensors, transceivers, mechanical and/or electrical actuators, and all on-board devices. The ETSI EN 302 665 standard has established a six-layer reference architecture for ITS station internal networks. Applications, facilities, networking and transport, access, management, and security layers compose the reference architecture and characterize different functionalities in ITS communications. Each layer includes a number of standards and protocols that are listed in the ETSI TR 101 607 standard. For example, ITS-G5 is one of the access layer standards that specifies V2X communications in the 5.9 GHz frequency band.

3 Road ITS semantic model

Upon analyzing and classifying background information on road intelligent transportation systems, Figure 3 shows an extract of the proposed semantic model devised as a formal description of road ITS simulation platforms. For the sake of clarity, the class diagram shown in Figure 3 is minimized to the representation of classes and relationships between classes.

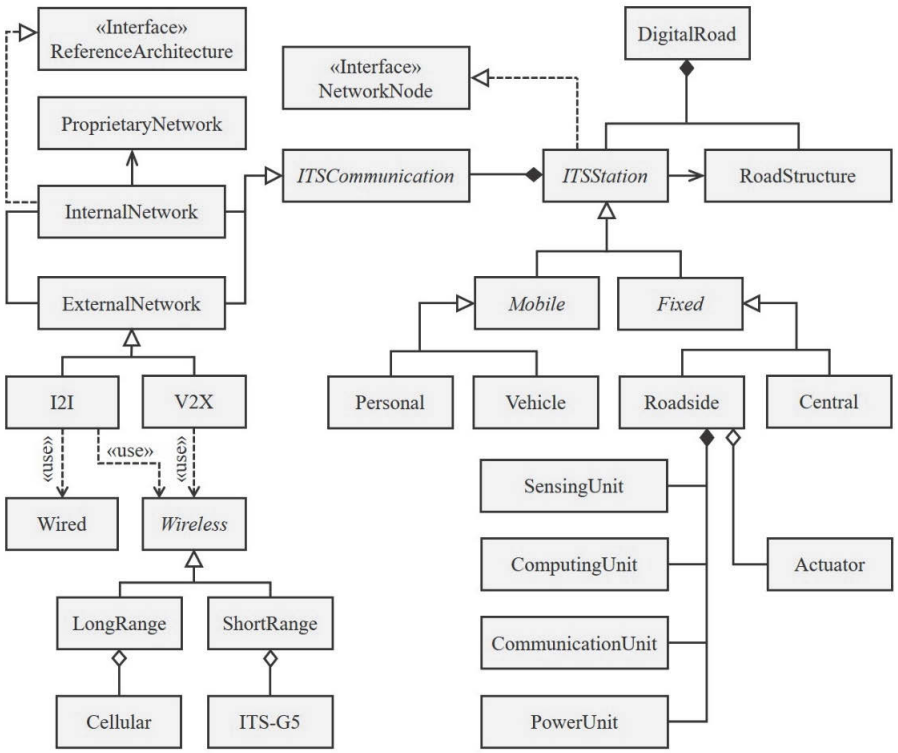


Figure 3: The semantic model for road intelligent transportation systems (extract)

The semantic model is composed of three main parts: *DigitalRoad*, *ITSStation*, and *ITSCommunication* classes. The *DigitalRoad* class comprises *RoadStructure* and *ITSStation* classes. The *RoadStructure* class represents the physical road structure, such as pavement and resting areas. The abstract class *ITSStation* presents the core elements of intelligent road infrastructure and is categorized into the abstract subclasses *Fixed* and *Mobile*. Fixed ITS stations are of two types, *Central* and *Roadside*, whereas mobile ITS stations are categorized into *Vehicle* and *Personal* classes. ITS station on-board units are shown by *SensingUnit*, *ComputingUnit*, *CommunicationUnit*, and *PowerUnit* classes are shown in Figure 3 exemplarily only for the *Roadside* class. ITS stations may be equipped with one or more *Actuator* devices.

Communication networks in the ITS domain are represented by the abstract class *ITSCommunication*, which is connected to *ITSStation* with a composition relationship, as ITS communications are dependent on ITS station infrastructure and resources. The *InternalNetwork* subclass implements the *ReferenceArchitecture* interface. Moreover, physical equipement attached to ITS stations are recognized by the *ProprietaryNetwork* class. The *ExternalNetwork* class, representing ITS ad-hoc and access networks, is a superclass to *V2X* and *I2I* classes. I2I communication can be either wired or wireless, whereas V2X communications are solely wireless. The abstract subclasses *LongRange* and *ShortRange* represent different wireless communication means and respective standards. Examples for each subclass are depicted by the *Cellular* and the *ITS-G5* classes.

4 Road ITS-related extension of the IFC schema

The IFC schema serves as an open, non-proprietary standard for defining and exchanging building information models in a comprehensive and standardized manner (ISO 16739, 2013). The entities defined in the IFC schema describe building-related information and components (Tauscher & Smarsly, 2016). The physical subsystem in a road ITS comprises the underlying physical infrastructure and intelligent road infrastructure. The former may be described using existing IFC entities, such as *IfcSectionProperties* and *IfcAlignment* that define geometry details of cross sections and positioning (BuildingSMART, 2017). In addition, further specifications relevant to road infrastructure, e.g. IfcRoad, IfcBridge, and IfcTunnel (Vilgertshofer et al., 2016), have been proposed to be included in future IFC schema versions.

A few entities exist in the current IFC schema that may be employed to formally describe intelligent road infrastructure. For example, *IfcSensor* can be used to partially define the sensing unit on ITS stations, and *IfcCommunicationsApplicance* can be obtained to represent on-board communication devices (Fitz et al., 2019; Theiler & Smarsly, 2019). However, due to a lack of entities to describe ITS-related infrastructure and components, the current IFC schema cannot be employed for fully mapping the proposed semantic model. Researchers have used object-oriented modeling tools to introduce non-standard IFC objects, which represent components of cyber-physical systems and relationships between the components (Smarsly et al., 2017). In future work, an IFC extension is to be developed to consider all aspects covered by the semantic model of road intelligent transportation systems.

5 Summary and conclusion

A semantic model of road intelligent transportation systems has been developed as a formal basis for road ITS simulation platforms. Background information relevant to road intelligent transportation systems has been analyzed and extracted for semantic modeling. Relationships and associations between elements of intelligent road infrastructure and vehicular cloud infrastructure have been depicted on a meta level. The semantic model, being technology-independent, is applicable for describing various road ITS applications. Current IFC schema capabilities for formally describing road ITS have been showcased and a potential IFC extension has been discussed. In future work, extending the IFC schema is envisaged to facilitate standardized descriptions of road intelligent transportation systems in terms of building information models.

Acknowledgments

This research is partially supported by the European Union through the European Social Funds (ESF) and by the Thuringian Ministry for Economic Affairs, Science and Digital Society (TMWWDG) under grant 2017 FGR 0068. The financial support is gratefully appreciated. Any opinions, findings, conclusions, or recommendations expressed in this paper are those of the authors and do not necessarily reflect the views of the aforementioned institutions.

References

Ahlgren, B., Dannewitz, C., Imbrenda, C., Kutscher, D. and Ohlman, B. (2012). A survey of information-centric networking. IEEE Communications Magazine, 50(7), pp. 26-36.

Atchison, L. (2018). Edge Computing vs. Cloud Computing: Which One Is Right for Your Application? [online] New Relic Blog. Available at: https://blog.newrelic.com/technology/edge-computing-vs-cloud-computing-comparison/ [Accessed: February 2, 2019].

Boschian, V., Dotoli, M., Fanti, M. P., Iacobellis, G. and Ukovich, W. (2011). A Metamodeling Approach to the Management of Intermodal Transportation Networks. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 8(3), pp. 457-469.

BuildingSMART (2017). IFC4.1 Infrastructure alignment: Alignment Positioning and Sectioned Geometry. [online] BuildingSMART international. Available at: http://www.buildingsmart-tech.org/ifc/IFC4x1/final/html/ [Accessed: May 26, 2019]

Datta, S.K., Costa, R.P., Haerri, J. and Bonnet, C. (2016). Integrating connected vehicles in Internet of Things ecosystems: Challenges and solutions. In: Proc. of the 2016 IEEE 17th International Symposium on A World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks, Coimbra, Portugal, June 21, 2016.

Dixit, M., Kumar, R. and Sagar, A. K. (2016). VANET: Architectures, research issues, routing protocols, and its applications. In: Proc. of the 2016 International Conference on Computing, Communication and Automation. Noida, India, April 29, 2016.

Eltoweissy, M., Olariu, S. and Younis, M.F. (2010). Towards Autonomous Vehicular Clouds – A Position Paper. In: Proc. of the Second International Conference on Ad Hoc Networks. Victoria, BC, Canada, August 18, 2010.

European Telecommunications Standards Institute (2010). Intelligent Transport Systems (ITS); Communications Architecture. ETSI EN 302 665 Standard (V1.1.1). ETSI, Sophia Antipolis, France.

European Telecommunications Standards Institute (2013). Intelligent Transport Systems (ITS); Cooperative ITS (C-ITS); Release 1. ETSI TR 101 607 Standard (V1.1.1). ETSI, Sophia Antipolis, France.

Fernández-Isabel, A. and Fuentes-Fernández, R. (2015). Analysis of Intelligent Transportation Systems Using Model-Driven Simulations. Sensors, 15(6), pp.14116-14141.

Fitz, T., Theiler, M. and Smarsly, K (2019). A metamodel for cyber-physical systems. Advanced Engineering Informatics, 41(2019), 100930.

Gerla, M. (2012). Vehicular Cloud Computing. In: Proc. of the 11th Annual Mediterranean Ad Hoc Networking Workshop (Med-Hoc-Net), Ayia Napa, Cyprus, June 19, 2012.

Gerla, M., Lee, E., Pau, G. and Lee, U. (2014). Internet of vehicles: From intelligent grid to autonomous cars and vehicular clouds. In: Proc. of the 2014 IEEE World Forum on Internet of Things (WF-IoT), Seoul, South Korea, March 6, 2014.

Ghariani, N., Elkosantini, S., Darmoul, S. and Ben Said, L. (2014). A survey of simulation platforms for the assessment of public transport control systems. In: Proc. of the 2014 International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT), Hammamet, Tunisia, May 1, 2014.

ISO 16739 (2013). Industry Foundation Classes (IFC) for data sharing in the construction and facility management industries.

Mirboland, M. and Smarsly, K. (2018). Semantic modeling of road intelligent transportation systems. In: Proc. of the Positioning and Navigation for intelligent transportation systems, Berlin, Germany, November 15, 2018.

Mirboland, M. and Smarsly, K. (2019). A semantic model of intelligent transportation systems. In: Proceedings of the 26th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE). Leuven, Belgium, June 30, 2019.

Smarsly, K., Theiler, M. and Dragos, K., 2017. IFC-based modeling of cyber-physical systems in civil engineering. In: The 24th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering (EG-ICE). Nottingham, United Kingdom, July 10, 2017.

Tauscher, E. and Smarsly, K. (2016). Generic BIM queries based on the IFC object model using graph theory. In: Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering (ICCCBE). Osaka, Japan, July 6, 2016.

Theiler, M. and Smarsly, K. (2018). IFC Monitor – An IFC extension for modeling structural health monitoring systems. Advanced Engineering Informatics, 37(2018), S. 54-65.

Vilgertshofer, S., Jubierre, J.R., and Borrmann, A. (2016). IfcTunnel - A proposal for a multiscale extension of the IFC data model for shield tunnels under consideration of downward compatibility aspects. In: Proc. Of the 11th European Conference on Product and Process Modelling, Limassol, Cyprus, September 7, 2016.

Wan, J., Zhang, D., Zhao. S., Yang, L.T. and Lloret, J. (2014). Context-aware vehicular cyber-physical systems with cloud support: architecture, challenges, and solutions. IEEE Communications Magazine, 52(8), pp. 106-113.

Whaiduzzaman, M., Sookhak, M., Gani, A. and Buyya, R. (2014). A survey on vehicular cloud computing. Journal of Network and Computer Applications, 40(2014), pp. 325-344.

Unterstützung parametrischer Modellierung durch Graphersetzung: Automatisierte Erstellung von graphbasierten Modellrepräsentationen

Simon Vilgertshofer

Lehrstuhl für Computergestützte Modellierung und Simulation · Technische Universität München Arcisstr. 21 · 80333 München
E-Mail: simon.vilgertshofer@tum.de

Anspruchsvolle geometrische und semantische Modelle sind die Grundlage für viele Anwendungen im Bereich des Building Information Modeling. Während die Anforderungen an die Detaillierung, Flexibilität und Konformität dieser Modelle und damit an die entsprechenden Modellierungswerkzeuge insbesondere bei der parametrischen und prozeduralen Modellierung steigen, bleiben nach wie vor Fragen zur Unterstützung des Anwenders während des Modellierungsprozesses und zum Verlust von Modellierungswissen nach Abschluss einer Modellierungsaufgabe offen. Graphentheorie kann hier als Ansatz genutzt werden, um die Lösung dieser Herausforderungen voranzutreiben. Graphen und Graphersetzung können verwendet werden, um parametrische Modelle herstellerneutral darzustellen und Modellierungsoperationen zu beschreiben, indem diese durch Graphersetzungsregeln formalisiert werden. Dieses Paper beschreibt dazu den aktuellen Stand der graphbasierten Modellerstellung zur Unterstützung der feature-basierten parametrischen Modellierung. Es wird dabei gezeigt, wie prozeduralen 3D-Modelle, die auf zweidimensionalen Skizzen basieren, durch Graphen dargestellt werden können und wie Modellierungsschritte durch regelbasierte Graphersetzung formalisiert werden können und wie es dieser Ansatz einem Benutzer ermöglicht, zuvor formalisierte Modellierungsoperationen wiederzuverwenden. Eine Weiterentwicklung des Ansatzes, der in diesem Paper dargestellt wird, besteht darin, die Graphen zur Repräsentation der parametrischen Modelle nicht nur auf Basis von Graphersetzungsregeln zu erzeugen, sondern auch eine automatisierte Erstellung des Graphen auf Basis bereits bestehender parametrische Modelle zu ermöglichen. Die so erstellen Graphen können anschließend als Basis für die Konzeption neuer Graphersetzungsregeln genutzt werden. Damit wird die bisher komplett manuelle Definition der Graphersetzungsregeln wesentlich erleichtert.

Keywords: Graphersetzung, parametrische Modellierung

1 Einleitung

Die erfolgreiche Durchführung der Planung und der Durchführung von Bauvorhaben ist für alle Beteiligten ein herausfordernder Prozess. Während selbst kleine und unkomplizierte Projekte komplexe Fragestellungen aufwerfen können, ist dies bei Großprojekten der Normalfall, da hier unterschiedlichste Randbedingungen und Einschränkungen berücksichtigt werden müssen sowie eine große Anzahl von Teilnehmern aus verschiedenen Fachbereichen beteiligt sind.

Die technologischen Möglichkeiten, die im Rahmen der Umsetzung von Building Information Modeling entwickelt wurden, zielen darauf ab, diese Herausforderungen zu meistern und Designer und Ingenieure bei ihrer täglichen Arbeit und in ihrer interdisziplinären Kommunikation zu unterstützen. Die Verfügbarkeit hochwertiger Modelle, die sowohl Geometrie als auch Semantik enthalten, ist dabei eine wichtige Voraussetzung für viele Anwendungen und Workflows. Nutzungsszenarien wie die automatisierte Baufortschrittskontrolle (Braun et al., 2015), die automatisierte Prüfung von Konstruktions- und Sicherheitsregeln (Preidel & Borrmann, 2016), die automatisierte Kostenanalyse oder die BIM-basierte Generierung von Bauablaufplänen (Sigalov & König, 2017) wären ohne die zugrunde liegenden BIM-Modelle, die verschiedenen notwendigen Informationen enthalten, nicht möglich.

Die Modellerstellung ist daher eine unverzichtbare Voraussetzung für die oben genannten Anwendungsfälle sowie eine Vielzahl von weiteren Szenarien. Beispielsweise kann der Entwurf von Schildtunneln durch die Nutzung geometrischen Modellen, die in verschiedenen Detailierungsgraden (LoD) vorliegen, unterstützt werden (Borrmann et al., 2015). Um Inkonsistenzen zwischen den verschiedenen LoDs zu vermeiden, ist es notwendig, parametrische Modelle zu verwenden. So ist es möglich, die Konsistenz des Modells über die verschiedenen LoDs hinweg auch im Falle von Änderungen automatisch sicherzustellen. Die Vorarbeiten von Borrmann et al. haben allerdings ergeben, dass die manuelle Erstellung von konsistenzerhaltenden parametrischen Produktmodellen eine sehr komplexe, zeitaufwändige und fehleranfällige Aufgabe ist. Ein Ansatz von Vilgertshofer und Borrmann (2015, 2017) beschreibt die Möglichkeiten der Nutzung von Graphtransformation zur Unterstützung des

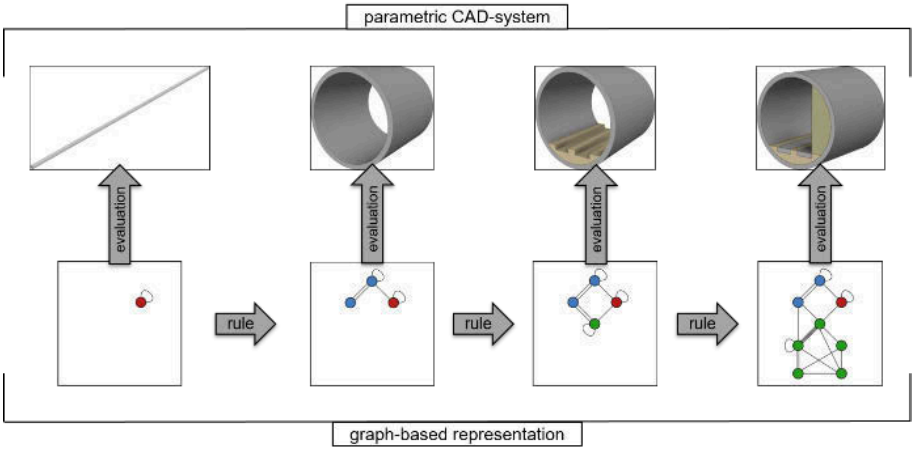


Abbildung 1: Konzeptionelle Darstellung der Verwendung von Graphersetzungsregeln, die Detaillierungsschritte der graphbasierten Repräsentation eines Schildtunnelmodells formalisieren. Jede Instanz des Graphen kann ausgewertet werden, um ein Modell in einem parametrischen CAD-System zu erstellen.

Modellierungsprozesses. Dabei werden die Erstellung parametrischer 2D-Skizzen und nachfolgende prozedurale Modellierungsoperationen formalisiert, um 3D-Modelle von Schildtunneln halbautomatisch zu erstellen.

Ein Überblick über das Konzept dieses bestehenden Ansatzes ist in Abbildung 1 dargestellt. Die Abbildung veranschaulicht konzeptionell, wie ein Modell durch einen Graphen dargestellt wird und wie dieser Graph durch Anwendung vordefinierter Graphersetzungsregeln verändert wird. Ein Pfeil „rule“ markiert die Anwendung einer Graphersetzungsregeln. In jeder Phase dieses Prozesses kann ein parametrisches CAD-System (wie z. B. Autodesk Inventor, Siemns NX oder FreeCAD) den Graphen interpretieren und verarbeiten, um ein veränderbares parametrisches Modell zu erstellen. Dieses Modell wird als evaluiertes Modell bezeichnet. Eine wesentliche Weiterentwicklung des Ansatzes, die in diesem Paper dargestellt wird, besteht darin, die Graphen zur Repräsentation der parametrischen Modelle nicht nur auf Basis von Graphersetzungsregeln zu erzeugen, sondern auch eine automatisierte Erstellung des Graphen auf Basis bereits bestehender parametrische Modelle zu ermöglichen. Die so erstellen Graphen können anschließend u. a. als Basis für die Konzeption neuer Graphersetzungsregeln genutzt werden. Damit wird die bisher komplett manuelle Definition der Graphersetzungsregeln wesentlich erleichtert.

2 Hintergrund und Vorarbeiten

2.1 Automatisierung von Entwurf und Modellierung

Die computergestützte Erstellung von technischen Zeichnungen und Produktmodellen ist durch die Verwendung von parametrischer CAD-Software im Bausektor weit verbreitet und enorm hilfreich (Camba & Contero, 2016). Der häufigste Anwendungsfall dieser Software ist die Unterstützung eines Ingenieurs bei der Konzeption von Entwürfen. Dabei handelt es sich um eine äußerst komplexe Aufgabe, da sie von der Berücksichtigung verschiedenster Randbedingungen abhängt, um zufriedenstellende Lösungen zu erhalten (Bhatt et al., 2013). Ein weiterer Schritt der computergestützten Modellierung ist daher die Entwicklung von Methoden und Werkzeugen, die einen Konstrukteur aktiv unterstützen, indem sie automatisch ganze Sätze von Designvarianten generieren oder repetitive und triviale Aufgaben im Designprozess automatisieren.

Im Bereich der Computational Design Synthesis (CDS) verwendet Helms (Helms & Shea, 2012) eine Graphgrammatik für die computergestützte Entwicklung von Produktarchitekturen. Das Entwurfswissen wird in einem portbasierten Metamodell und den prozeduralen Gestaltungsregeln der Grammatik erfasst. Hoisl (2012) stellt einen Ansatz zur Konzeption eines allgemeinen räumlichen Graphgrammatik-Systems vor, das die interaktive Definition und Anwendung von Grammatikregeln im Rahmen von CDS einführt. Ziel ist es, einen Konstrukteur aktiv im Modellierungsprozess mit mechanischen CAD-Systemen zu unterstützen. Der Ansatz von Kniemeyer (2008) im Bereich der Biologie nutzt eine Graphgrammatik, um eine Sprache zu entwerfen und zu implementieren, die die funktional-strukturelle Modellierung von Pflanzen unterstützt. Darüber hinaus beschreiben Lee et al. (2006) grundlegend, wie parametrisches Bauobjektverhalten für Gebäudeinformationsmodellierungssysteme spezifiziert werden kann. Dieser Ansatz zeigt, wie eine gängige Methode zur "Beschreibung der Designabsicht, um die benutzerdefinierten parametrischen Objekte zu teilen und wiederzuverwenden", zwischen kollaborierenden Experten realisiert werden kann. Der Ansatz ist jedoch nicht dazu gedacht, die Beschreibung und Erstellung von parametrischen Objekten/Modellen zu automatisieren.

2.2 Parametrische Modellierung

Das Konzept der parametrischen prozeduralen Modellierung wurde in den 90er Jahren entwickelt (Shah & Mäntylä, 1995) und ist inzwischen in vielen kommerziellen und Open-Source-CAD-Anwendungen wie Autodesk Inventor, Siemens NX und FreeCAD etabliert.

Während ein rein geometrisches Modell nur die Koordinaten der geometrischen Elemente speichert, besteht das Konzept der parametrischen Modellierung darin, die Historie der Erstellung von Skizzen und der nachfolgenden 3D-Modellierungsoperationen zu speichern: Die „Entstehungsgeschichte" des Modells. Im Allgemeinen hat diese Historie die folgende Struktur: Parametrische geometrische 2D-Modelle (Skizzen) bestehen aus geometrischen Objekten und parametrischen Zwangsbedingungen (Constraints). Bei der Erstellung einer Skizze in einer parametrischen CAD-Anwendung wird ein System von Zwangsbedingungen und Objekten definiert, das ein sog. Constraint-Problem darstellt. Ein *Geometric Constraint Solver* (GCS) (Fudos & Hoffmann, 1997) kann zur Lösung dieser Probleme eingesetzt werden. Schultz et al. (2017) definieren eine Reihe von parametrischen Zwangsbedingungen, die von allen gängigen GCS standardmäßig implementiert wird. Dieser Satz umfasst die dimensio-nalen Zwangsbedingungen für Abstände und Winkel sowie die folgenden geometrischen Zwangsbedingungen: koinzident, kollinear, tangential, horizontal, vertikal, parallel, senkrecht und fixiert.

Eine so erstellte parametrische Skizze kann dann als Grundlage für eine Extrusion, einen Sweep, einen Loft oder eine Drehung zum Erstellen eines 3D-Objekts, eines sogenannten Features, verwendet werden. Durch die Anwendung boolescher Operationen werden mehrere dieser Merkmale dann zu komplexeren Modellen (sog. Parts) kombiniert. Die Kombination verschiedener Teile führt zur Bildung einer Baugruppe (sog. Assemblies). Auf der Baugruppenebene werden verschiedene Teile durch 3D-Zwangsbedingungen angeordnet, die im Wesentlichen komplexe parametrische Einschränkungen für Punkte, Linien oder Oberflächen von Teilen darstellen. Der Hauptvorteil eines so erstellten 3D-Modells besteht darin, dass es Änderungen an jedem Vorgang in der Historie ermöglicht, ohne die nachfolgenden Modellierungsoperationen zu verwerfen. Dadurch sind Änderungen einfacher und Fehler können behoben werden, ohne dass eine komplette Umgestaltung erforderlich ist. Diese Modellie-rungstechnik erfordert jedoch ein tiefes Verständnis der parametrischen Grundlagen. Daher muss eine umfassende Schulung der Benutzer gewährleistet sein, da eine Vielzahl von Randbedingungen und Modellteilen zu sehr komplizierten Modellen führen, die ohne Kenntnis der Entwurfsabsicht des Urhebers (Lee et al., 2006) kaum weiterverwendet werden können. Unser Ansatz zielt daher darauf ab, Automatisierungsmechanismen in die parametrische Modellierung einzuführen.

2.3 Graphersetzungssysteme

Der vorgestellte Ansatz zur Automatisierung des Detaillierungsprozesses basiert auf der Graphentheorie und verwendet auch die Methode des Graphersetzung. Dies wird von Rozenberg et al. (1997) umfassend beschrieben. Es werden Graphen und Ersetzungsmechanismen verwendet, um die Darstellung und Modifikation von parametrischen Modellen zu ermöglichen. Diese Anwendung der Graphersetzung zur teilautomatisierten Erstellung und Änderung von parametrischen Skizzen und Modellen wurde von Vilgertshofer und Borrmann (2015) vorgestellt und weiterentwickelt (2017).

Die Ersetzungsregeln für Graphen werden verwendet, um aus einem bestehenden Graphen einen neuen Graphen zu erstellen, indem Teile (Subgraphen) des bestehenden Graphen geändert, gelöscht oder ersetzt werden. Die Änderungen werden durch Regeln zur Umschreibung von Graphen formalisiert, die mit $L \rightarrow R$ beschrieben werden. Wenn eine Regel auf einen Graphen angewendet wird (den sog. Host-Graph), wird dieser Graph nach einem Subgraphen durchsucht, der dem durch L definierten Mustergraphen entspricht. Wird eine Übereinstimmung gefunden, führt dies zur Ersetzung von *L* durch *R* unter Berücksichtigung eines Erhaltungs-Morphismus *r*. Dieser Erhaltungs-Morphismus steuert, wie *R* eine Instanz von *L* im Host-Graphen ersetzt oder ändert. Das Ergebnis dieser Regelanwendung wird als Ergebnisgraph *H'* bezeichnet, wie in Abb. 2 dargestellt.

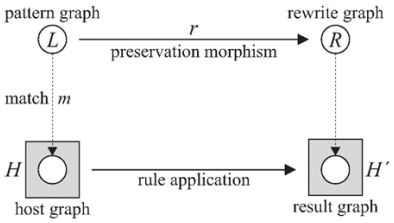


Abbildung 2: Graphersetzung durch SPO (nach Blomer et al. (2014))

Es existieren verschiedene Ansätze zur formalen Graphersetzung. Wesentliche Beispiele sind der Single-Pushout-Ansatz (SPO) und der Double-Pushout-Ansatz (DPO) (Heckel, 2006).

3 Konzeptioneller Ansatz

Dieser Abschnitt gibt einen Überblick über das Grundkonzept des bestehenden Ansatzes und zeigt, wie die Implementierung erfolgt.

3.1 Graphbasierte Repräsentation parametrischer Modelle

Parametrische CAD-Systeme verwenden geometrische Elemente wie Punkte, Linien oder Kreise als Elemente zur Erstellung von Skizzen. Die in Abschnitt 2.2 beschriebenen parametrischen Zwangsbedingungen definieren die Topologie dieser Einheiten und führen zu parametrischen Skizzen. Diese sind die Grundlage für weitere Modellierungsoperationen, die letztlich 3D-Modelle erzeugen. Um ein parametrisches Modell mittels eines Graphen darzustellen, ist es notwendig zu definieren, welche Arten von geometrischen Elementen, parametrischen Zwangsbedingungen und prozeduralen Modellierungsoperationen verwendet werden. Im Rahmen unserer bisherigen Forschung haben wir im Wesentlichen die folgenden Typen betrachtet:

- geometrische Elemente in Skizzen: Punkt, Linie, Spline, Kreis, Kreisbogen
- parametrische Zwangsbedingungen in Skizzen:
  - geometrische Zwangsbedingungen: koinzident, kollinear, gleich, konzentrisch, horizontal, vertikal, parallel, senkrecht, senkrecht, fixiert
  - dimensionale Zwangsbedingungen: Abmessungen eines geometrischen Elements, Abstände zwischen zwei geometrischen Elementen
- 3D-Zwangsbedingungen: koinzident, kollinear, komplanar

- Prozedurale Operationen: Arbeitsebene, Extrusion, Sweep, Boolesche Operationen, Part, Assembly

Diese Auflistung spiegelt in etwa die in Schultz et al. (2017) definierte Reihe der gängigsten Operationen eines parametrischen CAD-Systems wider. Für die formale Darstellung dieser Elemente beschreibt ein sog. Metamodell die notwendigen attribuierten Typen von Graphknoten und -kanten. Diese können dann bei der Erstellung eines Graphen instanziiert werden. Das Metamodell bildet auch die Grundlage für die Definition von Graphersetzungsregeln, die Modellierungsschritte formal beschreiben. Ein Endbenutzer kann diese anwenden, anstatt die zugrunde liegenden prozeduralen oder parametrischen Modellierungsoperationen manuell auszuführen. Abb. 1 in Abschnitt 1 veranschaulicht dies konzeptionell.

3.2 Anwendungsbeispiele und Implementierung

Für die Definition und Erweiterung des Graphersetzungssystems, bestehend aus einem Metamodell und entsprechenden Graphersetzungsregeln, wurde das Tool GrGen.NET (Geiß et al., 2006) verwendet, während die Generierung der ausgewerteten Skizze mit verschiedenen parametrischen CAD-Anwendung (Autodesk Inventor, Siemens NX, FreeCAD) durchgeführt wurde. Ein Software-Prototyp wurde entwickelt, um sowohl die Funktionalitäten von GrGen.NET als auch die der CAD-Anwendungen zu nutzen, um Graphersetzungsregeln anzuwenden und die anschließende Erstellung des Modells durchzuführen.
Um die Ergebnisse des Graphersetzungssystems zu überprüfen, wurden mehrere Testszenarien untersucht. Das System wurde verwendet, um die Verbindung von Stahlträgern zu modellieren. Hier wird die Verbindungsplatte aus der Extrusion einer Skizze zu einem 3D-Feature formal beschrieben. Dieses Teilmodell wird dann mit zwei weiteren vordefinierten Teilen (den Trägern) in einem Assembly kombiniert. Um die drei Teile im Modell aneinander zu koppeln, wurden mehrere Oberflächen der jeweiligen Teile durch die Zwangsbedingung komplanar aneinander ausgerichtet.

Im Rahmen der Modellierung der Geometrie von Schildtunneln wurde ein bestehendes Modell eines Tunnels um einen Querschlag erweitert. Normalerweise würde ein Tunnelabschnitt ohne den Querschlag nur als ein Teil modelliert werden.

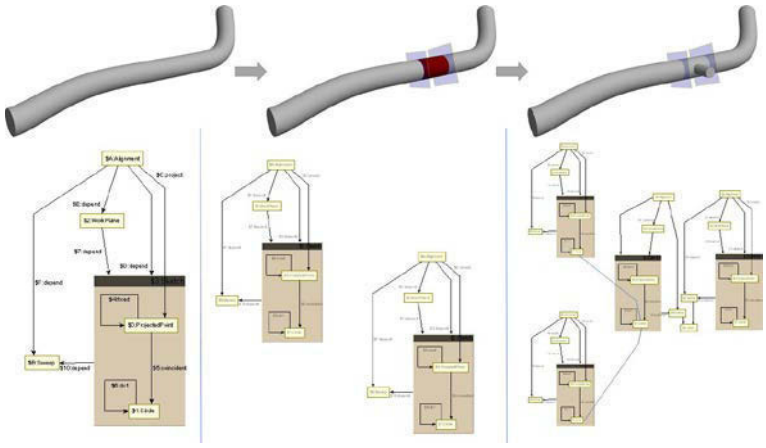


Abbildung 3: Verfahren zum Hinzufügen eines Querschnittes zu einem Tunnelmodell

An der gewünschten Position des Querschlags wird nun ein Teil herausgeschnitten, so dass zwei Teilmodelle des Tunnelabschnitts entstehen. Diese beiden äußeren Teile werden durch erneute Anwendung der bestehenden Regeln erstellt. Der innere Teil wird jedoch durch einen neuen Teilgraph dargestellt. Dieser Teilgraph wird durch Ausführen einer entsprechenden Graphersetzungsregeln erstellt, die die Darstellung eines Tunnelabschnitts mit der Öffnung für den Querschnitt erzeugt. Dieser Prozess ist in Abbildung 3 grafisch dargestellt.

4 Grapherstellung auf Basis bestehender Modelle

Grundsätzlich ist die Anwendung der hier beschriebenen Methode gut geeignet, um Modellierungsoperationen formal zu definieren, sie dadurch zu speichern und letztlich im selben oder einem anderen Kontext wiederzuverwenden. Die Wiederverwendbarkeit rechtfertigt dabei den nicht unerheblichen Aufwand, den die Erstellung einer Graphersetzungsregel, die eine Modellierungsoperationen formal definiert, erzeugt. Dabei ist zu beachten, dass sich die Komplexität der Modellierungsoperation, die durch eine Regel repräsentiert wird, direkt auf den Erstellungsaufwand auswirkt. Weiterhin ist auf Basis der bisherigen Untersuchungen festzuhalten, dass sich die Möglichkeiten zur Wiederverwendbarkeit einer Regel auf neue Szenarien mit zunehmender Regelkomplexität reduzieren und daher den für die Erstellung einer Regel notwendigen Aufwand nur bedingt rechtfertigen. Insofern erscheint es äußerst sinnvoll, zu untersuchen, inwieweit der Prozess der Regelkonzeption unterstützt werden kann.

Einen Ansatz bildet hierbei die Umkehrung des Interpretationsvorgangs – das bedeutet, dass ein in einem CAD-System manuell erzeugtes parametrisches Modell automatisiert in die graphbasierte Repräsentation umgewandelt wird. Dieses Vorgehen wurde bereits erfolgreich bei einfachen Modellen umgesetzt. Dabei wurde zuerst eine manuell erstellte Skizze in einen Graphen umgewandelt. Anschließend wurde der so erzeugte Graph durch eine Regel transformiert und wie schon beschrieben interpretiert, um im CAD-System ein Modell zu erzeugen, dass das Resultat der durch die Regel formalisierte Modellierungsoperation, beinhaltet. Im Weiteren wurden erste Untersuchungen vorgenommen, wie auch eine graphbasierte Repräsentation von komplexeren parametrischen Modellen erzeugt werden kann. Hierbei hat sich gezeigt, dass diese Vorgehensweise generell möglich ist. Es können allerdings nur solche Modelle in eine Graphrepräsentation umgewandelt werden, die auf Basis der geometrischen Elemente, der Zwangsbedingungen und der prozeduralen Operationen, die im Metamodell definiert sind, erzeugt wurden. Beinhaltet ein Modell zusätzliche Elemente oder Operationen, gehen diese verloren was dazu führen kann, dass der erzeugte Graph keine valide Modellrepräsentation mehr darstellt.

5 Zusammenfassung

Die vorgestellten Arbeiten stelle ein Konzept für die graphbasierte Darstellung von Produktmodellen und deren automatische Generierung und Detaillierung vor. Es werden Methoden zur Repräsentation von Graphen und deren Veränderung auf Basis formaler Regeln beschrieben. Dieser Ansatz wurde bereits erfolgreich zur Erstellung von konsistenzwahrenden mehrskaligen Produktmodellen von Schildtunneln angewendet. Um die Umsetzbarkeit des Ansatzes zu beweisen, wurde das Graphersetzungssystem mit Hilfe des Graphersetzungs-Tools GrGen.NET und verschieden parametrischen CAD-Systemen prototypisch implementiert.

Zukünftige Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die Entwicklung eines größeren Satzes von Ersetzungsregeln, die es den Endbenutzern ermöglichen, verschiedene Modelle in unterschiedlichen Kontexten zu erstellen und zu detaillieren sowie weitere Möglichkeiten sowie die Grenzen der Methode zu untersuchen. Dabei wird auch der beschriebene Ansatz zur Grapherstellung auf Basis bestehender Modelle unterstützend eingesetzt, um den manuellen Aufwand bei der Konzeption von Ersetzungsregeln zu reduzieren.

Literatur

Bhatt M., Borrmann A., Amor R. and Beetz J. Architecture, computing, and design assistance. Automation in. Construction, 32, 2013.

Blomer J., Geiß R. and Jakumeit E. The GrGen.NET User Manual, 2014.

Borrmann A., Kolbe T.H., Donaubauer A., Steuer H., Jubierre J.R. and Flurl M. Multi-scale geometric-semantic modeling of shield tunnels for GIS and BIM applications. Computer-Aided Civil and Infrastructure Eng. 30 (4), pp. 263-281, 2015.

Braun A., Tuttas S., Borrmann A. and Stilla, U. A concept for automated construction progress monitoring using BIM-based geometric constraints and photogrammetric point clouds. ITcon, 20 (8), pp. 68-79, 2015

Camba J.D. and Contero M. Parametric CAD modeling: an analysis of strategies for design reusability. Computer-Aided Design, 74. 2016.

Fudos I. and Hoffmann C.M. A graph-constructive approach to solving systems of geometric constraints. ACM Trans Graph, 16, 1997.

Geiß R., Batz G.V., Grund D., Hack S. and Szalkowski A. GRGEN: A fast SPO-based graph rewriting tool. Proc. ICGT 4178, 2006.

Heckel R. Graph transformation in a nutshell. Electron. Notes Theoret. Comp. Sci. 148, 2006.

Helms B. and Shea K. Computational synthesis of product architectures based on object-oriented graph grammars, J. of Mech. Design, 134, 2012.

Hoisl F.R. Visual, Interactive 3D Spatial Grammars in CAD for Computational Design Synthesis, Ph.D. thesis, TU München, 2012.

Kniemeyer O. Design and Implementation of a Graph Grammar Based Language for Functional-Structural Plant Modelling. Ph.D. thesis, BTU Cottbus, 2008.

Lee G. Sacks R., and Eastman C.M. Specifying parametric building object behavior (BOB) for a building information modeling system. Automation in Construction, 2006.

Preidel C., and Borrmann A. Towards code compliance checking on the basis of a visual programming language. ITcon 21. 2016

Rozenberg G. Handbook of Graph Grammars and Computing by Graph Transformation, vol. 1, World Scientific, 1997.

Schultz C., Bhatt M. and Borrmann A. Bridging qualitative spatial constraints and feature-based parametric modelling: expressing visibility and movement constraints. Adv. Eng. Inf. 31, 2017

Shah J.J. and Mäntylä M. Parametric and Feature-Based CAD/CAM: Concepts, Techniques and Applications, 1995.

Sigalov K. and König M. Recognition of process patterns for BIM-based construction schedules. Advanced Engineering Informatics, 2017.

Vilgertshofer S. and Borrmann A. Automatic Detailing of Parametric Sketches by Graph Transformation. Proc. of the 32nd ISARC, Oulu, Finland, 2015

Vilgertshofer S. and Borrmann A. Using graph rewriting methods for the semi-automatic generation of parametric infrastructure models. Advanced Engineering Informatics, 2017

Analyse von Mobilfunkdaten in urbanen Regionen am Beispiel von CDR-Daten aus Mailand 2013

Patrick Scheich[1]

[1]Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen · Technische Universität Darmstadt
Franziska-Braun-Straße 7 · 64287 Darmstadt · E-Mail: scheich@iib.tu-darmstadt.de

Mobiltelefone sind mittlerweile allgegenwärtig und aus dem heutigen Leben kaum noch wegzudenken. Sie helfen uns in der täglichen Kommunikation, Navigation und unterhalten uns. Allerdings hinterlassen sie hierbei nicht nur Spuren bei den verwendeten Diensten sondern auch in den Netzen der Mobilfunkbetreiber. Diese sammeln die anfallenden Daten aus unterschiedlichen Gründen, sei es für die Abrechnung mit den Kunden, die Instandhaltung und den Ausbau des Netzes oder auch der Möglichkeit diese Daten später kommerziell an Dritte weiterzugeben. Der italienische Mobilfunkprovider *Telecom Italia (TIM)* hat im Rahmen eines Wettbewerbs Mobilfunkdaten (Call Detail Records CDR) aus November und Dezember 2013 des Großraums Mailand veröffentlicht. Räumliche und zeitliche Informationen über Telefonate, SMS und mobiler Datennutzung wurden mit weiteren Daten verschnitten und analysiert. Hierfür wurde für das Geoinformationssystem *QGIS* eine Erweiterung geschaffen, um diese CDR-Daten mit den Daten aus OpenStreetMap in Verbindung zu bringen. Anschließend konnte die Qualität der Datenbereitstellung bewertet und diese mit der Analyse räumlicher Beziehungen verknüpft werden.
Keywords: CDR, OpenStreetMap, Mailand

1 Grundlagen

Bei jeder Interaktion eines Endgerätes im Mobilfunknetz fallen auf Providerseite Metadaten an. Der Provider kann aus diesen Daten ermitteln in welcher Funkzelle das Endgerät momentan angemeldet ist und wie viele Daten und in welcher Art diese zwischen Teilnehmer und Provider fließen.

1.1 Call Detail Records (CDR)

Die Aufzeichnung und Auswertung von Verbindungsinformationen stellen für einige Forschungsbereiche eine wichtige Informationsquelle dar. So wurden diese Daten unter anderem zur Untersuchung der Ebola-Krise 2014 (Vogel et al., 2015) (Erikson, 2018), als Hilfsmittel zur Verkehrsplanung (Schmidt and Männel, 2017) oder auch für die Katastrophenabwehr (Schmidt and Männel, 2014) (Moumni et al., 2013) verwendet. Weiterhin können diese Daten zur Analyse des Netzes (Sultan , Ali , Ahmad , Zhang, 2019) benutzt werden und auch Strafverfolgungsbehörden (Rebiger, 2018) und Nachrichtendienste (NSA, 2018) sind an diesen Daten interessiert. Zu dem in dieser Arbeit verwendeten Datensatz sind auch schon andere Arbeiten erschienen (Barlacchi et al., 2015) (Nau, 2017) (Scheich, 2018).

1.2 Datensatz

Im Rahmen einer *Big Data Challenge* wurden durch den italienischen Telekommunikationsprovider *Telecom Italia (TIM)* CDR-Daten aus den Gebieten Mailand und Trento für den Zeitraum November

und Dezember 2013 veröffentlicht (Telecom Italia, 2014). Die Daten sind zurzeit noch über das Portal *Dandelion* (dandelion.eu, 2014) zugänglich.

1.2.1 Zeitliche und räumliche Eingrenzung

Die 7,4 Millionen Einwohner große Metropolregion Mailand (ital. Milano) im Norden Italiens stellte 2013 den größten italienischen Ballungsraum dar. Das Stadtgebiet von Mailand war nach Rom 2013 die zweitgrößte Stadt Italiens. Mit drei Flughäfen, wichtigen Bahn- und Fernverkehrsknoten stellte sie einen wichtigen Infrastrukturknoten südlich der Alpen bereit. Außerdem war Mailand ein beliebtes Touristenziel, Universitätsstadt und beheimatete die beiden Fußballvereine AC und Inter Mailand. Neben dem GSM-Netz wurden 2013 in Italien Anrufe, SMS und mobile Daten über das UMTS- und LTE Netz abgewickelt. Als mobile Endgeräte können das iPhone5s von Apple und das S4 von Samsung genannt werden.

1.2.2 Milano-Grid

Zur Georefferenzierung der CDR-Daten auf das Gebiet der Metropolregion Mailand wurde ein Raster von 100 x 100 quadratische Zellen aufgespannt. Jede Zelle hat eine Kantenlänge von 235 m. Dieses Raster, im folgenden *Milano-Grid* genannt, deckt eine Fläche von 529 km^2 ab. Abbildung 1 projiziert das *Milano-Grid* auf die Daten des Corine-Projects [1] (Celino and Re Calegari, 2015) aus dem Jahre 2012. Das *Corine-Projekt (Coordination of Information on the Environment)* hat das Ziel die Landnutzung der Europäischen Landmasse vereinheitlicht abzubilden. Urbane Gebiete werden in rötlichen Farbtönen angezeigt, landwirtschaftlich genutzte Regionen in gelblichen.

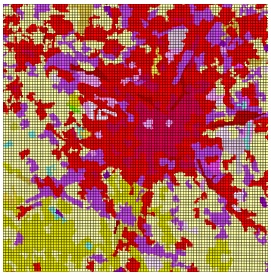


Abbildung 1: Landnutzung des *Milano-Grids*

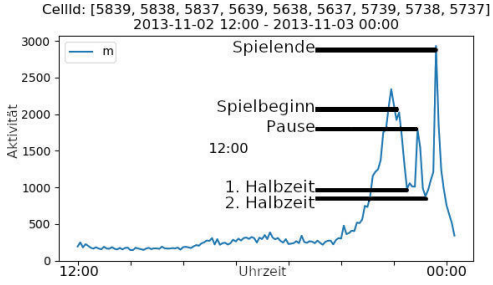


Abbildung 2: Aktivität der mobilen Daten während eines Spieltages

1.2.3 CDR-Daten

Im Rahmen dieses Datensatzes wurden die Aufzeichnungen über die CDR-Daten im 10 Minutentakt in Bezug auf das *Milano Grid* veröffentlicht. Pro ein- und ausgehenden Anruf und SMS wurde ein Ereignis aufgezeichnet. Mobile Daten wurden in 5MB Blöcken oder wenn eine neue Verbindung zustande kam sowie alle 15 Minuten als ein Ereignis aufgezeichnet. Anschließend wurden diese Werte mit einem Faktor multipliziert, um nicht die absoluten Zahlen preisgeben zu müssen. Diese

[1] `https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover`

unscharf gemachten Daten wurden von *Telecom Italia* als Aktivität bezeichnet. In einem kommenden Abschnitt dieses Papers wird beschrieben, wie dieser Faktor für Anrufe und SMS ermittelt und die absoluten Ereignisse zurückgerechnet werden konnten. Die Daten sind wie folgt strukturiert.

Square id Verweist auf die jeweilige Zellnummer des *Milano-Grids*
Time interval Zeitstempel in ms seit dem 1. Januar 1970 (UTC) im 10 Minuten Takt
Country code Ländercode der internationalen Telefonvorwahl des CDR
SMS-in activity (sin) Die Aktivität der eingehenden SMS in einer Zelle
SMS-out activity (sout) Die Aktivität der ausgehenden SMS in einer Zelle
Call-in activity (cin) Die Aktivität der eingehenden Anrufe in einer Zelle
Call-out activity (cout) Die Aktivität der ausgehenden Anrufe in einer Zelle
Internet traffic activity (m) Die Aktivität der mobilen Daten in einer Zelle

1.3 Entwicklung eines QGIS-Plugins zur Verscheidung der Daten

Räumliche Informationen wurden über die Datensätze des OpenStreetMap Projekts[2] bezogen. Hierzu wurden die Informationen einzelner georeferenzierter *Map Features* in Form von Key-Value-Paaren aus dem Datensatz von Januar 2014[3] herausgelesen und je einer Zelle des Milano-Grids zugewiesen. Anschließend wurden diese Informationen zur Verwaltung einer Datenbank zugeführt. Mit Hilfe des entwickelten Python-Plugins *Ogmios* konnten diese Informationen in *QGIS* [4] dargestellt werden. Weiterhin wurde die Visualisierung der CDR-Daten in räumlicher (Auswahl der betrachteten Zellen) und zeitlicher Abgrenzung mit Hilfe dieses Plugins realisiert.

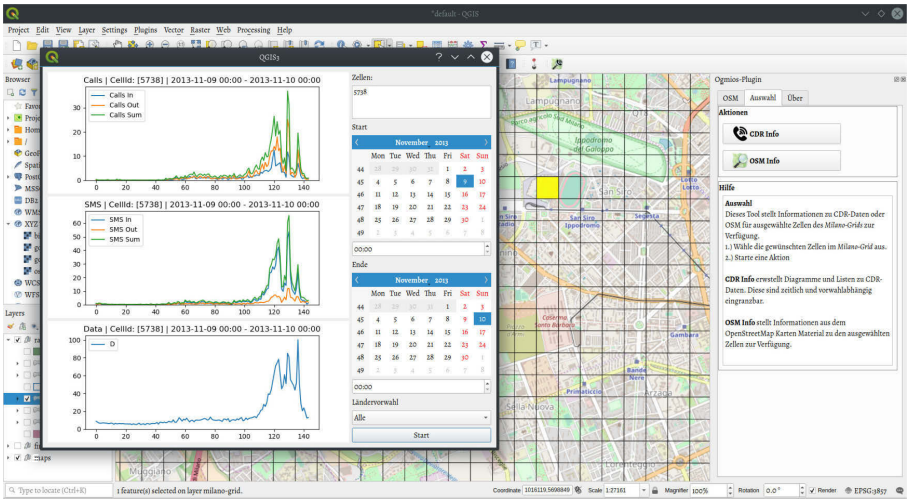


Abbildung 3: QGIS Plugin Ogmios, Visualisierung der CDR-Daten

[2] https://www.openstreetmap.org
[3] https://planet.openstreetmap.org/planet/2014/planet-140101.osm.bz2
[4] https://qgis.org

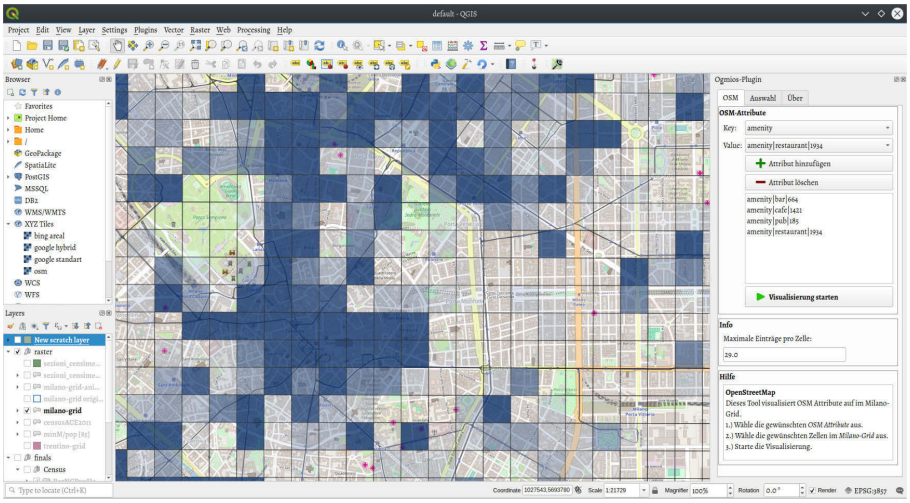


Abbildung 4: QGIS Plugin Ogmios, Visualisierung von Bars, Cafes, Pubs und Restaurants aus OpenStreetMap

2 Analysen

2.1 Streuung einzelner Datenpunkte

Da die Struktur des *Milano-Grids* feiner aufgelöst ist als des Netz, das durch die Funkmasten des Providers aufgespannt wird, und sich Personen mit den Endgeräten in einem 10 Minuten Slot auch in mehreren Zellen aufhalten können, wurden die Aktivitäten pro Zeiteinheit auf mehrere *Milano-Grid*- Zellen aufgeteilt. Separiert man die Daten einzelner Vorwahlbereiche mit geringster Aktivität aus dem Datensatz, werden die Auswirkungen einzelner Ereignisse (Anruf und SMS) auf die Aktivitäten ersichtlich. Die Summe der Aktivitäten eines Zeitslots ermöglichen die Berechnung des o.g. *Verzerrungsfaktors*. Für ein- und ausgehende Anrufe und SMS kann der Wert des Faktors mit der Kreiszahl π ermittelt werden. Ein Anruf oder eine SMS entspricht rund 3,141 Aktivitätspunkten (vgl. Abbildung 5). Somit können einzelne Anrufe und SMS mit dem Herkunftsland der Person verknüpft werden.

2.2 Aktivitäten des gesamten Zeitraums

Betrachtet man die Aktivitäten ein- und ausgehender Anrufe und SMS sowie die der mobilen Daten über das gesamte *Milano-Grid* über den zweimonatigen Zeitraum hinweg, erkennt man deutlich eine geringere Aktivität an Wochenenden und an den Tagen zwischen Weihnachten und Neujahr (vgl. Abbildung 6).

2.3 Tagesablauf

Betrachtet man die Aktivitäten während eines Tages des gesamten Gebietes, wird deutlich, dass sie tagsüber deutlich höher ist als nachts. Am stärksten ist diese in den Stadtgebieten ausgeprägt (vgl. Abbildung 7).

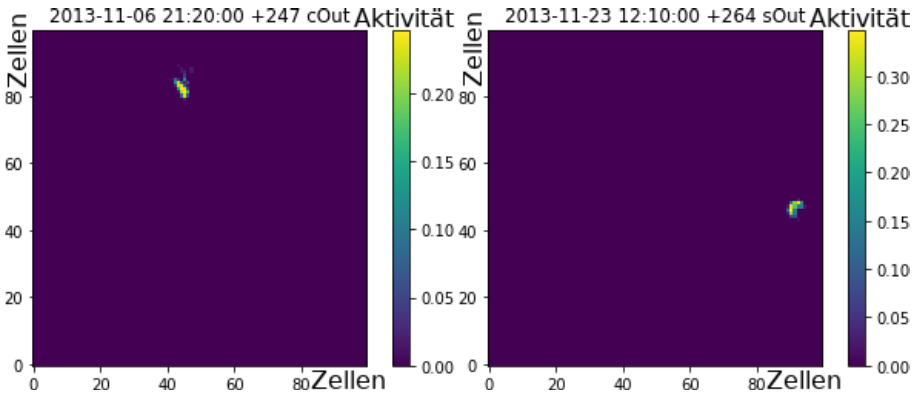


Abbildung 5: Telekommunikations-Aktivitäten einzelner Ereignisse im *Milano-Grid*

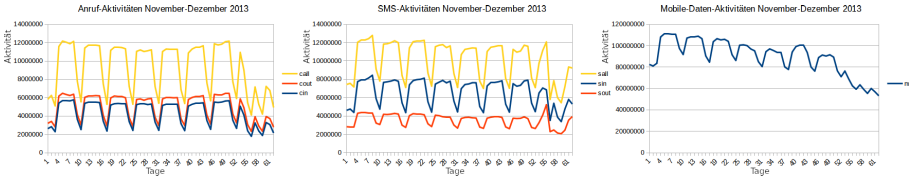


Abbildung 6: Telekommunikations-Aktivitäten Nov-Dez 2013

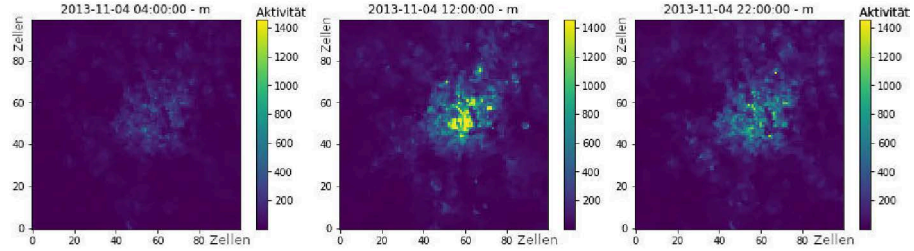


Abbildung 7: Aktivitäten (mobile Daten) während eines Tages im *Milano-Grid*

2.4 Großereignisse

Das Giuseppe-Meazza-Stadion im Westen Mailands bot 2013 80.018 Zuschauern Platz. Die beiden großen Mailänder Fußballmannschaften AC Mailand und Inter Mailand richteten dort ihre Heimspiele aus. Im Zeitraum der Aufzeichnungen fanden sieben Liga- (3 AC, 4 Inter) und je ein Coppa-Pokal- (Inter) sowie ein Champions League-Spiel (AC) statt. Abbildung 2 zeigt die typische Aktivität der mobilen Daten während des Ligaspiels AC Mailand gegen AC Florenz. Anhand des Graphen und den zeitlich genau regulierten Abläufen eines Spieles (je 45 Minuten Spielzeit pro Halbzeit sowie 15 Minuten Halbzeitpause) lassen sich Spielbeginn, Pause und Spielende gut in dem Graphen ablesen. Weiterhin lässt sich erkennen, dass die Aktivität vor Spielbeginn schon früher ansteigt, als sie nach Spielende abfällt. Ausgewertet wurde hier die Zelle des *Milano-Grids*, in der das Stadion liegt, sowie die acht umliegenden Zellen. Dies ist notwendig um der o.g. Steuerung

der Daten entgegen zu wirken.
Anhand der Aktivitäten lässt sich nur sehr ungenau auf die Besucherzahlen im Stadion schließen, da in diesem Datensatz nur ein Provider vertreten ist und auch nur Angaben zu verkauften Tickets öffentlich zugänglich sind. Es fehlen Informationen über die Anzahl der Personen, die im Stadion oder dessen Umfeld beschäftigt sind sowie Offizielle der Vereine, Polizisten usw..

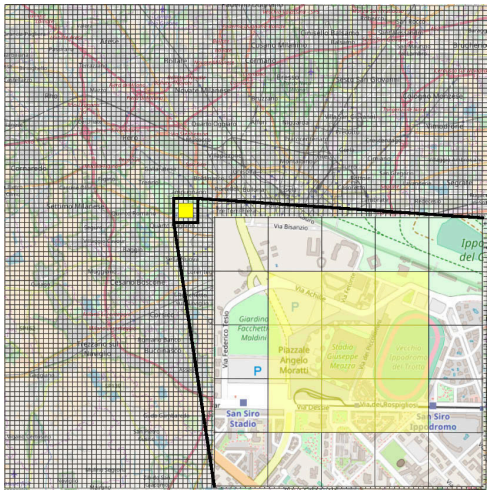


Abbildung 8: Lage des Giuseppe-Meazza-Stadion im *Milano-Grid*

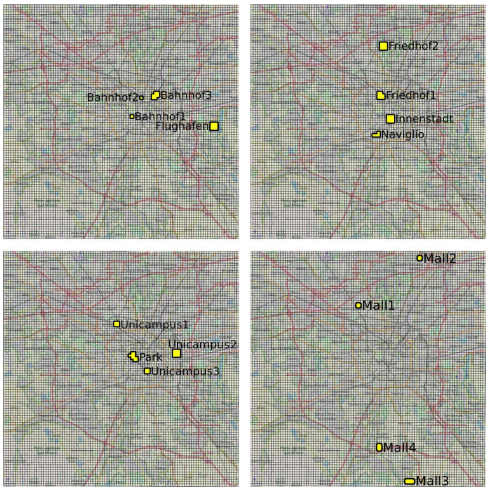


Abbildung 9: Betrachtete Stadtgebiete

2.5 Korrelationen zwischen Aktivität und Wochentagen

Vergleicht man die Aktivitäten im mobilen Netz an Werktagen und Wochenenden für bestimmte Stadtregionen, kann man für einige klare Profile erkennen. So ist an den drei großen Bahnhöfen in der Stadt, dem Flughafen sowie drei ausgewählten Universitätscampussen am Wochenende eine deutlich geringere Aktivität zu erkennen als an Werktagen. In den Bereichen der betrachteten Shoppingmalls steigen am Wochenende die Aktivitäten teilweise über das Niveau der Werktage an.

3 Fazit

3.1 Bewertung der Daten

Der zugrunde liegende Datensatz eignet sich gut, um Abläufe während größerer Ereignisse oder in bestimmten Regionen darzustellen. Er spiegelt aber nur das Telekommunikationsverhalten von Nutzern eines Providers wieder und auch nur, wenn diese aktiv dessen Dienste nutzten. Zwar fallen bei modernen Endgeräten mobile Daten auch im Hintergrund an, das aktive Abrufen oder Bereitstellen von Daten über das mobile Netz verbraucht allerdings weit mehr Kapazitäten. So nimmt die Benachrichtigung eines Instant Messengers weit weniger Daten in Anspruch als das Herunterladen eines Videos. Anhand der vorliegenden Daten kann außerdem nicht unterschieden werden, ob wenige Endgeräte große Datenmengen verursachen oder viele nur kleine Datenmengen abrufen. Weiterhin

kann man der gewählten Art der Datenaufbereitung kritisch gegenüberstehen, da einzelne Anrufe und SMS von Benutzern aus selten verwendeten Vorwahlbereichen im Datensatz abzulesen sind.

3.2 Ausblick

Um ergiebigere Analysen erarbeiten zu können, wären Datensätze hilfreich, die längere Zeitspannen abbilden. Da das Leben und Verhalten im urbanen Raum auch durch die Bedingungen während verschiedener Jahreszeiten geprägt wird, scheint eine ganzjährige Betrachtung sinnvoll. Weiterhin wäre es aufschlussreich, die gewonnenen Daten mit denen anderer Städte zu vergleichen und ggf. Unterschiede festzustellen. Für zukünftige Datensätze wird wahrscheinlich der Anteil an Anrufen und SMS zugunsten der mobilen Daten zurückgehen. Außerdem ist zu prüfen, welche Auswirkungen z.B. öffentliches WLAN und neue Funktechnologien (z.B. 5G) auf *CDR-Daten* haben können.

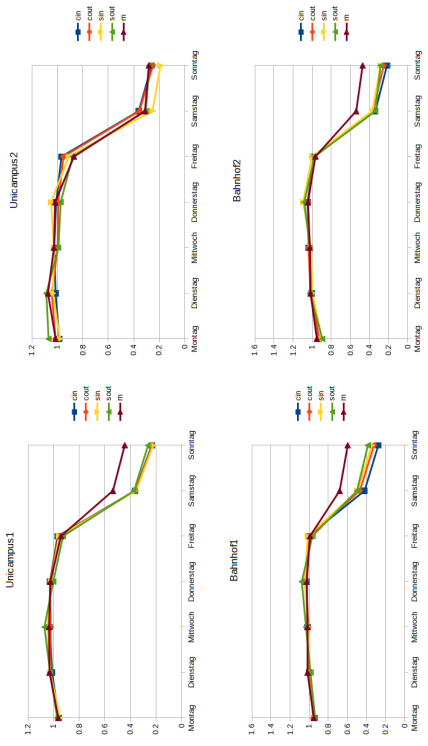


Abbildung 10: Gemittelter Wochenverlauf (Aktivität pro Werktagsaktivität)

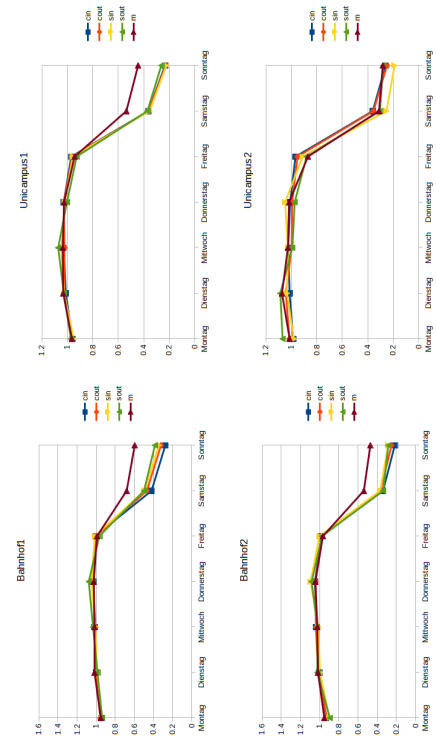


Abbildung 11: Gemittelter Wochenverlauf (Aktivität pro Werktagsaktivität)

Literatur

Barlacchi, G., De Nadai, M., Larcher, R., Casella, A., Chitic, C., Torrisi, G., Antonelli, F., Vespignani, A., Pentland, A. and Lepri, B. (2015), 'A multi-source dataset of urban life in the city of Milan and the Province of Trentino'.
URL: *https://www.nature.com/articles/sdata201555*

Celino, I. and Re Calegari, G. (2015), 'Corine Land Cover Nomenclature as KOS Concept Scheme'. (abgerufen am 05. November 2018).
URL: *http://swa.cefriel.it/ontologies/corine.html*

dandelion.eu (2014), 'CDR Resource'. (abgerufen am 05. November 2018).
URL: *https://dandelion.eu/datagems/SpazioDati/telecom-sms-call-internet-mi/resource/*

Erikson, S. L. (2018), 'Cell Phones as an Anticipatory Technology: Behind the Hype of Big Data for Ebola Detection and Containment'.
URL: *http://www.spp1448.de/fileadmin/media/galleries/SPP_Administration/Working_Paper_Series/WP24_Erikson_180115.pdf*

Moumni, B., Frias-Martinez, V. and Frias-Martinez, E. (2013), 'Characterizing Social Response to Urban Earthquakes Using Cell-phone Network Data: The 2012 Oaxaca Earthquake'.
URL: *https://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2494091.2497350*

Nau, C. K. (2017), 'Potentialanalyse zur Verwendung von Mobilfunkdaten im Bereich öffentliche Sicherheit'. Unveröffentlichte Studienarbeit, TU Darmstadt, Institut für Numerische Methoden und Informatik im Bauwesen.

NSA (2018), 'NSA Reports Data Deletion'. Release No: PA-010-18 June 28, 2018.
URL: *https://www.nsa.gov/news-features/press-room/Article/1618691/nsa-reports-data-deletion*

Rebiger, S. (2018), 'Funkzellenabfrage 2017: So oft hat die Berliner Polizei in deinem Kiez Handys erfasst'. (abgerufen am 11. November 2018).
URL: *https://netzpolitik.org/2018/funkzellenabfrage-2017-so-oft-hat-die-berliner-polizei-in-deinem-kiez-handys-erfasst/*

Scheich, P. (2018), 'Analyse von Mobilfunkdaten zur Identifikation von räumlichen Beziehungen in urbanen Regionen'. Betreuer: Marcus Dombois.
URL: *http://tubiblio.ulb.tu-darmstadt.de/111978/*

Schmidt, A. and Männel, T. (2014), 'Flooding through the lens of mobile phone activity'.
URL: *https://arxiv.org/abs/1411.6574*

Schmidt, A. and Männel, T. (2017), 'Potenzialanalyse zur Mobilfunkdatennutzung in der Verkehrsplanung, Fraunhofer IAO'.
URL: *http://publica.fraunhofer.de/documents/N-438270.html*

Sultan , Ali , Ahmad , Zhang (2019), 'Call Details Record Analysis: A Spatiotemporal Exploration toward Mobile Traffic Classification and Optimization'.

Telecom Italia (2014), 'Big Data Challenge 2014'. (abgerufen am 05. November 2018).
URL: *http://www.telecomitalia.com/tit/en/innovazione/archivio/big-data-challenge-vincitori/infografica-dataset-2014.html*

Vogel, N., Theisen, C., Leidig, J. P., Scripps, J., Graham, D. H. and Wolffe, G. (2015), 'Mining Mobile Datasets to Enable the Fine-grained Stochastic Simulation of Ebola Diffusion'.
URL: *http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050915010054*

Automatisierte Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen

Jens Wiggenbrock

Bauhaus-Universität Weimar · Professur Informatik im Bauwesen Coudraystr. 7 · 99423 Weimar ·
E-Mail: jens.wiggenbrock@uni-weimar.de

Glasfasernetze bilden das Rückgrat der modernen Informationsgesellschaft. Der flächen-deckende Ausbau von Glasfasernetzen bedarf eines hohen Planungsaufwandes. Wieder-kehrende Planungsschritte können durch eine automatisierte Infrastrukturplanung reduziert werden. Dieser Artikel beschreibt ein Konzept zur automatisierten Infrastrukturplanung, dass Methoden zur Datengewinnung, algorithmischen Netzplanung und zur Visualisierung koppelt. Die daraus resultierende Effizienzsteigerung bei der Infrastrukturplanung führt zur Beschleunigung des flächendeckenden Ausbaus von Glasfasernetzen.
Keywords: : Glasfaser, Gigabit, Infrastruktur, FTTx, 5G

1 Einleitung

Der flächendeckende Ausbau mit leistungsfähigen Glasfasernetzen verläuft in Deutschland vergleichsweise langsam. Die Verlegung der Glasfasern bis zu jedem Gebäude ist aufgrund der Tiefbauarbeiten sehr kostenintensiv (Wernick et al. (2018)). Die Kosten für den Glasfasernetzausbau innerhalb von Siedlungsgebieten können aktuell erst durch detaillierte Planungen ermittelt werden. Detaillierte Planungen sind die Grundlage für Wirtschaftlichkeitsbetrachtung, Projektentwicklung, behördliche Genehmigungen und Preisverhandlungen. Die Siedlungsstruktur in Deutschland besteht aus über 11 000 Gemeinden, die zu 75% jeweils weniger als 5000 Einwohner umfassen (Ämter des Bundes und der Länder (2016)). Daraus folgen entsprechend viele aufwendige Planungen des Glasfasernetzausbaus für Wohn-, Gewerbe- und Industriegebiete.

Allgemeingültige Richtlinien zur einheitlichen Planung von Glasfasernetzen liegen nicht vor (Grande et al. (1991)). Die Überführung der bundesweit agierenden Deutschen Bundespost in abgegrenzte privatwirtschaftliche Infrastruktur-Oligopole sowie der mangelnde technische Regulierungszwang von Kommunikationsnetzen verfestigt diesen Stand. Die Qualität der Planung hängt stark von den Vorgaben und dem Budget der Auftraggeber sowie von der Erfahrung und der Leistung der Planenden ab (Wiggenbrock et al. (2015)). Trotz computergestützter Kostenschätzungs- und Planungsverfahren bedarf es heute nach wie vor einer aufwändigen, detaillierten und manuellen Planung. Je nach Größe des zu planenden Gebietes und abhängig von der Detailtiefe kann die manuelle Planung eines Glasfasernetzes mehrere Wochen oder Monate dauern. Die für einen flächendeckenden Glasfasernetzausbau erforderlichen Planungskapazitäten sind jedoch nur unzureichend vorhanden (Burger (2018)).

Der vorliegende Artikel beschreibt ein Konzept zur automatisierten Planung von Glasfasernetzen. Besondere Beachtung finden hierbei die Baubarkeit der automatisiert geplanten

Leitungswege aufgrund glasfaserspezifischer Randbedingen sowie die Wiederverwendbarkeit der Planungsergebnisse in der anschließenden manuellen Ausführungsplanung.

2 Konzept zur automatisierten Glasfasernetzplanung

Die grundsätzlichen Anforderungen an ein Konzept zur Planung von Glasfasernetzen leiten sich aus den Funktionen Geografischer Informationssysteme ab. Für die manuelle Glasfaserplanung umfassen diese in der Regel das manuelle Einzeichnen und Beschriften von Leitungstrassen. Für eine automatisierte Planung von Glasfasernetzen ergeben sich weitere Anforderungen, die nachfolgend entlang des EVA-Prinzips (Eingabe, Verarbeitung, Ausgabe) beschrieben werden.

Im Bereich der **Eingabe** sollen alle verfügbaren, planungsrelevanten Datenformate automatisiert eingelesen werden können. Da die einzulesenden Datenformate sich grundlegend unterscheiden, müssen verschiedene Eingabeschnittstellen vorhanden sein, die die eingelesenen Daten in einheitliche Objekte überführen, sodass die Objekte anschließend verarbeitet werden können.

Die **Verarbeitung** soll alle Schritte zur automatisierten Planung von Glasfasernetzen umfassen. Diese bestehen aus der Analyse und Kombination der für die Planung relevanten Informationen sowie dem darauf aufbauenden algorithmischen Entwurf der Glasfasernetze. Der algorithmische Entwurf soll multikriteriell optimierte Leitungstrassen berechnen.

Die **Ausgabe** der Planungsergebnisse umfasst die Visualisierung für die Planer und den Export in standardisierte Dateiformate. Die Visualisierung der Planungsergebnisse soll der Kontrolle durch die Planer dienen. Hierzu sollen die Planungsergebnisse auf einer Hintergrundkarte, mit wählbaren geographischen Karten und Luftbildern, dargestellt werden.

Das Konzept zur automatisierten Planung von Glasfasernetzen folgt einer Komponentenarchitektur (Abbildung 1). Auf der linken Seite ist die Planungsplattform (blau) dargestellt, auf der rechten Seite sind die Nutzerschnittstelle (orange) und der Planer (rot schraffiert) dargestellt. Beide Softwarearchitekturteile enthalten Schnittstellen für externe Daten sowie zur Kommunikation zwischen der Planungsplattform und der Nutzungsschnittstelle.

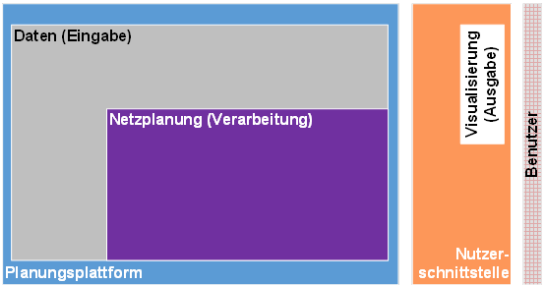


Abbildung 1: Komponentenarchitektur

Die Komponentenarchitektur enthält weitere Module für die Datenverarbeitung, die Netzpla-

nung und die Visualisierung. Die folgenden Unterkapitel beschreiben die einzelnen Komponenten entlang des Planungsprozesses.

2.1 Daten

Daten bilden die Grundlage für die automatisierte Planung von Glasfasernetzen. Beginnend bei verschiedenen Online-Diensten und Dateien können über angepasste Web- und Datei-Schnittstellen externe Daten in das System geladen werden. Ein Modul zur Datenaufbereitung übernimmt die Rohdaten der einzelnen Schnittstellen, interpretiert die Daten und kombiniert diese zu Objekten der Planungsplattform die alle planungsrelevanten Attribute enthalten. Ein Teil der weiteren Datenaufbereitung besteht in der Generierung von zusätzlichen Objekten, die beispielsweise Gehwege entlang von Straßenzügen beschreiben, in die Glasfaserleitungen üblicherweise verlegt werden (Abbildung 3). Alle Objekte werden in einem zentralen Daten-Container abgelegt und stehen der Planungsplattform zur Verarbeitung zur Verfügung.

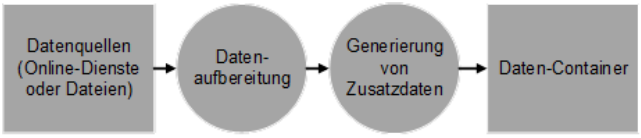


Abbildung 2: Prozessablauf und Datenfluss der Datenverarbeitung

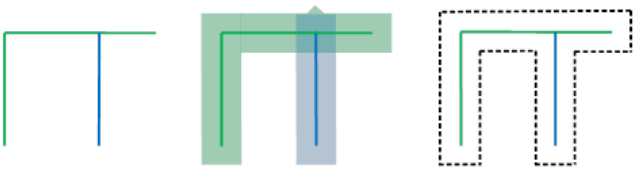


Abbildung 3: Aus Straßenzügen (links) werden mittels Polygon-Buffering (Mitte) Gehwegpolygone (rechts) generiert

2.2 Netzplanung

Die automatisierte Netzplanung bildet das Kernstück für die automatisierte Planung von Glasfasernetzen (Abbildung 4). Das Ergebnis der Netzplanung sind georeferenzierte Leitungstrassen und Materiallisten. Über die Nutzungsoberfläche können Planungsparameter, insbesondere das zur Planung nutzbare Wegenetz, Kosten und Algorithmen, eingestellt sowie der Planungsprozess gestartet werden. Zunächst werden für jedes Objekt die Verlege-kosten berechnet und ein Graph auf Basis des Wegenetzes erstellt. Gemäß einer Punkt-Zu-Punkt-Netzarchitektur werden von einem zentralen Verteilergehäuse (FCP) jeweils ein Teilnehmeranschlusskabel zu jedem Adresspunkt gelegt. Die Netzplanung umfasst mehrere Algorithmen zum optimierten Entwurf des Glasfasernetzes zur Versorgung aller Adressen in einem ausgewählten Gebiet. Abbildungen 4 bis 6 veranschaulichen unterschiedliche Entwürfe verschiedener Algorithmen zur Vernetzung der Adresspunkte. Anschließend werden die berechneten

Leitungswege zusammengefasst und Material- und Trassen-Objekte generiert. Diese Objekte werden in dem globalen Daten-Container abgelegt und stehen der Planungsplattform insbesondere zur Visualisierung zur Verfügung.

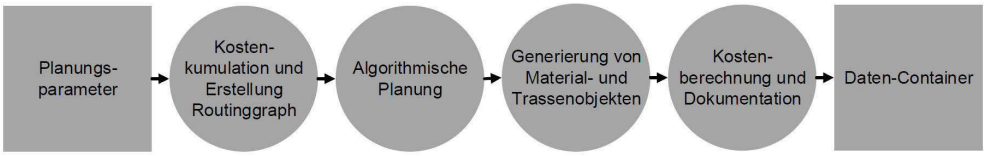


Abbildung 4: Prozessablauf und Datenfluss der Netzplanung

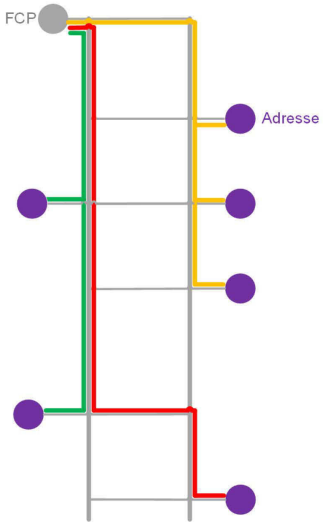


Abbildung 5: Netzplan eines minimalen Distanzbaumes; mehrere kürzeste Routen sind möglich

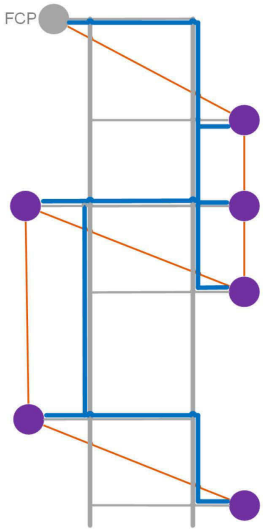


Abbildung 6: Netzplan eines minimalen Spannbaumes

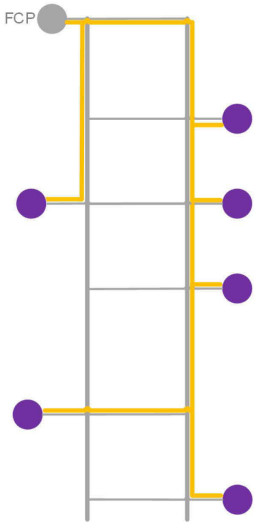


Abbildung 7: Netzplan eines, heuristischen kombinatorischen Baumes

2.3 Visualisierung

Die VDI-Richtlinien 7000 und 7001 beschreiben Empfehlungen und Standards für die erfolgreiche Kommunikation und die Öffentlichkeitsbeteiligung bei der Planung und dem Bau von Infrastrukturprojekten (Ingenieure (2013)). Die „frühe Öffentlichkeitsbeteiligung“ soll bereits während der Planungsphasen erfolgen und durch transparente Darstellungen der geplanten Maßnahmen die strukturierte Beteiligung von Bürgern ermöglichen (Bauer et al. (2017)). Die fundierte Kostenberechnung und besonders die Visualisierung der geplanten Trassenverläufe unterstützen die Information und die frühe Öffentlichkeitsbeteiligung bei Glasfaserausbauprojekten. Die Visualisierung der Netzplanung stellt somit eine wichtige Nutzerschnittstelle im Planungsprozess dar.

Der Daten-Container und die darin beinhalteten Objekte bilden den Datenbestand für die Visualisierung (Wiggenbrock and Smarsly (2016)). Die anzuzeigenden Objekte werden vom

Planer ausgewählt, durch einen Ansicht-Filter aus dem Daten-Container extrahiert und nach Vorgaben hinsichtlich der Geometrie und der Farbgebung aufbereitet. Anschließend werden die aufbereiteten Objekte einem Kartenmodul übergeben und angezeigt.

Abbildung 5: Prozessablauf und Datenfluss der Visualisierung

Die klassische 2D-Kartenansicht ist als Übersichtskarte weit verbreitet und universell einsetzbar. Für die Implementierung stehen eine Vielzahl möglicher Kartenmodule bereit. Abbildung 9 zeigt die Implementierung der Open-Source-Software „Leaflet“ (Agafonkin (2019)). Auf der OpenStreetMap-Hintergrundkarte sind Straßen und Gebäude zu erkennen. Die roten Punkte repräsentieren die Adresskoordinaten der jeweiligen Gebäude. Die schwarzen Linien entlang der Straßenränder zeigen die Glasfaserkabel.

Abbildung 6: 2D-Kartenansicht einer Netzplanung (schwarze Linien) und zugehörige Adressen (rote Punkte) auf einer Hintergrundkarte von OpenStreetMap

Abbildung 7 zeigt das gleiche Gebiet wie Abbildung 6, jedoch als Luftbilddarstellung mittels des Kartenmoduls „Leaflet“ auf einer Hintergrundkarte von Google-Maps. Die automatisch generierten Hausanschlusswege von jedem Adresspunkt bis zum nächsten Gehweg wurden mit farblicher Signalisierung der Unterschreitung (grün) und Überschreitung (rot) eines eingestellten Schwellwertes von 10 m eingezeichnet und zeigen das Potential der integrierten Visualisierung. Zwei Gebäude in der Bildecke rechts oben weisen jeweils einen langen Hausanschlussweg auf. Eine teilweise Zusammenlegung der Hausanschlusswege kann sich kostensenkend auswirken.

Abbildung 7: 2D-Luftbildansicht (Google-Maps) der Hausanschlusswege mit farblicher Signalisierung der Unterschreitung (grün) und Überschreitung (rot) des Schwellwertes von 10 m

3 Zusammenfassung

Diese Arbeit beschreibt ein Konzept zur computergestützten, automatisierten Planung von Glasfasernetzen. Der Bedarf an neuen Konzepten zur Planung von Glasfasernetzen, mit besonderem Blick auf die Umsetzbarkeit und die Wiederverwendbarkeit der Ergebnisse in späteren Planungsphasen wurde dargelegt. Planungsaufwand und -menge für einen flächendeckenden Glasfaserausbau wurden anhand der Siedlungsstrukturen in Deutschland erläutert. Für unterschiedliche Datenquellen wurden ein Prozess zur Extraktion und die Generierung von planungsrelevanten Daten dargestellt. Die Erstellung eines glasfasernetzspezifischen Kosten- und Routingmodells sowie die Netzplanung ermöglichen die strecken-spezifische Berechnung von Tiefbau- und Materialkosten. Die Netzplanung schließt mit wiederverwendbaren Planungsergebnissen für Folgeprozesse ab. Die Visualisierungskomponente bietet unterschiedlichen Nutzern angepasste Darstellungsarten zur Bearbeitung, Information und Kommunikation. Die Planungsergebnisse werden in verschiedenen Detail-stufen auf unterschiedlichen Hintergrundkarten und Luftbildern angezeigt. Die eigenschaftsbezogene konfigurierbare Farbgebung unterstützt die Planung durch die georeferenzierte Anzeige von planungsrelevanten Zusammenhängen. Für den flächendeckenden Glasfaserausbau zeigt dieser Beitrag ein Konzept zur automatisierten Infrastrukturplanung von Glasfasernetzen, das in Siedlungs- und Gewerbegebieten eine Beschleunigung des Glasfaserausbaus bewirken kann. Die effiziente Erstellung von Planungsalternativen erleichtert die Planungen, sodass für ein Gebiet zügig wirtschaftlich tragfähige Lösungen geplant, priorisiert und umgesetzt werden können.

Literatur

Agafonkin, V. (2019), ‘Leaflet [computersoftware]: Open-source-software, github’.
URL: *https://leafletjs.com/*

Bauer, H., Hajasch, L., Lübking, U., Stein, U., Roth, R., Sippel, H.-J., Bock, S., Friesecke, F., Kleger, H., Vowe, G. et al. (2017), *Partizipation in der Bürgerkommune*, Vol. 10, Uni-

versitätsverlag Potsdam.
URL: *http://nbn-resolving.de/urn:nbn:kobv:517-opus4-101601*

Burger, A. (2018), 'Langsamer breitbandausbau – bauverband sieht planung als problem.', *Berlin/Mannheim: dpa* .

Grande, E., Kuhlen, R., Lehmbruch, G. and Mäding, H. (1991), *Perspektiven der Telekommunikationspolitik*, Springer.

Ingenieure, V. D. (2013), 'Frühe Öffentlichkeitsbeteiligung bei industrie- und infrastrukturprojekten (vdi-richtlinien, bd. 7000, dez. 2013, entwurf).', Berlin: Beuth.

Ämter des Bundes und der Länder, S. (2016), 'Daten aus dem gemeindeverzeichnis. gemeinden in den ländern nach einwoh-nergrößenklassen auf grundlage des zensus 2011, statistisches bundesamt.', (Statistisches Bundesamt, Hrsg.).

Wernick, C., Tenbrock, S., Gries, C., Henseler-Unger, I., Plückebaum, T. and von Loris Model, U. M. (2018), 'Tiefbaukapazitäten als engpass für den fttb/h-ausbau? empfehlungen zur effizienzsteigerung und kostensenkung für den markt und die öffentliche hand', *WIK-Consult GmbH, Hrsg.* .
URL: *https://www.wik.org/fileadmin/Studien/2018/WIK-Tiefbaustudie.pdf*

Wiggenbrock, J., Breide, S. and Smarsly, K. (2015), „planung von glasfaser-zugangsnetzen in siedlungsgebieten ", *in* 'Proceedings of the 16th ITG Conference "Photonic Networks". Leipzig, Germany', Vol. 7, p. 2015.

Wiggenbrock, J. and Smarsly, K. (2016), Integrated visualization of installation plans and installation costs of fiber optic networks, *in* 'Broadband Coverage in Germany; 10. ITG-Symposium', VDE, pp. 1–5.

Modellierung eines gerichteten Graphen zur Abbildung von Vorfahrtsregeln

Nico Diekmann[1] and Chris Schiermeyer[2]

Institut für Risiko und Zuverlässigkeit· Leibniz Universität Hannover · Callinstraße 34 · 30167 Hannover
[1]E-Mail: diekmann@irz.uni-hannover.de
[2]E-Mail: schiermeyer@irz.uni-hannover.de

Durch die aktuelle Motivation, den Straßenverkehr umweltschonend zu optimieren, werden aktuell viele Verkehrskonzepte überarbeitet. Daher wächst der Bedarf an Modellen, welche bereits vorab Aussagen über die Wirkungen von baulichen Maßnahmen treffen können. Hierfür werden Simulationen verwendet, welche keinem einheitlichen Schema zur Gestaltung von Vorfahrtsregeln folgen. In dieser Arbeit wird ein modularer Ansatz über einen gerichteten Graphen aufgezeigt, der modellübergreifend genutzt werden kann. Der vorgestellte Graph gliedert sich zwischen Modell- und Infrastrukturebene ein, um Fehlinterpretationen der unterschiedlichen Simulationsmodelle aus der Infrastruktur vorzubeugen. Der Aufbau des Graphen wird anhand eines Beispiels verdeutlicht und letztlich im Verkehrssimulationsmodell MODIS der Leibniz Universität Hannover beispielhaft angewandt.

Keywords: Gerichteter Graph, Vorfahrtsregelung, Verkehrssimulation

1 Einleitung

Die Voraussetzungen für einen klaren und sicheren Ablauf an einer Kreuzung werden durch feste Vorfahrtsregeln gegeben. Jedoch entsteht durch aktuelle Klimastudien der Drang, neue umweltschonendere Verkehrskonzepte umzusetzen (Bohnenkamp (2018)). Für diese Erneuerungen wären kostenintensive bauliche Maßnahmen notwendig. Um diese Kosten zu vermeiden, gewinnt das Überarbeiten von bereits bestehenden Vorfahrtskonzepten immer mehr an Bedeutung. Diese sollte jedoch bereits in der Planungsphase der Umbaumaßnahmen berücksichtigt werden. Eine Lösung wäre die direkte Kalkulation der Folgen der baulichen Maßnahmen, gemessen an der Verkehrssicherheit und der Leistungsfähigkeit derartiger Verkehrsknotenpunkte.
Heutzutage können mithilfe von Computersimulationen bereits vorab Analysen einzelner Verkehrssituationen dargestellt werden. Das Übertragen oder Anwenden in unterschiedlichen Simulationsmodellen ist jedoch nur schwer möglich, da bei den gängigen Datenformaten für die Infrastruktur kein einheitliches Gestaltungsprinzip der Verkehrsregeln verfolgt wird.
OpenDrive (Dupuis et al. (2010)) ist ein weitverbreitetes Datenformat zur Darstellung von Verkehrsszenarien. Allerdings beinhaltet OpenDrive ausschließlich die geometrischen Informationen der Infrastruktur. Zuzüglich bietet OpenDrive die Möglichkeit, Verkehrsbeschilderung zu hinterlegen. Viele Verkehrssimulationen verfolgen jedoch einzig das Ziel, Flussleistungsanalysen von verschiedenen Knotenpunkten oder Verkehrsabschnitten durchzuführen. Die Wahrnehmung von Verkehrsteilnehmern, um eine Beschilderung zu berücksichtigen, ist daher in vielen Simulationen gar nicht implementiert.
Es wäre wünschenswert, dass ein Datenformat entwickelt wird, das modellübergreifend ge-

nutzt werden kann. Das Vorfahrtschema soll sich zwischen der Infrastruktur- und der Modellebene eingliedern. Somit bleiben auf der einen Seite die geometrischen Informationen aus der Infrastruktur unberührt nutzbar. Auf der anderen Seite wird jedoch sichergestellt, dass Verkehrsteilnehmer auf der Modellebene auf die selbe Verkehrsregelbeschreibung zurückgreifen. Das Loslösen des Vorfahrtschemas aus den Ebenen hat den Vorteil, dass dieses beliebig ausgetauscht werden kann, um verschiedene Verkehrsregelungen analysieren zu können. Hinzu kommt, dass kein neues Infrastrukturdatenformat entworfen wird, da zurzeit bereits eine Großzahl an verschiedenen Formaten existieren.
In diesem Beitrag wird, ausgehend von der Problemanalyse, ein graphenbasierter Modellierungsansatz vorgestellt, der ein Gestaltungsschema für Vorfahrtsregeln vorgibt, das unabhängig vom verwendeten Simulationsmodell anwendbar sein soll. Dieser Graph beinhaltet bereits alle Vorfahrtsregeln, die bei Knotenpunkten relevant sind. Zur Abbildung der Verkehrsregelung nutzt der Graph seine gerichteten Kanten, welche die Bevorzugung oder Benachteiligung der jeweiligen Bewegungsrelationen verkörpert.
Im Folgenden wird zunächst der Graph im Allgemeinen definiert. Neben dem grundsätzlichen Aufbau des Graphen, werden auch dessen Eigenschaften und mögliche Datenstrukturen zur Graphendarstellung beschrieben. Außerdem soll beispielhaft aufgezeigt werden, wie ein Vorfahrtsgraph für einen vorliegenden Verkehrsknotenpunkt entworfen wird. Im weiteren Verlauf wird dann die Anwendung des Graphen durch eine Simulation beschrieben.

2 Graphendefinition

In dieser Arbeit wird der Ansatz verfolgt, einen gerichteten Graphen als Grundlage für die vorliegende Vorfahrtsregelung zu verwenden. Der Vorfahrtsgraph wird im Folgenden als RoWG (abgeleitet von engl. *Right of Way Graph*) bezeichnet.
Zunächst werden graphentheoretische Grundlagen beschrieben. Anschließend werden die Eigenschaften eines RoWG aufgeführt und anhand eines Beispiels verdeutlicht.

2.1 Graphentheoretische Grundlagen

Die Eigenschaft eines gerichteten Graphen besteht darin, dass dessen Kanten eine Richtung beinhalten, sodass zwischen verbundenen Knoten nicht zwingend eine Hin- und Rückverbindung bestehen muss (Pahl and Damrath (2001)).
Eine visuelle Darstellung eines beispielhaften gerichteten Graphen zeigt die Abbildung 1.

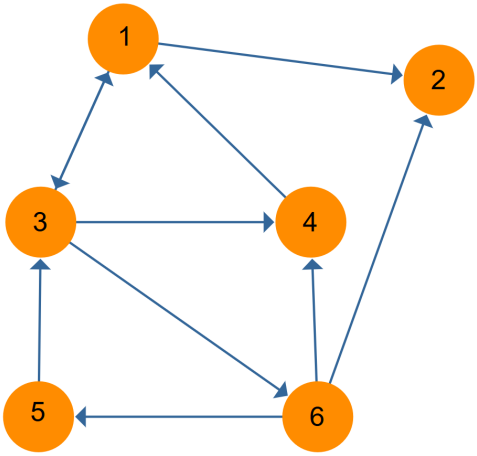


Abbildung 1: Beispiel eines gerichteten Graphen

2.2 Deklaration eines RoWG

Das in dieser Arbeit entworfene Modellierungsprinzip verfolgt denselben Ansatz, wie das vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entworfene Verkehrssimulationsmodell SUMO (Krajzewicz et al. (2012)). In SUMO ist ein Straßenkreuzungsmodell hinterlegt, das die einzelnen Spuren auf Kreuzungen untereinander verlinkt. Somit wird davon ausgegangen, dass auf Kreuzungen für jede Fahrtrichtung eine separate Spur vorliegt (Krajzewicz and Erdmann (2013)). Aufgrund des Platzmangels im innerstädtischen Bereich ist dies jedoch eher selten der Fall. In dieser Arbeit wird dieses Gestaltungsprinzip erweitert und für einen simpleren Straßenaufbau angepasst.
Im RoWG bilden die Knoten die Verbindungen zweier Verkehrsbereiche. Die Kanten zeigen, auf welche Relationen Rücksicht genommen werden muss. In dieser Arbeit wird vorausgesetzt, dass der Vorfahrtsgraph der Simulation zu Beginn zur Verfügung gestellt wird. Hier wird sich darauf beschränkt, den Graph händisch zu kreieren. Es wäre jedoch auch denkbar, einen Automatismus zu hinterlegen, der die Graphendeklaration ausführt.
Im Folgenden werden die Eigenschaften eines RoWG aufgezeigt. Anschließend wird ein Beispielgraph eines RoWG anhand einer Einmündung vorgestellt.

2.3 Eigenschaften eines RoWG

Ein RoWG weist durch seine Definition mehrere Eigenschaften auf, welche folgend aufgeführt sind (Pahl and Damrath (2001)):

- **Antireflexiv**, da ein Knoten bzw. ein Verkehrsbereich keine Erreichbarkeit zu sich selbst haben kann.
- **Asymmetrisch**, da zwischen zwei Knoten im Falle einer Hinverbindung keine Rückverbindung existieren darf.
- **Nicht zusammenhängend**, da der RoWG mehrere Kreuzungen beinhalten kann, diese jedoch in keiner Relation zueinanderstehen.

- **Zyklen** wären möglich, dies hängt jedoch von der jeweiligen Verkehrsregelung ab. Bei einer Rechts-vor-links-Kreuzung sind Zyklen beispielsweise vorhanden und können daher zu einer Pattsituation führen, welche die Verkehrsteilnehmer nur durch Eigeninitiative lösen können. Schlingen sind jedoch durch die Antireflexivität verboten.

Durch die oben genannten Eigenschaften ist die **Nachbarschaft** jedes Knoten des Graphen eindeutig definiert und kann somit zur Abfrage des Vorfahrtsrechts verwendet werden. Über die Nachbarschaft eines Knoten werden seine Nachfolger beschrieben, welche Verbindungen abbilden, denen Vorfahrt zu gewähren ist. Besitzt ein Knoten keine Nachfolger, so ist diese Verbindung in jedem Fall vorfahrtsberechtigt.

2.4 Beispielszenario: Einmündung

Als Beispielszenario soll eine Einmündung durch einen RoWG dargestellt werden. Die Abbildung 2 zeigt eine solche Einmündung. In diesem Beispiel soll die einmündende Straße dem Durchfahrtsverkehr Vorfahrt gewähren. Die Knoten des RoWG werden folgendermaßen definiert: Die Buchstaben im Knotennamen definieren die Verkehrsbereiche mit *von* und *zu*. Somit deutet beispielhaft der Knoten AD auf die Relation zwischen Punkt A zu Punkt D. Der Graph für die Beispieleinmündung wird in Abbildung 3 dargestellt. Möchte ein Verkehrs-

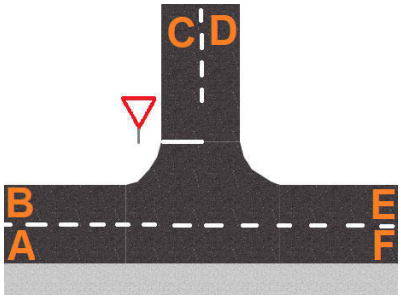


Abbildung 2: Beispielszenario: Einmündung

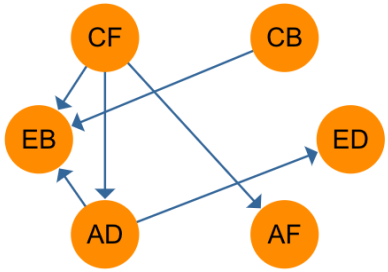


Abbildung 3: RoWG für das Beispielszenario: Einmündung

teilnehmer von Punkt A nach Punkt D links abbiegen, muss dieser alle erreichbaren Knoten abfragen und den entsprechenden Verbindungen Vorfahrt gewähren. In diesem Fall wäre der entgegenkommende Verkehr (Knoten ED und EB) zu berücksichtigen.

2.5 RoWG verbunden mit Lichtsignalanlagen

Der Vorfahrtsgraph korreliert mit der Simulation von Lichtsignalanlagen. Die Einflüsse auf einen Verkehrsteilnehmer werden dabei separat behandelt. Verkehrsteilnehmer müssen so modelliert werden, dass diese ihr Verhalten zunächst nach der Lichtsignalanlage richten. Erst wenn diese die Fahrerlaubnis signalisiert, greifen die Verkehrsteilnehmer auf den RoWG zurück. Der Graph muss dahingehend auf vorliegende Lichtsignalanlagen abgestimmt werden, wie beispielsweise bei der Verwendung von Richtungssignalen.

2.6 Darstellungsformate

Ein Graph lässt sich über verschiedenste Darstellungsformate ausdrücken. Die wesentlichen Unterschiede sind die Interpretierbarkeit von Mensch und Maschine. Im Folgenden werden zwei gängige Repräsentationsformate vorgestellt.

- **Graphendarstellung**: Als Mensch ist die Graphendarstellung leicht nachzuvollziehen. Es existieren zahlreiche Frameworks, welche bereits durch ihre Standardbibliotheken die Möglichkeit bieten, graphentheoretische Ansätze direkt zu verwenden. Ein Beispiel wäre hier das JDK von ORACLE. Bei Programmiersprachen, die diese Funktion nicht anbieten, wäre es denkbar, auf eine Adjazenzmatrix zurückzugreifen.
- **Adjazenzmatrix**: Eine abstraktere Darstellung eines gerichteten Graphen wird über eine Adjazenzmatrix ermöglicht (Lerner (2010)). In der folgenden Abbildung wird der Graph aus Abbildung 1 in eine Adjazenzmatrix überführt. Die Matrix beinhaltet nur Nullen und Einsen, die Auskunft darüber geben, welche Knoten von welchen erreichbar sind. Eine Eins stellt hierbei eine Erreichbarkeit dar.

$$G = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

3 Anwendung des RoWG

Um abschließend den entworfenen Graphentypen anzuwenden, wird ein solcher in das bereits bestehende Verkehrsmodell MODIS überführt. MODIS ist ein Modell zum Abbilden von Verkehrssituationen und wurde am Institut für Risiko und Zuverlässigkeit der Leibniz Universität Hannover entworfen. Basierend auf dem Verkehrsmodell wurde auch ein Simulationsframework entwickelt, das an dieser Stelle genutzt werden soll, um einen RoWG zu testen. Für nähere Informationen zu MODIS wird auf Schiermeyer and Tuck (2015) und Schiermeyer et al. (2017) verwiesen.
Die Abbildung 4 zeigt das Beispielszenario aus Abschnitt 2.4. Hierbei wurde vor der Simulation der Vorfahrtsgraph aus Abbildung 3 hinterlegt. In diesem Szenario werden zwei bedingt verträgliche Verkehrsströme simuliert. Es ist zu erkennen, dass der linksabbiegende Verkehrsteilnehmer im Zentrum der Einmündung stoppt, um dem entgegenkommenden Verkehrsteilnehmer Vorfahrt zu gewähren. Der RoWG ist eindeutig mit den Kreuzungen verbunden und wird von den Verkehrsteilnehmern entsprechend ausgelesen.
Die Anwendung bzw. die Interpretation des Graphen händelt der Verkehrsteilnehmer eigenständig, wobei der Verkehrsteilnehmer entsprechend seiner aktuellen Position auf der Kreuzung erkennen muss, welcher Knoten des RoWG am ehesten seiner aktuellen Situation entspricht.

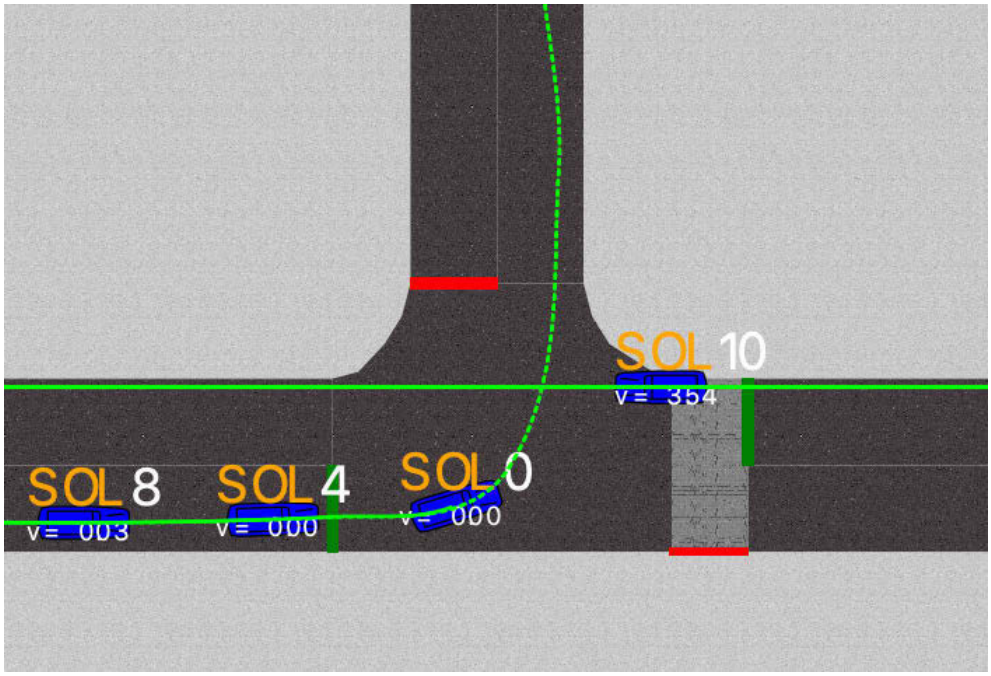


Abbildung 4: Anwendungsbeispiel eines RoWG in MODIS (Blau: Fahrzeuge; grün-gestrichelt: geplante Trajektorie; grün-durchgezogen: Zurückgelegte Trajektorie eines Verkehrsteilnehmers; dunkelgrün und rot: Lichtsignalanlagen (Die Farbe entspricht der aktuellen Phase); weiß: ID des Verkehrsteilnehmers)

4 Fazit & Ausblick

Aktuell werden verschiedenste Computersimulationen genutzt, um den Verkehrsablauf zu prognostizieren. Dabei wird zur Darstellung der Infrastruktur jedoch kein einheitliches Gestaltungsschema verwendet. Somit sind die Infrastrukturmodelle meist nur für eine Simulationsumgebung nutzbar oder können in unterschiedlichen Simulationsmodellen zu verschiedenen Interpretationen der Vorfahrtsregelung führen. In dieser Arbeit wurde ein Graph zum Abbilden von Vorfahrtsregeln vorgestellt. Dieser Graph soll ein Gestaltungsprinzip für die Vorfahrtsregelung aufzeigen, das durch seinen modularen Aufbau von vielen Modellen genutzt werden kann.
Der gerichtete Graph wird durch mehrere Eigenschaften definiert, welche in Abschnitt 2.3 aufgeführt wurden. Der Graph muss vor Simulationsbeginn manuell entsprechend der vorliegenden Verkehrssituation definiert werden. Eine Kopplung mit Lichtsignalanlagen wurde ebenfalls beschrieben. Es wurde ein Beispielszenario aufgezeigt, für die der Vorfahrtsgraph umgesetzt wurde (siehe Abschnitt 2.4). Abschließend wurde das Beispielszenario mithilfe des Simulationsframeworks MODIS der Leibniz Universität Hannover getestet (siehe Abschnitt 3).
Weiterführend an diese Arbeit wäre es denkbar, neben dem Vorfahrtsgraphen auch eine Schnittstelle zwischen einem Infrastrukturmodell und einem Vorfahrtsgraphen zu entwerfen. Über

diese Schnittstelle könnte definiert werden, welche Attribute für das Verhalten eines Verkehrsteilnehmers relevant sind. Dies wäre unter anderem in Bezug auf die Bremspunktberechnung hilfreich.

Literatur

Bohnenkamp, C. (2018), 'Hannover: Wann kommt die Grüne Welle?', `https://www.neuepresse.de/Hannover/Meine-Stadt/Hannover-Wann-kommt-die-Gruene-Welle`. [besucht am 17. Juni 2019].

Dupuis, M., Strobl, M. and Grezlikowski, H. (2010), Opendrive 2010 and beyond - status and future of the de facto standard for the description of road networks, *in* A. Kemeny, F. Mérienne and S. Espié, eds, 'Trends in Driving Simulation Design and Experiments', pp. 231–242.

Krajzewicz, D. and Erdmann, J. (2013), Road intersection model in sumo, *in* Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Institut für Verkehrssystemtechnik, ed., 'Reports of the DLR-Institute of Transportation Systems', pp. 212–220.

Krajzewicz, D., Erdmann, J., Behrisch, M. and Bieker, L. (2012), 'Recent development and applications of SUMO - Simulation of Urban MObility', *International Journal On Advances in Systems and Measurements* **5**(3&4), 128–138.
URL: *http://elib.dlr.de/80483/*

Lerner, J. (2010), Beziehungsmatrix, *in* C. Stegbauer and R. Häußling, eds, 'Handbuch Netzwerkforschung', VS Verlag für Sozialwissenschaften.

Pahl, P. J. and Damrath, R. (2001), *Mathematical Foundations of Computational Engineering*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Schiermeyer, C., Pascucci, F., Rinke, N., Berkhahn, V. and Friedrich, B. (2017), 'MODIS – Ein Simulationsmodell zur Bewertung von Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Gestaltungsprinzip', *Bauingenieur* **92**, 341–346.

Schiermeyer, C. and Tuck, K. (2015), Ein multi-modales Soziale-Kräfte-Modell für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen, *in* C. M. Real Ehrlich and C. Blut, eds, 'Bauinformatik 2015: Beiträge zum 27. Forum Bauinformatik', Wichmann Verlag.

Graphbasierte Routensuche unter Berücksichtigung von Fahrstreifenwechseln

Mirjam Lena Dannert[1] and Chris Schiermeyer[2]

[1,2]Institut für Risiko und Zuverlässigkeit · Leibniz Universität Hannover ·
Callinstraße 34 · 30167 Hannover
[1]E-Mail: mirjam_ dannert@web.de
[2]E-Mail: schiermeyer@irz.uni-hannover.de

Verkehrssimulationen stellen heutzutage ein wichtiges Werkzeug für die Untersuchung vielfältiger Fragestellungen im Verkehrswesen dar. Durch die bevorstehende fortschreitende Automatisierung von Fahrfunktionen gelangen derzeit neue Fragestellungen in den Vordergrund. Eine große Herausforderung ist dabei die automatische Trajektorienwahl in dynamischen Systemen.

In diesem Beitrag wird ein Multiskalenansatz vorgestellt, der die Trajektorienplanung in Verkehrssituationen in einen statischen und einen dynamischen Fall unterteilt. Der statische Fall dient zur initialen groben Routenplanung, wie sie beispielsweise zu Beginn einer Simulation stattfindet. Im dynamischen Fall können unvorhergesehene Ereignisse eine Anpassung der initialen Routensuche erforderlich machen. Hierbei können sowohl lokal begrenzte (z.B. langsame oder stehende Hindernisse) als auch großräumige Effekte (z.B. blockierte Streckenabschnitte) verschiedenartige Änderungen der Trajektorie hervorrufen.

Der Beitrag ist in zwei Teile gegliedert. Zunächst werden grundlegende Konzepte des offenen Dateiformats OpenDRIVE erläutert. Dieses hat sich in den letzten Jahren im Verkehrswesen als ein wichtiges Dateiformat zum Austausch von Infrastrukturdaten etabliert und ermöglicht unter anderem die Beschreibung von mehrspurigen Straßen. Es wird ein Importprogramm für OpenDRIVE-Daten in ein bestehendes Simulationsmodell vorgestellt. Dieses liest die Geometrien der Straßenspuren in OpenDRIVE ein, überführt sie in das MODIS-Format und generiert realistische Trajektorien entlang der Bahnen.

Im zweiten Teil wird ein Modellierungsansatz für die Trajektorienplanung erarbeitet. Diese basiert auf einem gerichteten Navigationsgraph, der zunächst lediglich die Erreichbarkeiten zwischen Knotenpunkten modelliert und zu Beginn der Simulation die Route durch das Netzwerks bestimmt.

Für die weitere Simulation wird ein spezieller Graph für die aktuelle Straße aufgebaut, auf der sich der betrachtete Verkehrsteilnehmer befindet. Dieser Graph kann im Laufe der Simulation bei Bedarf adaptiv verändert werden, so dass auch Spurwechsel bei der lokalen Routensuche berücksichtigt werden können.

Keywords: Verkehrssimulation, OpenDRIVE®, spurenbasiertes Fahren

1 Einleitung und Motivation

Obwohl selbstfahrende Fahrzeuge in der öffentlichen Wahrnehmung heutzutage noch überwiegend sehr futuristisch anmuten, ist in den nächsten Jahrzehnten mit einer fortschreitenden Automatisierung von Fahrfunktionen bis hin zum vollständig autonomen Fahrzeug zu rechnen. Zur Einstufung des Automatisierungsgrads hat sich eine sechsstufige Skala international

etabliert, die unter anderen von der *Bundesanstalt für Straßenwesen* (Gasser et al., 2012) und der *Society of Automotive Engineers* (SAE J3016, 2014) angewandt wird. Diese Skala beginnt mit Stufe 0, die den menschlichen „Selbstfahrer“ repräsentiert und endet mit dem vollautonomen Fahren auf Stufe 5. Je nach Interpretation befinden sich viele Automobilhersteller derzeit am Übergang zwischen den Fahrassistenzsystemen (Stufe 2) und dem hochautomatisiertem Fahren (Stufe 3 und 4). Charakteristisch für diese Phase ist, dass das Fahrzeug nun erstmalig selbstständige Ausweich- oder Spurwechselmanöver durchführt. Hierfür ist eine vorausschauende Fahrweise wünschenswert und damit aus technischer Sicht eine detaillierte Trajektorienplanung erforderlich. Daher stellt sowohl die mikro- als auch die makroskopische Trajektorienplanung derzeit eine zentrale Forschungsfrage dar.

Unabhängig von dieser Entwicklung können Verkehrssimulationen heutzutage als ein Standardwerkzeug für viele Fragestellungen in der Verkehrsplanung betrachtet werden. Da in derartigen Untersuchungen üblicherweise auch Prognosen über die zukünftige Entwicklung des Verkehrsgeschehens einfließen, ist die Berücksichtigung zukünftiger Mobilitätskonzepte bei der Weiterentwicklung der zugrunde liegenden Simulationsmodelle unabdingbar. Bei der Computersimulation automatisierter Fahrzeuge ergibt sich die Neuerung, dass erstmals nicht mehr nur auf ein approximiertes Verhalten menschlicher Verkehrsteilnehmer zurückgegriffen werden kann, sondern sich die entsprechenden Algorithmen des Fahrzeugs exakt in die Simulation übertragen lassen. Im Umkehrschluss lassen sich auch Weiterentwicklungen zukünftig im Simulationsumfeld mit einem hohen Realitätsgrad testen, bevor diese auf reale Fahrzeuge übertragen werden.

Dieser Beitrag behandelt die Trajektorienplanung im Rahmen von Spurwechselmanövern aus der Sicht eines Simulationsmodells. Derartige Fahrstreifenwechsel können sowohl im Stadtverkehr, z. B. beim Umfahren stehender Hindernisse, aber auch außerorts, wie z. B. beim Überholen langsamerer Fahrzeuge, auftreten. Kapitel 2 führt kurz in das Datenformat OpenDRIVE ein, das der folgenden Modellierung als Infrastrukturbeschreibung zugrunde liegt. Dieses Format wurde gewählt, da es zum einen bereits eine Beschreibung der Infrastruktur auf Basis von Fahrstreifen bereitstellt, vor allem aber, da es in der Praxis bereits sowohl in Verkehrssimulationen als auch in Versuchsfahrzeugen erfolgreich als Umfeldbeschreibung erprobt ist (Bokc et al., 2007). Kapitel 3 beschreibt die Zusammenführung von fahrstreifenbasierter Infrastruktur mit dem bestehenden Simulationsmodell MODIS. Innerhalb dieses Simulationsmodells wird in Kapitel 4 ein Konzept für die Trajektorienplanung unter der Berücksichtigung mehrerer Fahrstreifen auf Basis eines Graphen erarbeitet.

2 OpenDRIVE

Das Format OpenDRIVE dient der Beschreibung von Straßenverkehrsnetzwerken in XML-Syntax. Ein Straßenverkehrsnetzwerk in OpenDRIVE besteht aus mehreren Straßen, deren Geometriebeschreibung in Bahnen erfolgt. Diese werden entlang der sogenannten Referenzlinie definiert, welche dem Verlauf einer Straße entspricht. Um ein ganzes Netzwerk zu erhalten, werden die einzeln definierten Straßen miteinander verknüpft. In diesem Kapitel werden nur die für diesen Beitrag wichtigen Eigenschaften beschrieben. Eine vollständige Erläuterung kann in Dupuis et al. (2019) nachgelesen werden.

2.1 Die Referenzlinie

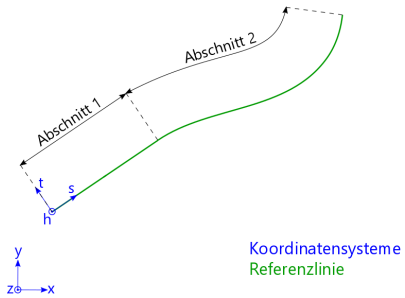


Abbildung 1: Referenzlinie einer OpenDRIVE-Straße

Die Referenzlinie wird in einem globalen x-y-Koordinatensystem beschrieben. Entlang dieser Referenzlinie wird das begleitende Track-Koordinatensystem definiert. Die s-Koordinate dieses Koordinatensystems zeigt in Richtung der Tangente der Referenzlinie am zugehörigen Punkt. Die Beschreibung der Referenzlinie erfolgt in aufeinanderfolgenden Abschnitten (siehe Abbildung 1). Die zur Verfügung stehenden Formen für diese Abschnitte sind Ausschnitte aus:

- Geraden
- Kreisen
- Klothoiden
- kubischen Polynomen
- parametrisch kubischen Polynomen

2.2 Erstellung der (Fahr-)Bahnen

Nach der Beschreibung der Referenzlinie können die (Fahr-)Bahnen, ebenfalls in Abschnitten, beschrieben werden. Jede Fahrbahn bekommt eine Identifikationsnummer zugeordnet.

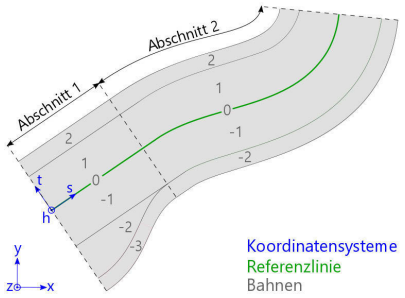


Abbildung 2: Bahnen einer OpenDRIVE-Straße

Die Ausweitung der Bahnen wird abhängig von der s-Koordinate festgelegt. Sie wird mit einem kubischem Polynom beschrieben, dass in Bezug zur Außenkante der vorherigen Bahn oder in Bezug auf die Referenzlinie definiert werden kann. Ein neuer Abschnitt ist notwendig, wenn die Ausweitung einer Bahn mit mehreren Polynomen beschrieben werden muss, beispielsweise bei einer Straßenauffahrt (siehe Abbildung 2). Zu jeder Bahn können weitere Eigenschaften, wie zum Beispiel das Material oder die erlaubte Geschwindigkeit, angegeben werden. Des Weiteren wird gespeichert, welche Bahn mit welcher Bahn einer anderen Straße verknüpft ist.

2.3 Verlinkung von Straßen

Die Verlinkung der Straßen ist notwendig, damit aus ihnen ein Straßennetzwerk entsteht. Für jede Straße wird daher ein Vorgänger und ein Nachfolger angegeben. Diese können vom Typ *Straße* oder vom Typ *Kreuzung* sein.

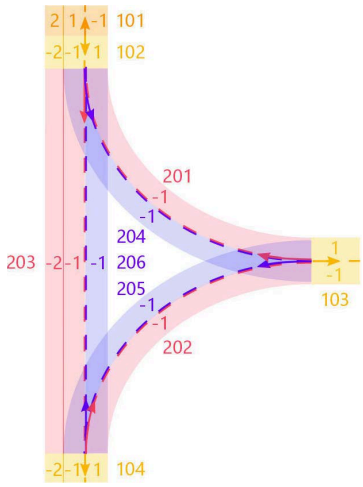


Abbildung 3: Aufbau einer OpenDRIVE-Kreuzung

Der Typ *Kreuzung* wird verwendet, wenn es keinen eindeutigen, also mehrere, Vorgänger oder Nachfolger gibt. Die Straßen innerhalb einer Kreuzung werden Verbindungsstraßen genannt. Diese weisen die Besonderheit auf, dass sie nur Bahnen in eine Richtung führen. Um zwei Straßen über eine Kreuzung zu verbinden, werden daher meistens zwei Verbindungsstraßen definiert, deren Vorgänger und Nachfolger dann eindeutig sind. Die Kreuzung definiert alle existierenden Verbindungen. In Abbildung 3 hat die *Straße* 102 beispielsweise den Vorgänger *Straße* 101. Der Nachfolger von *Straße* 102 ist nicht eindeutig, da ein Verkehrsteilnehmer, der auf dieser Straße in Richtung Kreuzung fährt, auf *Straße* 103 oder auf *Straße* 104 abbiegen könnte. Somit ist der Nachfolger die Kreuzung. Diese beschreibt unter anderen die Verbindungen, welchen *Straße* 102 als eingehende Straße dient. Dabei müssen nicht alle Bahnen weitergeführt werden.

3 Trajektorienplanung im bestehenden Simulationsmodell

In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Trajektorienplanung mit Fahrstreifenwechseln vorgestellt. Dieses soll ermöglichen, im bestehenden Modell MODIS einen spurenbasierten Verkehr simulieren zu können. Dieser Abschnitt behandelt das bestehende Modell und erklärt, wie Spuren in diesem dargestellt und in der Trajektorienplanung berücksichtigt werden.

3.1 MODIS

MODIS ist ein Modell zur Simulation von gemeinsam genutzten Verkehrsflächen. Hier wird nur ein Überblick gegeben, weitere Informationen können Rinke et al. (2017), Schiermeyer et al. (2017) und Schiermeyer and Tuck (2015) entnommen werden.

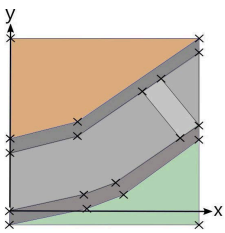


Abbildung 4: Verkehrsszenario

Ein MODIS-Verkehrsszenario besteht aus polygonförmigen Verkehrsgebieten, die sich insbesondere in Funktion und Material unterscheiden. Zur Bestimmung einer Trajektorie von einem Punkt zum anderen wird der kürzeste Weg über die Eckpunkte gesucht und anschließend geglättet. So ist es jedoch nicht möglich, automatisiert ein spurenbasiertes und somit realistisches Fahren zu simulieren. In dieser Arbeit wird deshalb ein erweiterndes Konzept zur spurenbasierten Trajektorienplanung entwickelt, dass für die Simulation autonomer Fahrzeuge unabdingbar ist.

3.2 Spurenerstellung und Bahntrajektorien

Spuren, als Geometrie und Trajektorie, sind im bisherigen Konzept von MODIS nicht bekannt. Jedoch ist es möglich, eine Straße mit mehreren Polygonen, die Fahrstreifen repräsentieren, darzustellen. Da die Straßen in OpenDRIVE-Verkehrsnetzwerken in Bahnen definiert werden, bietet sich die Möglichkeit diese Geometrien einzulesen und als Verkehrsgebiete in einem MODIS-Szenario darzustellen.

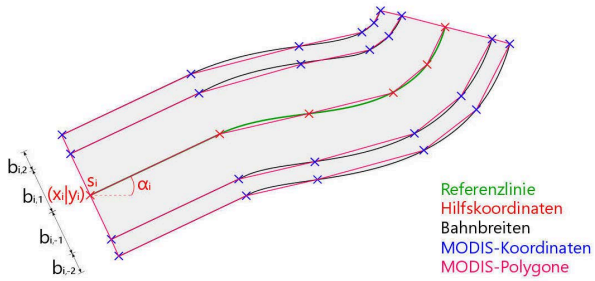


Abbildung 5: Überführung der OpenDRIVE-Bahnen in MODIS-Polygone

Für diesen Vorgang wurde ein Importprogramm entwickelt. Nachdem alle Informationen aus der OpenDRIVE-Datei eingelesen wurden, können auf der Referenzlinie sogenannte Hilfs-koordinaten (siehe Abbildung 5 in rot) berechnet werden, welche die vier ebenfalls in rot gekennzeichneten Informationen beinhalten. Diese Hilfskoordinaten werden für jeden Abschnitt der Referenzlinie einzeln berechnet. Zu Beginn und Ende eines solchen Abschnitts wird immer eine Hilfskoordinate definiert. Wie viele weitere dazwischen erzeugt werden, hängt von der Form des Abschnitts ab. Dabei wird ein gewisser Fehler eingehalten. Dieser entspricht dem Abstand zwischen der Referenzlinie und der Annäherung durch die Hilfskoordinaten an diese. Außerdem müssen Hilfskoordinaten an Stellen gesetzt werden, an denen ein neuer Bahnabschnitt beginnt. Mithilfe der s-Koordinate kann anschließend die Breite für jede Bahn an der zugehörigen Hilfskoordinate berechnet werden. Mit diesen Breiten und den restlichen Informationen der Hilfskoordinate können daraufhin die MODIS-Koordinaten berechnet werden, aus denen schließlich die MODIS-Polygone entstehen. Diese Übernahme der Bahngeometrien reicht jedoch noch nicht zwangsläufig aus, um ein spurenbasiertes Fahren in MODIS zu simulieren. Für jede eingelesene Bahn wird daher direkt eine Trajektorie mitberechnet. Dafür wird an jeder Hilfskoordinate für jede Bahn in der Mitte dieser eine Trajektorien-Koordinate berechnet. Anschließend werden alle Trajektorien-Koordinaten einer Bahn verbunden. Nach einer Glättung entsteht so eine Trajektorie für die jeweilige Bahn.

In der Simulation sollen jedoch auch Spurenwechsel realisierbar sein, für die es natürlich ebenfalls eine Trajektorie zu erstellen gilt. Grundlegend kann diese Trajektorie von einer Spur auf die nächste oder gegebenenfalls übernächste Spur als Ausschnitt eines Klothoids oder kubischen Polynoms dargestellt werden. Die Dimensionen dieser Trajektorie sind unter anderem abhängig von der Geschwindigkeit des Verkehrsteilnehmers und der Breite die beim Spurenwechsel vertikal zur Fahrtrichtung überwunden werden soll.

4 Routensuche im mehrspurigen Verkehr

Die Trajektorie der einzelnen Bahnen oder eines Spurenwechsels zu kennen reicht jedoch nicht aus, um eine Simulation durchführen zu können. Dafür muss bestimmt werden, welche Trajektorien abgefahren werden und wann ein Spurwechsel nötig und machbar ist. Das in diesem Beitrag vorgestellte Konzept beinhaltet zwei Graphen. Der Navigationsgraph wird zu Beginn erstellt und im Regelfall nur einmal zur Berechnung der eigentlichen Route im Netzwerk verwendet. Es wird also ermittelt, welche Straßen benutzt werden sollen. Der Simulationsgraph stellt für einen Verkehrsteilnehmer eine Straße mit ihren Spuren und möglichen Spurwechsel da. Er wird während der Simulation in jedem Zeitschritt Δt aktualisiert und dient der situationsabhängigen Trajektorienplanung.

4.1 Der Navigationsgraph

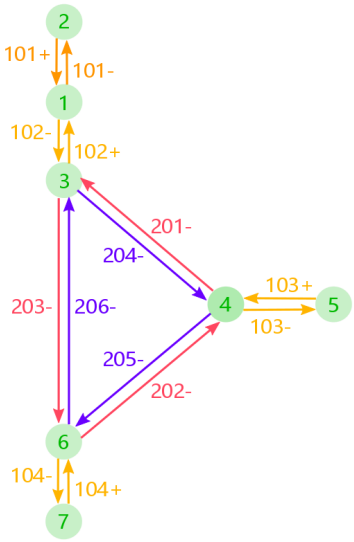


Abbildung 6: Navigationsgraph zur Kreuzung der Abbildung 3

Der Navigationsgraph stellt ein gesamtes Straßenverkehrsnetzwerk dar. Er wird beim Einlesen der OpenDRIVE-Datei durch den Importer erstellt. Jeder Start- und Endpunkt einer Straße wird, sofern er nicht schon existiert, dem Graphen als Knoten hinzugefügt. Zwischen diesen Knoten werden die Straßen als Kanten dargestellt. Für jede Fahrtrichtung, die eine Straße zulässt entsteht eine gerichtete Kante. Damit diese Kanten die zugehörigen Straßen sinnvoll repräsentieren, werden ihnen Gewichte zugeordnet. Diese können entweder der Länge der Straße entsprechen, oder der Zeit, die benötigt wird, die Straße entlang zu fahren. In Abbildung 6 ist eine Skizze des Navigationsgraphen der Kreuzung aus Abbildung 3 dargestellt.
Vor einer Simulation wird für jeden Verkehrsteilnehmer die beste Route durch den Graph berechnet. Dafür werden dem Graphen Start- und Endpunkt des Teilnehmers als zusätzliche Knoten hinzugefügt. Durch weitere Kanten werden diese Knoten dann mit dem nächstgelegenen Knoten des Netzwerkes verbunden.

4.2 Der Simulationsgraph

Der für jeden Verkehrsteilnehmer individuelle Simulationsgraph stellt immer nur die Straße dar, auf der sich der behandelte Verkehrsteilnehmer zum Zeitpunkt der Simulation befindet. Für jede zulässige Bahn wird eine gerichtete Kante definiert, welche die zugehörige Trajektorie der Bahn repräsentiert. Zu jedem Knoten, zwischen denen die Kanten definiert sind, werden die Koordinaten gespeichert, die der Lage im Modell entsprechen.

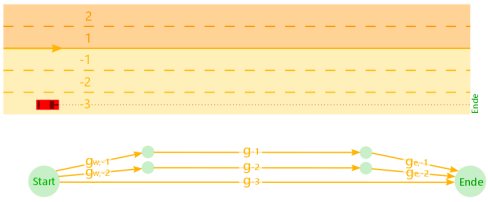


Abbildung 7: Simulationsgraph einer mehrspurigen, leeren Straße

Die Koordinaten des Startknotens entsprechen der aktuellen Position des Verkehrsteilnehmers, die des Endknotens den Koordinaten des Endes derjenigen Spur, auf der die anschließende Kreuzung oder nächste Straße befahren werden soll. Für einen Spurwechsel wird ein zusätzlicher Knoten definiert, der Spurwechsel selber wird als weitere Kante dargestellt.

Vom Startknoten auf jede andere mögliche Bahn gibt es immer einen Spurwechsel. Am Ende des Graphen führen von allen Bahnen, die nicht den Endpunkt beinhalten, Spurwechsel zum Endpunkt der Straße. In jedem Zeitschritt der Simulation wird der Simulationsgraph der vorliegenden Verkehrssituation angepasst. Dies geschieht, indem die Kanten situationsabhängig gewichtet werden. Somit kann dann der in diesem Zeitschritt beste Weg gewählt werden. Das grundlegende Gewicht einer Bahnkante entspricht der Zeit, die benötigt wird die zugehörige Trajektorie entlangzufahren. Weiterhin wird es mit zwei Faktoren multipliziert. Einer, um die linken Spuren einer Fahrtrichtung zu bestrafen, damit der Verkehrsteilnehmer vorzugsweise auf der rechten Spur fährt und einer, der für bestimmte Verkehrsarten die Nutzung der jeweiligen Bahn einschränkt.
Um die Gewichte einer Spurwechselkante bestimmen zu können, werden zwei Bereiche definiert: der Reaktions- und der Sichtbereich (siehe Abbildung 8).

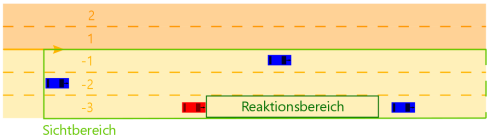


Abbildung 8: Sicht- und Reaktionsbereich eines Verkehrsteilnehmers

Der Reaktionsbereich ist ein Abschnitt vor dem Verkehrsteilnehmer, in dem sich Auslöser für ein Spurwechsel befinden können. Beispielsweise ein langsameres Fahrzeug, zu dem der nötige Sicherheitsabstand ohne Geschwindigkeitsverringerung nicht länger eingehalten werden kann.

Ist in diesem Reaktionsbereich ein solcher Auslöser vorhanden, wird mithilfe des Sichtbereichs geprüft, ob ein Spurwechsel möglich ist. Innerhalb des Sichtbereiches kennt der Verkehrsteilnehmer die Position und Geschwindigkeit aller Verkehrsteilnehmer. Ist ein Wechsel nicht möglich, wird dem Gewicht der Kante, die den Spurwechsel repräsentiert, ein unendlich großer Term hinzugefügt, sodass der Wechsel ausgeschlossen wird. In diesem Fall muss der Verkehrsteilnehmer anders auf den Auslöser reagieren, zum Beispiel die Geschwindigkeit verringern. Gründe einen Spurwechsel zu unterdrücken sind unter anderen:

- der Sichtbereich ist nicht groß genug, um Gefahren zu erkennen
- auf der Spur, auf die gewechselt werden soll, befindet sich ein Fahrzeug, dass den Sicherheitsabstand nach dem Wechsel nicht mehr einhalten könnte oder zu dem der Sicherheitsabstand nach dem Wechsel nicht groß genug wäre
- es würde einem Überholvorgang von rechts gleichen

5 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das offene Datenformat OpenDRIVE vorgestellt und erklärt, wie die Geometrie in ein MODIS-Modell importiert werden kann. Dieser Import wird genutzt, um ein fahrstreifenbasiertes Verkehrsszenario zu generieren. Weiterhin wurde die Erstellung der Trajektorien entlang dieser Fahrstreifen sowie der Spurenwechsel zwischen diesen Bahnen erläutert. Schließlich wurde ein graphbasiertes Konzept vorgestellt, das eine Routensuche durch die erstellten Trajektorien ermöglichen soll. Nach der Implementierung dieses Konzeptes, soll das Simulieren eines realistischen, spurenbasierten Verkehrs im Modell MODIS möglich sein. Folglich wird ein autonomer Verkehr darstellbar sein, der nicht nur den Fahrspuren der Straße folgt, sondern in dem Verkehrsteilnehmer situationsabhängig Spurwechselvorgänge vornehmen können. Da der Simulationsgraph für jeden Verkehrsteilnehmer einzeln aufgestellt wird, wird es zudem möglich sein, einzelnen Teilnehmern eigene Eigenschaften zuweisen zu können. Beispielsweise, dass ein einzelner Autofahrer den Sicherheitsabstand nicht richtig einschätzen kann. So kann ebenfalls getestet werden, wie ein autonomer Verkehr auf solche menschlichen Fehlverhalten reagiert. Dies vorerst zu Simulieren ist besonders im Hinblick auf die Entwicklung und das Testen von autonomen Fahrzeugen auf realen Straßen sehr wichtig, da so Risiken eines Unfalls reduziert werden können.

Literatur

Bokc, T., Maurer, M. and Farber, G. (2007), Validation of the Vehicle in the Loop (VIL); A Milestone for the Simulation of Driver Assistance Systems, in '2007 IEEE Intelligent Vehicles Symposium', IEEE, pp. 612–617.

Dupuis, M., Hekele, E. and Biehn, A. (2019), Format Specification, rev. 1.5 edn, VIRES Simulationstechnologie GmbH, Grassinger Str.8, 83043 Bad Aibling. OpenDRIVE©R .

Gasser, T. M., Arzt, C., Ayoubi, M., Bartels, A., Bürkle, L., Eier, J., Flemisch, F., Häcker, D., Hesse, T., Huber, W. et al. (2012), 'Rechtsfolgen zunehmender Fahrzeugautomatisierung', Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Unterreihe Fahrzeugtechnik (83).

Rinke, N., Schiermeyer, C., Pascucci, F., Berkhahn, V. and Friedrich, B. (2017), A multi-layer social force approach to model interactions in shared spaces using collision prediction, in 'Transportation Research Procedia', Vol. 25, Elsevier, pp. 1249–1267.

SAE J3016 (2014), 'Taxonomy and definitions for terms related to on-road motor vehicle automated driving systems', Society of Automotive Engineers .

Schiermeyer, C., Pascucci, F., Rinke, N., Berkhahn, V. and Friedrich, B. (2017), 'MODIS - Ein Simulationsmodell zur Bewertung von Verkehrsflächen nach dem Shared-Space-Gestaltungsprinzip', Bauingenieur (92), 341–346.

Schiermeyer, C. and Tuck, K. (2015), Ein multi-modales Soziale-Kräfte-Modell für gemeinsam genutzte Verkehrsflächen, in 'Forum Bauinformatik 2015'.

Universitätsverlag der TU Berlin

FORUMBAUINFORMATIK

31. Forum Bauinformatik

11.–13. September 2019 in Berlin
Proceedings

Das Forum Bauinformatik steht unter dem Motto „von jungen Forschenden für junge Forschende“. Es bietet jungen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie interessierten Studierenden die Möglichkeit, ihre Forschungsarbeiten zu präsentieren, Problemstellungen fachspezifisch zu diskutieren und sich ganz allgemein über den neusten Stand der Forschung zu informieren. Zudem ergibt sich dadurch eine ausgezeichnete Gelegenheit, in die wissenschaftliche Gemeinschaft im Bereich der Bauinformatik einzusteigen und Kontakte zu anderen Forschenden zu knüpfen.

ISBN 978-3-7983-3104-4 (print)
ISBN 978-3-7983-3105-1 (online)

ISBN 978-3-7983-3104-4

http://verlag.tu-berlin.de