

Scanning and data capturing for Integrated Resources and Energy Assessment using Building Information Modelling

SCI_BIM

M. Honic, I. Kovacic, M. Sreckovic,
G. Gourlis, H. Rechberger,
P. Aschenbrenner, J. Fellner,
M. Wimmer, I. Gilmutdinov, U. Pont,
A. Mahdavi, M. Schuß, P. Ferschin, P. Kan,
I. Schlögel, A. Hinterleitner, K. Löcker,
R. Totschnig, P. Meixner, I. Greussnig,
S. Schmidt, H. Steiner, G. Uhlariova,
A. Ragoßnig, K. Kondracki, J. Maier,
U. Moroz, M. Ragoßnig-Angst, M. Raskovic

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

21/2021

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien
Leiter: DI Michael Paula

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

Scanning and data capturing for Integrated Resources and Energy Assessment using Building Information Modelling

SCI_BIM

DI. Dr. techn. Meliha Honic, Univ. Prof. DI. Dr. techn. Iva Kovacic,
Mag. Dr.rer.soc.oec. Marijana Sreckovic, DI. Georgios Gourlis
Institut für interdisziplinäres Bauprozessmanagement, TU Wien

Univ. Prof. DI. Dr. techn. Helmut Rechberger, Ing. Philipp Aschenbrenner,
Assoc. Prof. DI. Dr. techn. Johann Fellner
Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement, TU Wien

Assoc. Prof. DI. Dr.techn. Michael Wimmer, DI. Ildar Gilmutdinov
Institut für Visual Computing & Human-Centered Technology, TU Wien

DI. Dr. techn. Ulrich Pont, Univ. Prof. DI. Dr. techn. Ardeshir Mahdavi, Assoc. Prof.
DI. Dr. techn. Matthias Schuss, Ass. Prof. DI. Dr. techn. Peter Ferschin,
Mag. Dr. techn. Peter Kann
Institut für Architekturwissenschaften

DI. Dr. Ingrid Schlögel, DI. Alois Hinterleitner, Klaus Löcker, Mag. Ralf Totschnig
ZAMG ArcheoProspections Abteilung Geophysik

DI. Dr.techn. Philipp Meixner, Mag. Isabelle Greussnig,
DI. Stefan Schmidt, DI. Hannes Steiner, DI. Gizela Uhlariova
Meixner Vermessung ZT GmbH

DI. Dr. Arne Ragoßnig, DI. Krzysztof Kondracki, DI. Dr. Jürgen Maier,
DI. Uliana Moroz, DI. Michaela Ragoßnig-Angst, Melanie Raskovic, BSc.,
RM Umweltkonsulenten ZT GmbH

Wien, Dezember 2020

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Vorbemerkung

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform www.NachhaltigWirtschaften.at zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Michael Paula
Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)

Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung	8
2	Abstract	10
3	Ausgangslage	12
3.1.	Motivation	12
3.2.	Stand der Technik	14
3.2.1.	As-built BIM – BIM im Bestand	14
3.2.2.	Ground Penetrating Radar (GPR)	15
3.2.3.	BIM & Gamification	16
3.3.	Stand des Wissens der Forschungspartner	17
3.3.1.	Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement	17
3.3.2.	Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement	17
3.3.3.	Institut für Architekturwissenschaften	18
3.3.4.	Institut für Visual Computing and Human-Centered Technology	19
3.4.	Nationale und internationale Projekte	19
4	Projekthalt und Methoden	21
4.1.	Proof of Concept – Integrale Gebäudeaufnahme und Modellierung für das as-built BIM-Modell	21
4.2.	Entwicklung des semi-automatisierten Scan-to-BIM Verfahrens	22
4.3.	Energie-Modellierung und Simulation	23
4.4.	Materieller Gebäudepass (MGP) auf Basis der ermittelten Daten sowie Szenarien für den Ressourcenkataster	24
4.4.1.	Materieller Gebäudepass (MGP)	24
4.4.2.	Szenarien für den Ressourcenkataster	25
4.5.	Gamification für BIM im gesamten Lebenszyklus	26
4.6.	Kosten-Effektivitäts-Analyse	27
5	Ergebnisse	28
5.1.	Process-Design SCI_BIM	28
5.2.	Generierung des „low-tech“ und „high-tech“ BIM-Modells (Geometrie)	30
5.3.	Modellierung der Materialität	32
5.3.1.	Registrierung von Geometrie & Material	32
5.3.2.	Klassifizierung der Wände	32
5.4.	Semi-automatisierte Erstellung des BIM-Modells	34
5.4.1.	Erster Prototyp der Scan-to-BIM Algorithmen (Geometrie)	34
5.4.2.	Zweiter Prototyp der Scan-to-BIM Algorithmen (inkl. Material)	34
5.5.	MGP-Modell	35
5.5.1.	MGP-Berechnungen der Außenwände	36

5.5.2.	MGP-Berechnungen des Fundaments und der dazugehörigen Fußböden	37
5.5.3.	Upscaling der Ergebnisse auf Stadt-Ebene: Ressourcenkataster	38
5.6.	Modellierung und Monitoring des Energiebedarfs	39
5.6.1.	BEM-Modell	39
5.6.2.	Auswertung der Monitoring-Messdaten	39
5.7.	Gamification.....	42
5.7.1.	Gamification-Prototyp	42
5.7.2.	Evaluierung von Gamification für BIM4FM	43
5.7.3.	Optimierung der Gamification-Plattform	44
5.8.	Kosten-Effizienz Analyse: Vergleich der vier MGP-Modelle MGPv1-4	45
5.9.	Finales Framework „Scan to BIM4FM“	48
5.10.	Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“	49
6	Schlussfolgerungen	50
6.1.	Erkenntnisse für das Projektteam und die Öffentlichkeit.....	50
6.2.	Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten	50
7	Ausblick und Empfehlungen	52
8	Verzeichnisse.....	53
9	Anhang.....	58
9.1.	Data Management Plan (DMP)	58
9.2.	Roadmap „Scan to BIM4FM“	59
9.3.	Journal Paper	59

1 Kurzfassung

Motivation und Forschungsfrage

Auf Grund des weltweit steigenden Verbrauchs von materiellen Ressourcen und dem ebenfalls ansteigenden Aufkommen von Abfall sind Gebäudebestände nicht nur für die Reduktion des Energieverbrauchs, sondern auch als zukünftige Quellen für materielle Ressourcen (Urban Mining) von wesentlicher Bedeutung. Jedoch fehlt das Wissen über die genaue materielle Zusammensetzung der Gebäudebestände, um die zukünftige Nutzung modellieren und prognostizieren zu können. Die Forschungsfrage ist, ob durch Einsatz der digitalen Technologien „Laserscanning“ und „Ground Penetrating Radar“ (GPR) sowie durch ein Gamification-Konzept, die Erstellung und Instandhaltung eines digitalen Zwillings (BIM-Modell), welcher als Basis für Urban Mining dient, möglich ist.

Ausgangssituation/Status Quo

Siedlungen und Infrastrukturen stellen den größten Materialbestand in einer industriellen Volkswirtschaft dar. Die weltweiten Materialbestände sind so groß wie die Reserven an Primärressourcen in der Natur. Langfristig gesehen ist es daher von großer Bedeutung, den urbanen Materialbestand instand zu halten oder immer wieder zu rezyklieren, um die Nutzung von Primärressourcen und somit die Abhängigkeit an Importen zu minimieren – eine Strategie namens „Urban Mining“. Gleichzeitig verbrauchen Gebäude weltweit rund 35% der Energie und verursachen ca. 40% der globalen CO₂-Emissionen [Abergel et al., 2017]. Bei einer Neubaurate von 3% [Euroconstruct, 2018] ist der Gebäudebestand wesentlich für die Minimierung des Energieverbrauchs.

Projekt-Inhalte und Zielsetzungen

Ziel dieses Projekts ist, durch Kopplung unterschiedlicher digitaler Technologien und Methoden zur Datenerfassung (Geometrie und materielle Zusammensetzung) und Modellierung (as-built BIM) die Steigerung der Ressourcen- und Energieeffizienz mit Einsatz eines Gamification-Konzepts zu ermöglichen. Anhand einer realen Fallstudie (TU Wien, Aspanggründe) wird die integrale Datenerfassung getestet und wirtschaftlich evaluiert.

Methodische Vorgehensweise

Für die Erfassung der Geometrie wird Laserscanning und für die materielle Zusammensetzung die Georadar-Technologie eingesetzt. Dabei wird die Eignung des Georadars für die Materialdatenermittlung gekoppelt mit Laserscantechnologie für die Geometrieerfassung getestet, um das Proof of Concept für die semi-automatisierte Generierung des informations- und datenreichen as-built BIM-Modells, welches die Basis für den materiellen Gebäudepass (MGP) und Building Energy Modeling und Simulation (BEM) bildet, zu entwickeln. In diesem Projekt wird auch der innovative Gamification-Ansatz getestet, bei welchem durch NutzerInnen-Beteiligung (NutzerInnen erstellen die Foto-Dokumentation mit Smartphone, welche via Gamification-Plattform in das as-built-BIM Modell eingebaut wird) bauliche Änderungen als auch das NutzerInnenverhalten (offene Fenster, Beleuchtung usw.) erfasst werden. Durch Einbettung der Gamification-Daten wird das as-built BIM-Modell semi-automatisch instandgehalten und bildet somit die Grundlage für BIM für Facility Management (BIM4FM). Einerseits werden die baulichen Änderungen festgehalten (statisch), andererseits wird durch die Dokumentation des NutzerInnenverhaltens das Modell für die operative Steuerung entwickelt (dynamisch).

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Mit dem Proof of Concept wird eine Forschungslücke geschlossen – die Erfassung und Modellierung der Geometrie ist bereits gut erforscht, jedoch fehlen die Methoden für die Erfassung und Modellierung der materiellen Zusammensetzung. Als wesentliche Innovation dieses Vorhabens ist die Entwicklung der Scan-to-BIM Algorithmen - semi-automatisierte Erkennung und Modellierung von informationsreichen BIM-Objekten aus der Point-Cloud sowie aus den GPR-Messungen, die Nutzung von Gamification für die Reduktion des Energieverbrauchs, als auch das automatisierte Update von as-built-BIM4FM zu nennen. Das Hauptergebnis ist das entwickelte „Process-Design“ von SCI_BIM, welches alle Teilschritte von der Erhebung der Daten bis zur Erstellung und Instandhaltung des Digital Twin aufzeigt.

Ausblick

Die erreichten Ergebnisse in SCI_BIM bilden die Basis für das Folgeprojekt BIMstocks „Digital Urban Mining Platform for Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS“¹, in welchem die Technologien „Laserscanning“ und „GPR“ an mehreren Bestandsobjekten angewendet werden, um ein Upscaling auf Stadt-Ebene zu ermöglichen. Langfristig betrachtet, dient die digitale Urban Mining Plattform zur Erhöhung von Rezyklierungs- und Wiederverwendungsraten auf Stadt-Ebene.

¹ www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bimstocks/

2 Abstract

Motivation and research question

Due to the rapidly increasing consumption of resources and land worldwide, as well as the growing generation of waste, the building stock plays a crucial role not only for the reduction of the energy consumption, but also as a future source of materials (urban mining). However, there is a lack of information on the detailed material composition of the building stock, which is the main obstacle for modelling and predicting its future use. Therefore, the main research question is whether the use of the digital technologies “Laser Scanning” and “Ground Penetrating Radar” (GPR) as well as a gamification concept, enable to develop and maintain a digital twin (BIM model) which serves as a basis for urban mining.

Initial situation/status quo

Building stocks and infrastructures are the largest material stock of industrial economies. The global material stock is about as large as reserves of primary resources in nature. It is of long-term importance to maintain or frequently recycle the urban material stock in order to minimize the use of primary resources and thus the dependency on imports – a strategy called “urban mining”. Simultaneously, buildings consume about 35% of energy worldwide and cause about 40% of global CO₂ emissions [Abergel et al., 2017]. With a new construction rate of 3% [Euroconstruct, 2018], the existing building stock is crucial for minimising energy consumption.

Project contents and objectives

The aim of this project is to enable the increase of resource and energy efficiency by using a gamification concept and coupling different digital technologies and methods for data acquisition (geometry and material composition) and modelling (as-built BIM) of buildings and assets. Based on a real case study (TU Wien, Aspanggründe) the integrated data acquisition and modelling methods are tested and evaluated in terms of costs and benefits.

Methodical procedure

Laser scanning is used for geometry acquisition and the technology “Ground Penetrating Radar” (GPR) for the material composition. Thereby the suitability of the GPR for the identification of materials coupled with laser scanning technology is tested, to develop the proof of concept for the semi-automated generation of an information-rich as-built-BIM, which enables an efficient generation of models for Material Building Passports (MBP) or Building Energy Modelling and Simulation (BEM). Within this project, an innovative gamification concept is developed, in which structural changes and user behaviour (such as open windows or lighting) are recorded by user participation (users take photos via smartphones, which are uploaded on the photogrammetric as-built BIM model within the gamification platform). Through implementation of user data, the as-built BIM is updated semi-automatically and forms the basis for BIM for Facility Management (BIM4FM). On the one hand, the structural changes will be recorded (static data) and on the other hand, the model for operational building automation will be compiled through the documentation of user behaviour (dynamic).

Results and conclusions

The proof of concept for GPR closes a research gap – the acquisition and modelling of geometry is already well explored, however, the methods and tools for capturing and modelling of the material composition of buildings are missing. The main innovation of this project is the development of the semi-automated recognition of BIM-objects from the point-cloud, as well as the use of gamification for the reduction of energy consumption together with the automated update of as-built-BIM4FM. Thereby, the automated generation of the material building passport at the end of the lifecycle will be enabled, thus delivering useful information for the material cadastre as well as for the assessment of the material value of a building. The main result is the developed „process design“ of SCI_BIM, which displays all sub-steps from data collection to the generation and maintenance of the Digital Twin.

Outlook

The results of SCI_BIM are the basis for the follow-up project BIMstocks „Digital Urban Mining Platform for Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS“², in which the technologies “Laser Scanning” and “GPR” are applied on various existing buildings in order to enable upscaling on city level. In the long term, the digital urban mining platform serves as a basis for increasing recycling and reuse rates at city level.

² www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bimstocks/

3 Ausgangslage

3.1. Motivation

Gebäude verbrauchen weltweit 35% der Energie und sind für ca. 40% des globalen CO₂-Ausstoßes verantwortlich [Abergel et al.,2017]. Gleichzeitig steigt mit dem Bevölkerungswachstum und starker Zunahme der Urbanisierung der Verbrauch der materiellen Ressourcen weltweit. Die Herausforderung der Zukunft ist, ausreichend materielle und natürliche Ressourcen zur Verfügung zu stellen, als auch das stetige Abfallaufkommen zu minimieren. Gebäudebestände stellen somit wertvolle Materiallager dar, mehr noch - bei einer Neubaurate von 3% im CE Raum [Euroconstruct, 2018] liegt die Erreichung der EU-Ziele 20-20-20 hauptsächlich im Bestand und weniger im Neubau. Im Augenblick fehlt das umfassende Wissen über die genaue materielle Zusammensetzung der Gebäudebestände, welches die Prognose der zukünftigen Materialflüsse wie auch die Erhöhung der Recycling-Raten erlauben würde [Brunner, 2011]. Auch die Annahmen über die Energieperformance der Gebäudebestände basieren meistens auf statistischen Analysen oder auf Energieausweisen nach zeitlichen Kategorisierungen. Aus diesem Grund ist die Entwicklung geeigneter Methoden und Technologien für die Erfassung und Analyse der materiellen Zusammensetzung von Gebäuden dringend notwendig.

Die Anwendung von digitalen Technologien wie Building Information Modeling (BIM) bieten umfassende Vorteile in der Ressourcenbewirtschaftung. BIM ermöglicht die Anwendung einer Lebenszyklus-Betrachtung von Anlagen und Bauvorhaben. Am Ende des Lebenszyklus, beim Rückbau eines Objektes, befindet sich die Abfallwirtschaft, welche von einem informationsreichen Datenmodell profitiert. Die Herausforderung für die Anwendung von BIM-Technologien liegt vor allem darin, den aktuellen Baubestand zu digitalisieren und ihn damit einer lebenszyklusorientierten Bewirtschaftung entsprechend der BIM-Philosophie zugänglich zu machen. Jedoch sind solche Erfassungsmethoden sehr aufwendig, und somit sollten die durch den Laserscan und „Ground Penetrating Radar“ (GPR) erfassten, umfangreichen Daten weitestgehend breite Nutzung haben. Die mit der exakten Geometrie sowie materiellen Eigenschaften angereicherten BIM-Modelle sollten also nicht nur als Grundlage für einen Rohstoffkataster, sondern auch der lebenszyklischen Analyse und Optimierung dienen.

Mit diesem Vorhaben wird das Proof of Concept für die materielle Gebäudeerfassung mit GPR und das semi-automatisierte Scan-to-BIM-Verfahren – die Generierung des as-built BIM-Modells anhand von Scandaten (Point-Clouds, GPR) – erstellt. Die informationsreichen BIM-Modelle bieten eine umfassende Informations- und Wissensbasis, welche beides, Geometrie als auch parametrische Attribute wie Schichtaufbauten (Baustoffe und Bauelemente) und deren thermische Eigenschaften beinhaltet.

Die Hauptproblematik, welche den Bedarf für dieses Forschungsprojekt begründet, liegt darin, dass die Generierung von as-built BIM-Modellen derzeit ein vorwiegend manueller, zeitaufwendiger und fehleranfälliger Prozess ist. In SCI_BIM sollen die fehlenden automatisierten oder semi-automatisierten Verfahren und Prozesse für Scan-to-BIM entwickelt und getestet werden. Eine der vielen Herausforderungen stellt die automatisierte Datenerfassungstechnik dar. Zudem kommt, dass derzeit mittels Laserscan-Daten nur die semi-automatisierte Erzeugung von Oberflächen möglich ist. Die Generierung von BIM-Objekten aus Flächen ist ein sehr komplexer Prozess, wofür es noch keine durchgesetzte Methode gibt. Eine weitere Forschungslücke stellt die Zusammenführung von

Geometrieinformationen (Laserscan) mit Materialinformationen (GPR) dar, welche in SCI_BIM untersucht werden soll. Während Laserscanning bereits eine etablierte Geometrie-Erfassungsmethode ist, gibt es noch keine Methode für die Erfassung und Modellierung der materiellen Zusammensetzung von Gebäuden. In diesem Gebiet stellt SCI_BIM einen innovativen Ansatz dar. Zudem ist die Instandhaltung von BIM-Modellen im Lebenszyklus eine große Herausforderung für das Facility Management. Derzeit gibt es noch keine automatisierte Methode, um Veränderungen im Bestand in die as-built BIMs zu übertragen. In SCI_BIM soll ein auf Gamification basiertes Konzept zur Instandhaltung von BIM-Modellen entwickelt werden, welches durch Einsatz der NutzerInnen die Erfassung von Veränderungen an Gebäuden ermöglicht. Der Forschungsbedarf liegt in der Evaluierung der Nützlichkeit solcher informationsreichen BIM-Modelle für einerseits Ressourcen- und andererseits Energieeffizienz.

Zusammengefasst sollen folgende Forschungslücken durch SCI_BIM untersucht und geschlossen werden:

- Erfassung der materiellen Zusammensetzung von Gebäuden durch GPR-Scan
- Semi-automatisierte Scan-to-BIM Datenerfassung und Generierung eines as-built BIM-Modells (Geometrie + Material)
- Instandhaltung der Informationen im as-built BIM-Modell (Gamification-Ansatz)

Das **Forschungsziel** ist die Entwicklung des Proof of Concept für die Nutzung der digitalen Scanning- und Modellierungs-Technologien wie GPR für die Erfassung der materiellen Zusammensetzung des Gebäudes gekoppelt mit Laserscantechnologie für die Geometrieerfassung; inklusive semi-automatisierter Generierung des as-built BIM-Modells aus den durch Scanning erhaltenen Daten (Point-Clouds, Radarmessungen). Durch die Erfassung der materiellen Zusammensetzung und der Geometrie der Gebäude („BIM in Bestand“) werden materielle Gebäudepässe (MGP) bzw. Building Energy Modelle (BEM) generiert, welche die Grundlage für das Ressourcenmanagement (Abfallwirtschaft) als auch für die Energieverbrauch-Prädiktion und Optimierung im Lebenszyklus der Gebäude bilden. Weiters soll die Eignung dieser informationsreichen Modelle für eine performance-based Energieoptimierung als auch die Aufnahme der baulichen Veränderungen durch den Lebenszyklus getestet werden – durch das Gamification-Konzept, welches durch die NutzerInnenbeteiligung mit z.B. Smartphones einerseits das NutzerInnenverhalten und andererseits die baulichen Änderungen festhält. Somit wird ein Workflow für die semi-automatisierte Instandhaltung des BIM-Modells im Lebenszyklus entwickelt. Dadurch soll langfristig die Integration der BIM-Datenmodelle in GIS und infolgedessen eine Szenario-basierte Bilanzierung und Prädiktion der aufkommenden Materialflüsse und Bauabfälle ermöglicht werden, als auch die Schaffung eines urbanen Materialkatasters, welcher die Grundlage für die Urban Mining-Strategie bildet.

Das Proof of Concept für die integrale Erfassung von geometrischen, materiellen und energetischen Eigenschaften des Gebäudebestands mittels Kopplung folgender unterschiedlicher Technologien und Computer-Werkzeuge wird anhand einer realen Fallstudie (TU Wien, Aspanggründe) durchgeführt:

- Georadar-Technologie für die Erfassung der materiellen Zusammensetzung,
- Laserscan zur Erfassung der Geometrie,
- Entwicklung des semi-automatisierten Scan-to-BIM Verfahrens,

- Generierung der BIM-Teilmodelle samt Datenstrukturierung und -transfer für die thermische Gebäudesimulation (BEM - Building Energy Modelling) und den Materiellen Gebäudepass (MGP),
- Thermische Gebäudesimulation samt Sensorik und Monitoring für die Kalibrierung der thermischen Simulation,
- Gamification: durch die NutzerInnen-Beteiligung (NutzerIn scannt QR-Code mit Smartphone via Gamification-App) wird die Erfassung der baulichen Änderungen als auch des NutzerInnenverhaltens (offene Fenster, Beleuchtung usw.) ermöglicht
- BIM4FM: durch die Einbettung der Gamification-Daten wird das as-built BIM-Modell semi-automatisch instandgehalten. Einerseits werden die baulichen Änderungen festgehalten (statisch), andererseits wird durch die Dokumentation des NutzerInnenverhaltens das Modell für die operative Steuerung entwickelt (dynamisch).

3.2. Stand der Technik

Dieses Kapitel verschafft einen Überblick über bestehende Methoden zu BIM im Bestand, Erfassung der materiellen Zusammensetzung mit Ground Penetrating Radar sowie zu BIM & Gamification.

3.2.1. As-built BIM – BIM im Bestand

Bestandsgebäude werden immer öfter mit Laserscannern aufgenommen, je nach Verwendungszweck der resultierenden Point-Cloud (= Punktwolke) in Farbe oder Schwarzweiß. Der große Vorteil von modernen Laserscannern ist die hohe Auflösung im Millimeterbereich. Weiters ist der Laserscanner nicht auf starke Lichtquellen angewiesen und kann so unabhängig von den mitunter schwierigen Umständen beste Ergebnisse liefern. Mit einer im Scanner verbauten CCD-Kamera können zusätzlich Bilder erfasst werden, die später dazu verwendet werden können, die Point-Cloud mit Farbinformation zu versehen. Für die Positionierung sind tachymetrische Vermessungen nicht immer unbedingt erforderlich – aufgrund des inzwischen sehr genauen integrierten Positionierungssystems – in vielen Fällen aber dennoch hilfreich. Über tachymetrisch eingemessene Zielmarken können die Scans nach der Feldarbeit exakt georeferenziert und auch registriert, oder in Programmen von Drittanbietern mit photogrammetrisch aufgenommenen Bildern kombiniert werden. Die aus den registrierten Scans gewonnene Point-Cloud kann so entweder Grundlage für eine millimetergenaue Strichauswertung sein oder aber zu einem fotorealistischen 3D-Modell verarbeitet werden, um so nicht nur PlanerInnen und ArchitektInnen, sondern auch einer breiten Öffentlichkeit zur Verfügung zu stehen. Terrestrische Fotogrammetrie (SfM Structure from Motion) kann entweder als Ergänzung zu Laserscans oder vollständig alleinstehend eingesetzt werden, abhängig von den Anforderungen an das Resultat. Durch stark überlappende Aufnahmen einer gut geplanten Aufnahme und einer hochauflösenden DSLR-Kamera (digital single-lens reflex) kann mit einfachen Mitteln ein genaues 3D-Modell erstellt werden, oder diese dazu verwendet werden, Laserscandaten mit hochauflösender Bildinformation zu versehen.

Die Laserscan-Technologie ermöglicht die Generierung von as-built BIMs, wobei ein einzelner Scan bis zu mehreren Millionen 3D-Points erzeugen kann. Für den Aufbau eines Modells muss das untersuchte Gebäude aus unterschiedlichen Positionen gescannt werden, um schlussendlich die generierte Point-Cloud zu einem Model zusammenzuführen, was derzeit nur durch einen semi-automatisierten Prozess möglich ist. Die erzeugte Point-Cloud kann in dreiecksförmige Oberflächen konvertiert werden, welche

jedoch nicht direkt in BIM-Objekte transformiert werden können. Bei der Modellierung des BIM-Modells sind folgende Aufgaben zu lösen:

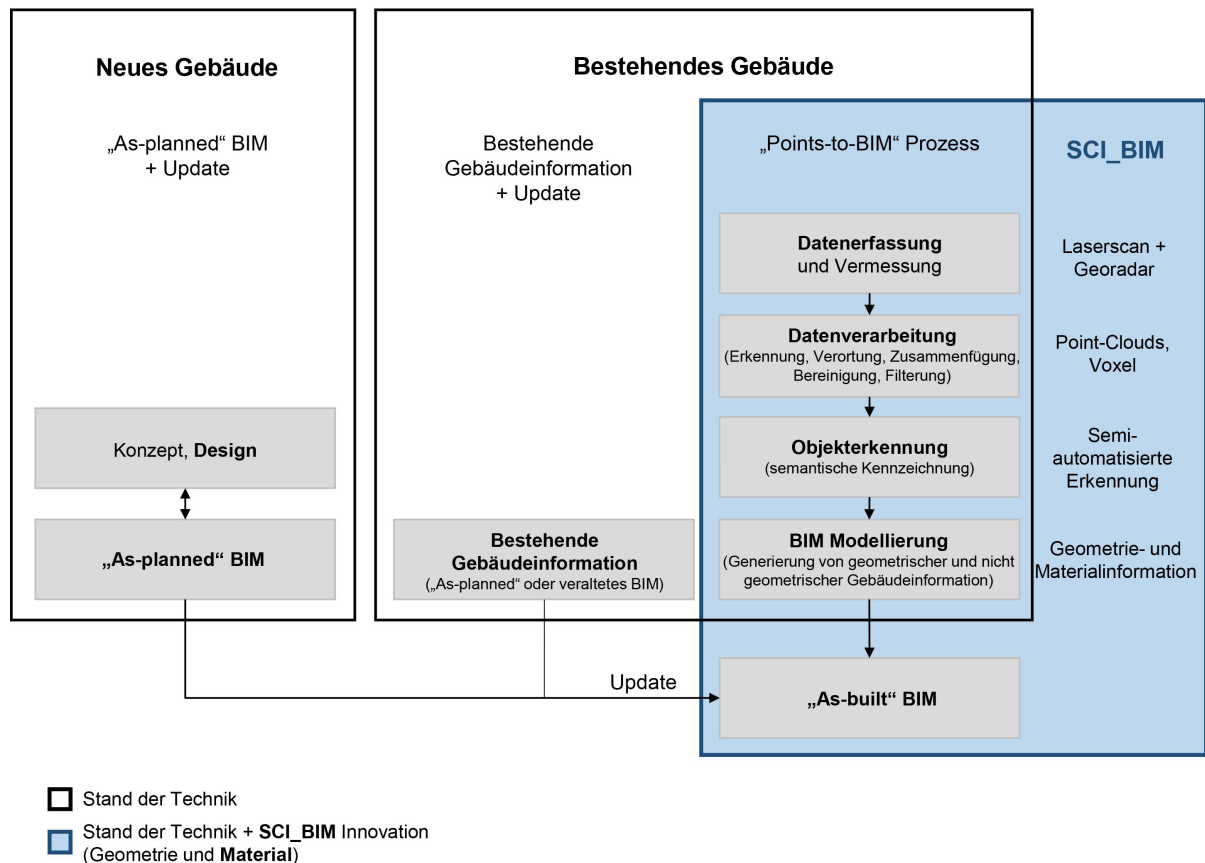
1. Die Geometrie der Komponenten muss definiert werden („Welche Form hat die Wand?“).
2. Den Komponenten müssen Kategorien und Materialien zugewiesen werden („Das ist eine Ziegelwand.“)
3. Beziehungen und Verbindungen zwischen den Objekten müssen hergestellt werden („Wand 1 ist mit Wand 2 verbunden und ist hier lokalisiert“).

Die Generierung von as-built BIMs ist derzeit ein vorwiegend manueller, zeitaufwendiger und fehleranfälliger Prozess und erfordert automatisierte oder zumindest semi-automatisierte Werkzeuge, welche derzeit nicht ausreichend vorhanden sind. Obwohl es bereits zahlreiche Methoden und Technologien zu as-built BIM Datenerfassung gibt, fokussieren sich diese meist auf die Erfassung der Geometrie – die Erfassung der materiellen Zusammensetzung ist derzeit noch wenig erforscht.

3.2.2. Ground Penetrating Radar (GPR)

Der **GPR** ist zurzeit die modernste und potenziell leistungsfähigste geophysikalische Methode zur Durchschallung von Bauteilen und bietet somit Potential zur digitalen Erfassung der materiellen Zusammensetzung. Die Technologie nutzt eine elektromagnetische Welle als Signalträger. Ein elektromagnetischer Impuls mit der gewählten Frequenz (im Fall der Gebäudeerfassung zwischen 500 und 2.000 MHz) wird mittels einer Sendeantenne in die Mauer abgestrahlt. Er breitet sich in der Mauer mit einer materialabhängigen Geschwindigkeit aus und wird an den Grenzflächen einzelner Objekte oder von Schichten unterschiedlicher physikalischer Eigenschaften (Dielektrizitätskonstante, Leitfähigkeit) reflektiert. Das an die Oberfläche zurückkehrende elektromagnetische Signal wird von einer Empfängerantenne erfasst und digital aufgezeichnet. Die Veränderungen der Signalform (Amplitude und Frequenz) erlauben Rückschlüsse auf die physikalischen Eigenschaften der durchstrahlten Medien, wie ihre Mineralzusammensetzung, Feuchtigkeit, Porosität etc. Die Laufzeit des Signals ist proportional zu der Entfernung der reflektierenden Grenzfläche. Die in die Mauern abgestrahlte elektromagnetische Energie wird, abhängig vom Medium, unterschiedlich gedämpft (materialbedingter Absorptionsverlust). Die Amplitudenabnahme des ausgesandten Energieimpulses hängt dabei im Wesentlichen von der Leitfähigkeit des Mediums und dem zurückgelegten Weg ab. Die Leitfähigkeit ist die bestimmende Größe für die effektive Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen. Durch den Vergleich der Amplituden (Sender, Empfänger) ist es möglich, die Bereiche nach ihrer Absorptionseigenschaft zu unterscheiden. Dadurch sind Rückschlüsse auf unterschiedliche Materialien innerhalb der Gebäudeteile möglich. Abbildung 1 stellt die Innovation von SCI_BIM dem aktuellen Stand der Technik gegenüber.

Abbildung 1: BIM Generierungsprozess für neue und bestehende Gebäude, Fokus von SCI_BIM: „Points-to-BIM“ Prozess (aufbauend auf Huber et al., 2011 und Volk et al., 2015)



3.2.3. BIM & Gamification

Im geplanten Projekt werden die Prinzipien der Gamification im Bereich des Building Information Modeling (BIM) eingesetzt, um die NutzerInnen in die Dokumentation des aktuellen Zustands eines Gebäudes sowie des energiebezogenen Verhaltens seiner BenutzerInnen einzubinden. Der Grundgedanke von Gamification ist die Anwendung von Techniken und Denkweisen aus dem Bereich der Spieleindustrie in einem spielefernen Kontext. Dieser Ansatz ist besonders in Gebäuden von Interesse, wo keine oder nicht genügend Sensoren installiert werden können und jede andere Art der Überwachung nicht zielführend wäre. Die Strategie des Spiels besteht darin, die BenutzerInnen zu motivieren, die erforderlichen Daten zu sammeln. Dazu werden die Smartphones der NutzerInnen als mobiles Sensornetzwerk herangezogen. Zusätzlich sollen Augmented Reality (AR)-Techniken – einerseits zur Lokalisierung des Smartphones im Gebäude und andererseits auch zur Instruktion der BenutzerInnen, was die korrekte Erfassung von Objekten und Objektzuständen betrifft – zum Einsatz kommen.

Bestehende Projekte haben Gamification in der BenutzerInnenbeteiligung während der Gebäudeplanung integriert [Merschbrock et al., 2014]. Ebenso wurde dieser Ansatz bei der Simulation des NutzerInnenverhaltens z.B. bei Brandfällen verfolgt [Rüppel und Schatz, 2011]. Ein weiterer Gamification-Ansatz beschäftigt sich mit der Ausbildung von Studierenden im Bereich der Gebäudetechnik [Alanne, 2016]. Ein weiteres Projekt beschäftigt sich mit der Integration der Gebäude-

Performance in Spielumgebungen [Marsh und Thoo, 2016]. Um das Bewusstsein für einen energieeffizienten Gebäudebetrieb zu stärken, wurde das DIMMER-Projekt implementiert [Osello et al. 2015]. Das Smartphone als visuelles Inspektionsmedium in der Gebäudeinstandhaltung wurde in [Chen und Chen 2014] für die Erkennung struktureller Schäden eingesetzt. Mobiles Feedback von BenutzerInnen eines Gebäudes, z.B. bezüglich des thermischen Komforts, wurde in [Rinaldi, 2016] entwickelt. Augmented Reality (AR) im Baubereich wurde bereits für unterschiedliche Anwendungsfälle eingesetzt. Das Problem der Lokalisierung innerhalb von Gebäuden wurde durch natürliche Markierungen adressiert [Koch et al., 2014]. Im Bereich der Sicherheitsausbildung in der Baudurchführung wurde AR als unterstützendes Medium eingesetzt [Le et al., 2015]. [Zollmann et al., 2014] haben AR-Methoden für die Überwachung und Dokumentation von Baustellen eingesetzt.

3.3. Stand des Wissens der Forschungspartner

3.3.1. Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement

Das **Institut für Interdisziplinäres Bauprozessmanagement**, Forschungsbereich für Integrale Bauplanung und Industriebau (TU-IBAU) hat einschlägige Kompetenz und Erfahrung in Erforschung und Entwicklung der Methoden für integrale, interdisziplinäre Planung gestützt durch BIM (Building Information Modeling) und digitale Planungswerkzeuge (Simulation, Prädiktion). Die Hypothese, dass BIM das Potential birgt, die Fragmentierung der Bauindustrie (Planung, Errichtung und Betrieb) zu reduzieren und den größten Nutzen entlang des Lebenszyklus von Gebäuden aufzuweisen, wird empirisch mittels Studierendenexperimente untersucht und durch forschungsgeleitete Lehre im Integrated Design LAB umgesetzt. Zu dieser Experiment-Reihe (Forschungsprojekt BIM-sustain³), welche erstmalig die BIM-gestützten Planungsprozesse qualitativ und quantitativ untersucht, wurden zahlreiche Publikationen veröffentlicht. Die Forschungsschwerpunkte im Bereich von BIM liegen auf der Modellierung und dem Datentransfer in interdisziplinärem Kontext (an der Schnittstelle zwischen Architektur und Bauwesen: Projekt BIM_sustain), der Schaffung der Transferregeln für den reibungslosen Datenaustausch (Doctoral College Computational Design⁴), der Definition der Workflows für die Geometrie-Übertragung ins Building Energy Modelling (BaMa_Balanced Manufacturing⁵), sowie der automatisierten Erstellung von Materiellen Gebäudepässen und Ökobilanzen (BIMaterial⁶) [Kovacic et al., 2018 und Honic et al., 2019].

3.3.2. Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement

Das **Institut für Wassergüte und Ressourcenmanagement**, Forschungsbereich Abfallwirtschaft und Ressourcenmanagement (TU-FAR), ist global gesehen an vorderster Front, wenn es um die Bestimmung der materiellen Zusammensetzung von Bauwerken und des Gebäudeparks an sich geht. TU-FAR verfügt durch die Forschung des angesiedelten Christian Doppler Labs für anthropogene Ressourcen über umfangreiches Knowhow über die mittlere materielle Zusammensetzung von Bauwerken unterschiedlicher Kategorien. Diese (generischen) Daten wurden anhand der Untersuchung von ausgewählten Abrissobjekten in Wien generiert (ca. 200), wobei Plandokumente

³ www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bimsustain/

⁴ www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/dccd/

⁵ www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bama/

⁶ www.industriebau.tuwien.ac.at/forschung/forschungsprojekte/bimaterial/

analysiert, aber auch direkte Bestandsaufnahmen vor Ort durchgeführt wurden. In einem weiteren Schritt wurden die spezifischen Gebäudematerialdaten mit GIS-Daten über Fläche/Höhe/Nutzungsart/Bauphase verknüpft und daraus das materielle Lager des Wiener Gebäudeparks (vorerst ohne Kellergeschoße) ermittelt. Mittels des Top-down Ansatzes wird anhand von Datenzeitreihen, dynamischen Bilanzmodellen und statistischen Werkzeugen das momentane Lager eines Rohstoffes abgeschätzt, inkl. einer Unterteilung auf die wesentlichen Einsatzgebiete. In einer weiteren Studie wurde mittels Bottom-up Ansatz das materialspezifische Lager Wiens mit der für derartige Untersuchungen bislang höchsten Genauigkeit erhoben [Kleemann et al., 2016]. Es wurden 15 Bauwerke unterschiedlicher Nutzung und Alters eingehend untersucht und Baudokumente von über 200 Bauwerken ausgewertet. Daraus wurden gebäudetypische Materialintensitäten (kg Material pro m³ Bruttorauminhalt) ermittelt, die in Kombination mit Orthophotos und GIS-Raummodellen zur Abschätzung der Quantitäten und Qualitäten von Baurestmassen verwendet werden. Die Firma Altmetalle Kranner, Partner von FAR, setzt die Urban Mining Strategie seit 70 Jahren in ihrem Unternehmen ein, indem sie bereits verwendete Materialien verarbeiten und wiederverwertbar machen, wodurch Primärrohstoffe geschont werden. Im Rahmen des Projekts „PILAS“ [Markova und Rechberger 2011] wurde ein Konzept zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen entwickelt. Dabei wurden zwei Thematiken ausgearbeitet: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen.

3.3.3. Institut für Architekturwissenschaften

Das Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung **Bauphysik und Bauökologie (TU-BPI)** befasst sich unter anderem mit energiebezogenen und bauphysikalischen digitalen Werkzeugen. Dazu gehören Beurteilungswerkzeuge für Bauteile auf numerischer Basis (Wärmebrücken, Feuchtedurchgang instationär), Gesamtgebäude-Simulationswerkzeuge (mit denen nicht nur die Energieperformance von Bauwerken simulatorisch erfasst werden kann, sondern auch Parameter wie Innentemperatur oder Luftfeuchtigkeit in Folge des Gebäudebetriebs approximiert werden können), wie auch Werkzeuge, welche auf urbaner/großmaßstäblicher Ebene verwendet werden können. Ein großes Problem ist die Gewinnung von Eingabedaten, daher ist Messtechnik/Sensorik in den unterschiedlichsten Formen in den vergangenen Jahren ins Interesse gerückt, wie auch die Verwaltung, Speicherung, Skalierung und Visualisierung von entsprechend gesammelten Daten. Das MOST-Environment [Zach 2012, Schuss et al., 2017], als eine Open-Source-Software für die verschiedensten Sensoren, wurde bei TU_BPI entwickelt. Im SEMERGY Projekt [Pont et al., 2014] konnte demonstriert werden, wie mächtig eine „Web-of-Data“-Annäherung an die gebaute Umwelt sein könnte: Beinahe alle Daten für die Bauwerksevaluierung existieren in irgendeiner Form im World-Wide-Web. Das Problem ist die semantische Aufbereitung, so dass (teil)automatisiert eine Verlinkung hergestellt werden kann. Im BAU-WEB Projekt [Pont et al. 2016] wurden Ansätze verfolgt, Baumaterial-Informationen so aufzubereiten, dass eine teilautomatisierte Übernahme in verschiedene Simulationswerkzeuge möglich ist. In bauphysikalischen Betrachtungen werden viele Methoden eingesetzt, die sich sehr gut mit anderen Applikationen paaren lassen. Als Beispiel seien hier Thermographien genannt, welche beispielsweise schon mit Laserscannern gekoppelt wurden. Nicht nur Oberflächentemperaturen lassen sich solcherart ermitteln, vielmehr können sich mittelfristig die Eigenschaften von Thermographien und Laserscanning zu neuen Evaluierungsmethoden zur Datengewinnung ausbauen lassen.

Das Institut für Architekturwissenschaften, Abteilung **Digital Architecture and Planning** (TU-DAP) beschäftigt sich mit der Entwicklung und Anwendung neuer digitaler Technologien an den Schnittstellen von Informatik, Architektur und Raumplanung. Einer der Forschungsschwerpunkte bezieht sich auf fortgeschrittene Visualisierungsmethoden in den oben bezeichneten Anwendungsbereichen. Als angewandte Projekte in der Vermittlung komplexer archäologischer Inhalte durch Gamification können sowohl die Virtual Reality-Visualisierung des römischen Forums in Carnuntum [Ferschin et al., 2006] im Museum Carnuntinum als auch die Visualisierung einer Prototyp-Mastaba [Ferschin et al., 2013], im Kunsthistorischen Museum Wien (KHM Wien) hervorgehoben werden. Die Visualisierung der Prototyp-Mastaba wurde anlässlich der Sonderausstellung „Im Schatten der Pyramiden“ erstellt und anschließend in die permanente ägyptische Sammlung des KHM aufgenommen.

3.3.4. Institut für Visual Computing and Human-Centered Technology

Das **Institut für Visual Computing and Human-Centered Technology**, Forschungsbereich Computer Graphics, hat jahrelange Erfahrung in der Aufnahme, Verarbeitung und Darstellung von punktbasierten Daten, wie sie bei der Baudokumentation auftreten. Einen Überblick über den Stand der Technik in der Rekonstruktion erstellten Musialski et al. [2013]. Während es viele Versuche gibt, Strukturen in Point-Clouds vollautomatisch zu erkennen, haben sich halbautomatische Ansätze, die den/die NutzerIn miteinbeziehen, als besonders leistungsfähig herausgestellt. Es wurde z.B. gezeigt, dass eine Gebäudefassade mithilfe eines interaktiven Algorithmus schneller in verschiedene Gebäudeelemente unterteilt werden kann als durch die besten existierenden automatischen Algorithmen [Musialski et al., 2012]. Auch bei der Rekonstruktion der vollständigen 3D-Struktur eines Bauwerks konnten mit einem Ansatz, der NutzerInneninput und spezifische Optimierungsalgorithmen kombiniert, Bauelemente in ihren wesentlichen Strukturen erfasst werden, während automatische Algorithmen die zugrundeliegende Struktur nicht abbilden und eine effiziente Unterteilung in verschiedene Bauelemente erschweren [Arikan et al., 2013]. Viele Ansätze zur Rekonstruktion von urbanen Strukturen setzen noch das Vorhandensein von zumindest teilweisen Element-Bibliotheken voraus oder versuchen diese zu erstellen. Es ist zu erwarten, dass Methoden basierend auf „Deep Learning“ hier Fortschritte bringen werden, wie teilweise schon gezeigt [Choy et al., 2015]. Auch für die Rekonstruktion von Innenräumen, wie sie für die automatische Erstellung von BIM-Modellen besonders wichtig ist, gibt es schon vielversprechende Ansätze [Zhang et al., 2015, Pintore und Gobetti, 2014, Mura et al., 2016]. Besonders interessant sind hier neue Methoden, um eine parametrische Darstellung der Innenräume zu erstellen [Ochmann et al., 2016], wobei diese bis jetzt auf die reine Konfiguration der Wände beschränkt sind.

3.4. Nationale und internationale Projekte

Das Horizon 2020-Projekt **BAMB** (Buildings as Material Banks)⁷ hat zum Ziel, die Bauindustrie in die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) einzubeziehen und somit den Wert von verbauten Materialien zu erhöhen. Dynamisch und flexibel entworfene Gebäude können in die Kreislaufwirtschaft (Circular Economy) einbezogen werden, wodurch die Materialien ihren Wert beibehalten können. Dadurch soll einerseits der Abfall und andererseits die Nutzung von Primärrohstoffen reduziert werden.

⁷ www.bamb2020.eu/

Die Studie „**Gebäudepass**“⁸ (Umweltbundesamt; Ressourcen Management Agentur) beschäftigt sich mit der Erarbeitung von Grundlagen für die Standardisierung von Gebäudepässen als Gebäudematerial-Informationssysteme und verfolgt folgende zwei Ansätze: Einführung eines Gebäudematerial-Datenblatts und Nutzung von BIM als Gebäudematerial-Informationssystem. In der Studie wird erläutert, dass die Entwicklung eines BIM als Gebäudematerial-Informationssystem langfristig größeres Potential hat als das Datenblatt.

Im Projekt **UMKAT**⁹ (Entwicklung eines Urbanen Mining Katasters) wurde die Visualisierung anthropogener Lagerstätten in einem Pilotprojekt umgesetzt. Der UMKAT dient als Grundlage für die Umsetzung regionalen Ressourcenmanagements und ist konzipiert, um als Instrument einer nachhaltig ausgelegten strategischen Raumplanung mit dem Ziel einer ressourceneffizienten Stadt ausgebaut zu werden.

HOLISTEEC (Holistic and Optimized Life-Cycle Integrated Support for Energy-Efficient building design and Construction)¹⁰ des FP7 EU-Programms hat als Hauptziel die Entwicklung einer BIM-cloud-basierten kollaborativen Bauplanungs-Plattform, unter Berücksichtigung der multikriteriellen Optimierung und der Beeinflussung der externen Einflüsse auf dem Nachbarschafts-Level.

Das FFG-geförderte Projekt **6D BIM-Terminal**¹¹ beschäftigt sich mit dem standardisierten Austausch von Ökobilanzdaten, um die Lücke zwischen FachkonsulentInnen und BIM-Applikationen zu schließen. Über die zentrale Plattform „6D BIM Terminal“ sollen Daten unter Verwendung der IFC-Schnittstelle und des ASI-Merkmalsservers ausgetauscht werden.

⁸ www.rma.at/node/1580

⁹ www.rma.at/node/1602

¹⁰ cordis.europa.eu/project/id/609138/de

¹¹ projekte.ffg.at/projekt/2808423

4 Projektinhalt und Methoden

Das Proof of Concept von SCI_BIM wurde anhand von einem echten Use Case (TU Gebäude, Aspanggründe) durchgeführt. Alle Methoden wurden am selben Gebäude angewandt – von Gebäudeaufnahme bis zur Generierung des Digital Twins. Alle angewandten Methoden und Projektinhalte sind in den folgenden Kapiteln beschrieben.

4.1. Proof of Concept – Integrale Gebäudeaufnahme und Modellierung für das as-built BIM-Modell

Ein wesentlicher Schwerpunkt von SCI_BIM liegt in der Testung, Klassifizierung und Weiterentwicklung von Methoden zur Aufnahme von Bestandsobjekten. Anhand des Use Case in den Aspanggründen der TU Wien wurden zwei unterschiedliche Erfassungsmethoden getestet – eine High-Tech Gebäudeaufnahme zur sehr komplexen Ermittlung der Geometrie und eine Low-Tech-Aufnahme zur simplen Erhebung von Geometrie und Schadstoffen in Gebäuden. Die materielle Zusammensetzung wurde einerseits mit dem GPR aufgenommen und andererseits durch invasive Methoden sowie durch eine Schad- und Störstofferkundung ermittelt. Es wurden mehrere Teilmodelle und Endmodelle generiert, welche in 5.1, Abbildung 6 und Abbildung 7, dargestellt sind.

Die High-Tech-Datenerfassung (Faro Scanner) basiert auf einer sehr genauen Datenermittlung mittels Laserscan. Aus den Erhebungen wurde eine Point-Cloud (M10) generiert, welche in einem weiteren Schritt zu einem gesamtheitlichen BIM-Modell mit Geometrieinformation zusammengeführt wurde (M1). Dieses Modell wurde als Referenzmodell (M1) genutzt, wovon die Elementbezeichnungen für alle weiteren Modelle übernommen wurden.

Bei der Low-Tech-Datenaufnahme lag das Augenmerk auf der Entwicklung einer raschen und ohne relevante Zusatzkosten durchführbaren Ermittlung des Geometriemodells von Gebäuden ohne Bestandspläne. Zu diesem Zweck wurden fünf Low-Tech Scan-Technologien (handgeführter 3D Laserscanner, Kompakt-Laserscanner, photogrammetrische Kamerasysteme, Tiefenkameras, Datenbrillen) getestet, wovon sich nur der handgeführter 3D Laserscanner und der Kompakt-Laserscanner für eine geometrische Bauwerksdatenaufnahme im konkreten Anwendungsfall qualifizieren konnten. Aus der Erhebung mit dem Kompakt-Laserscanner resultieren die Point-Cloud (M11) sowie das BIM-Modell (M6).

Die Aufnahme der materiellen Zusammensetzung erfolgte mit GPR. Da das Gebäude zum ersten Aufnahmezeitpunkt noch von den NutzerInnen genutzt wurde und noch nicht entrümpelt war, mussten die Aufnahmen mit GPR an weiteren zwei Terminen durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Messungen wurden mit den tatsächlichen, durch invasive Methoden ermittelten Materialien, geeicht. Eine direkte Erkennung der Materialien über die Dichte war nicht möglich, jedoch konnte man in den Messungen sehr schnell zwischen sehr dichten (Metallständer) und weniger dichten Materialien unterscheiden (Dämmung). M14 enthält die Ergebnisse des GPR mit Eichung der Ergebnisse der Schad- und Störstofferkundung (M4). Das finale Modell der GPR Messungen ist das M2.

Zwei state-of-the-art Methoden zur Materialerfassung wurden am Use Case durchgeführt – die Schad- und Störstofferkundung (M4) sowie die Erkundung durch die TU-FAR (M3), welche eine sehr genaue

Materialermittlung durchführte. Die Teilmodelle wurden miteinander verglichen und angepasst, woraus ein neues Modell (M13) resultierte. Die Ergebnisse dieser Erfassungen dienen einerseits zur Verifizierung der durch den GPR erfassten Daten und andererseits als Basis für die Generierung des MGPs.

Alle Datenerfassungen wurden am selben Gebäude der TU Wien in den Asparnggründen durchgeführt. Beim Use Case handelt es sich um ein Gebäude, welches mittelfristig abgebrochen werden soll, wodurch invasive Methoden zur Ermittlung der materiellen Zusammensetzung möglich waren. In einem weiteren Schritt wurden die unterschiedlichen Datenaufnahmemethoden auf ökonomische Kriterien getestet und verglichen, um die effizienteste Methode für die Erstellung von as-built BIM-Modells bzw. des MGP-Modells zu ermitteln.

4.2. Entwicklung des semi-automatisierten Scan-to-BIM Verfahrens

Auf Basis der von Fa. Meixner im Projekt generierten Point-Cloud wurden Algorithmen zur automatisierten Erstellung von BIM-Objekten sowie des gesamten BIM-Modells (M5) getestet. Zur Erstellung des geometrischen Grobmodells wurden zunächst unterschiedliche Methoden getestet (RAPter basierend auf Monzpart et al., 2015; O-Snap basierend auf Arikan et al., 2013; Konturierung basierend auf Jung et al., 2018). Im aktuellen System kann man zwei Workflows unterscheiden: Geometrische Rekonstruktion und IFC Modellerstellung. Abbildung 2 zeigt den Workflow der geometrischen Rekonstruktion, bei welchem es zwei mögliche Wege für die Eingabedaten gibt. Im oberen Weg werden Räume in drei Schritten bearbeitet: Segmentierung von ebenen Teilregionen, Entfernung von Ausreißern und schließlich die Erstellung von Polygonen. Der untere, alternative Weg ist ähnlich, außer dass keine Ausreißer-Entfernung nötig ist. Für die Segmentierung wurde Region Growing [Lafarge et al., 2012] benutzt. Die Ausreißer-Entfernung basiert auf [Mura et al., 2016]. Für Erstellung von Polygonen wurde PolyFit von [Nan et al., 2017] verwendet. Der zweite Workflow verwendet die Eingangs-Punktwolke sowie das polygonale Modell, das aus der ersten Pipeline erzeugt wurde, und erstellt daraus ein IFC-Modell. Nach der Erkennung von Öffnungen [Jung et al., 2018] wird jeder Polyeder und jede Öffnung zu einer IFC-Einheit umgewandelt. Die Materialdaten sind dann zu entsprechenden Wänden registriert.

Abbildung 2: Geometrische Rekonstruktion

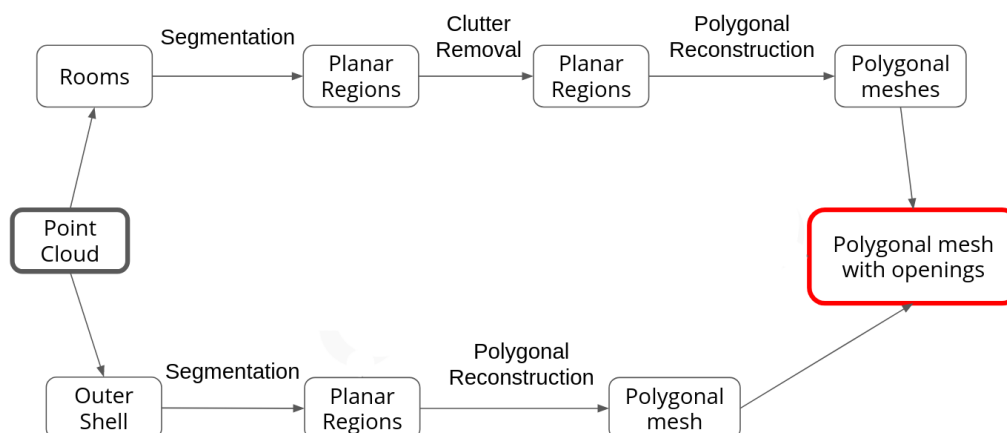
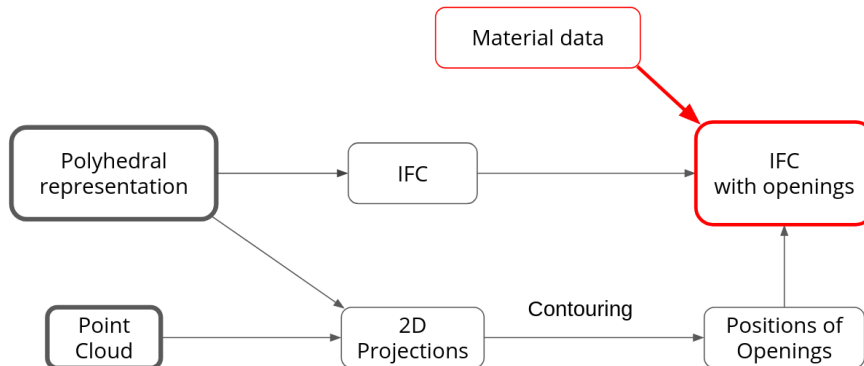


Abbildung 3 zeigt den Workflow für das semi-automatisiert generierte IFC.

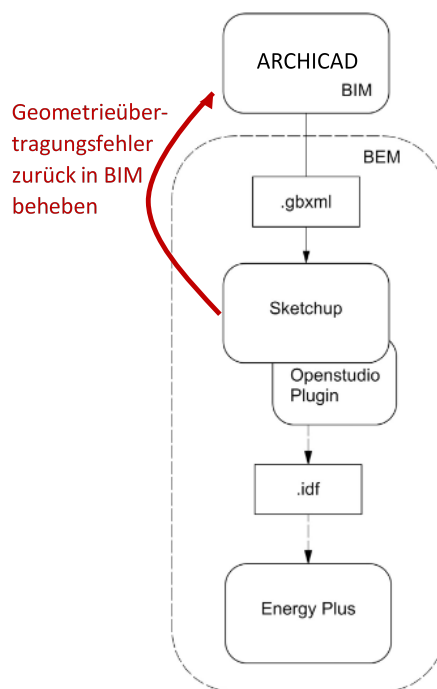
Abbildung 3: IFC Generierung



4.3. Energie-Modellierung und Simulation

Der BIM-zu-BEM-Workflow wurde an zwei BIM-Referenzmodellen getestet, nämlich M1 (Meixner, manuell generiertes BIM-Modell) und M5 (semi-automatisiert generiertes BIM-Modell, s. 4.2). Aufgrund der unvollständigen Modellgeometrie von M5 basierte die Weiterverarbeitung zur Erstellung des BEM nur auf M1. Das Post-Processing des M1-BIM-Modells umfasste unter anderem die Vereinfachung der hochdetaillierten Modelgeometrie (Säulen, Möblierung, Rohrleitungen usw.), um den für die BEM-Analyse erforderlichen Detaillierungsgrad zu erreichen. Zudem wurde ein iterativer Prozess zur Fehlerbehebung für ein funktionierendes BEM-Modell in der EnergyPlus Gebäudesimulationssoftware, sowie die Definition der geeigneten thermischen Zonierung durchgeführt. Die Materialeigenschaften aller Aufbauten wurden dem BEM-Modell anhand der Informationen des M3 zugewiesen. Der BIM-zu-BEM-Workflow ist in Abbildung 4 abgebildet.

Abbildung 4: BIM zu BEM Workflow



Zur Erfassung der internen Bedingungen im Use Case wurde ein Monitoring-Konzept durch die Installation von Sensorik realisiert. Das Monitoring lief ab Kalenderwoche 28 (Juli 2019) und erfasste somit die letzten zwei Monate der Benutzung des Bauwerkes in der kritischen Sommerphase. Es wurde ein maßgeschneidertes Monitoring-Konzept der wesentlichsten internen Bedingungen wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, sowie CO₂-Konzentration erstellt. Dabei wurden Datenlogger verwendet, welche die Daten entsprechend in eine bereits bestehende Monitoring-Daten-AuswertegUI (Graphical User Interface) einspielten, so dass sehr einfach Abfragen vorgenommen werden konnten. Aufgrund der besonderen (und organisatorisch nicht anders möglichen) Messperiode im Sommer 2019 mit nur zwei Monaten und einer Überlappung mit der üblichen Urlaubszeit und der bereits teilweise stattfindenden Absiedelung der NutzerInnen war die Erstellung von realistischen Ganzjahres-Nutzungsprofilen nicht sinnvoll möglich. Exemplarisch wurde das Konzept getestet, jedoch führte die Simulation zu Resultaten, welche aufgrund der fehlenden restlichen Jahresdaten nicht validierbar sind. Da der Use Case per se keine separate Energieerfassung hatte, konnte hier auch nicht auf historische Energiebedarfsdaten zurückgegriffen werden.

4.4. Materieller Gebäudepass (MGP) auf Basis der ermittelten Daten sowie Szenarien für den Ressourcenkatalog

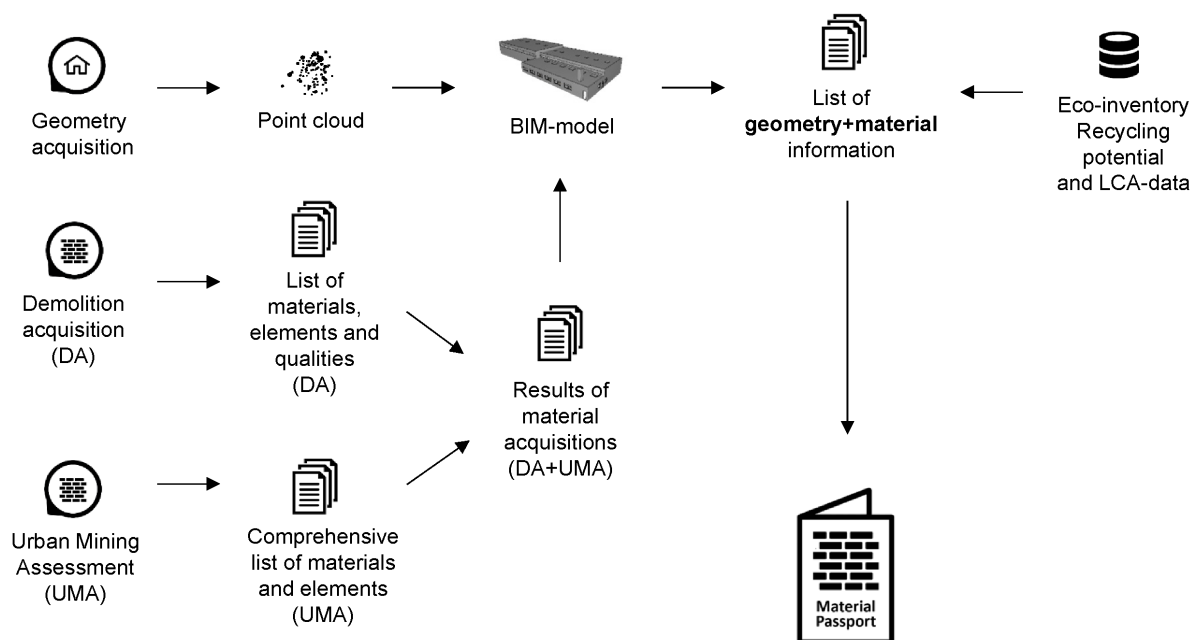
4.4.1. Materieller Gebäudepass (MGP)

Die Ermittlung der materiellen Zusammensetzung wurde von drei Partnern (ZAMG, TU-FAR und RMU) durchgeführt, woraus unterschiedliche Modelle entstanden sind. Alle generierten Modelle sind in Abbildung 5 und Abbildung 6 dargestellt. Insgesamt sind aus den unterschiedlichen Erhebungsmethoden vier MGP-Modelle (MGP v1, MGP v2, MGP v3 und MGP v4) entstanden, welche alle auf unterschiedlichen Datensätzen aufbauen. MGP v1 wurde auf Basis des Referenzmodells

(Geometriemodell, M1) von Meixner durch Integration der Materialität aus dem ZAMG-Modell (M2) generiert. Der MGP v2 basiert auf dem Geometriemodell M1 und dem Materialmodell M13 (einheitlicher Datensatz von RMU & TU-FAR). Der MGP v3 ist nicht zur Gänze realisierbar, da die automatisierte Integration des Materialmodells von ZAMG (M2) in das semi-automatisiert generierte Geometriemodell M5 nicht möglich ist. Eine vereinfachte, semi-automatisierte Integration des Materialmodells von ZAMG wurde realisiert, dieses erfordert jedoch noch Optimierungen am Modell, damit es für den MGP verwendet werden kann. MGP v4 besteht aus dem M7 (TU-IBAU), welches das BIM-Modell basierend auf 2D-Plänen darstellt, sowie dem M13.

Exemplarisch werden die MGP-Ergebnisse des MGP v2 (M1 + M13) anhand der Wände und dem Fundament inkl. Fußbodenaufbau präsentiert (siehe Kapitel 5.5.1 und 5.5.2, sowie Tabelle 1-8). Der Workflow für die Generierung des MGP v2 ist in Abbildung 5 dargestellt und beschreibt die Erfassung des Use Case bis hin zur Generierung des MGP. Zur Generierung des MGP v2 wurde das M13, welches den gemeinsamen Datensatz aus den Erhebungen von TU-FAR (M3, in der Grafik als „Urban Mining Assessment“ bezeichnet) und RMU (M4, in der Grafik als „Demolition Acquisition“ bezeichnet) bildet, in das Referenzmodell M1 integriert. Die genauen Schichtaufbauten, Schichtdicken und Materialqualitäten wurden dem M13 entnommen, wobei die Abmessungen aus dem M1 übernommen wurden. Im bestehenden Geometriemodell M1 wurden mehrschichtige Aufbauten mit der Information aus M13 erstellt und eine Bauteilliste exportiert.

Abbildung 5: Workflow für die Generierung des MGP



4.4.2. Szenarien für den Ressourcenkataster

Die Abschätzung der erreichbaren Genauigkeitsgewinne für den städtischen Ressourcenkataster war schwierig, da es sich bei dem Use Case nicht um ein für Wien repräsentatives Gebäude handelt. Trotzdem wurden mathematisch-statistische Untersuchungen gemacht, welche zu neuen Erkenntnissen führten. Da die bisher angewandte manuelle Beprobung von Gebäuden (TU-FAR und RMU) mit hohem Aufwand, die mit Beschädigung von Gebäudeteilen und großen Unsicherheiten

verbunden ist (auf Grund von ausschließlich stichprobenartigen Erhebungen innerhalb des Gebäudes), leisten die im Rahmen dieses Projekts verwendeten nicht-invasiven Erhebungsmethoden (Laservermessung, Bodenradar) einen wichtigen Beitrag dazu, die „zerstörungsfreie“ Ermittlung der notwendigen Gebäudedaten zu beschleunigen bzw. zu erleichtern. Die Erfassung mit Laserscanning erlaubt eine detailgetreue Dokumentation der Abmessungen des Gebäudes (wichtig für nicht-dokumentierte bauliche Änderungen) und der GPR liefert die grobe materielle Zusammensetzung aller Bauteile, ohne diese beschädigen zu müssen. Zusätzlich können mit dem GPR verborgene Einbauten (z.B. Kabel, Rohrleitungen) sichtbar gemacht werden, wodurch deren Länge wesentlich genauer abgeschätzt werden kann. All dies führt zu einer verringerten Unsicherheit der geschätzten Materialzusammensetzung der beprobten Gebäude und ist die Grundvoraussetzung, um in Zukunft Aussagen über andere Gebäude bzw. die Grundgesamtheit mit reduzierter Unsicherheit treffen zu können.

4.5. Gamification für BIM im gesamten Lebenszyklus

Das Konzept der Gamification beruht auf Einbeziehung der GebäudenutzerInnen und der IK-Technologie. Dabei werden die BenutzerInnen motiviert, bauliche Änderungen und neue Einbauten mit dem Smartphone festzuhalten und die Gebäudemodelle durch die automatisierte Einbettung in das as-built BIM zu aktualisieren.

Die Grundidee der Gamification-Strategie besteht darin, mobile Geräte von BenutzerInnen des Use Cases zu verwenden, um spielerisch Informationen über das Gebäude zu sammeln. Diese Informationen können den Zustand der Gebäudeelemente, die sich auf die Energieeffizienz auswirken, oder Gebäudeveränderungen enthalten. In der Spielstrategie wurden drei Hauptspielkonzepte verwendet, welche die BenutzerInnen zum Sammeln von Informationen über das Gebäude motivieren sollen:

1. Punkte Sammeln – Jede/r SpielerIn sammelt Punkte, indem er/sie Gebäudeelemente (z.B. Fenster, Türen, Lichtschalter usw.) scannt und ihren Zustand aufzeichnet (z.B. das Fenster ist offen, das Licht ist eingeschaltet usw.).
2. Wettbewerb mit KollegInnen - Alle SpielerInnen können den Punktestand sehen und gegeneinander antreten. Am Ende des Wettbewerbs erhält der/die SpielerIn mit der höchsten Punktzahl eine Belohnung.
3. Herausforderungen - Eine bestimmte Kombination von gescannten Objekten wird als Herausforderung für eine/n BenutzerIn vorgeschlagen. Wenn er/sie es schafft, alle diese Objekte in einer bestimmten Zeit zu scannen, erhält er/sie zusätzliche Punkte.

Diese drei Konzepte wurden in die App implementiert, um relevante Daten zu sammeln. Um den Aufwand der Erfassung zu reduzieren und den Gemeinschaftsgeist zu fördern, wurden BenutzerInnen zu kleinen Teams (2-3 Personen/Team) zusammengefasst, die gegen andere Teams antraten.

Die entwickelte mobile Anwendung verwendet die Kamera eines Mobiltelefons, um ein spezifisches Element in einem Gebäude zu erkennen. In dem entwickelten Prototyp wurden QR-Codes zur Identifizierung bestimmter Bauelemente verwendet. Jeder QR-Code codiert den eindeutigen Namen des Gebäudeelements, der sich auf ein korrespondierendes Objekt im BIM-Modell bezieht. In Kombination mit den Koordinaten dieses Objektes im BIM-Modell kann der Ort des Elements genau identifiziert werden. Für jedes Element wurde ein QR-Code erstellt und dieser in physischer Nähe des Zielelements installiert, um ein komfortables Scannen durch BenutzerInnen zu ermöglichen.

Augmented Reality wurde nicht genutzt, da sich diese Technologie für diesen speziellen Zweck als nicht geeignet herausgestellt hat. Da z.B. alle Fenster im Use Case sehr ähnlich sind, ist eine Identifikation der einzelnen Elemente durch AR nicht möglich.

4.6. Kosten-Effektivitäts-Analyse

Das Ziel ist, die Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Technologien und Methoden mithilfe einer Kosten-Effizienz-Analyse zu ermitteln sowie die ökonomisch effizienteste Methode für die Erstellung von as-built BIM-Modellen für die Nutzung als MGP-Modelle zu eruieren. Anhand der gesammelten Daten (Kosten & Stunden) und dokumentierten Workflows von Meixner, TU-FAR, RMU, ZAMG, TU-VC und TU-IBAU wurde eine Kosten-Analyse erstellt. Dabei wurde auf die Anwendbarkeit und Effizienz der Methoden, den Grad der Genauigkeit der Gebäudeerfassung und die Anforderungen an die Modellgenerierung geachtet. Darauf basierend hat sich ergeben, dass für die Bewertung des Nutzens der implementierten Methoden ein Cost-Effectiveness-Model (Kosten-Effektivitäts-Analyse), anstatt der ursprünglich geplanten Kosten-Nutzen-Analyse, sinnvoller ist, da sich zusätzlich zu den genannten quantifizierbaren Daten in Bezug auf Datenerfassung und Modellerstellung, auch qualitative Kriterien (wie Modellgenauigkeit etc.) aus den erfassten Daten ergeben haben. Basierend auf den Erhebungsmethoden und entstandenen Datensätzen wurden die Kosten den Workflows von Meixner, TU-FAR, RMU, ZAMG, TU-VC und TU-IBAU zugeordnet, gegliedert nach Gerätekosten/Ausrüstung & Software und Personalkosten für die Process-stages im Process-Design. Daraus wurden Kostenberechnungen für die Generierung der Materiellen Gebäudepässe v1-4 durchgeführt und diese miteinander verglichen.

Da es sich bei dem Use Case nicht um ein für Wien repräsentatives Gebäude handelt, ist die Abschätzung der erreichbaren Genauigkeitsgewinne für den städtischen Ressourcenkataster schwierig. Jedoch ließen sich anhand der statistischen Untersuchungen und den Erkenntnissen aus den quantitativen und qualitativen Ergebnissen der Cost-Effectiveness-Analysis mögliche Empfehlungen für eine Hochskalierung auf Stadtebene machen.

5 Ergebnisse

In diesem Kapitel sind alle Ergebnisse des Projekts abgebildet und erläutert. Da dieser Bericht an eine breite Öffentlichkeit gerichtet ist und somit für alle verständlich und nachvollziehbar sein sollte, wurden die Ergebnisse entsprechend aufbereitet.

5.1. Process-Design SCI_BIM

Das Hauptergebnis ist das entwickelte Process-Design von SCI_BIM, welches alle Teilschritte von Erhebung der Daten bis zur Erstellung und Instandhaltung des Digital Twin aufzeigt (siehe Abbildung 6). Abbildung 7 stellt alle Teilmodelle sowie die gekoppelten Modelle dar. Die Datenerhebung wurde durch mehrere Partner durchgeführt (Geometrie: Meixner, RMU und TU-IBAU (Planerhebung), Material: ZAMG, TU-FAR und RMU, Monitoring: TU-BPI). Das Pre-Processing wurde von den Partnern Meixner und RMU zur Bearbeitung der Point-Cloud durchgeführt. Die ZAMG generierte in dieser Phase die ersten Ergebnisse aus ihren Messungen, ohne diese direkt Materialien zuordnen zu können. TU-FAR und RMU generierten die erste Auswertung ihrer vor-Ort Materialanalyse. In der Model-Creation-Phase wurden die Geometrie und Material-Modelle, sowie das semi-automatisierte IFC-Modell erstellt. Das Modell 1 (M1) von Meixner stellt das Referenzmodell für alle folgenden Bearbeitungen dar. Zudem wurde in dieser Phase von der ZAMG das finale Materialmodell (M2), welches auf der finalen Auswertung von TU-FAR und RMU (M13) basiert, generiert. In der Model-Creation-Phase wurden auch die NutzerInnen-Profile durch Analyse der Monitoring-Ergebnisse (M8) erstellt, welche als Basis für das BEM in der Post-Processing-Phase diente. In der Post-Processing-Phase wurden zudem die MGP Varianten 1-4 generiert, wobei alle vier auf unterschiedlichen Modellen basieren. Der Digital Twin basiert auf dem Referenzmodell M1 und integriert die Daten der NutzerInnenbeteiligung durch die Gamification App, wodurch das Modell laufend instandgehalten wird.

Abbildung 6: Process-Design SCI_BIM

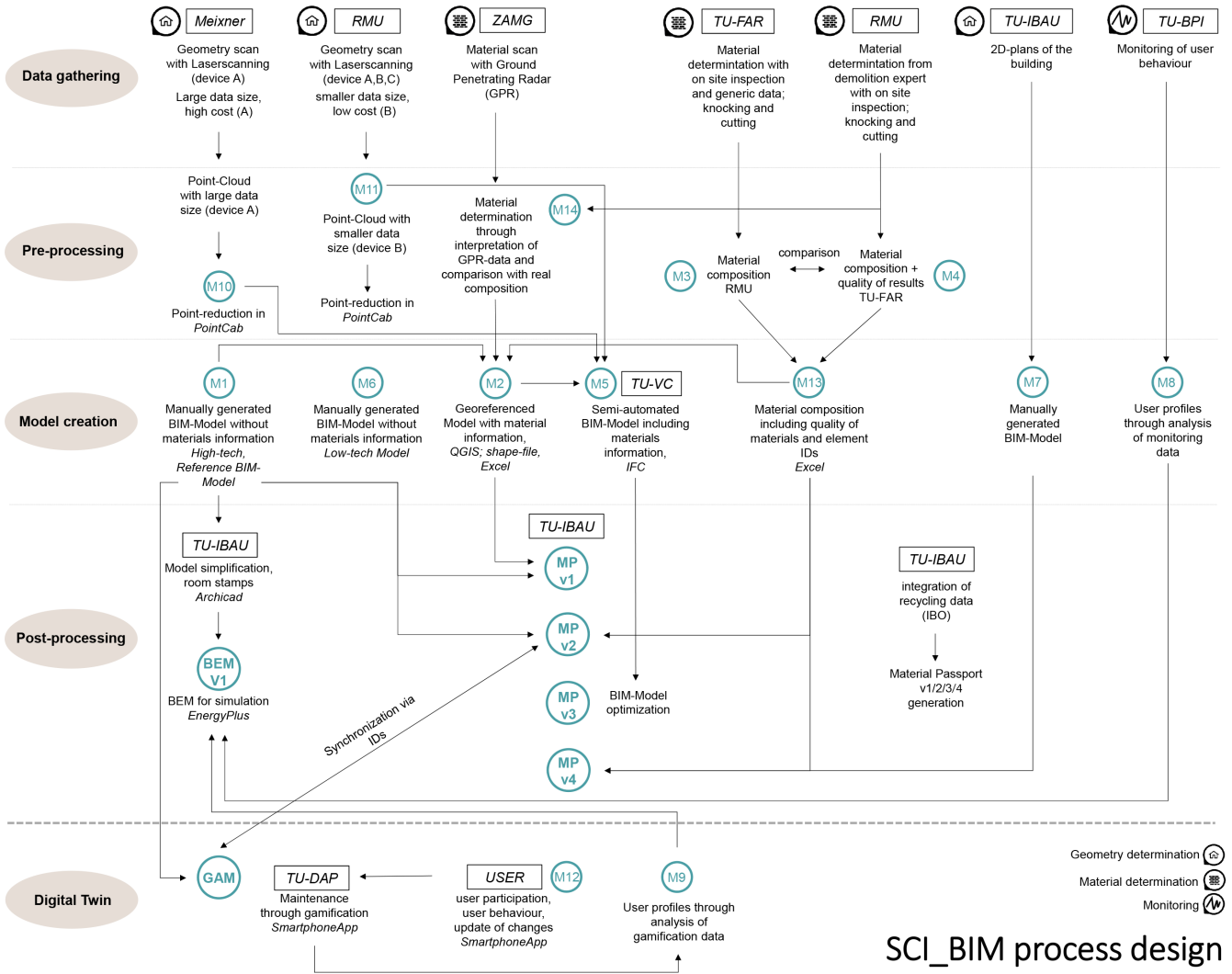
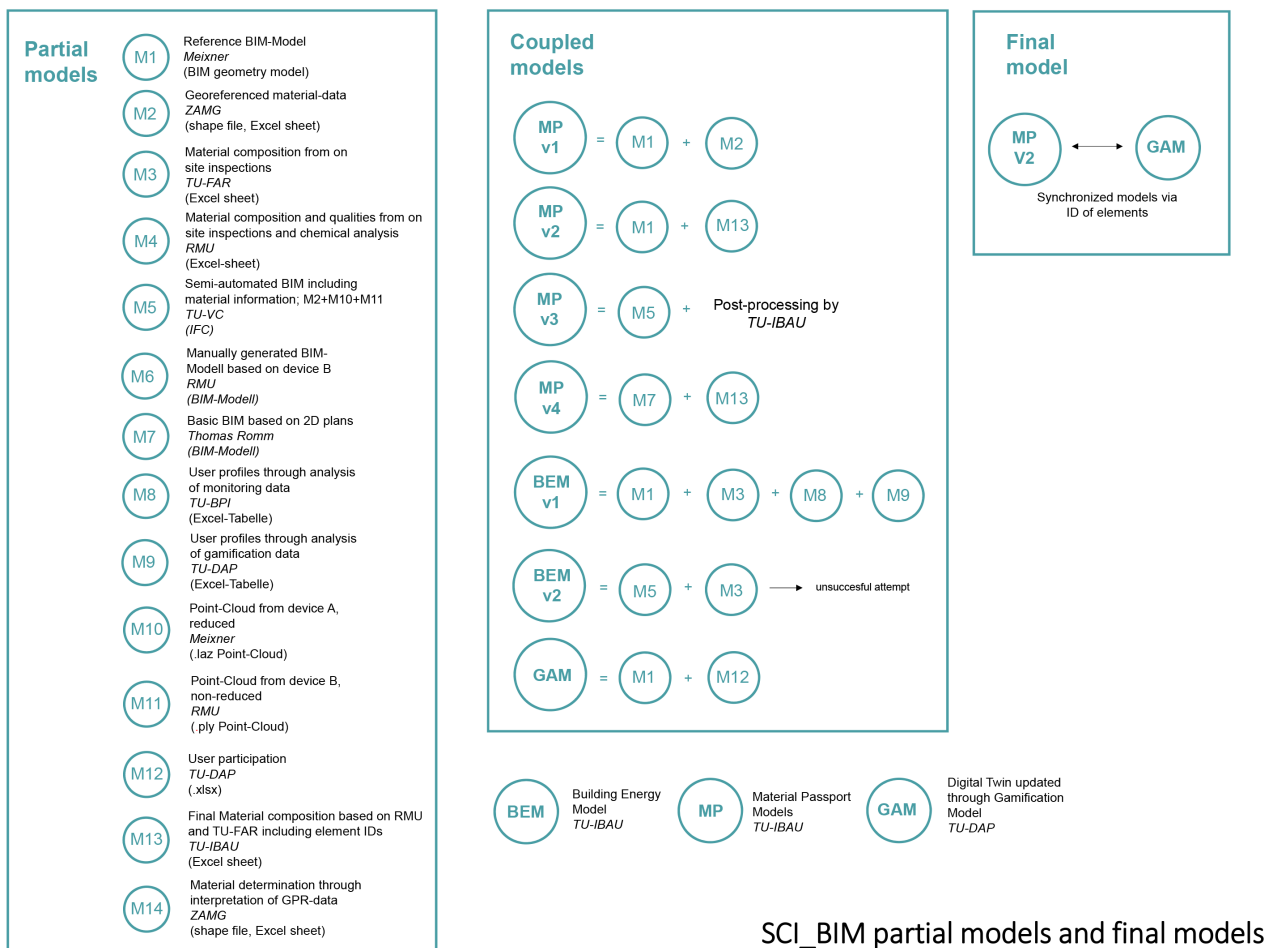


Abbildung 7: Teilmodelle und gekoppelte Modelle



5.2. Generierung des „low-tech“ und „high-tech“ BIM-Modells (Geometrie)

Zwei BIM-Modelle, M1 und M6 (Abbildung 1Abbildung 8 und Abbildung 9) wurden aufbauend auf den Point-Clouds M10 (Abbildung 10) und M11 erstellt. Dafür wurde der Use Case sowohl von der Firma Meixner als auch von RMU aufgenommen. Fa. Meixner verwendete für die Aufnahme einen teuren Handheldscanner, welcher sehr genaue Aufnahmen durchführt und große Datenmengen liefert. Dahingegen verwendete RMU einen kostengünstigeren Scanner (etwa um 1/3 günstiger), welcher kleinere Datenmengen liefert. Basierend auf den Point-Clouds wurden zwei BIM-Modelle mit einem manuellen Workflow (Schnitte durch die Point-Clouds und manuelle Erstellung der Objekte) generiert. Da das BIM-Modell der Fa. Meixner genauer ist, wurde dieses als Referenzmodell (Benennung der Elemente wie z.B. AW01, Nullpunkt etc.) für die weiteren Prozesse verwendet.

Abbildung 8: BIM-Modell (Geometrie), M1

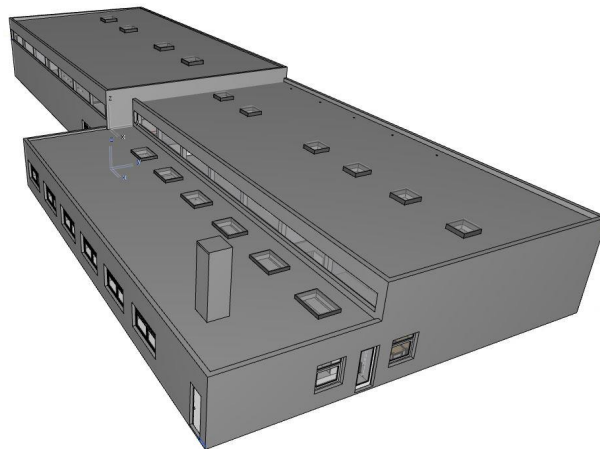


Abbildung 9: BIM-Modell (Geometrie), M6

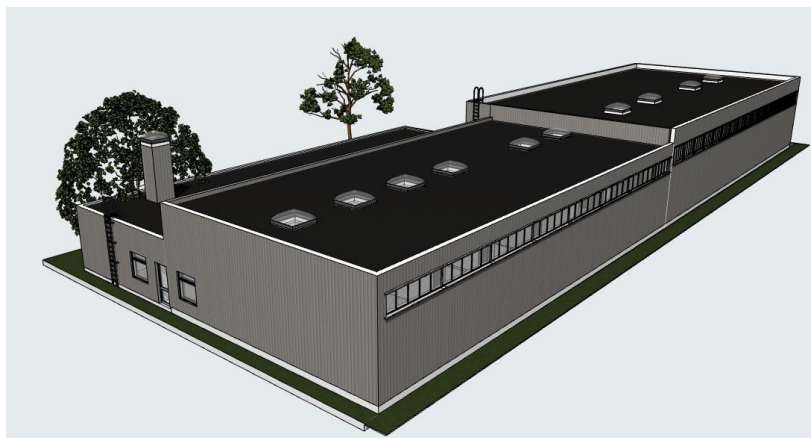
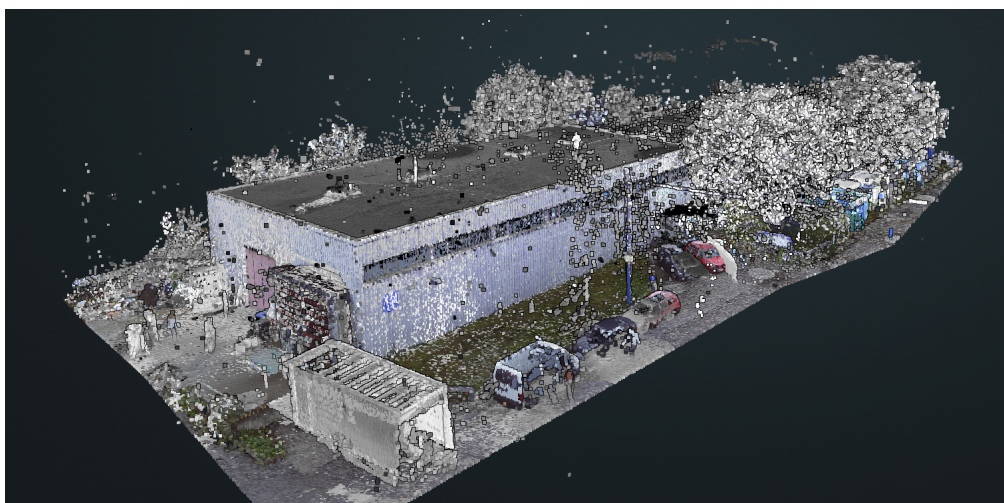


Abbildung 10: Point-Cloud des Use Case, M10

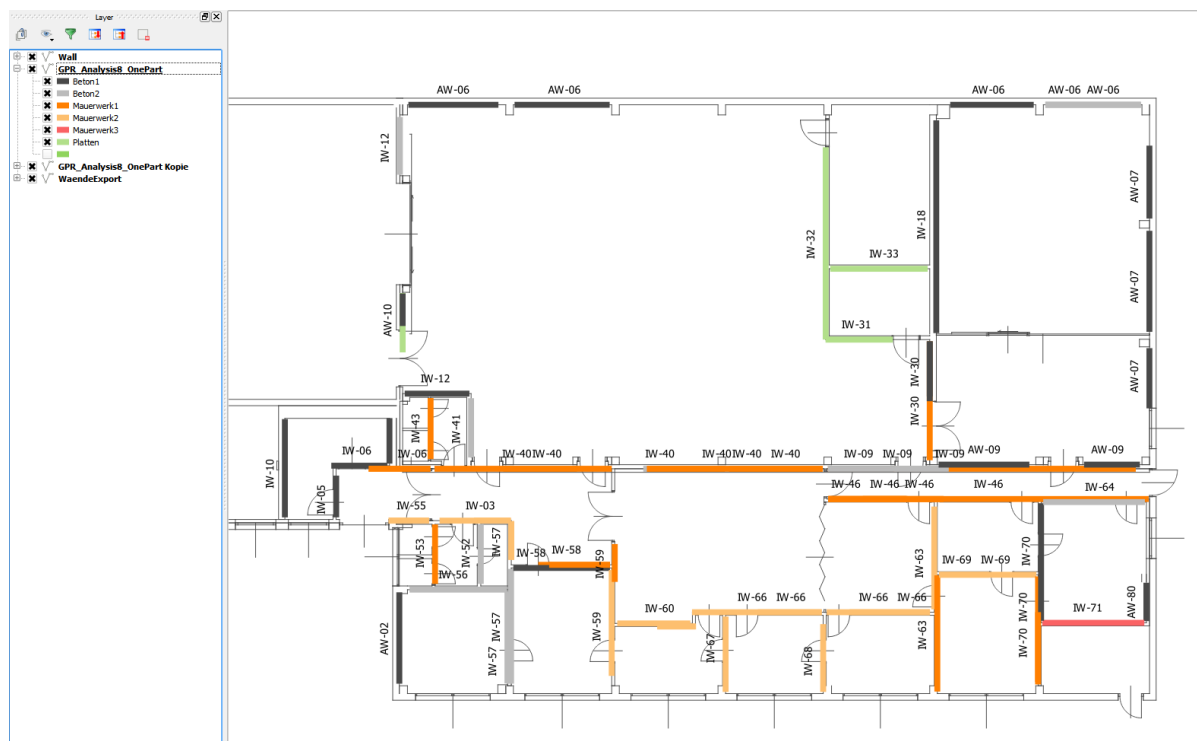


5.3. Modellierung der Materialität

5.3.1. Registrierung von Geometrie & Material

Die Bezeichnungen der einzelnen Elemente im Referenzmodell (Meixner) galt als Basis zur Registrierung von Geometrie und Material. Für die geometrische Referenzierung wurden im ersten Schritt die Koordinaten der Radarprofile zur relevanten Wand zugeordnet und dann die Materialität an das jeweilige Element angehängt. Die Modellierung der Materialität wurde basierend auf aufgenommenen Georadardaten durchgeführt. Dabei wurde ein Shape-File (QGIS) erstellt, aus welchem die Materialität der einzelnen Bauteile herauslesbar ist (Abbildung 11).

Abbildung 11: Registrierung von Geometrie und Material



5.3.2. Klassifizierung der Wände

Zur Klassifizierung der Wände wurden vier Parameter verwendet: die Energie der ersten Radarwelle (E1), die Energie der zweiten Radarwelle (E2), das Verhältnis der Energieabnahme zwischen erster und zweiter Radarwelle und die Hauptfrequenz der ersten Welle. Für jede der 89 Radarmessungen der Wände wurde zuerst eine mittlere Radarwelle berechnet. Danach wurden die oben beschriebenen vier Parameter dieser gemittelten Radarwelle bestimmt. Der Wand-Typ wurde klassifiziert, indem der Abstand der vier Parameter zu den interaktiv gesetzten Parametern der Klassen berechnet wurde. Jede Messlinie wurde der am nächsten liegenden Klasse zugeordnet.

Es wurde eine automatische Klassifizierung mit dem Modell der Materialaufnahme von TU-FAR durchgeführt, indem die Parameter der einzelnen Klassen (Energiewerte und Frequenz) verglichen und adaptiert wurden. Insgesamt gibt es sechs unterschiedliche Wandaufbauten. Wie der graphische

Vergleich in Abbildung 12 anschaulich zeigt, gibt es drei Wandaufbauten in der Funke-Halle, die sich sehr gut mit einer Radarmessung identifizieren lassen: Hohlbeton A4 (grün), Gasbeton A1 (blau & rot) und Rigips A3 (orange). Zur Unterscheidung der Böden in drei Bereiche wird die Mächtigkeit des Betons und die Art der Bewehrung herangezogen. Zudem sind teilweise Schichtgrenzen in den Radargrammen sichtbar (Abbildung 13).

Abbildung 12: Visualisierung der Klassifizierung nach Frequenz und Energie der ersten Welle der ZAMG Radar-Messung

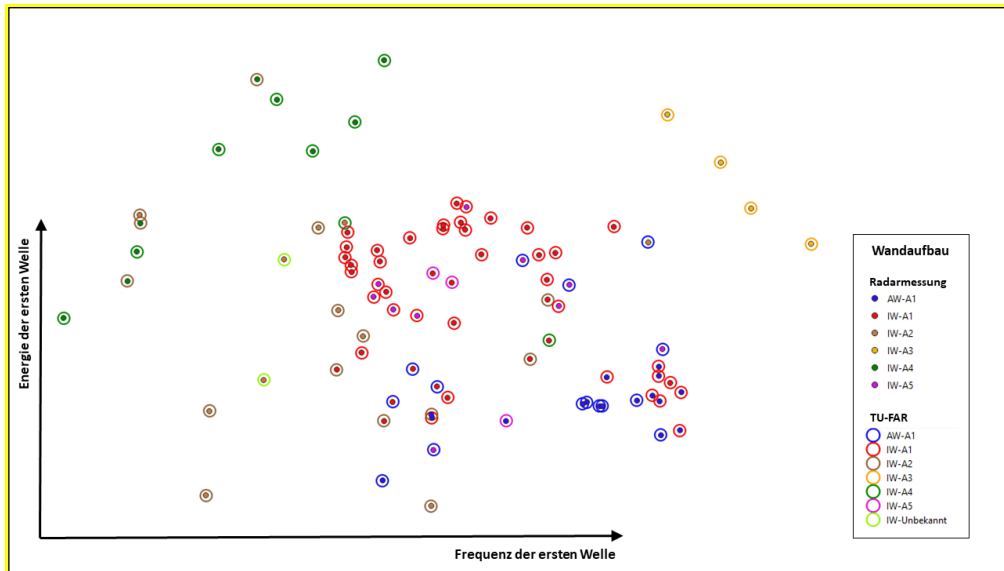
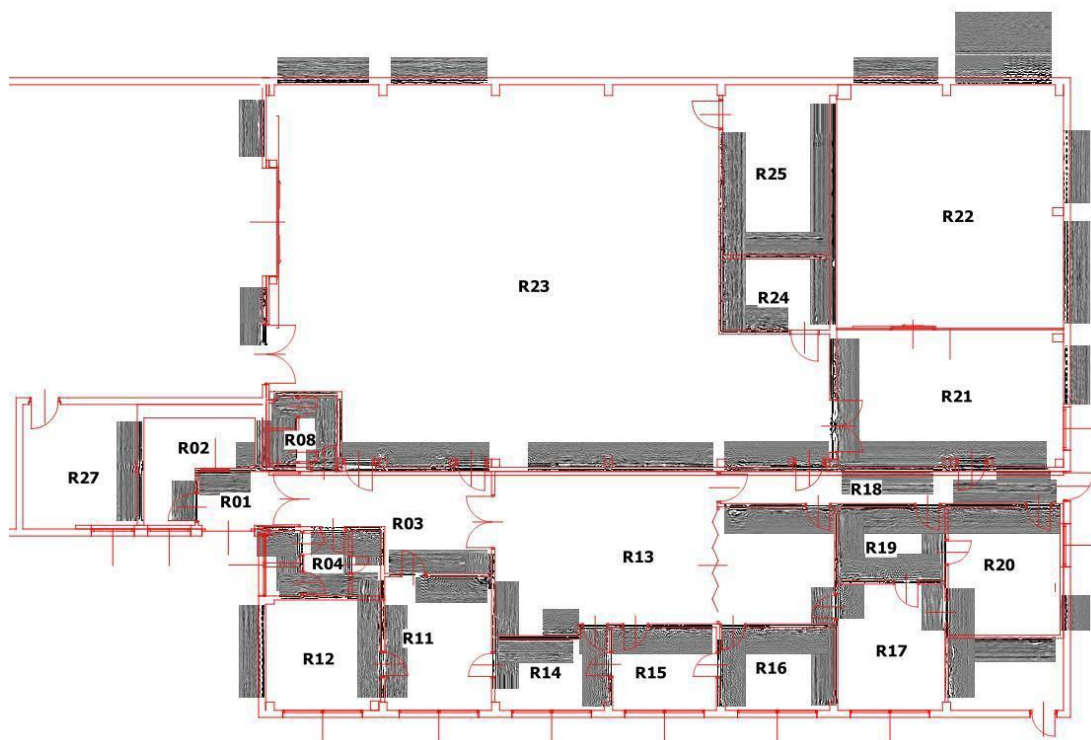


Abbildung 13: Georadarmessungen der Wände mit der GSSI 1.6 GHz Antenne

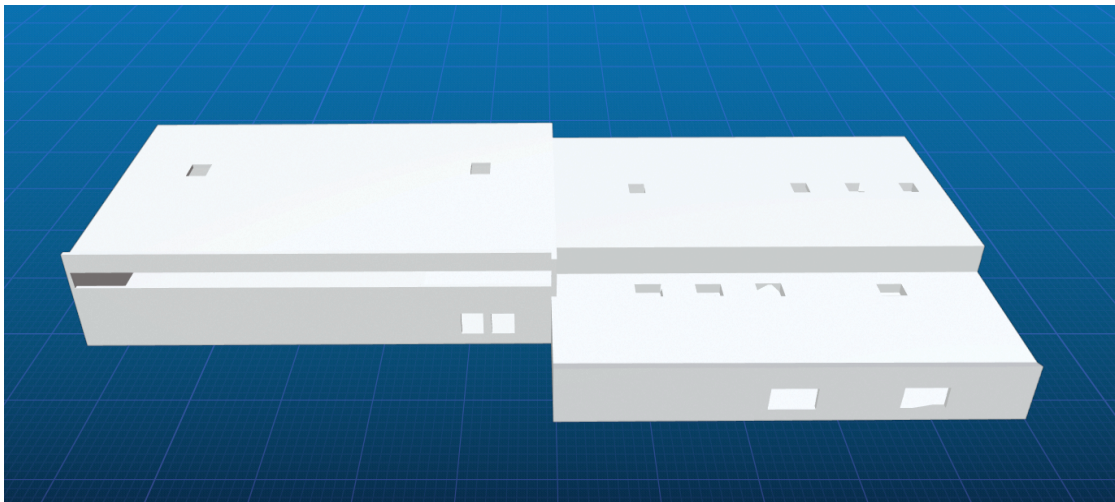


5.4. Semi-automatisierte Erstellung des BIM-Modells

5.4.1. Erster Prototyp der Scan-to-BIM Algorithmen (Geometrie)

Zur Generierung des ersten Prototyps wurde die Point-Cloud M10 (Meixner) sowie teilweise die Point-Cloud M11 (RMU) herangezogen, um das M5 zu generieren. Im ersten Prototyp wurde nur die Geometrie rekonstruiert, ohne die Materialität zu integrieren. Der genaue Workflow zur Generierung des ersten Prototyps ist in Kapitel 4.2, Abbildung 14 zu sehen. Hierbei wurde die Rekonstruktion der planaren Geometrien mit willkürlicher Orientierung implementiert. Jeder Raum sowie dessen Umrise („Schale“) wurden getrennt bearbeitet. Nach der Rekonstruktion der einzelnen Räume und ihrer Umrise wurde ein kombiniertes Polygonnetz erstellt.

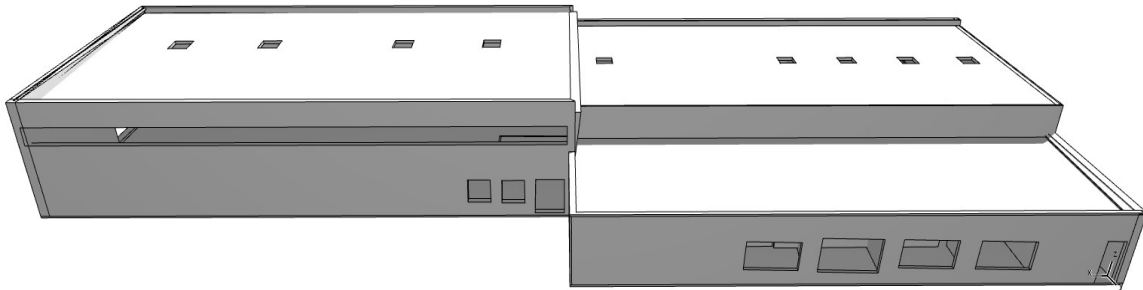
Abbildung 14: Erster Prototyp



5.4.2. Zweiter Prototyp der Scan-to-BIM Algorithmen (inkl. Material)

Wie beim ersten Prototyp dienen auch beim zweiten Prototyp die Point-Cloud M10 (Meixner) sowie teilweise die Point-Cloud M11 (RMU) als Basis, um das finale M5 zu generieren. Im zweiten Prototyp wurden Innenwände hinzugefügt, wodurch die gesamte volumetrische Rekonstruktion finalisiert ist. Es wurden zusammengehörige Wände und Räume gefunden, wodurch Polyeder (als Innenwände) extrudiert wurden, welche im nächsten Schritt zu IFC-Objekten konvertiert wurden. Nach Umwandlung in das IFC wurde die Materialinformation integriert sowie die Öffnungen für Fenster und Türen im finalen IFC ausgeschnitten. Es gibt die Möglichkeit der NutzerInnen-Integration, welche die Komplexität und die Dicke der Wände definieren können. Der genaue Workflow zur Generierung des zweiten Prototyps ist in Kapitel 4.2, Abbildung 15 abgebildet.

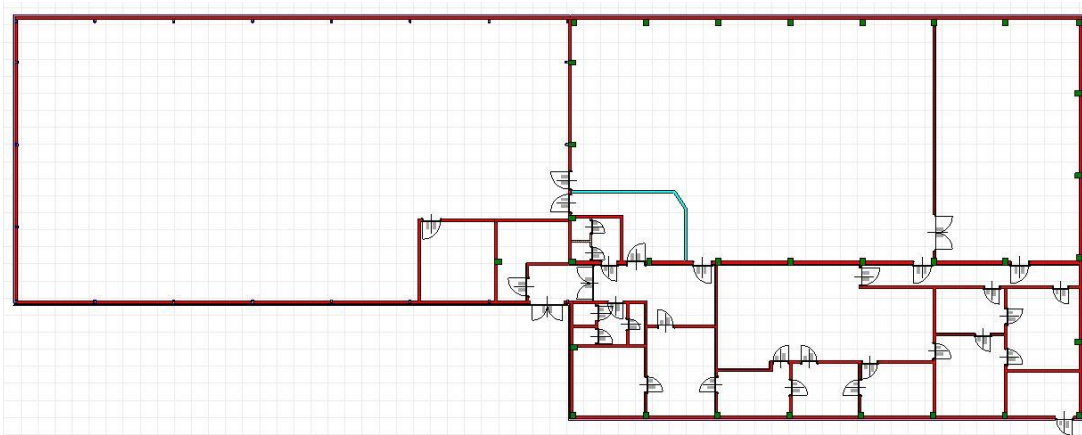
Abbildung 15: Zweiter Prototyp



5.5. MGP-Modell

In Summe haben sich 4 MGP-Varianten (MGP v1-4) ergeben, welche auf unterschiedlichen Erhebungsmethoden und Datensätzen basieren. Der gesamte Prozess zur Generierung der MGP-Varianten ist in Abbildung 5 dargestellt. In Abbildung 6 sind die einzelnen Teilmodelle der gekoppelten Modelle dargestellt. Exemplarisch werden die MGP-Ergebnisse des MGP v2 (M1 + M13) anhand der Wände und dem Fundament inkl. Fußbodenaufbau präsentiert (siehe Tabelle 1-8). Das MGP-Modell v2 ist in Abbildung 16 dargestellt (Archicad Modell inkl. Schichtaufbauten). Zur Erstellung des MGP sind Informationen über das Recyclingpotential sowie die Dichten der Materialien notwendig, welche aus der öffentlichen Datenbank von IBO (Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie) entnommen wurden. Die Bewertung des Recyclingpotentials basiert auf den Noten 1-5, welche vom IBO zur Verfügung gestellt werden („Verwertungspotential“). Jede Note steht für einen bestimmten Prozentsatz an rezyklierbarer Materialmasse. Note 1 steht für 75% Recyclingmasse und 25% Abfallmasse, Note 2 für 50% Recyclingmasse und 50% Abfallmasse, Note 3 für 25% Recyclingmasse und 75% Abfallmasse, Note 4 für 0% Recyclingmasse und 100% Abfallmasse und Note 5 für 0% Recyclingmasse und 125% Abfallmasse. Bei Note 5 kommt es zu einem Überschuss von 25%, wodurch der zusätzliche Aufwand für die Entsorgung von gefährlichen oder sehr schwer trennbaren Materialien dargestellt werden soll. Da die Noten von 1-5 für Neubauten vorgesehen sind und nicht die Abnutzung bzw. Qualität am Ende des Lebenszyklus eines Gebäudes mitberücksichtigen, wurden die Noten bei schlechter Qualität (aus M13) herabgestuft.

Abbildung 16: MGP Modell v2



5.5.1. MGP-Berechnungen der Außenwände

Tabelle 1: Inputparameter für die MGP-Berechnungen der Außenwände (1) [IBO]

Schichten der Außenwände	Dichte [kg/m ³]/ Flächengewicht [kg/m ²]	Dicke [m]	Fläche [m ²]	Masse [t]	Recycling Note [1-5]
Trapezblech (Stahl)	10		1241,7	12,42	1
Mineralwolle	15	0,05	813,6	0,61	3
Ytong	800	0,25	813,6	162,72	2
				175,75	

Tabelle 2: Inputparameter für die MGP-Berechnungen der Außenwände (2) [IBO]

Schichten der Außenwände	Qualität der Materialien (Schad- und Störstofferkundung)	GWP [kg CO ₂ equ./kg]	AP [kg SO ₂ equ./kg]	PEI [MJ/kg]
Trapezblech (Stahl)	unrein	2,13	0,01	31,20
Mineralwolle	asbesthaltig	1,93	0,01	21,36
Ytong	ok	0,23	0,00	2,82

Tabelle 3: Ergebnisse der MGP-Berechnungen der Außenwände (1)

Schichten der Außenwände	adaptierte Recycling Note	Recycling-masse [t] end-of-life	Abfall-masse [t] end-of-life
Trapezblech (Stahl)	2	6,21	6,21
Mineralwolle	5	-	0,76
Ytong	2	81,36	81,36
		87,57	88,33

Tabelle 4: Ergebnisse der MGP-Berechnungen der Außenwände (2)

Schichten der Außenwände	GWP [kg CO₂]	AP [kg SO₂]	PEI [MJ]
Trapezblech (Stahl)	26.448	132	387.410
Mineralwolle	1.180	9	13.035
Ytong	36.937	108	458.870
	64.566	248	859.316

5.5.2. MGP-Berechnungen des Fundaments und der dazugehörigen Fußböden

Tabelle 5: Inputparameter für die MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (1) [IBO]

Schichten des Fundaments und der Fußböden	Dichte [kg/m³]	Dicke [m]	Fläche [m²]	Masse [t]	Recycling Note [1-5]
Putz	2200	0,08	821,11	144,52	4
Bitumen	1050	0,001	821,11	0,86	5
Normalbeton (1% Bewehrung)	2300	0,3	986,33	680,57	2
				825,95	

Tabelle 6: Inputparameter für die MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (2) [IBO]

Schichten des Fundaments und der Fußböden	Qualität der Materialien (Schad- und Störstofferkundung)	GWP [kg CO₂ equ./kg]	AP [kg SO₂ equ./kg]	PEI [MJ/kg]
Putz	Nicht bewertet	0,12	0,00	1,03
Bitumen	Nicht bewertet	1,06	0,00	55,42
Normalbeton (1% Bewehrung)	ok	0,13	0,00	1,14

Tabelle 7: Ergebnisse der MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (1)

Schichten des Fundaments und der Fußböden	adaptierte Recycling Note	Recycling- masse [t] end-of-life	Abfall- masse [t] end-of-life
Putz	4	-	144,52
Bitumen	5	-	1,08
Normalbeton (1% Bewehrung)	2	340,28	340,28
		340,28	485,88

Tabelle 8: Ergebnisse der MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (2)

Schichten des Fundaments und der Fußböden	GWP [kg CO₂]	AP [kg SO₂]	PEI [MJ]
Putz	17 376,82	40,18	148 671,04
Bitumen	911,55	3,80	47 779,65
Normalbeton (1% Bewehrung)	87 031,00	206,89	775 721,27
	105 319,36	250,87	972 1,97

5.5.3. Upscaling der Ergebnisse auf Stadt-Ebene: Ressourcenkataster

Um die Datenlage des Wiener Ressourcenkataster zu verbessern, ist es zwingend notwendig, den Stichprobenumfang (Anzahl der beprobten Gebäude) zu vergrößern und die Genauigkeit der ermittelten Daten zu erhöhen. Nur dadurch können gesicherte Aussagen über die Grundgesamtheit (Gebäudepark in Wien) gemacht werden. Da die bisher angewandte manuelle Beprobung von Gebäuden mit hohem Aufwand, der Beschädigung von Gebäudeteilen und großen Unsicherheiten verbunden ist (auf Grund von ausschließlich stichprobenartigen Erhebungen innerhalb des Gebäudes), leisten die im Rahmen dieses Projekts verwendeten nicht-invasiven Erhebungsmethoden (Laservermessung, Bodenradar) einen wichtigen Beitrag dazu, die „zerstörungsfreie“ Ermittlung der notwendigen Gebäudedaten zu beschleunigen bzw. zu erleichtern. Die Laservermessung erlaubt eine detailgetreue Dokumentation der Abmessungen des Gebäudes (wichtig für nicht-dokumentierte bauliche Änderungen) und das Bodenradar liefert die grobe materielle Zusammensetzung aller Bauteile, ohne diese beschädigen zu müssen. Zusätzlich können mit dem Bodenradar verborgene Einbauten (z.B. Kabel, Rohrleitungen) sichtbar gemacht werden, wodurch deren Länge wesentlich genauer abgeschätzt werden kann. All dies führt zu einer verringerten Unsicherheit der geschätzten Materialzusammensetzung der beprobten Gebäude und ist die Grundvoraussetzung, um in Zukunft Aussagen über andere Gebäude bzw. die Grundgesamtheit mit reduzierter Unsicherheit treffen zu können.

5.6. Modellierung und Monitoring des Energiebedarfs

5.6.1. BEM-Modell

Um den für die BEM-Analyse erforderlichen Detaillierungsgrad zu erreichen, wurde ein iterativer Prozess zur Fehlerbehebung für ein funktionierendes BEM-Modell in der EnergyPlus Gebäudesimulationssoftware, sowie die Definition der geeigneten thermischen Zonierung durchgeführt. Die Materialeigenschaften aller Aufbauten wurden dem BEM-Modell anhand der Informationen des M13 zugewiesen. Das BEM-Geometriemodell ist in Abbildung 17 und das BEM-Modell mit thermischer Zonierung in Abbildung 18 dargestellt.

Abbildung 17: BEM Geometriemodell

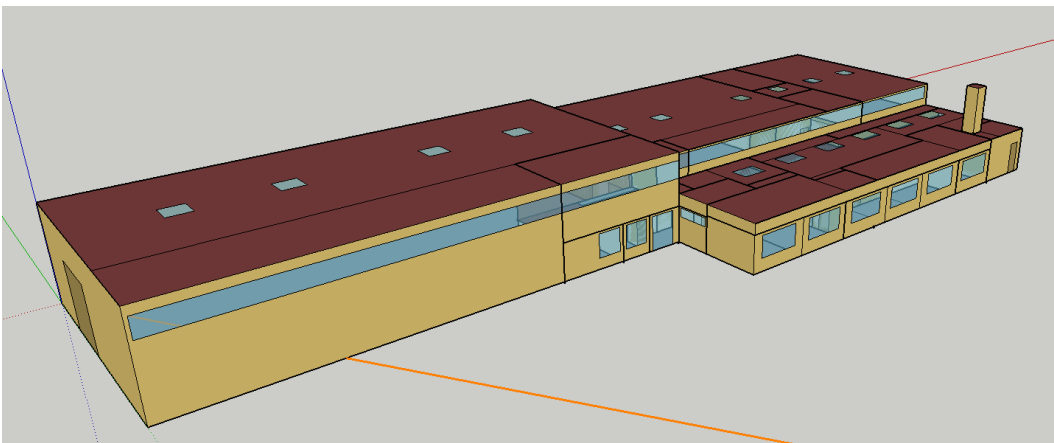
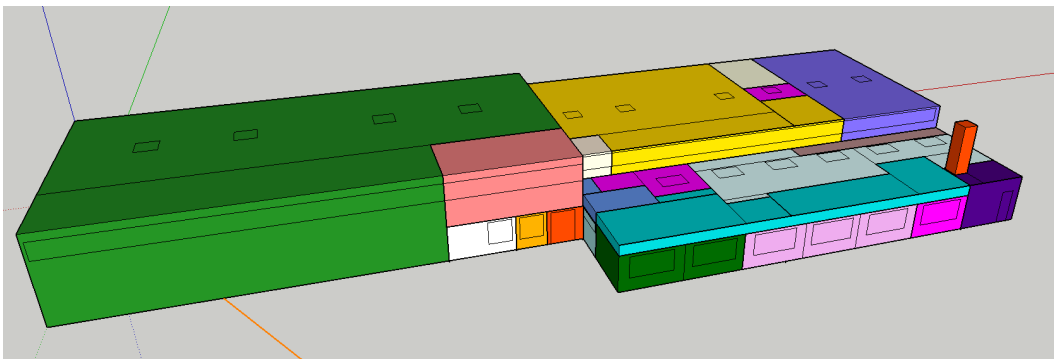


Abbildung 18: BEM-Modell mit thermischer Zonierung



5.6.2. Auswertung der Monitoring-Messdaten

Auswertung der Messdaten hinsichtlich des Komforts und NutzerInnenverhalten

Die im Sommer 2019 erfassten Daten wurden systematisch analysiert. Generell wäre bei ganzjährigen Datensätzen eine automatische Generierung von idf-Schedules zur Integrierung in die Gebäudesimulation mittels EnergyPlus möglich. Aufgrund der besonderen (und organisatorisch nicht anders möglichen) Messperiode im Sommer 2019 von nur zwei Monaten und einer Überlappung mit der üblichen Urlaubszeit und der bereits teilweise stattfindenden Absiedelung der NutzerInnen war

die Erstellung von realistischen Ganzjahres-Nutzungsprofilen nicht sinnvoll möglich. Exemplarisch wurde das Konzept getestet, jedoch führten die Simulation zu Resultaten, welche aufgrund der fehlenden restlichen Jahresdaten nicht validierbar sind. Da das Use-Case-Building per se keine separate Energieerfassung hatte, konnte hier auch nicht auf historische Energiebedarfsdaten zurückgegriffen werden. Temperatur und relative Feuchteverteilung der Innenraumluft im Messzeitraum sind in Abbildung 19 und Abbildung 20 dargestellt.

Abbildung 19: Kumulative Verteilung der Innenraumtemperatur gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)

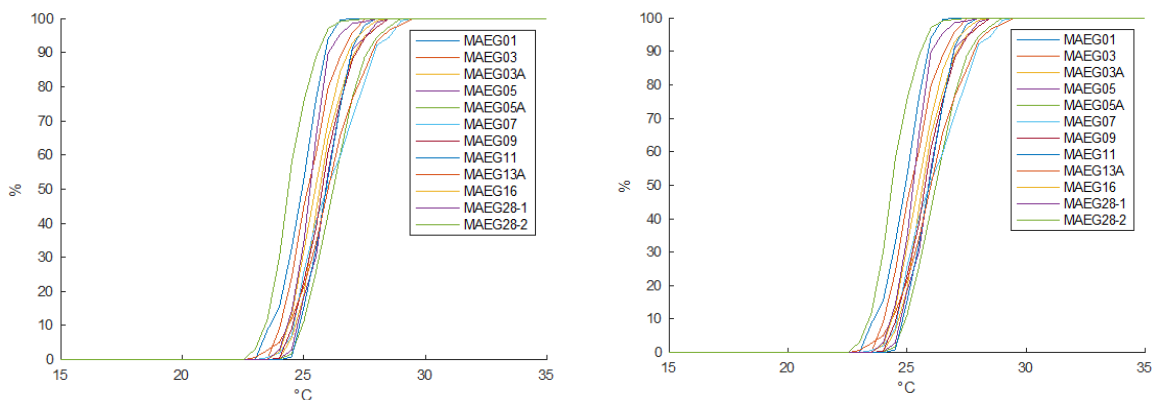
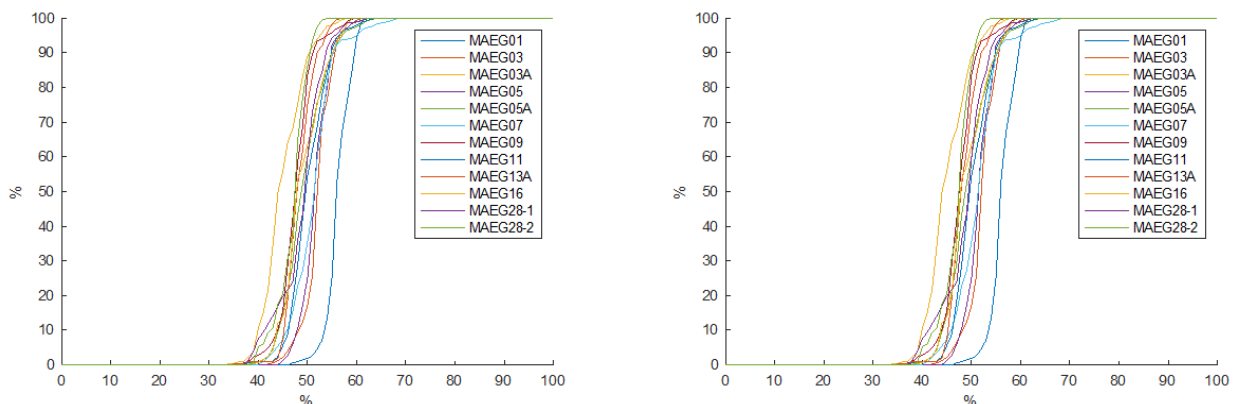


Abbildung 20: Kumulative Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)



Luftqualität, CO₂-Konzentrationen und Fensteröffnungen

Messdaten der CO₂-Konzentrationen wurde für die Evaluierung der Luftqualität herangezogen und zeigen im Allgemeinen sehr gute Werte. Wie in Abbildung 21 ersichtlich, liegen diese überwiegend unter der Pettenkoferzahl von 1000 ppm. Abbildung 22 zeigt das typische und relativ häufige Öffnen der Fenster der einzelnen NutzerInnen. Eine detaillierte Analyse der Interaktionen und vorherrschenden Innenraumbedingungen zeigt - wie in Abbildung 22 ersichtlich - keine wesentlichen Korrelationen zur Innentemperatur/-luftfeuchtigkeit. Es kann somit eher von einem typischen Verhaltensmuster der NutzerInnen ausgegangen werden, welches durch die versuchte

Verhinderung der sommerlichen Überwärmung bzw. unangenehmer Zustände des thermischen Komforts bestimmt ist.

Abbildung 21: Kumulative Verteilung der CO₂-Konzentrationen gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)

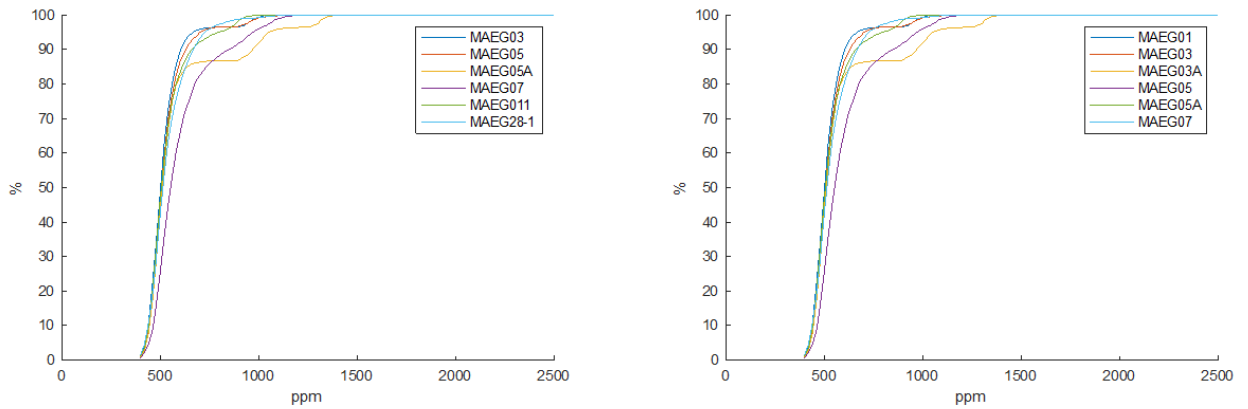
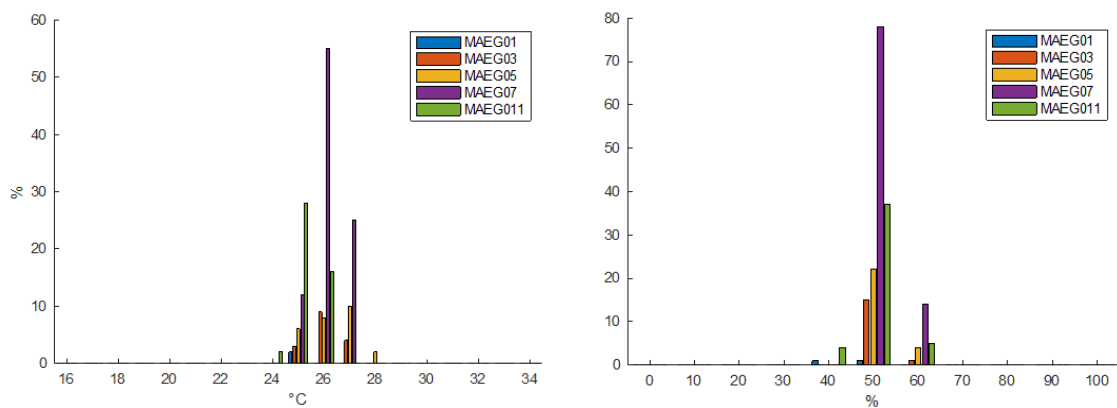


Abbildung 22: Prozentsatz der Fensteröffnung in Relation zur Lufttemperatur und relativen Feuchtigkeit der Innenräume.



5.7. Gamification

5.7.1. Gamification-Prototyp

Im Rahmen des Tasks wurde ein Prototyp entwickelt, mit dessen Hilfe BenutzerInnen des Gebäudes auf ihren Mobilgeräten Daten über Gebäudeelemente erfassen können. Das entwickelte Gamification-Konzept wurde in diesen Prototyp integriert. In dem entwickelten Prototyp wurden QR-Codes zur Identifizierung bestimmter Bauelemente verwendet (Abbildung 23). Jeder QR-Code codiert den eindeutigen Namen des Gebäudeelements, der sich auf ein korrespondierendes Objekt im BIM-Modell bezieht. Die Anwendung wurde mit der Spielentwicklungsplattform „Unity“¹² entwickelt und läuft sowohl auf Android- als auch auf IOS-Geräten.

Abbildung 23: Installation der QR-Codes zur Erfassung des Zustands der Gebäudeelemente



Die Anwendung ermöglicht den BenutzerInnen, die QR-Codes zu scannen und zeigt den Zustand der Gebäudeelemente an. Außerdem kann jede/r BenutzerIn die „High Score“-Liste mit allen SpielerInnen und Herausforderungen sehen. Zusätzlich kann das 3D-BIM-Modell in der Anwendung angezeigt werden. Die Screenshots der Prototypanwendung sind in Abbildung 24 zu sehen.

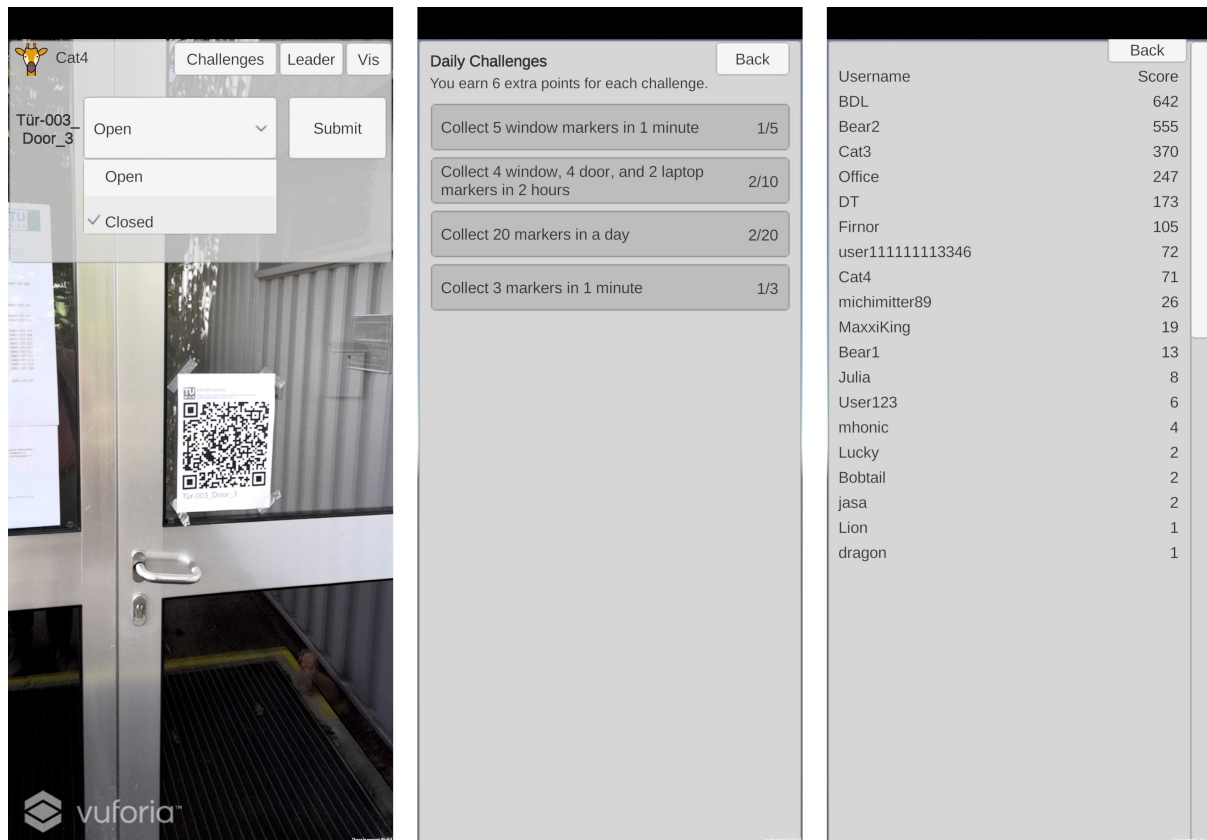
Alle aufgezeichneten Daten der Gebäudeelemente werden in Google Sheets-Dokumenten gespeichert. Die Prototyp-Anwendung greift über die Google API auf Google Sheets zu und sendet Gebäudedaten bei Bestätigung des Scanvorgangs. Die folgenden Daten werden an den Server gesendet:

- Name des Bauelements,
- Art des Bauelements,
- Status des Gebäudeelements (z. B. offen oder geschlossen),
- Zeitstempel,
- Spielname des Benutzers/der Benutzerin.

Aus Datenschutzgründen sendet die Anwendung keine persönlichen Daten vom Telefon des Benutzers/der Benutzerin.

¹² unity.com/de

Abbildung 24: Beispiele der Bildschirminhalte der Prototyp-Applikation von links nach rechts: Objekterkennung, Herausforderungen und „High Scores“.



5.7.2. Evaluierung von Gamification für BIM4FM

Ein Einführungsworkshop zur Präsentation und Live-Demonstration der Prototypanwendung mit NutzerInnen wurde abgehalten. Der Workshop fand am 13.6.2019 im Use Case statt. Dabei wurde das Projekt vorgestellt und die Motivation für das Sammeln von Gebäudeinformationen sowie die Details zur Anwendung erläutert. Danach wurde die Anwendung auf den Geräten der BenutzerInnen installiert und der Wettbewerb begann (MS 8.1: Workshop mit NutzerInnen – Einschulung in die Plattform).

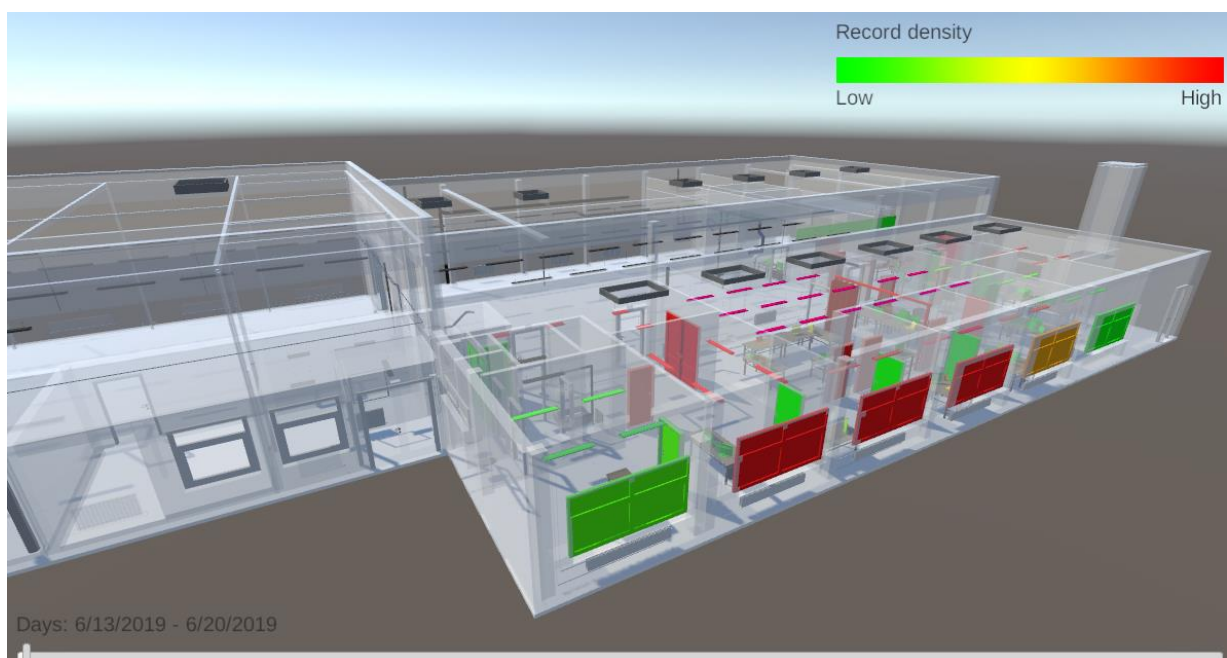
Der Anwendungsprototyp wurde auf den Smartphones der im Use Case arbeitenden MitarbeiterInnen installiert. Insgesamt haben 12 Personen von 26 MitarbeiterInnen mit ihren Geräten an der Testphase teilgenommen. Die Datenerfassung umfasste 12 Büros. Die QR-Codes für die Anwendung wurden in den Büros installiert, woraufhin der Wettbewerb zwischen den BenutzerInnen sowie die Datensammlung begann. Die Datenerfassung lief vom 13.6.2019 bis zum 10.9.2019 und umfasste 943 Datenpunkte (943 Zustände verschiedener Elemente wurden aufgezeichnet).

Der kritische Faktor bei der Datenerfassung durch Gamification war die Motivation. Zu Beginn des Wettbewerbs war die Motivation sehr hoch, dann sank die Motivation der TeilnehmerInnen. Die Motivation erhöhte sich während der Datenerfassungsperiode um ein Vielfaches, als die zweite Version der Anwendung mit BenutzerInnen-Herausforderungen herausgebracht wurde (22.7.2019). Im zweiten Jahr des Projekts wurden BenutzerInnen-Befragungen durchgeführt, analysiert und eine detaillierte Studie der Gamification-Plattform erstellt. Ein zweiter Workshop wurde organisiert, in dem die GewinnerInnen ausgezeichnet wurden. In diesem Workshop wurde auch die BenutzerInnen-orientierte Bewertung in Form eines Fragebogens durchgeführt. Diese zweite Bewertung untersuchte

die subjektive Präferenz des Benutzers/der Benutzerin zwischen dem entwickelten Ansatz und herkömmlichen Sensoren in Bezug auf Praktikabilität, Spaß, Zeitbedarf, Datenschutz und Kosten.

Das BIM4FM-Modell wurde so aktualisiert, dass Gebäudeänderungen in Form eines digitalen Zwillings verfolgt werden können. Dieses Update ermöglicht die korrekte Verfolgung von Änderungen in Geometrie, Energie, Materialien oder anderen Eigenschaften des Gebäudes. Die an einem Gebäude vorgenommenen Änderungen werden in einer separaten Datei aufgezeichnet, die über Objektkennungen mit dem BIM-Modell verknüpft ist. Diese separate Datei kann Änderungen am Zielgebäude enthalten. Die Visualisierung des BIM-Modells mit zusätzlichen Eigenschaften ist in Abbildung 25 dargestellt.

Abbildung 25: Visualisierung des aktualisierten BIM4FM-Modells



5.7.3. Optimierung der Gamification-Plattform

Während des Projekts wurde die vorgeschlagene Gamification-Plattform zweimal aktualisiert. Das erste Update wurde am 22.7.2019 veröffentlicht und bestand hauptsächlich aus dem Update der mobilen Anwendung mit speziellen Sonderaufgaben (special game challenges). Die zweite Optimierung wurde nach der Anwenderstudie durchgeführt. In diesem Update wurde die WebGL-Visualisierung erstellt und der erweiterte Datenexport, inklusive Datennachbearbeitung, implementiert. Die exportierten Daten, in Form einer mit dem BIM-Modell verbundenen Excel-Tabelle, können direkt für die Gebäudeanalyse oder für die Verfolgung von Änderungen verwendet werden. Schließlich wurde die Plattform optimiert, um die Erstellung eines digitalen Zwillings (Digital Twin) des Zielanwendungsfalls zu ermöglichen.

5.8. Kosten-Effizienz Analyse: Vergleich der vier MGP-Modelle MGPv1-4

Basierend auf den Erhebungsmethoden und entstandenen Datensätzen in der Implementierung der unterschiedlichen Technologien und Methoden im Use Case durch Meixner, RMU, ZAMG, TU-FAR, TU-VC und TU-IBAU wird hier die Wirtschaftlichkeitsanalyse der vier MGP-Varianten präsentiert. Diese beinhaltet die Darstellung aller Workflows für die Generierung der vier unterschiedlichen MGP-Varianten mit Zuordnung der jeweiligen Kosten zu den Prozess-Phasen Data Gathering, Pre-processing, Model Creation und Post-processing im Process-Design SCI_BIM Value Chain. Daraus wurden die Gesamtkosten für jede MGP-Variante berechnet und diese miteinander verglichen. Es ist ersichtlich, dass MGP-Variante 1 die teuerste ist und Variante 4 die günstigste (Abbildung 26), wobei es unterschiedliche Ausprägungen in der verschiedenen Prozess-Phasen gibt (Abbildung 27).

Abbildung 26: Vergleich der Gesamtkosten der MGP-Varianten

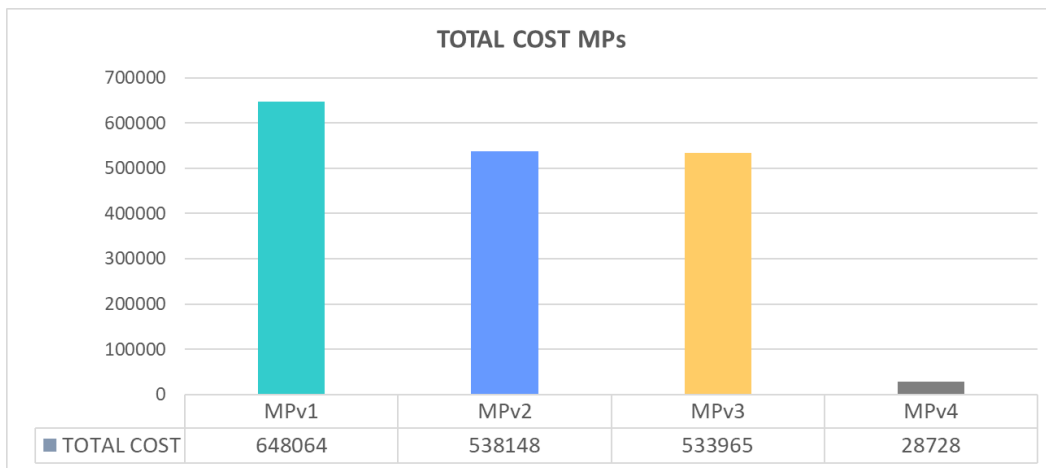
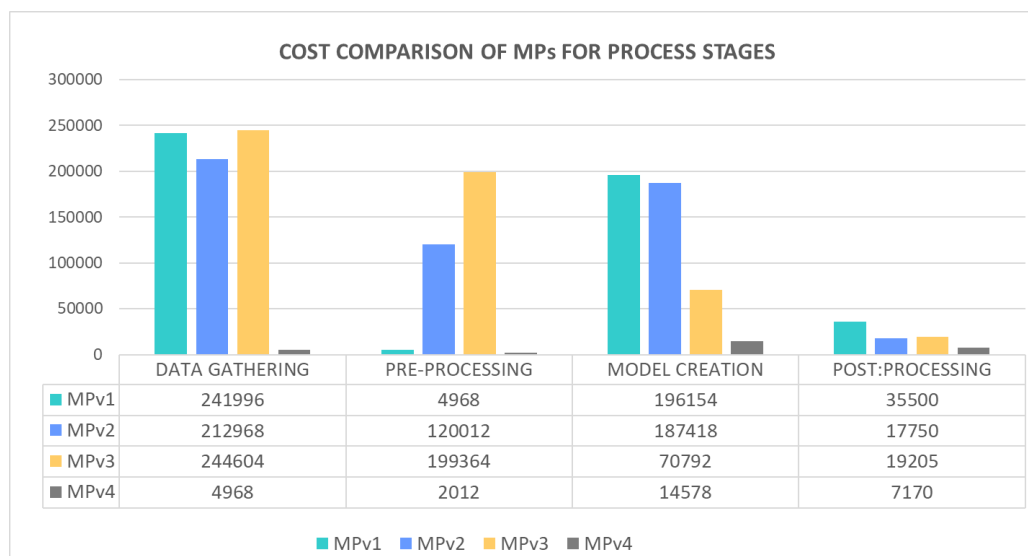


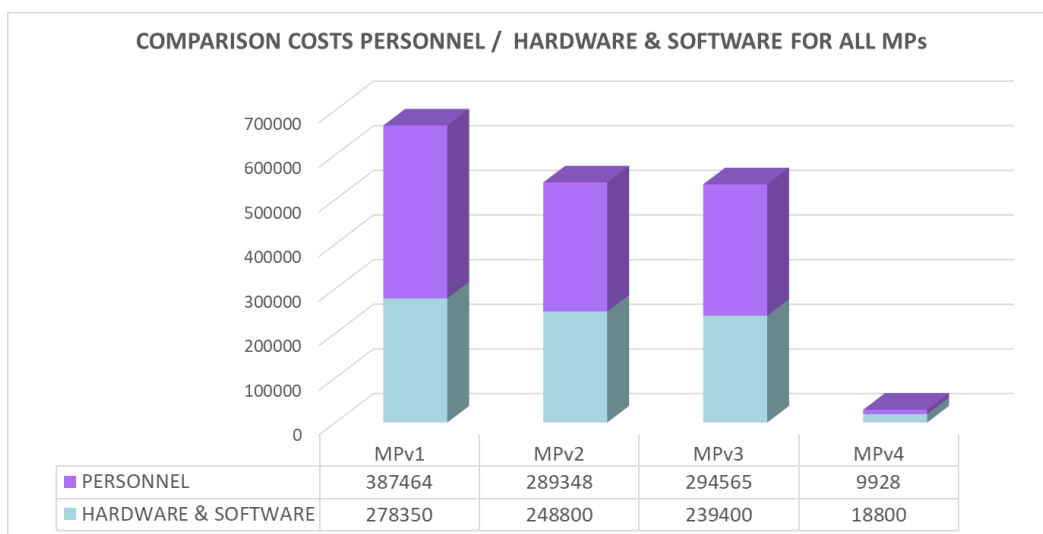
Abbildung 27: Kostenvergleich der MGP-Varianten in den Prozess-Phasen



Betrachtet man die Phasen separat (Abbildung 27), ist ersichtlich, dass bei MGPv1 (Basis Geometriemodell M1 und M2) Data Gathering wie auch Mode-Creation aufgrund der hohen Kosten für Geräte/Hardware und Software teuer sind, wobei die Kosten für Pre-processing im Vergleich zu Variante 2 und 3 sehr niedrig sind. MGPv2 und MGPv3 sind auch relativ teuer, unterscheiden sich untereinander jedoch deutlich in der Höhe der Kosten im Pre-processing und bei der Model-Creation: Der Grund ist, dass MGPv2 auf dem Geometriemodell M1 und dem Materialmodell M13 basiert (einheitlicher Datensatz) und somit im Pre-processing günstiger ist. MGPv3 ist dafür in Model Creation günstiger, aber nicht zur Gänze realisierbar, da die automatisierte Integration des Materialmodells (M2) in das semi-automatisiert generierte Geometriemodell M5 nicht möglich ist. Zusätzliche notwendige Optimierungen am Modell würden auch hier die Kosten erhöhen. Da MGPv4 aus dem Teilmodell M7, welches auf Grundlage von 2D-Plänen entstanden ist, sowie dem Teilmodell M13 besteht, ist es am günstigsten und aus diesem Grund nicht mit den anderen Varianten vergleichbar, da hier keine kostenaufwendigen Erhebungsmethoden notwendig waren.

Betrachtet man die Kosten aller MGPs bei einer Aufteilung in Personalkosten und Kosten für Geräte/Ausrüstung & Software (Abbildung 28), wird ersichtlich, dass der Kostenbereich „Personal“ bei allen Varianten höher ist als der Bereich „Geräte/Ausrüstung & Software“, außer bei MPv4 - aus den bereits genannten Gründen (2-D Pläne als Basis) - was diese Variante deshalb nicht mit den Varianten 1-3 vergleichbar macht. Bei den Personalkosten ist die Variante 1 am teuersten. Unter der Annahme, dass Geräte/Ausrüstung & Software eine einmalige Investition in die Ausstattung des Unternehmens sind, welche längerfristig genutzt werden kann, wäre der Vergleich der Personalkosten für die verschiedenen Erfassungsmethoden und Modellerstellungen bei einer n-Anzahl von Use Cases bzw. Gebäuden als variabler Kostenfaktor zu berücksichtigen und somit wahrscheinlich ein besserer Vergleichsparameter der verschiedenen Methoden als die Gesamtkosten (Investition + Personal).

Abbildung 28: Aufteilung in Personalkosten und Kosten für Geräte/Ausrüstung & Software



Durch die geführte Aufzeichnung der Stunden für die Erstellung der MGPs zeigt sich auch, dass für MGPv3 die meiste Anzahl an Stunden notwendig war (Abbildung 29), gefolgt von MGPv1 und MGPv2. Da MGPv4 auf 2D-Plänen basiert, ist diese Variante nicht wirklich mit den MGP Varianten 1-3 vergleichbar, da diese aus einer High-tech bzw. Low-tech Erhebungsmethode entstanden sind und dementsprechend aufwendige Modellierungszeit beansprucht haben. Vergleicht man die Stunden pro Phase und MGP-Variante (Abbildung 30), ist ersichtlich, dass die Phase „Modell Creation“ bei allen

Varianten den höchsten Zeitaufwand verursachte und MGPv3 die höchste Anzahl an Arbeitsstunden aufweist.

Abbildung 29: Gesamtstunden Vergleich der MGP Varianten

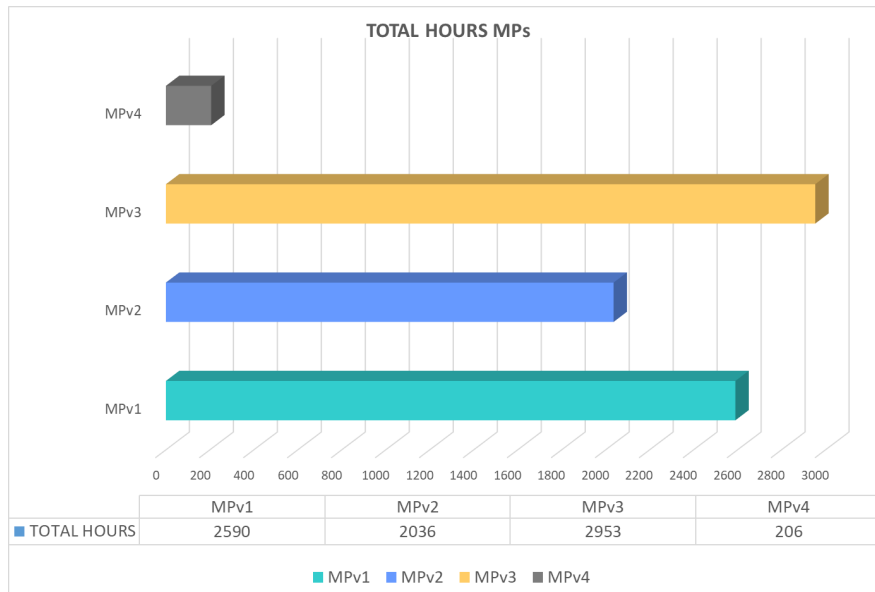
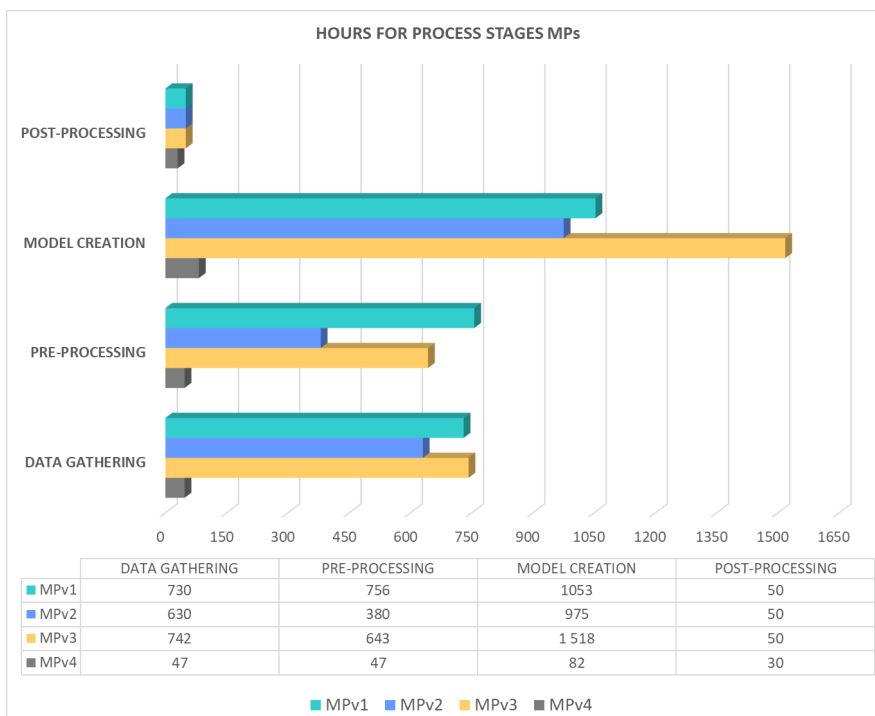


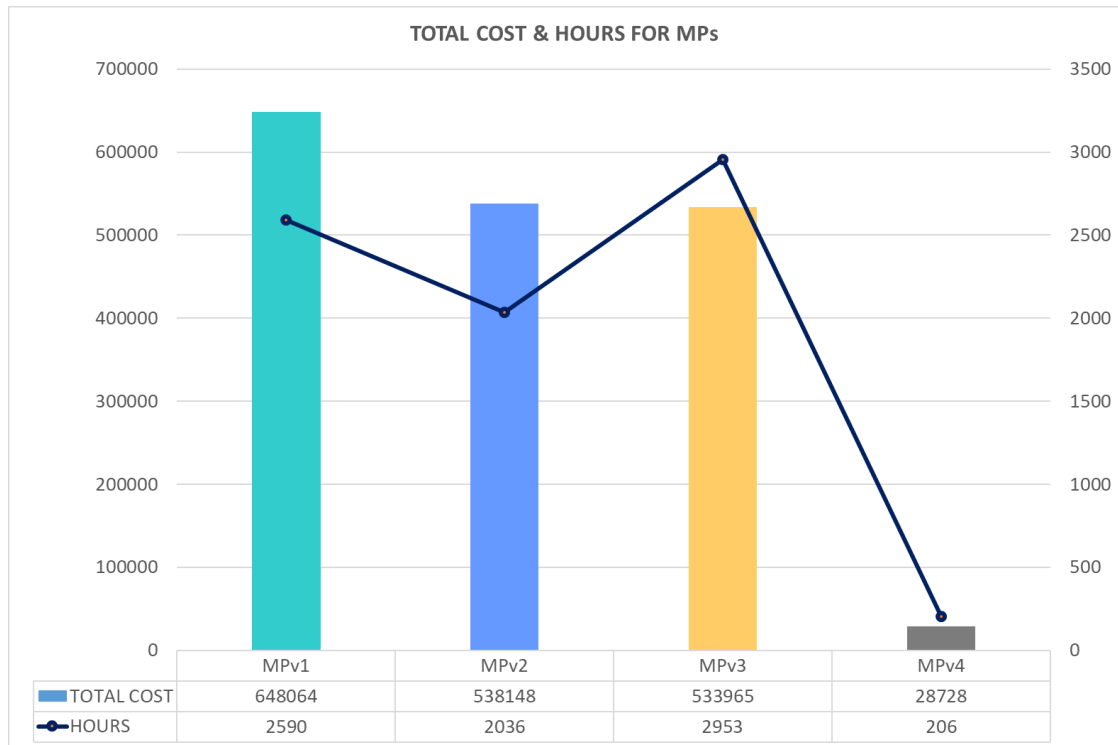
Abbildung 30: Stundenvergleich der MGP Varianten in den Prozess Phasen



Zusammengefasst ist von den Varianten MGPv1-v4 Variante 1 die teuerste, MGPv2 und v3 sind günstiger, aber im Vergleich zueinander ähnlich teuer. Es ist zu beachten, dass bei MGPv4 das BIM-Modell anhand von 2-D Plänen erstellt wurde und diese Variante somit nicht mit den anderen Methoden vergleichbar ist (Abbildung 31). Der Stundenaufwand war bei MGPv3 am höchsten, gefolgt

von MGP1 und MGPv2. Hier ist auch die Variante MGPv4 separat zu betrachten, da bei dieser eine andere Art der Modell-Generierung im Sinne der angewendeten Methoden implementiert wurde.

Abbildung 31: Kosten und Stunden Vergleich aller MGP

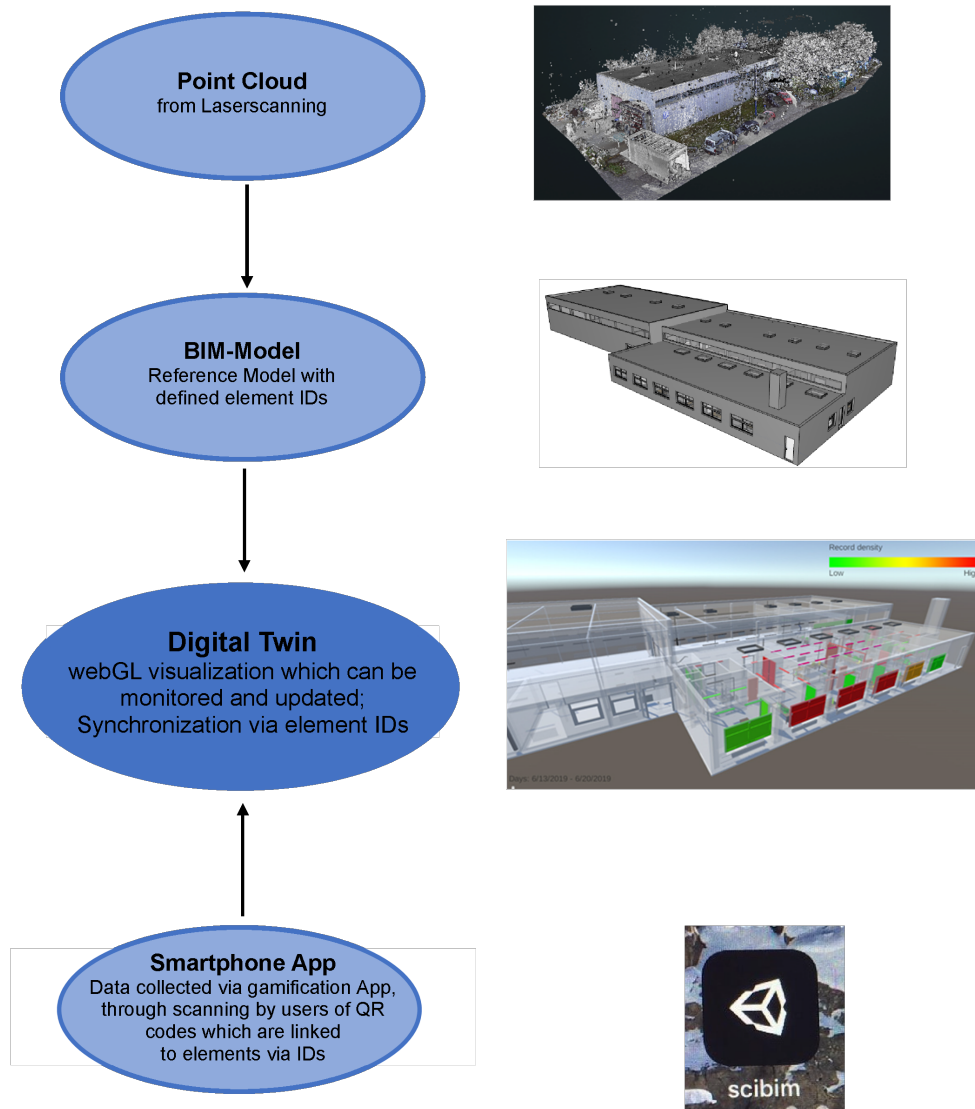


5.9. Finales Framework „Scan to BIM4FM“

Das finale, in SCI_BIM angewandte Framework „Scan to BIM4FM“ ist in Abbildung 32 präsentiert. Zusätzlich wurden verschiedene Möglichkeiten der Weiterbearbeitung der generierten BIM-Modelle evaluiert. Als Ergänzung zur Datenspeicherung im IFC4-Format wurde die Bearbeitung mittels BlenderBIM als OpenSource-Applikation getestet. Änderungen auch komplexer Geometrie und dazugehöriger Metadaten lassen sich in BlenderBIM umsetzen, zusätzliche Funktionen können über die Programmiersprache PYTHON implementiert werden. Die Möglichkeit von BlenderBIM, Asset-Daten im COBie (Construction Operations Building Information Exchange) Standard speichern zu können, erlaubt eine verbesserte Anbindung von Facility Management Software.

Zudem wurde eine Roadmap „Scan to BIM4FM“ im Rahmen des Forschungsprojekts erstellt, diese ist im Anhang zu finden. Die Roadmap dient als Basis für die Integration des in SCI_BIM entwickelten Workflows in anderen Facilities.

Abbildung 32: Framework „Scan to BIM4FM“



5.10. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

SCI_BIM ist in das Themenfeld 1 „Digitales Planen, Bauen und Betreiben“, Subthema 1.6 „Digitalisierung, Social-Media-Nutzung und Gamification auf Stadt- bzw. Gemeindeebene“ eingebettet.

Der Bedarf nach Energie und Ressourcen sind essenzielle Themen für zukünftige Städte. Zudem stellt die zunehmende Urbanisierung Herausforderungen für die „Stadt der Zukunft“ hinsichtlich der Veränderungen durch den Klimawandel und der Verknappung von endlichen Ressourcen dar. Daher war der wesentliche Schwerpunkt des Projekts die Optimierung der Energie- und Ressourceneffizienz, welche durch digitales Erfassen von Gebäuden und dessen Änderungen, sowie der Prädiktion der zukünftigen Materialflüsse ermöglicht wird. Die Entwicklung neuer oder verbesserter Technologien, wie z.B. semi-automatisierte Generierung und Instandhaltung eines Digital Twin, Gamification sowie Materialerfassung durch GPR standen dabei im Fokus.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Erkenntnisse für das Projektteam und die Öffentlichkeit

Die erreichten Ergebnisse sind sowohl für die ProjektpartnerInnen als auch für PlanerInnen und die Bauindustrie von großem Interesse und können eine wirtschaftliche Verwertung hervorrufen. Die semi-automatisierte BIM-Objekterstellung aus der Point-Cloud (durch Laserscan) ist für alle Projektbeteiligte von großem Nutzen, da die as-built BIM-Erstellung aus der Point-Cloud sehr aufwändig ist. Durch die entwickelte Methodik sind wesentliche Zeit- und Kostenersparnisse zu erwarten. Die entwickelte Gamification-Plattform bietet für Gebäudeeigentümer bzw. Gebäudeverwalter sowie NutzerInnen die Möglichkeit, den Energieverbrauch zu optimieren. Zudem wird auch ein aktueller „digitaler Zwilling“ durch ein semi-automatisiertes Update des BIMs generiert, welches für das Gebäudemanagement einen großen Nutzen mit sich bringt. Im Rahmen des Projekts wurde auch das webGIS von RMU weiterentwickelt, wodurch das Unternehmen eine direkte Verwertung der Ergebnisse realisieren konnte. Die Stadtverwaltung hat bereits die positiven Aspekte des Projekts realisiert (Erweiterung des materiellen Katasters im Rahmen von „Circular City Wien 2020-2030“) und hat beim Antrag für das weiterführende Projekt „BIMstocks“ mit einem LOI unterstützt.

6.2. Verwertungs- und Verbreitungsaktivitäten

Die bisherigen wissenschaftlichen Verwertungs- und Weiterverbreitungsaktivitäten umfassten zahlreiche Vorträge bei nationalen und internationalen Veranstaltungen, Vorträge für die Industrie und bei Weiterbildungsseminaren, sowie Publikationen in Fach- und wissenschaftlichen Journals.

Aus dem Projekt SCI_BIM ist das Folgeprojekt BIMstocks (FFG Nr.: 879401) entstanden, worin die in SCI_BIM entwickelten Workflows weiterentwickelt und an mehreren Use Cases angewendet werden.

Das TU_IBAU Team hat an der CIB-Konferenz 2019 in Hongkong, CCSS Summer School 2019 in Senigallia, OTMC Konferenz 2019 in Zagreb CIB Konferenz, SEESDEWES Konferenz 2020 (online) und an der CIB W78 Konferenz 2020 (online) teilgenommen. Des Weiteren wurde SCI_BIM an der ETH Zürich (Oktober 2019) und beim Autodesk Primecustomer Workshop in Wien (Juni 2019) präsentiert.

Das Team von RMU (Raskovic et al.) hat in mehreren Publikationen das Projekt SCI_BIM dargestellt. Ebenso hat das Team von TU-DAP gemeinsam mit TU-IBAU das Paper mit dem Titel „Building Information Monitoring via Gamification“ für die Konferenz GRAPP 2021 eingereicht.

Die Liste der Beiträge, welche durch SCI_BIM entstanden sind, sind im Folgenden aufgelistet. Zusätzlich ist das im OTMJ Journal publizierte Paper „Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks“, welches die wesentlichen Ziele von SCI_BIM zusammenfasst, im Anhang zu finden.

- Honic M., Kovacic I. (2020) "Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks"; Organization, Technology & Management in Construction, 11, S. 2148-2157. Best Paper Award bei der OTMC Konferenz gewonnen!

- Honic M., Kovacic I. (2020) "Scan to BIM for the semi-automated generation of a Material Passport for an existing building"; in: Proceedings of the 37th International CIB W78 Conference 2020 (ICCCBE CIB W78 Conference 2020), August 18-20, Sao Paolo, Brazil (ONLINE), S. 338-346.
- Honic M., Kovacic I. (2020) "Increasing the sustainability of buildings by application of the Material Passport method"; in: Proceedings of the 4th South East Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems 2020 (4th SEE SDEWES 2020), June 28 - July 2, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (ONLINE), S. 1-13.
- Kan P., Ferschin P., Honic M., Kovacic I. (2020) "Building Information Monitoring via Gamification"; eingereicht und akzeptiert für die GRAPP Conference 2021 (<http://www.grapp.visigrapp.org/>).
- Kovacic I., Honic M. (2019) "BIM-supported scanning and data capturing for Integrated Resources and Energy Assessment"; in: CIB World Building Congress 2019 - Constructing Smart Cities, June 17-21, Hong Kong, China, S. 1-10.
- Rašković M., Ragošnić A.M., Kondracki K., Ragošnić-Angst M. (2020) "Clean C&D waste material cycles through optimized pre-demolition waste audit documentation: A review on building material assessment tools"; accepted for publication in Waste Management & Research.
- Rašković M., Ragošnić A.M., Kondracki K., Ragošnić-Angst M. (2019) "Clean C&D waste material cycles through BIM-enhanced building stock examination practices: An Austrian case study"; in: Proceedings of the 9th International Conference on Sustainable Waste Management towards Circular Economy (IconSWM-CE 2019), November 27-30, Bhubaneswar, India.
- Rašković M., Ragošnić A.M., Kondracki K., Ragošnić-Angst M. (2019) "Scanning, Data Capturing & Visualization for Integrated Resource Management"; in: Proceedings of the 2019 e-nova International Conference, November 21-22, Pinkafeld, Austria.

7 Ausblick und Empfehlungen

Eine weiterführende Forschungsarbeit hat sich bereits aus SCI_BIM entwickelt - das Forschungsprojekt BIMstocks: „Digital Urban Mining Platform for Assessing the material composition of building stocks through coupling of BIM to GIS“, in welchem die Technologien „Laserscanning“ und „GPR“ auf mehreren Bestandsobjekten angewendet werden, um ein Upscaling auf Stadt-Ebene zu ermöglichen. Langfristig betrachtet, dient die digitale Urban Mining Plattform zur Erhöhung von Rezyklierungs- und Wiederverwendungsraten auf Stadt-Ebene, welche einen wesentlichen Beitrag zur Österreichischen Wirtschaft bezüglich Importabhängigkeit haben könnte. Aus dem semi-automatisierten Scan-to-BIM Prozess zur Generierung eines BIM-Modells mit Geometrie und Materialinformation könnte in Zukunft ein Softwareprodukt entstehen. Eine Optimierung der für die Generierung des MGPs für Bestandsgebäude angewandten Methode ist im Rahmen von BIMstocks vorgesehen. Diesbezüglich wird im Rahmen des Folgeprojekts mit dem Österreichischen Institut für Ökologie und Bauen (IBO) bereits ein neues Bewertungsmodell entwickelt.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: BIM Generierungsprozess für neue und bestehende Gebäude, Fokus von SCI_BIM: „Points-to-BIM“ Prozess (aufbauend auf Huber et al., 2011 und Volk et al., 2015)	16
Abbildung 2: Geometrische Rekonstruktion	22
Abbildung 3: IFC Generierung	23
Abbildung 4: BIM zu BEM Workflow	24
Abbildung 5: Workflow für die Generierung des MGP	25
Abbildung 6: Process-Design SCI_BIM.....	29
Abbildung 7: Teilmodelle und gekoppelte Modelle	30
Abbildung 8: BIM-Modell (Geometrie), M1	31
Abbildung 9: BIM-Modell (Geometrie), M6	31
Abbildung 10: Point-Cloud des Use Case, M10	31
Abbildung 11: Registrierung von Geometrie und Material.....	32
Abbildung 12: Visualisierung der Klassifizierung nach Frequenz und Energie der ersten Welle der ZAMG Radar-Messung.....	33
Abbildung 13: Georadarmessungen der Wände mit der GSSI 1.6 GHz Antenne.....	33
Abbildung 14: Erster Prototyp.....	34
Abbildung 15: Zweiter Prototyp.....	35
Abbildung 16: MGP Modell v2	35
Abbildung 17: BEM Geometriemodell	39
Abbildung 18: BEM-Modell mit thermischer Zonierung	39
Abbildung 19: Kumulative Verteilung der Innenraumtemperatur gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)	40
Abbildung 20: Kumulative Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)	40
Abbildung 21: Kumulative Verteilung der CO ₂ -Konzentrationen gesamt und während der üblichen Arbeitszeit (8-17 Uhr)	41
Abbildung 22: Prozentsatz der Fensteröffnung in Relation zur Lufttemperatur und relativen Feuchtigkeit der Innenräume.....	41
Abbildung 23: Installation der QR-Codes zur Erfassung des Zustands der Gebäudeelemente	42
Abbildung 24: Beispiele der Bildschirminhalte der Prototyp-Applikation von links nach rechts: Objekterkennung, Herausforderungen und „High Scores“	43
Abbildung 25: Visualisierung des aktualisierten BIM4FM-Modells	44
Abbildung 26: Vergleich der Gesamtkosten der MGP-Varianten	45
Abbildung 27: Kostenvergleich der MGP-Varianten in den Prozess-Phasen	45
Abbildung 28: Aufteilung in Personalkosten und Kosten für Geräte/Ausrüstung & Software	46
Abbildung 29: Gesamtstunden Vergleich der MGP Varianten.....	47

Abbildung 30: Stundenvergleich der MGP Varianten in den Prozess Phasen.....	47
Abbildung 31: Kosten und Stunden Vergleich aller MGP	48
Abbildung 32: Framework „Scan to BIM4FM“	49

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Inputparameter für die MGP-Berechnungen der Außenwände (1) [IBO]	36
Tabelle 2: Inputparameter für die MGP-Berechnungen der Außenwände (2) [IBO]	36
Tabelle 3: Ergebnisse der MGP-Berechnungen der Außenwände (1).....	36
Tabelle 4: Ergebnisse der MGP-Berechnungen der Außenwände (2).....	37
Tabelle 5: Inputparameter für die MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (1) [IBO]	37
Tabelle 6: Inputparameter für die MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (2) [IBO]	37
Tabelle 7: Ergebnisse der MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (1)	38
Tabelle 8: Ergebnisse der MGP-Berechnungen des Fundaments inkl. Fußböden (2)	38

Literaturverzeichnis

- Abergel, T., Dean, B., & Dulac, J. Towards a zero-emission, efficient, and resilient buildings and construction sector: Global Status Report 2017. UN Environment and International Energy Agency, Paris, France, 2017.
- Alanne, K. "An overview of game-based learning in building services engineering education." *European Journal of Engineering Education* 41.2, 204-219, 2016.
- Arikan, M., Schwärzler, M., Flöry, S., Wimmer, M., & Maierhofer, S. O-snap: Optimization-based snapping for modeling architecture. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 32(1), 1-15, 2013.
- Brunner, Paul H. "Urban mining a contribution to reindustrializing the city." *Journal of Industrial Ecology* 15.3:339-341, 2011.
- Choy, C. B., Xu, D., Gwak, J., Chen, K., & Savarese, S. 3d-r2n2: A unified approach for single and multi-view 3d object reconstruction. In *European conference on computer vision* (pp. 628-644). Springer, Cham., 2016.
- IBO, Österreichisches Institut für Bauen und Ökologie. <https://www.baubook.at/eco2soft/> (abgerufen am 30.04.2021).
- Euroconstruct. "Construction will continue to grow in Europe", Presseaussendung, 2018. https://euroconstruct.org/ec/press/pr2018_85 (abgerufen am 17.12.2020; 16:34).
- Fersch, P., et al. Museum Carnuntinum - Legionsadler und Druidenstab: vom Legionslager zur Donaumetropole. Text- und Katalogband. Franz Humer (Hrsg.) - Kataloge zur Sonderausstellung aus Anlass des Jubiläums - 2000 Jahre Carnuntum. Archäologisches Museum Carnuntinum, Bad Deutsch-Altenburg, 21. März 2006 - 11. November 2007.

- Ferschin, P., Di Angelo, M., & Suter, G. *Exploring the potential of game engines for real-time light simulation*. 2010.
- Ferschin, P., et al. Kunsthistorisches Museum Wien, Sonderausstellung: Im Schatten der Pyramiden, 2013.
- Honic, M., Kovacic, I., Sibenik, G., & Rechberger, H. Data-and stakeholder management framework for the implementation of BIM-based Material Passports. *Journal of building engineering*, 23, 341-350, 2019.
- Huber, D., Akinci, B., Oliver, A. A., Anil, E., Okorn, B. E., & Xiong, X. Methods for automatically modeling and representing as-built building information models. In *Proceedings of the NSF CMMI Research Innovation Conference* (Vol. 856558). 2011.
- Jung, J., Stachniss, C., Ju, S., & Heo, J. Automated 3D volumetric reconstruction of multiple-room building interiors for as-built BIM. *Advanced Engineering Informatics*, 38, 811-825, 2018.
- Koch, C., Neges, M., König, M., & Abramovici, M. Natural markers for augmented reality-based indoor navigation and facility maintenance. *Automation in Construction*, 48, 18-30.2014.
- Kovacic, I., Honic, M., Rechberger, H., Oberwinter, L., Lengauer, K., Hagenauer, A., ... & Meier, K. Prozess-Design für den „Building Information Modeling“(BIM) basierten, materiellen Gebäudepass, 2018.
- Kleemann, F., Lederer, J., Aschenbrenner, P., Rechberger, H., & Fellner, J. A method for determining buildings' material composition prior to demolition. *Building Research & Information*, 44(1), 51-62, 2016.
- Lafarge, F., & Mallet, C. Creating large-scale city models from 3D-point clouds: a robust approach with hybrid representation. *International journal of computer vision*, 99(1), 69-85, 2012.
- Le, Q. T., Pedro, A. K. E. E. M., Lim, C. R., Park, H. T., Park, C. S., & Kim, H. K. (2015). A framework for using mobile based virtual reality and augmented reality for experiential construction safety education. *International Journal of Engineering Education*, 31(3), 713-725, 2015.
- Markova, S., & Rechberger, H. Entwicklung eines Konzepts zur Förderung der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen: Materieller Gebäudepass und Design for Recycling für das Bauwesen. *Endbericht. Wien. Technische Universität Wien, pp. I-III*, 2011.
- Marsh, A., Thoo, S. Games technology and building performance analysis. J. Zuo, L. Daniel, V. Soebarto (eds.). Fifty years later: Revisiting the role of architectural science in design and practice: 50th International Conference of the Architectural Science Association, 417-426, 2016.
- Merschbrock, C., Ann K. L., and Tor T. "Integrating BIM and gaming to support building operation: the case of a new hospital.", 2014.
- Monzpart, A., Mellado, N., Brostow, G. J., & Mitra, N. J. RAPter: rebuilding man-made scenes with regular arrangements of planes. *ACM Trans. Graph.*, 34(4), 103-1, 2015.
- Mura, C., Mattausch, O., & Pajarola, R. Piecewise-planar Reconstruction of Multi-room Interiors with Arbitrary Wall Arrangements. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 35, No. 7, pp. 179-188), 2016.

- Musialski, P., Wimmer, M., & Wonka, P. Interactive coherence-based façade modeling. In *Computer Graphics Forum* (Vol. 31, No. 2pt3, pp. 661-670). Oxford, UK: Blackwell Publishing Ltd., 2012.
- Musialski, P., Wonka, P., Aliaga, D. G., Wimmer, M., Van Gool, L., & Purgathofer, W. A survey of urban reconstruction. In *Computer graphics forum* (Vol. 32, No. 6, pp. 146-177), 2013.
- Nan, L., & Wonka, P. Polyfit: Polygonal surface reconstruction from point clouds. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 2353-2361), 2017.
- Ochmann, S., Vock, R., Wessel, R., & Klein, R. Automatic reconstruction of parametric building models from indoor point clouds. *Computers & Graphics*, 54, 94-103, 2016.
- Osello, A., Del Giudice, M., Guinea, A. M., Rapetti, N., Ronzino, A., Ugliotti, F. M., & Migliarino, L. Augmented Reality and gamification approach within the DIMMER Project. *INTED2015 Proceedings*, 8, 2015.
- Pintore, G., & Gobbetti, E. Effective mobile mapping of multi-room indoor structures. *The visual computer*, 30(6-8), 707-716, 2014.
- Pont, U., Ghiassi, N., Shayeganfar, F., Mahdavi, A., Fenz, S., Heurix, J., & Anjomshoaa, A. SEMERGY: Utilizing semantic web technologies for performance-guided building design optimization. *eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction: ECPPM 2014*, 209. 2014.
- Pont, U., Ghiassi, N., Taheri M., Bräuer R., Mahdavi A. The BAU_WEB-Project: Exploring the potential of state-of-the-art Web-Technologies for Building Product Data Acquisition and Management, Poster: Vienna Young Scientists Symposium 2016, Vienna; 06-09-2016 - 06-10-2016; in: "Proceedings of Vienna Young Scientists Symposium 2016", B. Ullmann, TU Wien et al. (ed.); Eigenverlag mit wissenschaftlichem Lektorat / TU Wien, (2016), ISBN: 978-3-9504017-2-1; 28 - 29. 2016.
- Poster: Vienna Young Scientists Symposium 2016, Vienna; 06-09-2016 - 06-10-2016; in: "Proceedings of Vienna Young Scientists Symposium 2016", B. Ullmann, .. TU Wien et al. (ed.); Eigenverlag mit wissenschaftlichem Lektorat / TU Wien, (2016), ISBN: 978-3-9504017-2-1; 28 - 29.
- Rinaldi, S., Bittenbinder, F., Liu, C., Bellagente, P., Tagliabue, L. C., & Ciribini, A. L. C. Bi-directional interactions between users and cognitive buildings by means of smartphone app. In *2016 IEEE International Smart Cities Conference (ISC2)* (pp. 1-6). IEEE., 2016.
- Rüppel, U., & Schatz, K. Designing a BIM-based serious game for fire safety evacuation simulations. *Advanced engineering informatics*, 25(4), 600-611, 2011.
- Schuss, M., Pont, U., Taheri, M., Lindner, C., & Mahdavi, A. Simulation-assisted monitoringbased performance evaluation of a historically relevant architectural design. In *Building Simulation Applications-3rd IBPSA-Italy Conference*, Bolzano, Italy. 2017.
- Volk, R., Julian S., and Frank S. "Building Information Modeling (BIM) for existing buildings— Literature review and future needs." *Automation in construction* 38, 109-127, 2014.
- WEF (World Economic Forum). "Shaping the Future of Construction: a Breakthrough in Mindset and Technology.", 2016.

Zach, R. An open-source, vendor and technology independent toolkit for building monitoring, data preprocessing, and visualization (Doctoral dissertation), 2012.

Zhang, Y., Xu, W., Tong, Y., & Zhou, K. Online structure analysis for real-time indoor scene reconstruction. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 34(5), 1-13, 2015.

Zollmann, S., Hoppe, C., Kluckner, S., Poglitsch, C., Bischof, H., & Reitmayr, G. Augmented reality for construction site monitoring and documentation. *Proceedings of the IEEE*, 102(2), 137-154, 2014.

Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modelling
BEM	Building Energy Modelling
GPR	Ground Penetrating Radar
MGP	Materieller Gebäudepass

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

1: Datenerstellung und Dokumentation

Die Daten wurden durch Erfassung des Use Case generiert. Dabei wurden Daten durch das Laserscanning, Messungen mit GPR sowie durch manuelle Erfassungsmethoden generiert. Alle Daten wurden für das Projekt ermittelt und finden nur Anwendung in der Forschung. Eine direkte Weiterverarbeitung ist derzeit nicht geplant. Die Daten werden auf TU-internen Servern gespeichert und dokumentiert.

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

Die Daten stehen Forschungszwecken zur Verfügung. Für die Nutzung der von externen Projektpartner generierten Daten müssen diese kontaktiert werden.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die Daten werden auf TU-internen Servern gespeichert. Backups sind nicht vorgesehen. Alle Partner haben Zugriff auf die Daten, die Verwaltung der Daten erfolgt hauptsächlich durch den Konsortialführer.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Sensible Daten werden durch Anonymisierung geschützt. Im Grunde stehen alle Daten den Projektpartnern zur Verfügung und auf Anfrage auch für die Öffentlichkeit, sofern die Partner dies als möglich sehen.

9.2. Roadmap „Scan to BIM4FM“

Die Roadmap steht unter <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/sci-bim.php> zum Download zur Verfügung.

9.3. Journal Paper

Honic M., Kovacic I. (2020) "Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks"; Organization, Technology & Management in Construction, 11, S. 2148-2157.

Das Paper steht unter

[https://www.researchgate.net/publication/342856520 Model and data management issues in the integrated assessment of existing building stocks](https://www.researchgate.net/publication/342856520_Model_and_data_management_issues_in_the_integrated_assessment_of_existing_building_stocks) zum Download zur Verfügung.

A large, light blue geometric shape, resembling a right-angled triangle or a trapezoid, is positioned on the right side of the page. It has a vertical right edge and a horizontal top edge, with a diagonal line connecting the top-left corner to the bottom-right corner.

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)