

# **Künstliche Intelligenz für die Erstellung von CityGML Modellen und VR Visualisierung (KityVR)**

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 74/2025

Wien, 2025

## Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur,  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination: Abteilung III/3 - Energie und Umwelttechnologien

Leitung: DI (FH) Volker Schaffler, MA, AKKM

Autorinnen und Autoren:

Gerald Schweiger, Johannes Exenberger (Graz University of Technology, Institute of Software Technology)

Johanna Pirker, Saeed Safikhani (Graz University of Technology, Institute of Interactive Systems and Data Science)

Julian Murschetz, Michael Monsberger (Graz University of Technology, Institute for Building Physics, Services and Construction)

Hermann Edtmayer, Lisa-Marie Fochler, Thomas Mach (Graz University of Technology, Institute of Thermal Engineering)

Wien, Graz 2025. Stand: März 2022

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an [iii3@bmimi.gv.at](mailto:iii3@bmimi.gv.at).

## **Rechtlicher Hinweis**

Dieser Ergebnisbericht wurde von die/der Projektnehmer:in erstellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit, Aktualität sowie die barrierefreie Gestaltung der Inhalte übernimmt das Bundesministerium für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI) keine Haftung.

Mit der Übermittlung der Projektbeschreibung bestätigt die/der Projektnehmer:in ausdrücklich, über sämtliche für die Nutzung erforderlichen Rechte – insbesondere Urheberrechte, Leistungsschutzrechte sowie etwaige Persönlichkeitsrechte abgebildeter Personen – am bereitgestellten Bildmaterial zu verfügen.

Die/der Projektnehmer:in räumt dem BMIMI ein unentgeltliches, nicht ausschließliches, zeitlich und örtlich unbeschränktes sowie unwiderrufliches Nutzungsrecht ein, das übermittelte Bildmaterial in allen derzeit bekannten sowie künftig bekannt werdenden Nutzungsarten für Zwecke der Berichterstattung, Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit im Zusammenhang mit der geförderten Maßnahme zu verwenden, insbesondere zur Veröffentlichung in Printmedien, digitalen Medien, Präsentationen und sozialen Netzwerken.

Für den Fall, dass Dritte Ansprüche wegen einer Verletzung von Rechten am übermittelten Bildmaterial gegen das BMIMI geltend machen, verpflichtet sich die/der Projektnehmer:in, das BMIMI vollständig schad- und klaglos zu halten. Dies umfasst insbesondere auch die Kosten einer angemessenen rechtlichen Vertretung sowie etwaige gerichtliche und außergerichtliche Aufwendungen.

## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm „Stadt der Zukunft“ des Bundesministeriums für Innovation, Mobilität und Infrastruktur (BMIMI). 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 aller betroffener Bereiche 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 BMIMI publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung .....</b>	<b>7</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>9</b>
<b>1 Ausgangslage.....</b>	<b>10</b>
Datenmodelle .....	10
Modellierung und Simulation von Städten .....	10
Enrichment .....	11
Virtual Reality .....	11
<b>2 Projektinhalt.....</b>	<b>12</b>
2.1. Information Modelling für die Energiesimulation städtischer Gebäude .....	12
2.2. SHP2SIM .....	13
2.3. BIM als Informationsquelle für Energiesimulationen .....	14
2.4. Machine Learning basiertes Enrichment.....	14
2.5. Virtuelle Realität zur Erweiterung des Potenzials von Building Information Modeling .....	15
2.6. VR Test-Case.....	16
Innovation District Inffeld als Test Case .....	16
Energietechnisches Simulationsmodell im Test Case .....	17
<b>3 Ergebnisse .....</b>	<b>20</b>
3.1. Information Modelling für die Energiesimulation städtischer Gebäude .....	20
Taxonomie-basierte Analyse .....	20
ExpertInnenbefragung.....	21
3.2. SHP2SIM .....	24
3.3. BIM-Modell als Datenquelle für Energiesimulationen.....	26
3.4. Machine Learning basiertes Enrichment.....	28
3.5. Virtuelle Realität zur Erweiterung des Potenzials von Building Information Modeling .....	29
3.6. VR Test-Case Innovation District Inffeld.....	31
Ergebnisse aus der energietechnischen Simulation .....	31
Visualisierung der Simulationsdaten in Virtual Reality .....	33
<b>4 Schlussfolgerungen .....</b>	<b>37</b>
Roadmap für VR-Anwendungen im Bereich von 3D-Stadtmodellen.....	37
<b>5 Ausblick und Empfehlungen .....</b>	<b>42</b>
<b>6 Verzeichnisse .....</b>	<b>43</b>

# Kurzfassung

Die Entwicklung von 3D-Stadtmodellen ermöglicht die Integration von Stadt- und Gebäudeebene in ein einziges Modell, das sowohl semantische als auch geometrische Informationen enthält. Diese Modelle können verwendet werden, um Stakeholdern wie politische Entscheidungsträger, Stadtplanern, Energieversorgern und Energielieferanten sowie Bürgern bei Entscheidungen zu unterstützen sowie die Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit zu verbessern. Die höchste Form der Visualisierung in diesem Bereich ist der Einsatz von Virtual Reality (VR) Technologie. CityGML ist ein internationaler, weit verbreiteter Standard des Open Geospatial Consortiums zur Modellierung, Speicherung und dem Austausch von 3D-Stadtmodellen; das Open Geospatial Consortiums betrachtet die Verbindung von Virtual Reality und CityGML als eine der größten Herausforderungen der Forschung und Entwicklung im Bereich von 3D-Stadtmodellen. Im Projekt KityVR wurden zwei zentrale Forschungsaspekte in diesem Zusammenhang adressiert. (i) Wie kann Virtual Reality als die höchste Form der Visualisierung im Bereich von 3D-Stadtmodellen eingesetzt werden? Welche Use-Cases gibt es für Virtual Reality im Bereich von 3D-Stadtmodellen? (ii) Die Modellierung der energietechnischen Struktur von größeren urbanen Einheiten ist von einem Mangel an beschreibenden Eingabedaten geprägt. In vielen Fällen sind Datensätze nicht vollständig oder bestimmte Anwendungsfälle erfordern zusätzliche Informationen, die nicht im entsprechenden Datenmodell dargestellt werden. In diesen Fällen ist ein "Enrichment" des ursprünglichen Datensatzes notwendig, um alle erforderlichen Daten zur Verfügung zu stellen. Machine Learning und statistische Methoden sind in diesem Kontext vielversprechend: Fehlende Informationen werden anhand anderer Attribute und heuristischen Ansätzen berechnet.

## Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Resultate einer ExpertInnenbefragung zeigen, dass die Datenakquise der zeitintensivste Teil der Forschung ist (im Median 40% der gesamten Projektlaufzeit). Mehr als 80% der ExpertInnen verwenden Methoden für Data Enrichment; Ansätze mit Gebäudearchetypen werden von 75% verwendet, statistische Methoden von 50% und Machine Learning Methoden von 36% der Befragten. ExpertInnen erwarten das größte Potential für Machine Learning im Bereich Datenenrichment und Analyse von Inputdaten. Drei Hauptbereiche für Anwendungen im Kontext von Datenenrichment konnten identifiziert werden: Parameterableitung bzw. das Ersetzen fehlender Daten, die Erstellung präziserer Gebäudearchetypen, sowie die Bildanalyse.

Im Projekt wurde die Simulations-Pipeline SHP2SIM entwickelt, die es ermöglicht, basierend auf 2D Gebäudeinformationen direkt Simulationsmodelle zu erstellen.

Zusätzlich wurden in einem Review-Paper verschiedene Anwendungsfälle von VR sowie deren Stärken und Schwächen analysiert. Weiteres wurde VR für zwei verschiedene Anwendungen im Bereich von Gebäuden und Städten realisiert; dabei wurden Simulationsergebnisse in VR visualisiert.

## Ausblick

Die Tatsache, dass (i) die Datenverfügbarkeit im Bereich City Information Modelling nach wie vor eingeschränkt ist, und (ii) über 95% der Arbeiten im Bereich City Information Modelling nicht reproduzierbar sind, zeigt, dass es hier klare politische Vorgaben und eine Veränderung

der Gesetzeslage notwendig sind, und andererseits die Wissenschaftsgemeinschaft die Qualität der eigenen Forschung kritisch hinterfragen muss.

# Abstract

The development of 3D city models enables the integration of city and building levels into a single model that contains both semantic and geometric information. These models can be used to assist stakeholders such as policy makers, urban planners, utilities and energy suppliers, and citizens in making decisions, as well as to improve communication and outreach. The highest form of visualization in this field is the use of virtual reality (VR) technology. CityGML is an international, widely used Open Geospatial Consortium standard for modeling, storing, and sharing 3D city models; the Open Geospatial Consortium considers the fusion of virtual reality and CityGML to be one of the greatest challenges in 3D city model research and development. The KityVR project addressed two key research aspects in this context. (i) How can Virtual Reality be used as the highest form of visualization in the field of 3D city models? What are the use-cases for Virtual Reality in the domain of 3D city models? (ii) Modeling the energy structure of larger urban units is characterized by a lack of descriptive input data. In many cases, data sets are not complete or certain use cases require additional information that is not represented in the corresponding data model. In these cases, "enrichment" of the original dataset is necessary to provide all the required data. Machine learning and statistical methods are promising in this context: missing information is calculated using other attributes and heuristic approaches.

## Results and conclusions

Results of an expert survey show that data acquisition is the most time consuming part of the research (median 40% of the total project duration). More than 80% of the experts use methods for data enrichment; approaches with building archetypes are used by 75%, statistical methods by 50% and machine learning methods by 36% of the respondents. Experts expect the greatest potential for machine learning in the area of data enrichment and analysis of input data. Three main areas regarding applications in the context of data enrichment could be identified: Parameter derivation or the replacement of missing data, the creation of more accurate building archetypes, and image analysis.

In the project, the simulation pipeline SHP2SIM was developed, which allows to directly create simulation models based on 2D building information.

In addition, a review paper analyzed different use cases of VR and their strengths and weaknesses. Furthermore, VR was implemented for two different applications in the field of buildings and cities; simulation results were visualized in VR.

## Outlook

The fact that (i) data availability in the field of City Information Modelling is still limited, and (ii) more than 95% of the work in the field of City Information Modelling is not reproducible, shows that on the one hand, there is a need for clear political guidelines and a change in the legal situation, and on the other hand the scientific community has to critically question the quality of its own research.

# 1 Ausgangslage

Die Hälfte der Menschheit - etwa dreieinhalb Milliarden Menschen - lebt heute in Städten, und bis 2030 werden es voraussichtlich fünf Milliarden sein. Die bebaute Umwelt ist der weltweit größte energieverbrauchende Sektor, der 55% des weltweiten Strombedarfs, 60-80% des gesamten Energieverbrauchs, und mindestens 75% der weltweiten Kohlendioxid-(CO<sub>2</sub>)-Emissionen verursacht. Um diese Zahlen zu begrenzen, sind tiefgreifende Veränderungen in der Strom- und Wärmeerzeugung sowie im Energieverbrauch in städtischen Gebieten erforderlich.

Um Stadtplanungsstrategien und Infrastrukturinvestitionen durchzuführen, benötigen Entscheidungsträger wie lokale Gemeinschaften, Versorgungsunternehmen und Stadtplaner geeignete Modelle und Instrumente, welche die Bewertung der Umweltauswirkungen erleichtern. Aktuell gibt es jedoch noch keine allgemein anerkannten, standardisierten Modelle, die den Informationsaustausch zwischen den verschiedenen Stakeholdern ermöglichen. Stattdessen haben die verschiedenen Stakeholder ihre eigenen Datenmodelle und Datenbankstrukturen entwickelt, um Informationen zu sammeln, zu speichern, und zu verwalten; dadurch ist der Datenaustausch zwischen den beteiligten Stakeholdern begrenzt. Der Zugang und die Wiederverwendbarkeit der Daten ist eingeschränkt.

Für energiebezogene Simulationen auf Quartiersebene, bei denen das reale thermodynamische Verhalten des Zielsystems mit ausreichender Genauigkeit abgebildet wird, sind verschiedene Informationen wie Lage, Geometrie, Bauphysik, Gebäudetechnik, etc. über jedes einzelne Gebäude erforderlich.

## Datenmodelle

Für die digitale Darstellung von Gebäudedaten stehen verschiedene Datenmodelle und Datenformate zur Verfügung. Ein abstraktes, konzeptionelles Modell von Datenelementen (Klassen), deren Eigenschaften (Attribute) und gegenseitigen Relation wird in der Regel als Datenmodell bezeichnet. Ein Datenformat ist eine Implementierung eines Datenmodells mit einer spezifischen Technologie (z.B. XML) für einen bestimmten Anwendungsfall (z.B. Datenaustausch oder Datenspeicherung). Generell können aus einem Datenmodell mehrere Datenformate abgeleitet werden.

## Modellierung und Simulation von Städten

Im Bereich der Modellierung des Gebäudeenergiebedarfs unterscheidet die Literatur zwischen "top-down" und "bottom-up" Ansätzen<sup>1</sup>. Top-down-Ansätze beginnen mit dem Energiebedarf einer Region. Diese Ansätze sind nicht geeignet für detaillierte Untersuchungen von integrierten Energieversorgungs- und Nachfrageszenarien. Bottom-up Modellierungsansätze können in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: technische und statistische Ansätze. Technische Modelle schätzen den Energiebedarf von Gebäuden basierend auf physikalischen Modellen ab. Statistische Modelle basieren auf Regressionsanalysen, die den Zusammenhang zwischen den Faktoren Energieverbrauch des Gebäudes, seine definierten Endverwendungen, sowie klimatischen Bedingungen bestimmen. Derzeit werden City

---

<sup>1</sup> Reinhart and Davila (2016): Urban building energy modeling - A review of a nascent field. Build. Environ.

Information Modeling-Tools entwickelt, da GIS-Tools aufgrund schlecht attributierter gebäude-  
semantischer Informationen eingeschränkt sind; CityGML ist in diesem Zusammenhang das  
am weitesten verbreitete semantische Modell.

### Enrichment

Die Datenakquisition und Datengenerierung ist für die Erstellung von Modellen von zentraler  
Bedeutung. In den meisten Fällen sind „Enrichment“ Methoden erforderlich, um die Modelle  
mit fehlenden Daten „anzureichern“. Die Basis für dieses Anreichern können einerseits  
nominelle und statistische Werte aus ähnlichen Gebäudebeständen sein; Datenbanken sind  
z.B. BMVBS, TABULA und UrbanReNET. Im IBPSA Project 1 wird dazu das open-source Tool  
TEASER entwickelt<sup>2</sup>. Andererseits sind in diesem Zusammenhang Methoden der künstlichen  
Intelligenz (im speziellen des maschinellen Lernens (ML)) vielversprechend: Fehlende  
Informationen werden anhand anderer Attribute und mit heuristischen Ansätzen berechnet.  
Detaillierte Einschätzungen zu Anwendungen und Möglichkeiten von ML Methoden wurden in  
der Literatur noch nicht adressiert.

### Virtual Reality

In den letzten Jahren ist das Interesse an Virtual Reality (VR) Technologien ständig gestiegen.  
Insbesondere der aktuelle Trend zu immer erschwinglicheren Head-Mounted-Displays (HMD)  
ermöglicht einem immer breiter werdenden Nutzerkreis den Zugang zu verschiedenen VR-  
Anwendungen. Mittlerweile wird das Thema auch branchenübergreifend aufgenommen.  
Immer mehr große Unternehmen machen ihre Produkte mittels VR potenziellen Kunden  
zugänglich. Solche immersiven Erfahrungen sind nicht nur für Unterhaltung und Spiele  
interessant, sondern auch im Bereich der Bildung, Forschung, Medizin und Therapie<sup>3 4</sup>. Aktuell  
verfügbare VR Geräte, bieten hier bereits einen ausreichenden Reifegrad um als  
ernstzunehmendes, aber preisgünstiges Arbeitsmittel zu gelten. Sie erzeugen ein fesselndes  
Gefühl des Eintauchens in die virtuelle Welt und schaffen so ansprechende und eindrucksvolle  
Erfahrungen, in welchen der Nutzer mit der virtuellen Welt direkt interagieren kann. Die  
wesentlichen Faktoren bei der Entwicklung solcher virtuellen, interaktiven Erfahrungen sind  
dabei Immersion, Engagement und Flow. Moderne VR-Technologien unterstützen dabei  
unterschiedliche Freiheitsgrade und unterschiedliche Stufen der Immersion und Interaktion.  
Abhängig von der VR-Umgebung kann die Wahrnehmung der Aktivitäten und der Emotionen  
variieren. Daher ist es essentiell, auf die unterschiedlichen Designkonzepte zu achten.  
Settgast et. al. 2016<sup>5</sup> evaluierten dazu verschiedene VR Szenarien in Bezug auf Immersion,  
Engagement, Cyber-Sickness und das Gesamterlebnis. VR bietet verschiedene Vorteile. So  
können unsichtbare oder schwer visualisierbare Elemente und Phänomene sichtbar gemacht  
werden und Visualisierungen kostengünstig erfahrbar und reproduzierbar gemacht werden.

---

<sup>2</sup> Wetter, van Treeck, Helsen et al. (2019): IBPSA Project 1: BIM/GIS and Modelica framework for building and community energy system design and operation – ongoing developments, lessons learned and challenges. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.

<sup>3</sup> Freina, Ott (2015): A literature review on immersive virtual reality in education: state of the art and perspectives. In The international scientific conference elearning and software for education (Vol. 1, p. 133). "Carol I" National Defence University

<sup>4</sup> Bruce, Regenbrecht (2009): A virtual reality claustrophobia therapy system-implementation and test. In Virtual reality conference, 2009. vr 2009. ieee (pp. 179–182). IEEE.

<sup>5</sup> Settgast, Pirker, Lontschar, Maggale, Gütl (2016): Evaluating experiences in different virtual reality setups. In Entertainment computing - ICEC 2016 (pp. 115–125).

# 2 Projektinhalt

## 2.1. Information Modelling für die Energiesimulation städtischer Gebäude

Die Entwicklungen im Bereich City Information Modelling für die Energiesimulation städtischer Gebäude wurden im Zuge des Projektes KityVR veröffentlicht.

- Malhotra, A., Bischof, J., Nichersu, A., Häfele, K.H., Exenberger, J., Sood, D., Allan, J., Frisch, J., van Treeck, C., O'Donnell, J. and Schweiger, G.. Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic. Building and Environment, 2022.
- Schweiger, G., Exenberger, J., Malhotra, A., Schranz, T., Boiger, T., Van Treeck, C., & O'Donnell, J. Data shortage for urban energy simulations? An empirical survey on data availability and enrichment methods using machine learning?. In 28th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering, 2021.

Um verschiedene Aspekte von UBEM zu analysieren, wurde die Literatur basierend auf einem taxonomischen Ansatzes analysiert <sup>6</sup> (siehe Abbildung 1). Dabei wurden verschiedene Bereiche wie Datentypen, Simulationsumgebungen, Ergebnisse und Visualisierung sowie die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse analysiert; insgesamt wurden 72 Artikel analysiert.

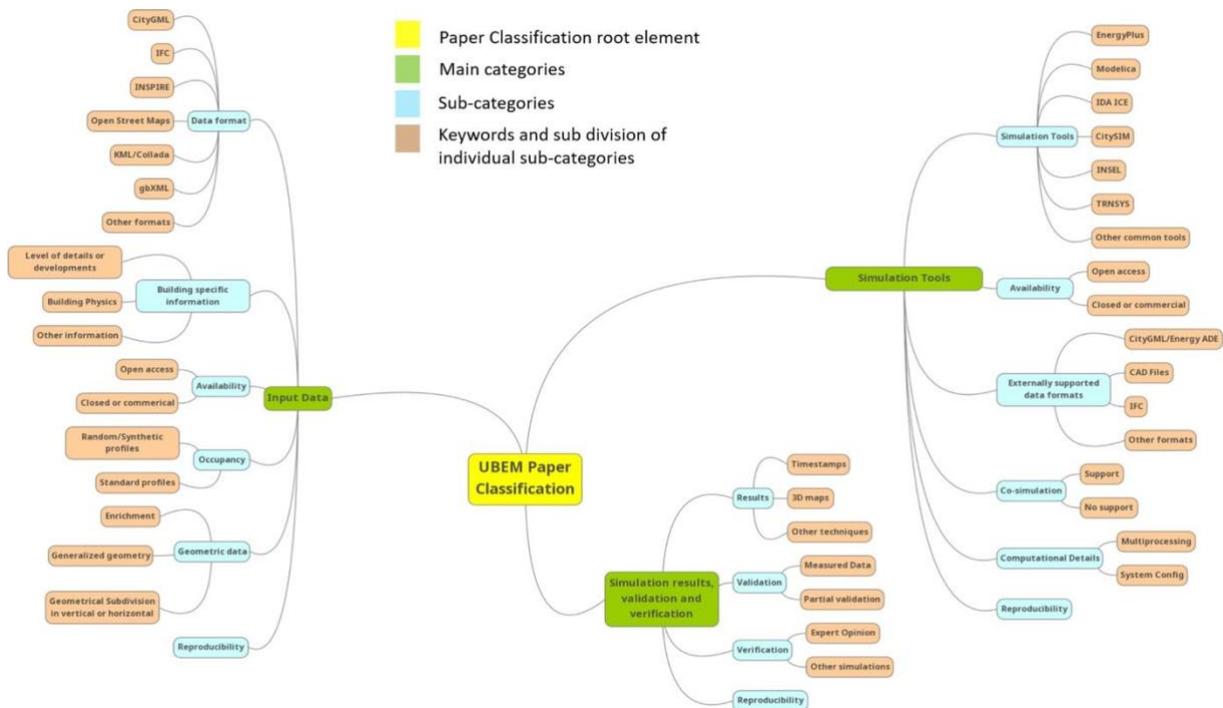


Abbildung 1: Taxonomie für UBEM.

<sup>6</sup> Malhotra, Avichal, et al. "Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic review." Building and Environment (2021)

Basierend auf einer Expertenbefragung haben wir unter anderem die wichtigsten Herausforderungen hinsichtlich der Datenverfügbarkeit für städtische Energiesimulationen, vielversprechende Datenmodelle und Standards, ermittelt <sup>7</sup>.

## 2.2. SHP2SIM

Die Entwicklungen im Bereich „SHP2SIM“ wurden im Zuge des Projektes KityVR veröffentlicht.

- Boiger & Schweiger. SHP2SIM: A Python Pipeline for Modelica based District and Urban Scale Energy Simulations. In *ISEC conference*, 2022.

Die Pipeline "SHP2SIM" ist eine automatisierte Python-Pipeline zur Erstellung von Gebäude-Energiesimulationsmodellen auf Stadtteil- oder Stadtebene. Auf der Grundlage von Eingaben in Form von GIS-Daten erstellt die Pipeline ein CityGML-Modell, reichert es mit Energiedaten an (energyADE) und leitet ein Modelica-Simulationsmodell auf der Grundlage des Enrichment-Frameworks TEASER<sup>8</sup> ab. Die Entwicklungen der Pipeline sind offen auf GitHub (<https://github.com/tug-cps/shp2sim>) verfügbar.

Die Eingabe für die Pipeline ist ein GIS-Datensatz von Gebäudegrundrissen im shp-Format mit Attributen für jedes Gebäude. Gebäudeteile mit unterschiedlicher Höhe müssen als separate Grundrisse dargestellt werden. Jede Grundfläche muss ein geschlossenes Polygon ohne Lücken sein. Überschneidungen von Grundrissen sind nicht erlaubt, aber Gebäudeteile desselben Gebäudes müssen nicht unbedingt nebeneinander liegen, da jeder Gebäudeteil in der Simulation als eigenes Gebäude behandelt wird. Für jedes Gebäude sind zusätzliche Informationen in Form von Attributen in der shp-Datei erforderlich: Obligatorische Attribute sind eine eindeutige ID, die Gebäudehöhen in Metern, die Anzahl der oberirdischen Geschosse, das Baujahr und eine eindeutige Adresse oder ein Name des Gebäudes. Besteht ein Gebäude aus mehreren Gebäudeteilen, werden eindeutige IDs und eindeutige Adressen oder Namen für jeden Gebäudeteil benötigt. Eingabedaten mit dieser spezifischen Struktur können als Eingabe für die Pipeline verwendet werden, um ein Gebäudeenergie-Simulationsmodell zu erstellen. Der Arbeitsablauf der Pipeline ist in Abbildung 2 dargestellt.

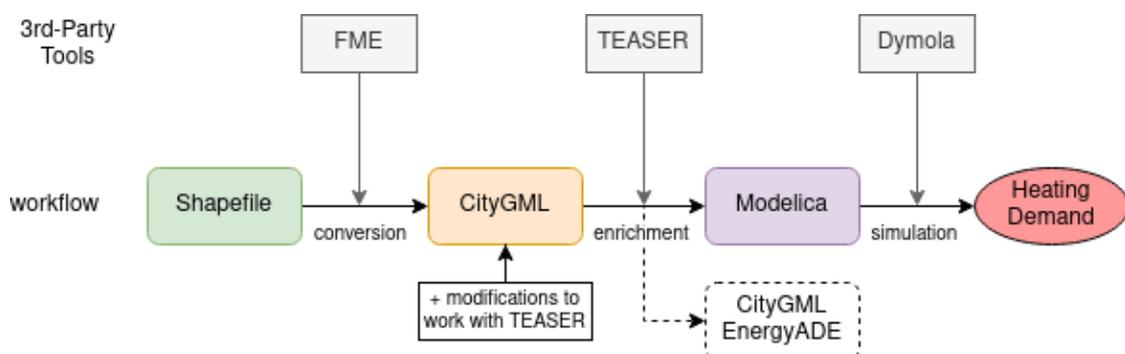


Abbildung 2: Überblick der Arbeitsabläufe vom Shapefile zur Energiesimulation in SHP2SIM.

<sup>7</sup> Schweiger, Gerald, et al. "Data shortage for urban energy simulations? An empirical survey on data availability and enrichment methods using machine learning?." 28th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. Universitätsverlag der TU Berlin, 2021

<sup>8</sup> Remmen, Peter, et al. "TEASER: an open tool for urban energy modelling of building stocks." Journal of Building Performance Simulation 11.1, 2018

Ausgehend von der shp-Datei werden die 2D-Daten in 3D-Daten im Format CityGML umgewandelt, die so modifiziert werden, dass sie als Eingabe für das Tool TEASER geeignet sind. Nach der Anreicherung mit Energiedaten durch TEASER wird ein Modelica-Simulationsmodell erstellt, das in Dymola simuliert werden kann.

### **2.3. BIM als Informationsquelle für Energiesimulationen**

Gebäudegeometrien und semantische Gebäudeinformationen für die SHP2SIM-Pipeline können auch aus BIM-Modellen entnommen bzw. abgeleitet werden. Ein Building Information Model (BIM-Modell) ist ein digitales Abbild eines Bauwerks, welches dessen geometrische und funktionale Eigenschaften beinhaltet. Ein BIM-Modell besteht idealerweise über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks, vom ersten Konzept bis zum Rückbau, weshalb es als verlässliche Grundlage für alle Entscheidungen im Laufe des Bestehens eines Bauwerks dient.<sup>9</sup>

Daher ist es naheliegend, Gebäudemodelle für Energiesimulationen auf Basis von BIM-Modellen zu entwickeln oder mit Informationen aus BIM-Modellen anzureichern. Im Rahmen des Projekts KityVR wurde ein Standort der TU-Graz, der „Innovation District Innfeld“, als Use-Case für Energiesimulationen gewählt. Da für Energiesimulationen urbaner Räume detaillierte und der Realität entsprechende Gebäudemodelle erforderlich sind, wurde ein BIM-Modell des Forschungsgebäudes für Electronics Based Systems (EBS-Gebäude) auf Basis von Dokumenten und Plänen aus der Erstellungsphase des Gebäudes erstellt und als Datenquelle für Energiesimulationen verwendet.

Für die BIM-Modellierung des EBS-Gebäudes wurden die Anforderungen unterschiedlicher Simulationsumgebungen an ein BIM-Modells bzw. den IFC-Export eines BIM-Modells untersucht. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde zunächst ein einfaches Testgebäude erfolgreich modelliert. Dabei wurden je eine Variante mit einschichtigen Bauteilaufbauten und eine Variante mit mehrschichtigen Bauteilaufbauten erstellt. In weiterer Folge wurden bei beiden Varianten unterschiedliche Raumbegrenzungen implementiert. Für die Importversuche mit Simulationssoftware wurden IFC-Modelle der Testgebäude exportiert, wobei auch bei den IFC-Exporteinstellungen unterschiedliche Settings getestet wurden.

Das detaillierte BIM-Modell des EBS-Gebäudes wurde anschließend basierend auf den Erfahrungen mit den Testgebäuden speziell für Energiesimulationen optimiert. Das BIM-Modell kann auch als Grundlage für die Ableitung von Modellen für Gebäudeenergiesimulationen, beispielsweise mit EnergyPlus oder IDA ICE, verwendet werden.

### **2.4. Machine Learning basiertes Enrichment**

Die Erkenntnisse im Bereich Machine Learning basiertes Enrichment wurden im Zuge des Projektes KityVR veröffentlicht.

---

9

- Schweiger, G., Exenberger, J., Malhotra, A., Schranz, T., Boiger, T., Van Treeck, C., & O'Donnell, J. Data shortage for urban energy simulations? An empirical survey on data availability and enrichment methods using machine learning?. In 28th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering, 2021.

Da detaillierte Daten über diese Gebäudemerkmale oft nicht verfügbar sind (vor allem auf Bezirks- und Stadtebene), reichern die meisten Modellierer ihre Modelle mit Daten aus anderen Quellen an (en. enrichment). Eine weitere Möglichkeit zur Anreicherung gebäudebezogener Daten ist die Ableitung bestimmter Gebäudemerkmale aus anderen Merkmalen mithilfe von Techniken des ML. Im Allgemeinen kann die Datenanreicherung in zwei Hauptkategorien eingeteilt werden: a) die Anreicherung der Geometrie und b) die Anreicherung der semantischen Daten. Zur ersten Kategorie gehören alle Ansätze, die die Anreicherung nutzen, um komplexere 3D-Modelle durch Datenanreicherung zu erstellen. ML-basierte Anreicherungsmethoden sind ein neues und aufstrebendes Gebiet, so dass es notwendig ist, potenzielle Anwendungen und Forschungswege zu definieren. Da ML nicht ohne eine Bewertung der Verfügbarkeit der erforderlichen Datenquellen diskutiert werden kann, sieht dieses Papier Folgendes vor:

- Identifizierung der wichtigsten Herausforderungen, mit denen sich Forscher hinsichtlich der Datenverfügbarkeit für städtische Energiesimulationen gegenübersehen.
- Mögliche Anwendungen für ML zur Anreicherung von Daten für Energie-Simulationen in Stadtteilen und Städten zu identifizieren.

Im Zuge des Projektes wurde eine explorative Expertenbefragung durchgeführt, um die Datenverfügbarkeit und Anreicherungsmethoden mit ML für urbane Energiesimulationen zu untersuchen

## 2.5. Virtuelle Realität zur Erweiterung des Potenzials von Building Information Modeling

Die Erkenntnisse im Bereich VR und BIM wurden im Zuge des Projektes KityVR veröffentlicht.

- Safikhani, S., Keller, S., Schweiger, G., & Pirker, J. Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: systematic review. International Journal of Digital Earth, 2022.

Um den State of the Art im Bereich BIM in Kombination mit Virtual Reality zu erfassen, haben wir eine Systematische Literaturstudie durchgeführt und die Ergebnisse im Journal of Digital Earth publiziert. In der Studie verwenden wir PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) Guidelines um akademische Datenbanken nach Publikationen zu durchsuchen und diese nach Arbeiten, welche Virtual Reality und BIM kombinieren, zu analysieren. Dabei wurden die Datenbanken Scopus, IEEEExplore, und ACM durch nach den Stichwörtern ('Virtual Reality' OR 'VR') AND ('BIM' OR 'Building Information Modeling') durchsucht. 615 Resultate wurden basierend auf Qualitätskriterien (peer-review, Sprache,...) und Relevanzkriterien durchsucht und am Schluss 73 wissenschaftliche Arbeiten als relevante Arbeiten in diesem Bereich gefunden und genauer analysiert.

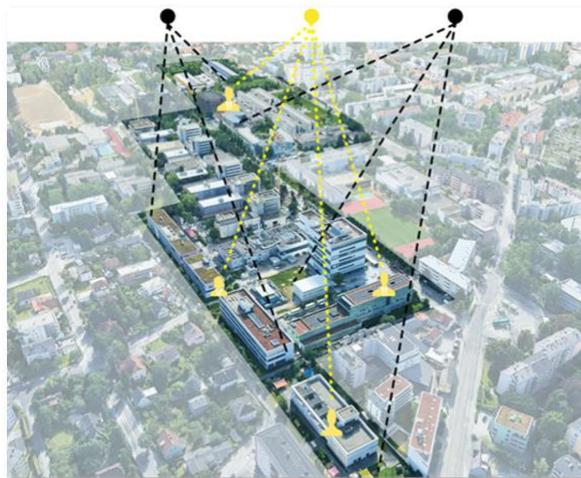
VR Umgebungen für BIM werden häufig mithilfe von Game-Engines erstellt. In diesem Projekt wurde die Unreal Engine verwendet. Diese ist weit verbreitet und wird für die Entwicklung einer Vielzahl unterschiedlicher Applikationen verwendet, von Spielen bis zu technischen Lösungen. Die BIM Modelle dienen als Grundlage für die VR Umgebung. Der digitale VR-Avatar kann mit der Umgebung interagieren und so beispielsweise unterschiedliche Tageszeiten sowie Ansichten wählen.

## **2.6. VR Test-Case**

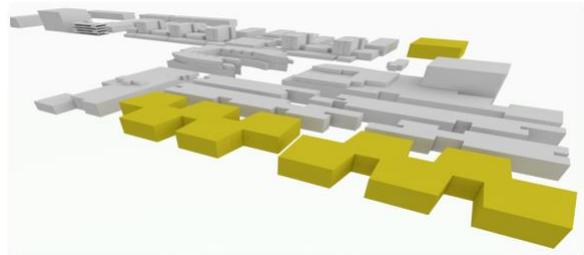
### **Innovation District Inffeld als Test Case**

Die Technische Universität Graz hat ein Testfeld definiert, um die Entwicklung innovativer grüner Technologien in Stadtvierteln zu unterstützen. Der größte der drei Universitätscampusbereiche (Campus Inffeldgasse) wurde als Innovation District definiert, der der Strategie "Netto-Null-CO<sub>2</sub> Emissionen bis 2030" der TU Graz folgt. Der „Innovation District Inffeld“, 2 km vom Grazer Stadtzentrum entfernt, wird sich zu einem Vorbild für innovative und nachhaltige Stadtteile entwickeln. Abbildung 3 zeigt den Innovation District im aktuellen Gebäudebestand und im Planungsmodell für das Jahr 2030. Derzeit sind fast 156.000 m<sup>2</sup> Nutzfläche verbaut. Der Campus benötigt derzeit rund 18,1 GWh/a Strom, 10,6 GWh/a Wärme und 2,7 GWh/a Kälte pro Jahr. Neben der Fernwärme werden derzeit Wärmepumpen (inkl. Tiefensonden) und Abwärme als Wärmequellen genutzt. Zur Kühlung werden reversible Wärmepumpen, Kältemaschinen und ein passiv gekühlter Betonspeicher eingesetzt. Derzeit sind fast 1.800 m<sup>2</sup> PV installiert. Für das nächste Jahrzehnt ist eine erhebliche Vergrößerung der Nutzfläche (60.000 m<sup>2</sup>) geplant, begleitet von einem massiven Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen (hauptsächlich PV und Geothermie) und einer optimalen Steuerung der thermischen (auch geothermischen) und/oder elektrischen Speicher und der Energieversorgung aus volatilen Quellen wie PV oder Abwärme aus den Labors.

Der Test-Case Innovation District Inffeld ermöglichte erst die Umsetzung des Projektes. Die aktuell sehr dynamische und positive Entwicklung durch die Nachhaltigkeits-Bestrebungen seitens der TU-Graz bieten umfangreiche Möglichkeiten, Digitalisierungsprojekte wie KityVR umzusetzen. Innovationszentren wie dieses innerhalb der Stadt sind unabdingbar, um die Digitalisierung voran zu treiben.



**REAL** Innovation District Inffeld 2022



**MODEL** Innovation District Inffeld 2030

Abbildung 3: Innovation District Inffeld, TU Graz Campus Inffeldgasse; links: Luftbildaufnahme des aktuellen Gebäudebestands mit angedeuteter Vernetzung von Gebäuden und Nutzern; rechts: Gebäudebestand im Planungsmodell und Grundriss für das Jahr 2030; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik

### Energetechnisches Simulationsmodell im Test Case

Für die im Test Case verwendeten Bereiche im Innovation District Inffeld wurde ein energetechnisches Simulationsmodell erstellt. Abbildung 4 zeigt in Form eine Flugaufnahme die zwei Elemente die in KityVR als Use Case bearbeitet wurden. Zum einen das mehrstöckige, quadratische Bürogebäude Inffeldgasse 13, rechts im Bild. Dieses wurde mit der 3D CAD Plattform Vectorworks im Building Information Model (BIM) Type IfcSpaces modelliert und daraus ein Building Energy Simulation Modell für die Simulationsplattform IDA ICE erstellt. Anschließend wurde eine energetechnische, dynamische Simulation für den Betrachtungszeitraum 1.1. – 31.12.2021 durchgeführt. Die Ergebnisse wurden in weiterer Folge für eine Visualisierung in VR aufbereitet, siehe Kapitel . Abbildung 5 links zeigt das 3D CAD Gebäude-Grundmodell, das in Vectorworks erarbeitet wurde. Rechts ist das energetechnische Gebäude-Simulationsmodell in IDA ICE gezeigt.

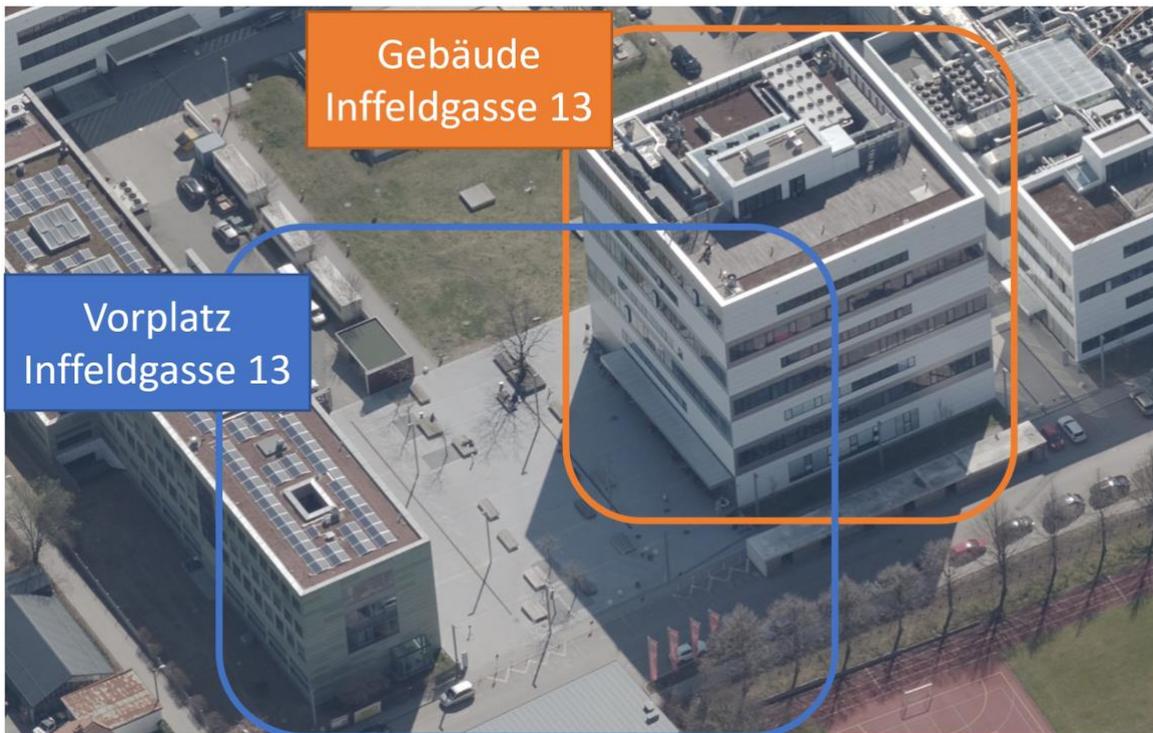


Abbildung 4: Luftbild des in VR dargestellten Gebäudes und Außenraumes im Innovation District Inffeld; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik auf Basis Magistrat Graz, Stadtvermessungsamt

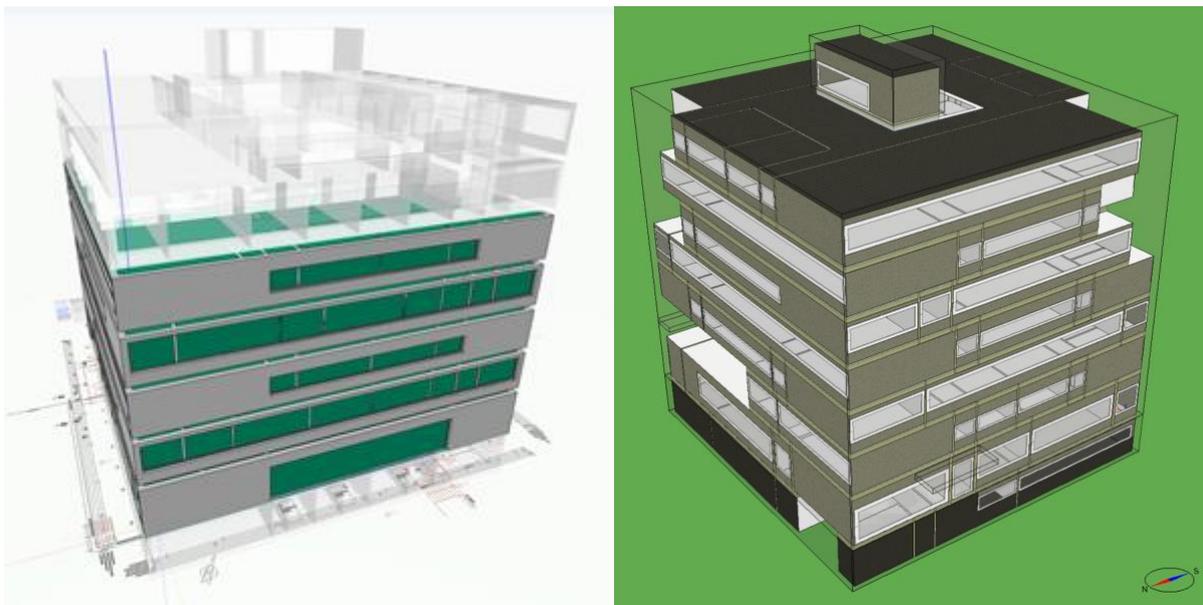


Abbildung 5: Gebäudemodell Innovation District Inffeldgasse 13; links: BIM IFCSpaces Modell in Vectorworks; rechts: IDA ICE Gebäudesimulationsmodell zur energietechnischen Simulation; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik

Das zweite Element, das modelliert, simuliert und visualisiert wurde, ist der Vorplatz vor dem Gebäude Inffeldgasse 13, der in der unteren Bildmitte in Abbildung 4 zu sehen ist. Dieser wurde wiederum in 3D CAD in Vectorworks modelliert und in weiterer Folge in ein Outdoor-Simulationsmodell übergeführt. Dieses Modell wurde im Mikroklima-Simulationstool ENVI\_met für verschiedene Zeitabschnitte im Jahr 2021 berechnet und die Ergebnisse wiederum für die VR Visualisierung aufbereitet.

ENVI\_met berechnet auf physikalischer Basis das Mikroklima eines Stadtteiles in der Auflösung von einem Quadratmeter. Dabei werden der Freiraum sowie Gebäude genauer betrachtet. Der Freiraum gliedert sich in Bepflanzung, Gewässer und Oberflächenmaterialien. Den Gebäuden werden Geometrien/Höhen, Baumaterialien sowie die Verwendung von Grünen-Fassaden/Dächern zugewiesen. Der Campus Inffeldgasse wurde originalgetreu abgebildet, Basis dafür sind die durch Steakholder zur Verfügung gestellten original Planungsunterlagen. Als Randbedingungen für die Simulation werden die Stationswetterdaten der Messstation ‚Universität Graz‘ der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) des jeweiligen Tages verwendet.

In Abbildung 6 ist das im Simulationstool ENVI\_met erstellte Mikroklimasimulationsmodell für den Innovation District Inffeld gezeigt. Abgebildet sind die im Modell integrierten Gebäude in Grau, Verkehrsflächen in Weiß und Grünflächen sowie Bepflanzungen in Grün.

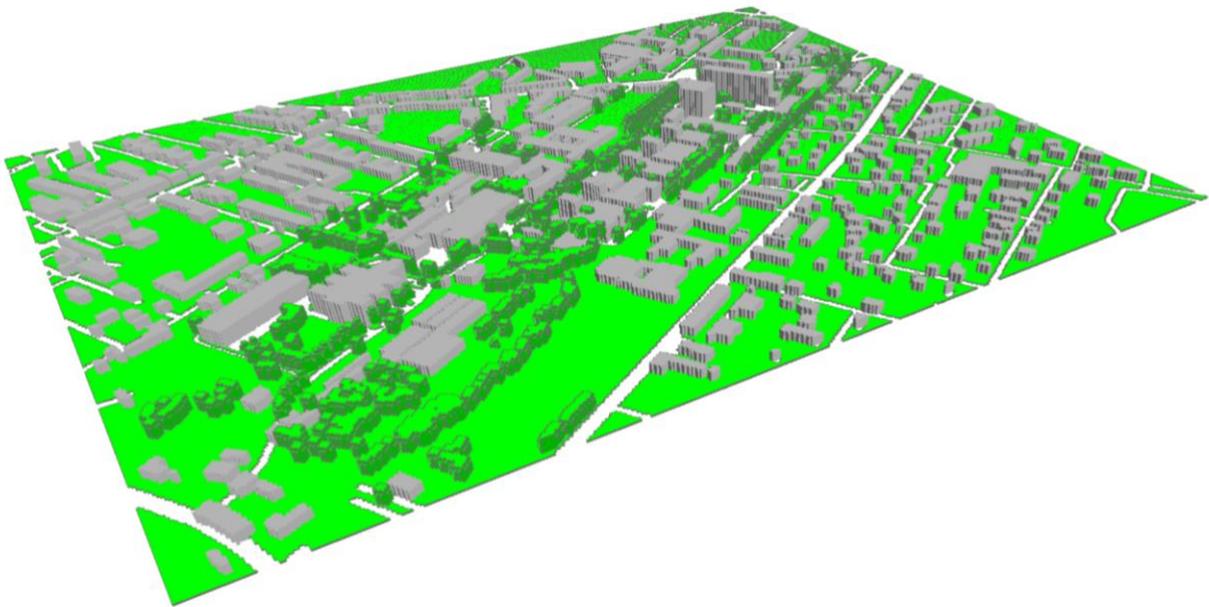


Abbildung 6: Mikroklima-Simulationsmodell für den Innovation District Inffeld im Simulationstool ENVI\_met; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik.

# 3 Ergebnisse

## 3.1. Information Modelling für die Energiesimulation städtischer Gebäude

### Taxonomie-basierte Analyse

Die Taxonomie-basierte Studie zeigt, dass 27 % der untersuchten Studien das CityGML-Datenmodell zur Beschreibung der Lage und Geometrie des Gebäudes verwenden. 36 % der Studien enthalten keine Informationen über das verwendete Datenmodell, und 18 % der Studien enthalten nur unzureichende Angaben über die georeferenzierte Geometrie. 67 % der Studien verwenden Daten-Enrichment; 58 % führen ein Enrichment der Belegung durch, 56 % der Bauphysik und 21 % der HLK Systeme. Darüber hinaus verwenden 67 % der Studien einen auf Archetypen basierenden Ansatz für Simulationen im städtischen Maßstab.

Das mit Abstand am häufigsten verwendete Simulationswerkzeug ist EnergyPlus und seine Erweiterungen, die in 38 % der untersuchten Studien verwendet werden (siehe Abbildung 7). An zweiter Stelle steht INSEL, das in 11 % der untersuchten Arbeiten angegeben wird, während Modelica in 6 % und Matlab in 5 % der Studien verwendet wird.

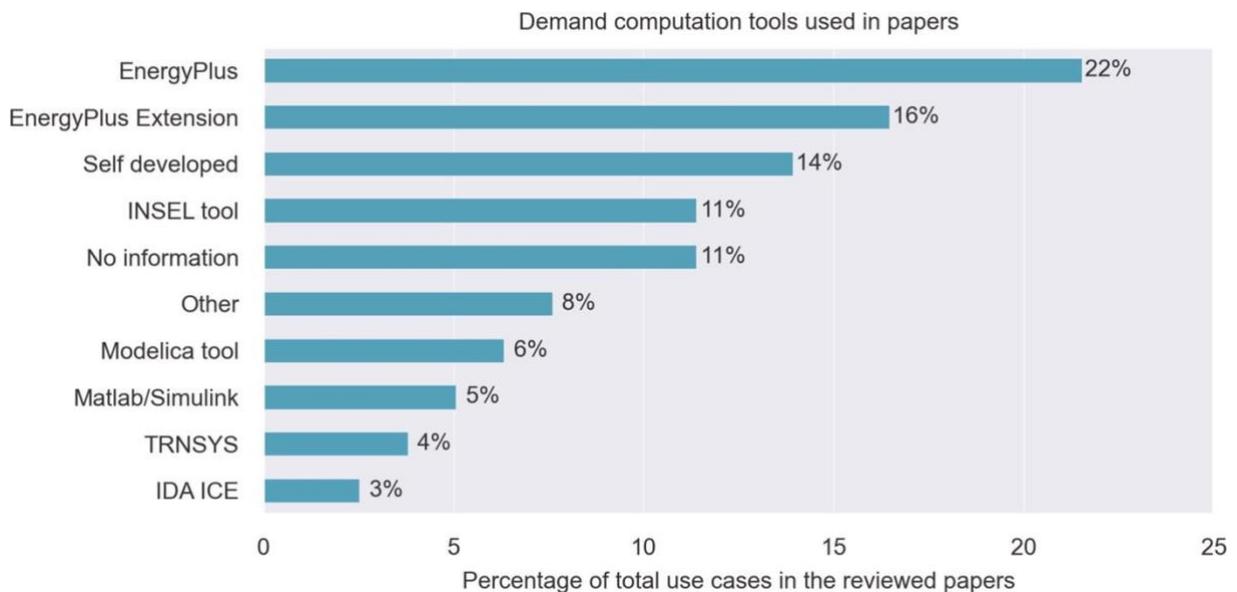


Abbildung 7: Software-Tools, welche in UBEM eingesetzt werden.

Die Analyse zeigt außerdem, dass die präsentierten Ergebnisse in 95 % der diesem Bericht berücksichtigten wissenschaftlichen Arbeiten nicht reproduzierbar sind - etwa aufgrund nicht zugänglicher Daten oder fehlender Beschreibung des Simulationsalgorithmus. Darüber hinaus werden in etwa 30 % aller Arbeiten die vorgestellten Ergebnisse nicht anhand von Messdaten oder anderen Methoden validiert, während 7 % nur eine Teilvalidierung vornehmen. Teilvalidierung bedeutet im Rahmen dieser Arbeit, dass entweder die Datenmodelle oder die Simulationsergebnisse validiert werden. Im Gegensatz dazu werden in 44 % der Studien Vergleiche von Simulationsergebnissen mit Messdaten durchgeführt.

## ExpertInnenbefragung

Die erste Frage betrifft den Anwendungsbereich von City Information Modelling für ForscherInnen und PraktikerInnen (Abbildung 8). Die Mehrheit der Befragten (70 %) verwendete bereits bzw. verwendet derzeit Stadtinformationsmodelle für die Vorhersage des Wärmebedarfs von Gebäuden, weitere 19 % der Befragten planen, dies innerhalb des nächsten Jahres zu tun. Die zweite wichtige Anwendung für Stadtinformationsmodelle ist die Visualisierung des Energiebedarfs, die von 65 % der Befragten bereits durchgeführt wurde und von weiteren 31 % geplant ist. Mehr als die Hälfte aller Befragten haben digitale Stadtmodelle im Zusammenhang mit der Vorhersage und Simulation des Bedarfs an elektrischer Energie (58 %) und Kühlenergie (52 %) eingesetzt. 27 % bzw. 30 % der ExpertInnen planen den Einsatz von Stadtinformationsmodellen für die Berechnung des Strom- bzw. Kältebedarfs. Dieser Trend korreliert mit der zunehmenden Bedeutung von Kühlsystemen für den Gesamtenergieverbrauch in der Zukunft aufgrund der steigenden Temperaturen, insbesondere in städtischen Gebieten. Die optimale Planung und der Betrieb von Energieerzeugungsanlagen wurden von weniger Befragten als mögliche Anwendungen für Stadtinformationsmodelle angesehen. 35 % nutzen Stadtmodelle für die optimale Planung, 38 % beabsichtigen, dies in den kommenden 12 Monaten zu tun. Für den optimalen Betrieb arbeiteten oder arbeiten 38% mit solchen Modellen, während 23% planen, dieses Thema in Kombination mit Stadtinformationsmodellen zu bearbeiten.

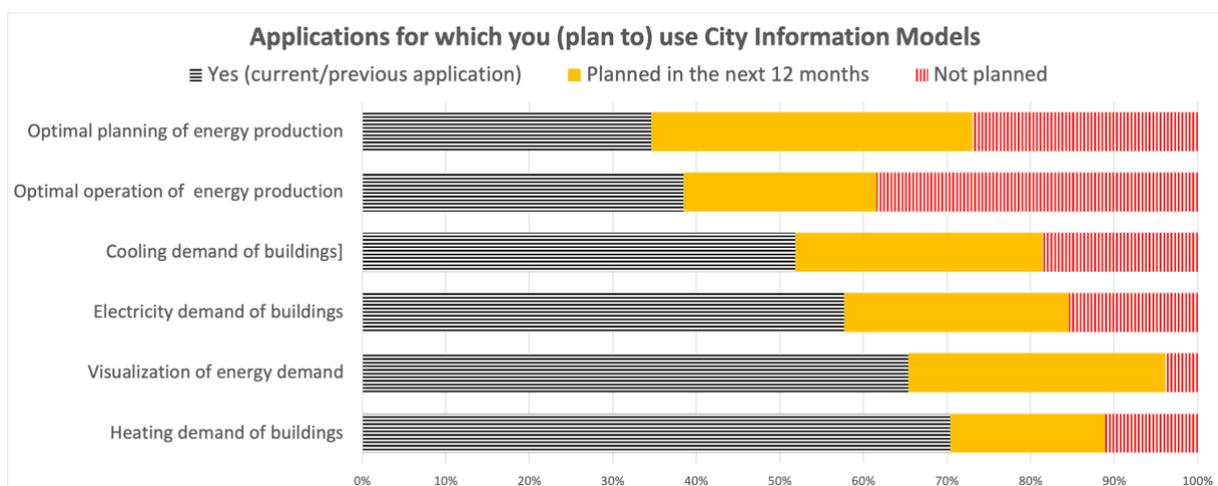


Abbildung 8: Anwendungen für City Information Models.

Weiteres wurden die ExpertInnen gefragt, wie sich der Zeit- und Arbeitsaufwand in ihren Projekten in der Regel auf die folgenden Arbeitspakete verteilt: Datenerfassung, Entwicklung des Simulationsmodells, Simulation und Ergebnisanalyse (siehe Abbildung 9). Dies geschah, um bestehende Engpässe in den Arbeitsabläufen von Projekten zu städtischen Energiesimulationen zu ermitteln und potenzielle Anwendungen für ML aufzuzeigen. Die Datenerfassung wird als der zeitaufwändigste Teil des Arbeitsablaufs angesehen, wobei durchschnittlich 44 % (Median = 40 %) der gesamten Projektzeit auf die Datenerfassung entfallen. Darüber hinaus verbringen mehr als 40 % aller Befragten mindestens die Hälfte ihrer Zeit mit der Datenerfassung, was darauf hindeutet, dass die Datenerfassung und -vorverarbeitung nach wie vor einen großen Engpass bei der Forschung im Bereich der städtischen Energiesimulationen darstellt. Die Entwicklung eines Simulationsmodells nimmt nach Angaben der Befragten weniger Zeit in Anspruch (Durchschnitt = 30 %, Median = 25 %). Die Durchführung der Simulation und die Analyse der Ergebnisse machen im Durchschnitt 27

% des gesamten Zeitaufwands aus, mit einem Medianwert von 37 %.

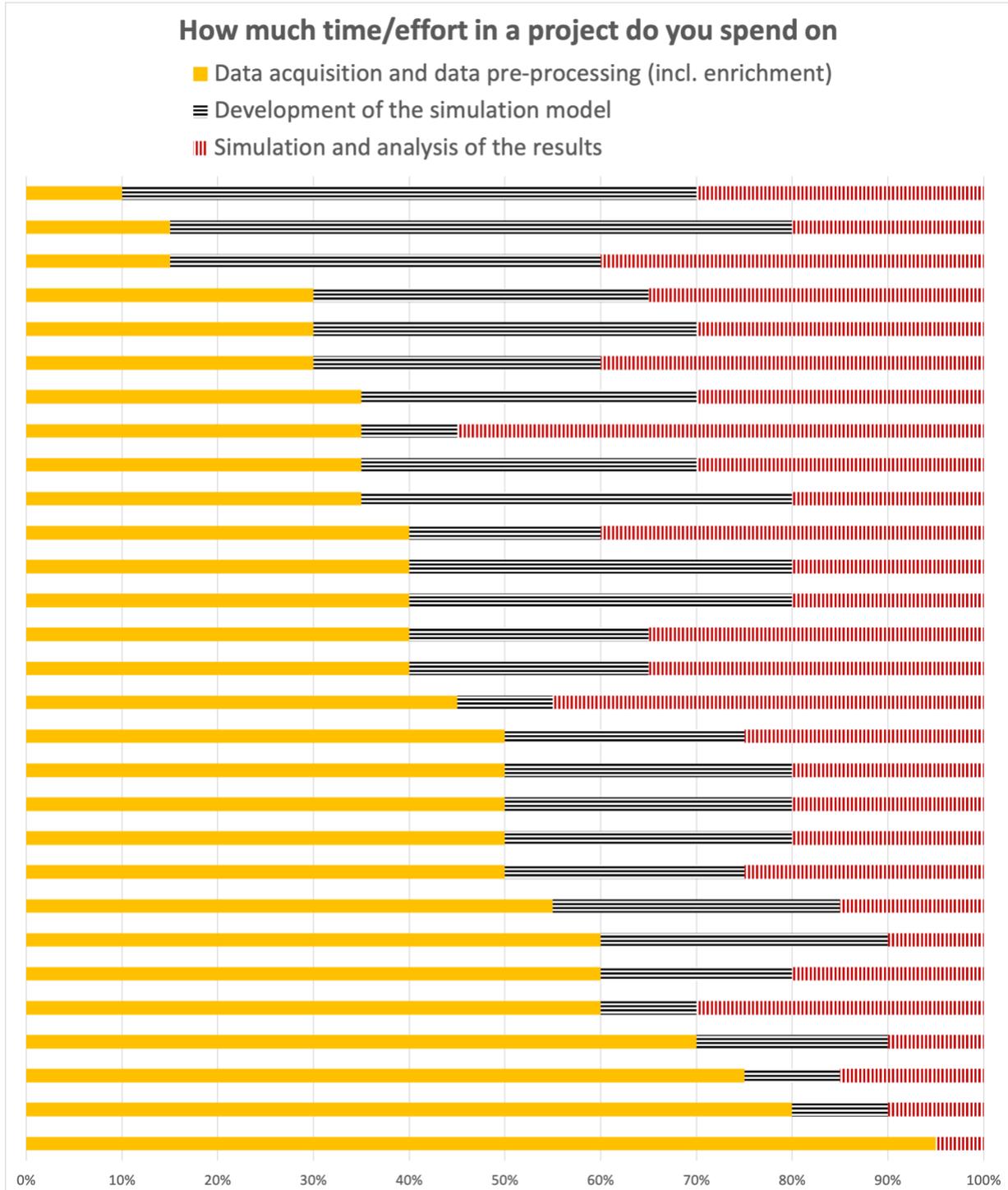


Abbildung 9: Verteilung der Arbeitsbelastung auf die verschiedenen Phasen eines Projekts.

Alle Teilnehmer stimmten zu, Open-Source-Datensätze zu verwenden, während nur 18 % die Verwendung kommerzieller Datensätze angaben (Abbildung 10). Kommerzielle Daten beziehen sich auf Informationen, die lizenziert sind und gegen Zahlung einer vereinbarten Gebühr genutzt werden können. Darüber hinaus nutzen 89 % der Befragten Informationen des öffentlichen Sektors. Akademische Daten, die für wissenschaftliche Forschung kostenlos sind, werden von 68 % der Teilnehmer genutzt. Eingeschränkte Daten der Industrie, die nur für bestimmte Anwendungen genutzt werden können, werden von 29 % verwendet. Außerdem

lehnen 68 % der Befragten die Verwendung privater Daten ab. Da die Mehrheit der Teilnehmer auf offene Datensätze und Informationen des öffentlichen Sektors zurückgreift, ist es für öffentliche Stellen sehr wichtig, Daten auf städtischer Ebene für städtische Energieanwendungen frei zugänglich anzubieten.

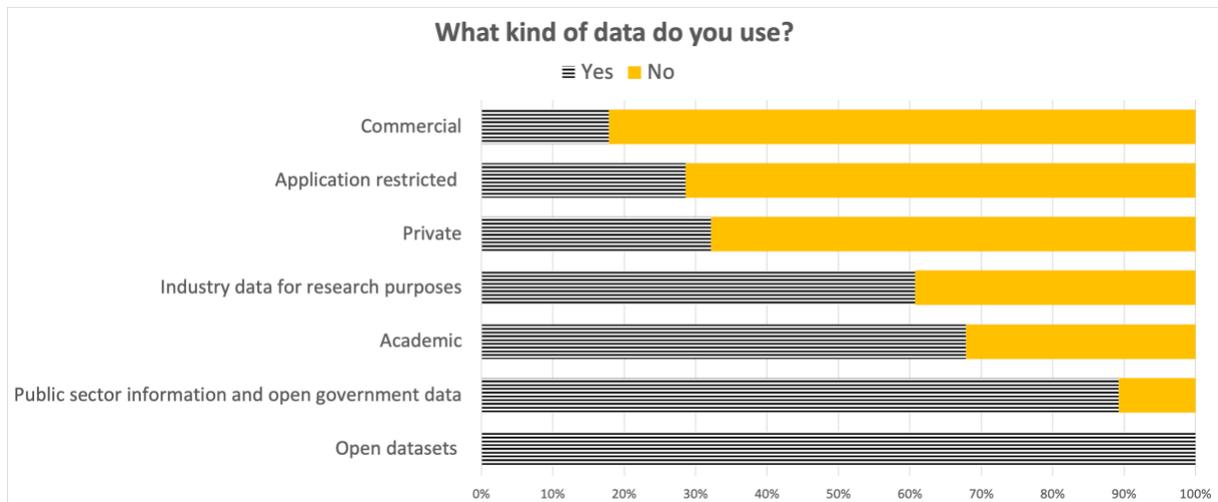


Abbildung 10: Herkunft der verwendeten Datenquellen.

Geometrische und energiespezifische Daten sind die Grundvoraussetzung für energiebezogene Anwendungen. CityGML<sup>10</sup>, ein offenes XML-basiertes Datenformat, erleichtert die Darstellung von semantischen und topologischen Informationen in 3D-Stadtmodellen. CityGML-Datensätze enthalten hauptsächlich geometrische Informationen zu den Gebäuden. Um zusätzliche Informationen aufzunehmen, können diese Modelle mit Hilfe des Application Domain Extension (ADE) erweitert werden. Für energierelevante Informationen wird hauptsächlich die CityGML Energy ADE<sup>11</sup> verwendet. Green Building XML (gbXML)<sup>12</sup>, ein offenes Datenformat, unterstützt ebenfalls den Informationsaustausch zwischen BIM-Modellen und anderen verwandten Analysetools. Darüber hinaus können auch die Industry Foundation Classes (IFC)<sup>13</sup> für die Darstellung von 3D-BIM-Modellen verwendet werden. GeoJSON basiert auf der JavaScript Object Notation und definiert JSON-Objekte und ihre Beziehungen, mit denen sie kombiniert werden, um Daten über geografische Merkmale, ihre Eigenschaften und ihre räumliche Ausdehnung darzustellen. Das ESRI Shapefile-Format ist ein geografisches Vektordatenformat für geografische Informationssystem-Software (GIS).

ExpertInnen wurden gefragt, welche Datenmodelle und Datneformate sie aktuell einsetzen (siehe Abbildung 11). Die Hälfte der Befragten verwendet GeoJSON, während CityGML und Energy ADE von 43 % der Teilnehmer genutzt werden; 64 % nutzen Shape-Dateien.

<sup>10</sup> Gröger et al. CityGML - Interoperable sematic 3D city models. In ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2020

<sup>11</sup> Agugiaro et al. The Energy Application Domain Extension for CityGML: enhancing interoperability for urban energy simulations. In: Open Geospatial Data, Software and Standards. 2018

<sup>12</sup> Green Building Studio. Open Green Building XML Schema 2021, URL <http://www.gbxml.org/>.

<sup>13</sup> Laakso et al. The IFC standard - A review of history, development, and standardization. In: Electronic Journal of Information Technology in Construction 17. 2012

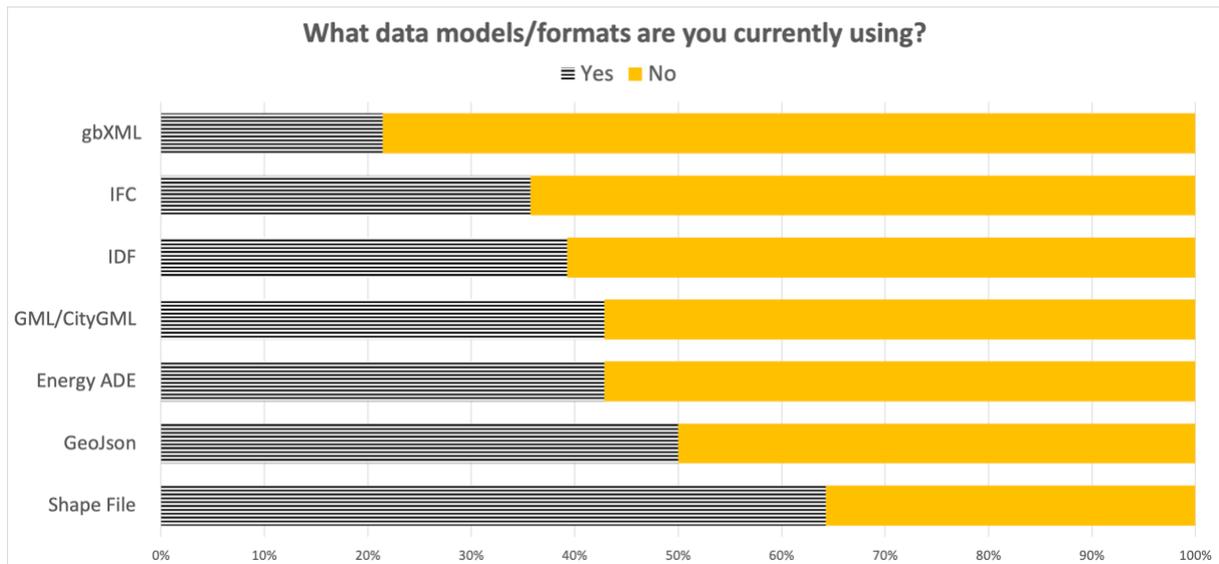


Abbildung 11: Verwendete Datenmodelle/Formate.

### 3.2. SHP2SIM

Um die Pipeline "SHP2SIM" zu testen, haben wir TMY-Simulationen (Typical Meteorological Year Data) mit gemessenen Daten für eine Fallstudie verglichen. Der Anwendungsfall ist der Campus Inffeldgasse der Technischen Universität in Graz, Österreich. Der Campus besteht aus 27 Gebäuden.

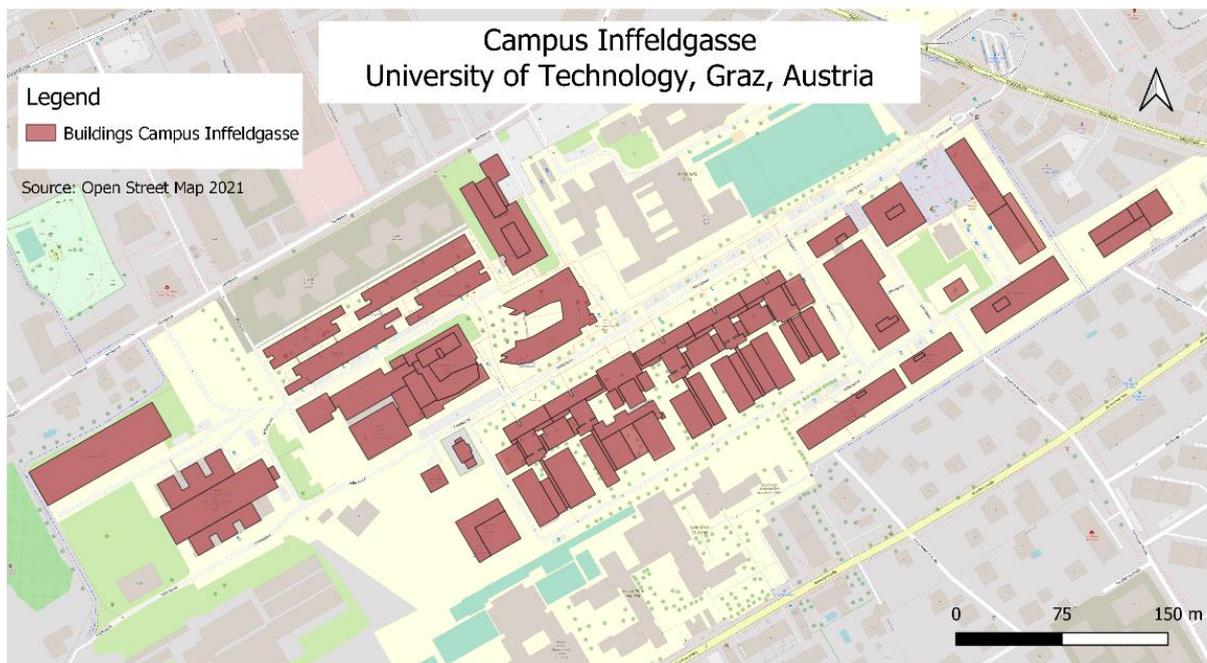


Abbildung 12: Digitalisierte Gebäude am Campus Inffeldgasse.

Da die offenen Datensätze für das Fallstudiengebiet nicht genau genug waren, wurden alle Gebäude des Campus von Hand im shp-Format digitalisiert (Abbildung 12). Jeder Gebäudeteil

wurde als separate Grundfläche im Referenzsystem EPSG:32633 - WGS84 / UTM-Zone 33N gezeichnet. Die für die Pipeline benötigten Attribute wurden als Gebäudeattribute in die shp-Datei eingefügt. Die Gebäudehöhen wurden mit GIS-Methoden aus den Gebäudegrundrissen und einem digitalen Gelände- sowie Oberflächenmodell berechnet. Die Geschosshöhen über Grund wurden durch die Gebäudehöhe und Geschoszahl geschätzt, die für jedes Gebäude am Campus offen verfügbar ist (online.tugraz.at); das Baujahr war aus den Energieausweisen bekannt.

Die Gebäude am Campus Inffeldgasse enthalten hauptsächlich Büros, Labors, Seminarräume und Hörsäle. Daher wurde für die Simulationen das CityGML-Modul "Institut" gewählt, da dort Labors als Zonen enthalten sind.

Das resultierende Gebäudesimulationsmodell enthält alle Gebäude des Campus. Zwei Gebäude des Campus wurden ausgewählt, um die gemessene Wärmelast mit der simulierten Wärmelast zu vergleichen. Für die beiden Gebäude Inffeldgasse 11 (Baujahr 2005) und Inffeldgasse 12 (Baujahr 1976) standen Messdaten aus den vergangenen Jahren zur Verfügung. Auf der Grundlage einer Klassifizierung jedes Raums und der Fläche jedes Raums wurde der prozentuale Anteil jeder der sieben Zonen im Gebäude ermittelt (Tabelle 1).

Tabelle 1: Anteil der Zonen in den Gebäuden.

%	Büro	Gänge	Labor	Abstellräume	Meetingräume	Toiletten	ICT
Inffeldgasse 11	18.73	26.74	36.55	0.57	12.96	3.22	1.23
Inffeldgasse 12	32.8	26.93	25.77	2.28	5.61	2.94	3.67

Das Modelica-Simulationsmodell wurde mit der Python Library buildingspy<sup>14</sup> simuliert. Gemessene Wärmelastdaten für die Gebäude Inffeldgasse 11 und 12 stammen aus dem Jahr 2019. Die Messdaten lagen in einer 15-Minuten-Auflösung vor; diese wurden auf Stundenwerte aggregiert, um mit den simulierten Daten vergleichbar zu sein (Tabelle 2).

Tabelle 2: Simulierte und gemessene Heizlast für ein Jahr.

	Simuliert in kWh	Gemessen 2019 in kWh	Unterschied kWh	Unterschied in %	Euklidische stündlicher in kWh	Norm Daten
Inffeldgasse 11	189403	256880	67477	26.27	2138	
Inffeldgasse 12	439812	446620	6808	1.52	10195	

Abbildung 13 zeigt die simulierte und gemessene tägliche Heizlast für das Gebäude Inffeldgasse 11. Die simulierte Wärmelast folgt dem Trend der gemessenen Daten, wobei im Sommer wenig oder gar nicht geheizt wird und im Winter am meisten geheizt wird.

<sup>14</sup> <https://github.com/lbl-srg/BuildingsPy>

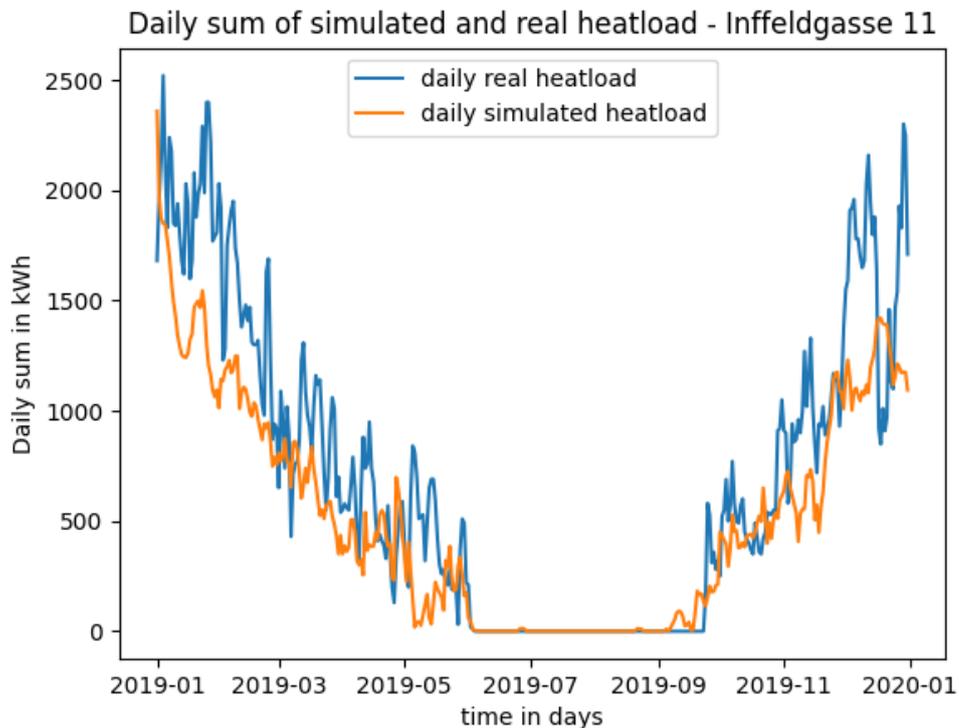


Abbildung 13: Tägliche simulierte und gemessene Heizlast für die Inffeldgasse 11.

### 3.3. BIM-Modell als Datenquelle für Energiesimulationen

Die Untersuchung der Anforderungen von Energiesimulationen (Kapitel 4.3) ergab mehrere Punkte, welche bei der BIM-Modellierung des EBS-Gebäudes im „Innovation District Innfeld“ für eine spätere Ableitung von Simulationsmodellen berücksichtigt wurden.

Grundlegend für eine korrekte Überführung der thermischen Eigenschaften eines Gebäudes aus einem BIM-Modell in ein Simulationsmodell ist z.B. die Art und Weise, wie mehrschichtige Bauteile modelliert werden. Wenn Wände, Decken, Bodenplatten oder Dächer aus mehreren Materialschichten bestehen, müssen diese im BIM-Modell als einschichtige Bauteile modelliert werden. Einschichtig bedeutet, dass alle Schichten des Bauteils in einem Element zusammengefasst werden, wie am Beispiel der Wand auf der linken Seite in Abbildung 14 zu sehen ist. Bei einem mehrschichtigen Aufbau wird jede Schicht im BIM-Modell als eigenes Element modelliert, wie die rechte Seite in Abbildung 14 zeigt. Einschichtige Bauteile in BIM-Modellen sind für die Ableitung eines Simulationsmodells wichtig, da die im Projekt verwendeten Softwareprodukten für Energiesimulationen momentan nur Bauteile berücksichtigt, welche direkten Kontakt mit dem umschlossenen Raum aufweisen. Bei mehrschichtigen Bauteilen bleiben alle Schichten, welche nicht an den Raum grenzen, unberücksichtigt. Die thermischen Eigenschaften dieser Schichten werden dadurch in der Simulation nicht berücksichtigt.

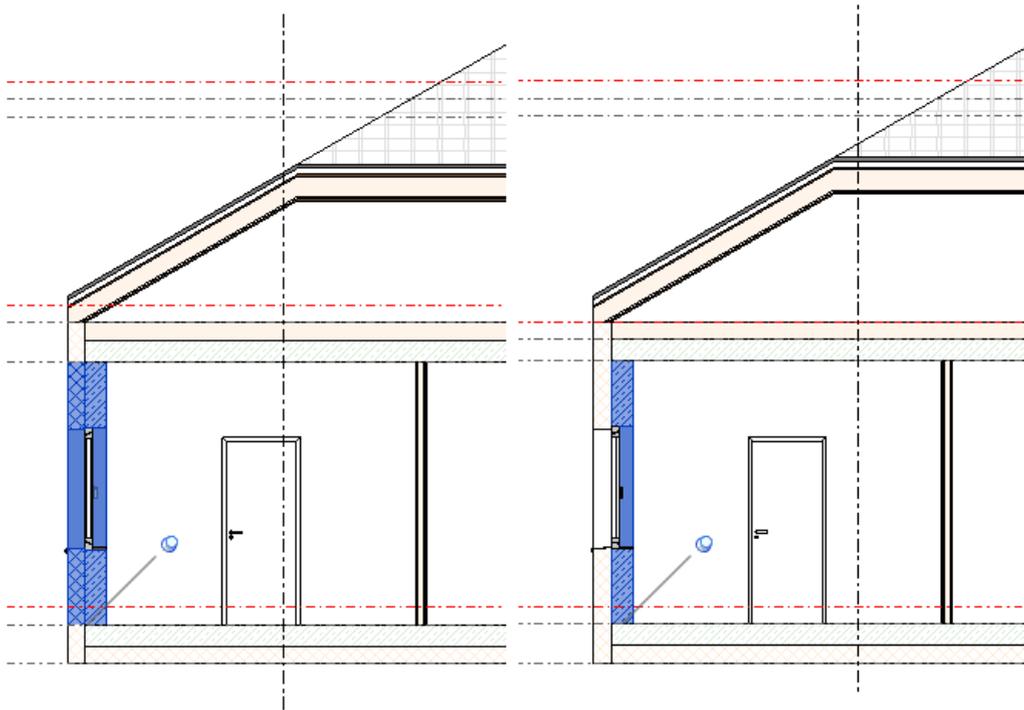


Abbildung 14: Gegenüberstellung von einschichtigem und mehrschichtigem Bauteilaufbau in BIM-Modellen.

Des Weiteren ist es für die korrekte Ableitung von Simulationsmodellen wichtig, alle Elemente im BIM-Modell den richtigen Ifc-Klassifikationen zuzuweisen, da Energiesimulationen primär mit IFC-Exporten eines BIM-Modells arbeiten. So sollten beispielsweise Wände als `IfcWall` klassifiziert werden, Geschosdecken als `IfcSlab`. Bei der Ableitung eines Simulationsmodells muss beachtet werden, dass Räume im BIM-Modell (`IfcSpace`) mit allen zugehörigen Raumbegrenzungen (`IfcRelSpaceBoundaries`) exportiert werden. Raumbegrenzungen entsprechen den Kontaktflächen eines Raumes mit den umgebenden Bauteilen (Wänden, Decken, etc.). Auch die im BIM-Modell definierten thermischen Materialeigenschaften der Bauteile müssen beim IFC-Export berücksichtigt werden, da diese Informationen essenziell für Energiesimulationen sind. Darüber hinaus ist beim IFC-Export eines BIM-Modells zu beachten, dass das richtige IFC-Format gewählt wird. Das Beispiel Gebäudesimulation zeigt, dass die Software IDA ICE beispielsweise über eine IFC2x3-Schnittstelle verfügt. Die Ableitung eines Simulationsmodells für EnergyPlus setzt wiederum einen Export im IFC4-Format voraus.

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurde ein BIM-Modell des EBS-Gebäudes entwickelt und speziell für dynamische Simulationen optimiert. Dadurch kann das BIM-Modell als Informationsquelle für Gebäudegeometrien und semantische Gebäudedaten im Zuge des SHP2SIM-Workflows herangezogen werden. Abbildung 15 zeigt ein IFC-Modell des EBS-Gebäudes. Die Räume des IFC-Modells (`IfcSpaces`) wurden für die Ableitung eines Simulationsmodells mit zugehörigen Raumbegrenzungen (`IfcRelSpaceBoundaries`) ausgestattet, welche in Abbildung 15 grün dargestellt werden.

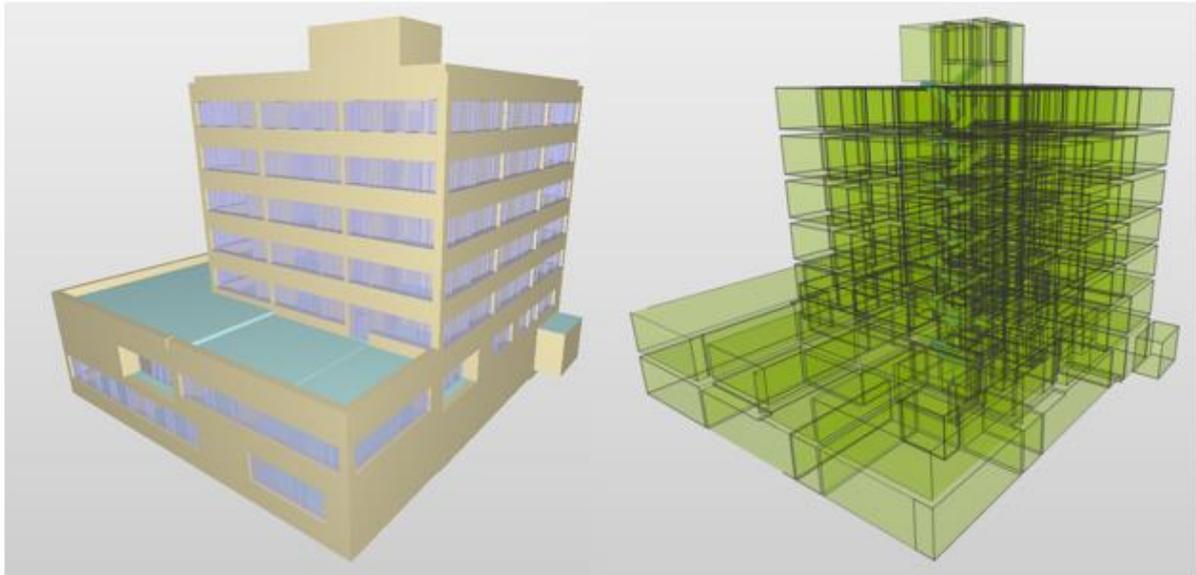


Abbildung 15: IFC-Export des modellierten EBS-Gebäudes (links) mit Raumbegrenzungsflächen (rechts).

### 3.4. Machine Learning basiertes Enrichment

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass 82 % der befragten ExpertInnen Methoden für Daten-Enrichment verwenden (Abbildung 16). Archetypische Ansätze werden von 75% der Studienteilnehmer angewandt, statistische Ansätze von 50% und ML-Methoden von 36%. Der hohe Prozentsatz der Teilnehmer, die ML-Methoden für die Datenanreicherung verwenden, überrascht angesichts der relativ geringen Anzahl von Veröffentlichungen zu diesem Thema. Neben diesen Ansätzen nannten die Teilnehmer auch andere Anreicherungsmethoden wie technische Modelle, Expertenratschläge und manuelle Anreicherung.

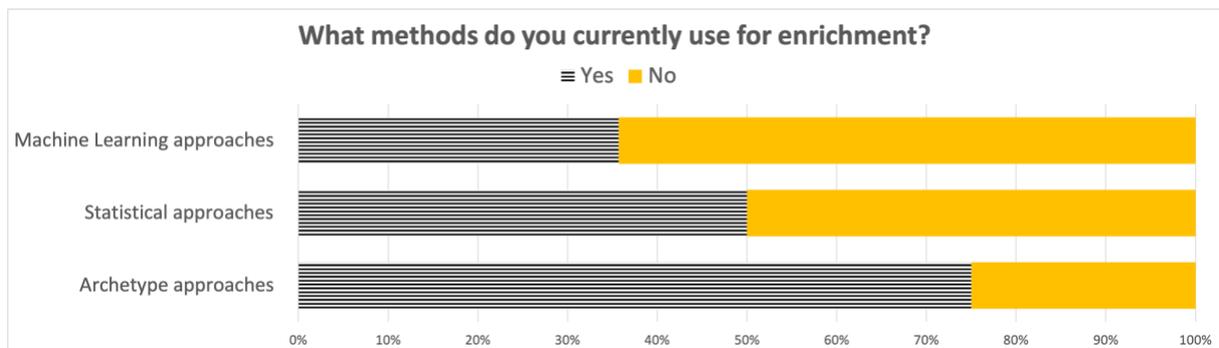


Abbildung 16: Von den ExpertInnen verwendete Methoden zur Datenanreicherung.

68 % der Experten antworteten, dass sie bei ihrer Arbeit bereits ML-Techniken eingesetzt haben. Von den verbleibenden 32 %, die noch keine ML-Methoden eingesetzt haben, gaben 78 % an, dass sie dies in Zukunft tun wollen. Mit einem Anteil von 86 % ist Python die Sprache/das Framework der Wahl für die meisten Experten. Matlab und R werden von 21 % bzw. 25 % verwendet. Andere Sprachen, wie z. B. C++, wurden nur einmal genannt. ML kann für eine Vielzahl von Aufgaben eingesetzt werden, z. B. für die Vorverarbeitung von Daten, die Datenanalyse oder die Datenanreicherung. 39 % der Experten verwenden ML-Methoden für die Vorverarbeitung, 36 % für die Analyse von Eingabedaten und die Datenanreicherung und

32 % für die Analyse von Simulationsergebnissen. Die meisten Experten sehen in all diesen Bereichen ein mittleres bis hohes Potenzial für ML-Techniken. Bei der Datenanreicherung und der Eingangsdatenanalyse wird ML von 64 % bzw. 61 % der Umfrageteilnehmer ein hohes Potenzial zugeschrieben. Ein mäßiges Potenzial bei der Datenanreicherung wird von 28 % der Experten geschätzt, und 30 % sehen ein mäßiges Potenzial für ML bei der Analyse von Eingabedaten. 52% der Experten sehen ein hohes Potenzial für ML in der Datenvorverarbeitung und innerhalb des Simulationsworkflows (z.B. in Form von Surrogate-Modellen). Mäßiges Potenzial in diesen beiden Bereichen wird von 32 % bzw. 29 % gesehen. Im Post-Processing und bei der Analyse der Simulationsergebnisse sehen 42% der Experten ein hohes Potenzial für ML-Methoden und weitere 42% ein moderates Potenzial.

In einer weiteren Frage wurden die ExpertInnen nach konkreten Anwendungen im Rahmen der Datenanreicherung gefragt, die sie für die Integration von ML als vielversprechend ansehen. Aus allen Antworten lassen sich mehrere Hauptthemen ableiten: Parameterschätzung, Füllen von Datenlücken, und Erstellung präziserer Archetypen und Bildanalyse. Die Mehrheit der Experten sieht das Potenzial von ML bei der Bewältigung von Problemen mit fehlenden oder fragmentierten Daten. Eng damit verbunden ist die Erstellung genauerer Gebäudearchetypen aus Daten, die anschließend zur Anreicherung von City Information Models verwendet werden können. Auch die Bildanalyse wurde mehrfach erwähnt, obwohl in den meisten Antworten keine genauen Anwendungsfälle für die Bildanalyse genannt wurden. Experten erwähnten die Bilderkennung im Zusammenhang mit Texturen und die Erkennung von Gebäudeattributen wie Fenstern und PV-Anlagen. Auch die Kalibrierung und Qualitätsprüfung von Daten wurde von einigen Befragten in Betracht gezogen.

### **3.5. Virtuelle Realität zur Erweiterung des Potenzials von Building Information Modeling**

In unserer State-of-the-Art Analyse konnten wir aufzeigen, dass BIM in Kombination mit VR vermehrt eingesetzt wird und die Anzahl der Publikationen in diesem Bereich steigend ist (siehe Abbildung 17).

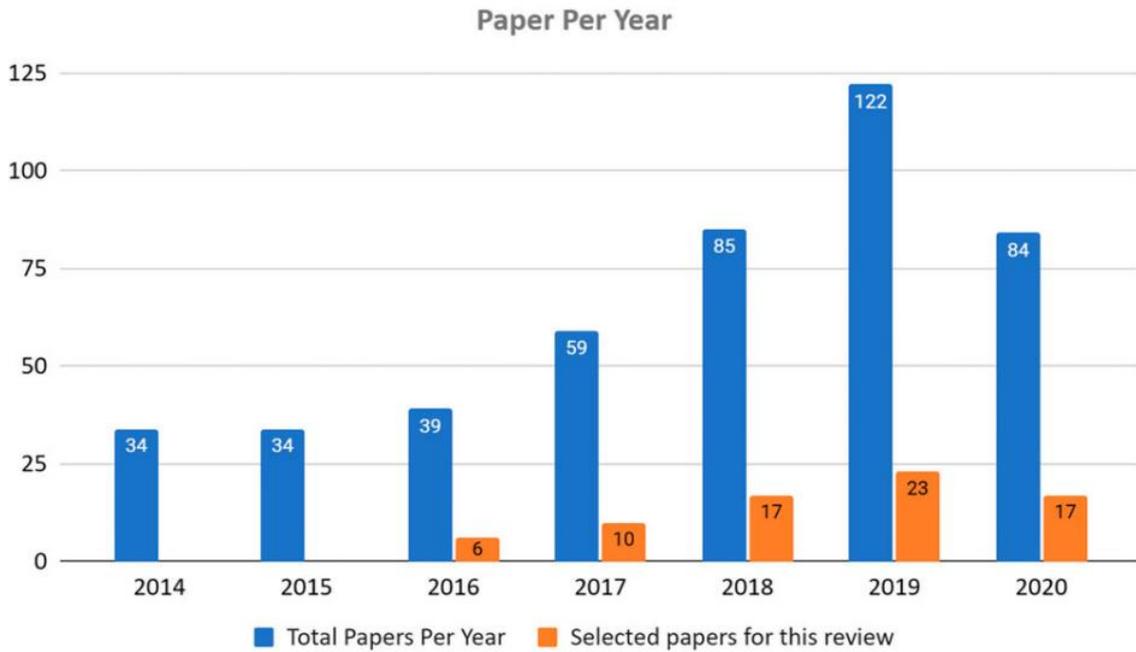


Abbildung 17: Zahl der Publikationen im Bereich BIM und VR.

Abbildung 18 verdeutlicht, wie Keywords in dem Bereich in Kombination zueinander stehen.

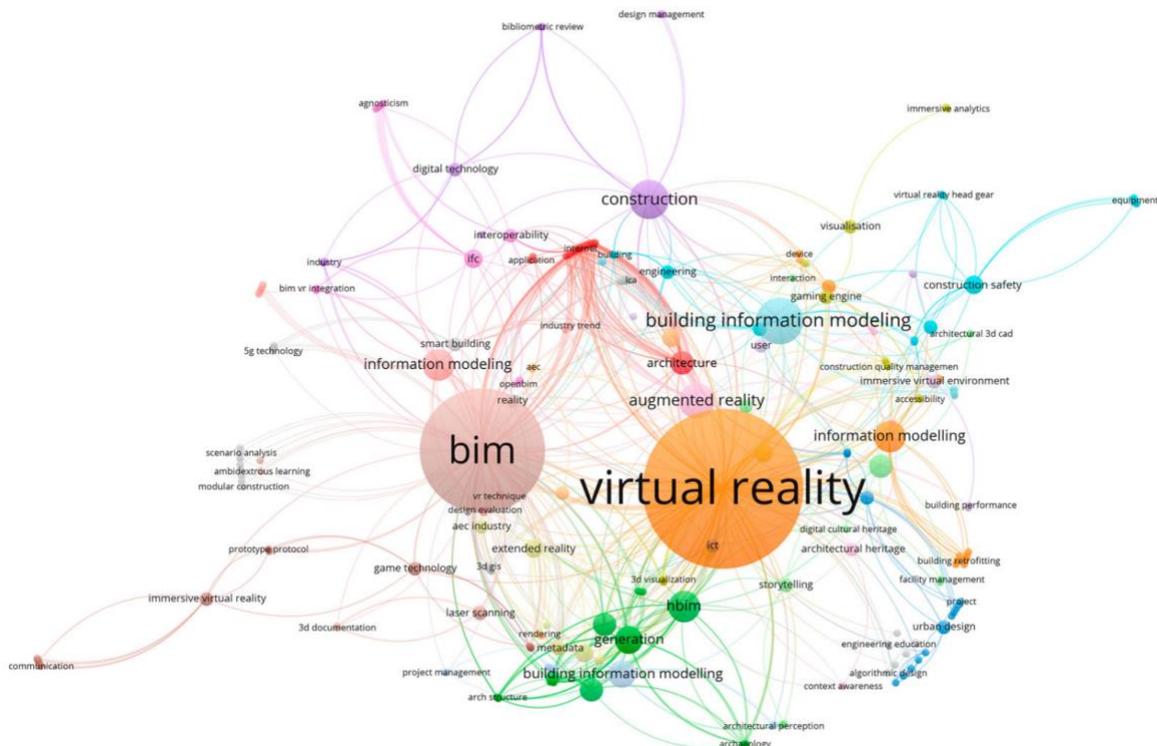


Abbildung 18: Netzwerkanalyse der Themen BIM und VR.

Bei der Analyse der Publikationen konnten drei Hauptkategorien für Anwendungsbereiche von BIM mit VR definiert werden: (i) Lehre und Training, (ii) Design und Datenaustausch, und (iii) Projektmanagement und Zusammenarbeit. Zu Lehre und Training gehören Bereiche wie beispielsweise Sicherheitstraining oder Designtraining. Im Bereich Design und

Datenaustausch findet man Applikation wie Interaktive Visualisierungen, Algorithmen-Design, oder Photogrammetrie. In der Kategorie Projektmanagement und Zusammenarbeit werden Anwendungen wie Instandhaltung, Workspace-Planung oder Katastrophenmanagement beschrieben.

Weiters haben wir die verwendeten Technologien genauer analysiert, um auch für unseren eigenen Use Case relevante Technologien zu definieren (Abbildung 19). 65.8% verwendeten die Game Engine Unity, 17.8% die Game Engine Unreal und 16,4% andere Tools oder Plugins. Der Großteil der beschriebenen Applikationen verwendet die HTC Vive oder die Oculus Rift als VR-Headset.

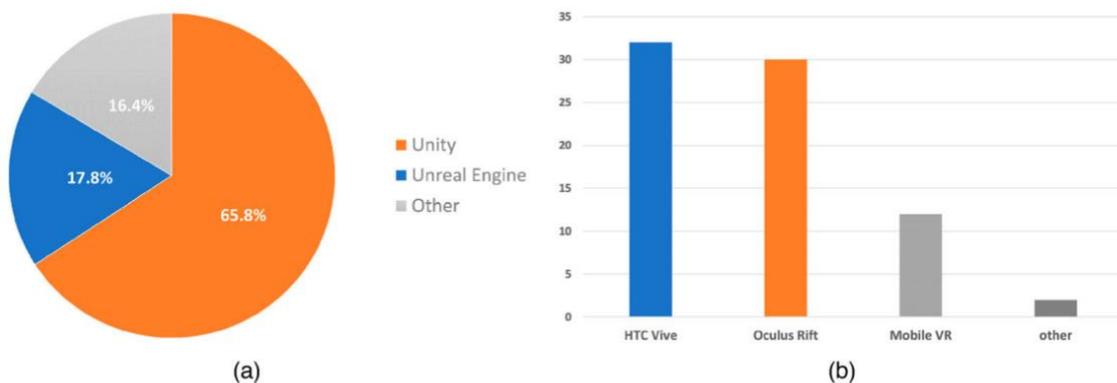


Abbildung 19: (a) Verbreitung verschiedener Game Engines für VR Umgebungen, (b) Anteil unterschiedlicher VR Brillenmodelle.

Folgende Vorteile von BIM mit VR wurden oft gelistet: steigende Motivation, besseres Verständnis durch den immersiven Charakter; Möglichkeit für sicheres, günstiges, motivierendes Experimentieren in einem immersiven Raum; immersives (und günstiges) Visualisierungstools; Unsichtbares kann sichtbar gemacht werden; Interaktion mit e.g. historischen Räumen wird möglich; digitales remote Arbeiten wird unterstützt.

Als relevante zukünftige Arbeiten wurden beispielsweise der Einsatz von Mobile VR Umgebungen oder Oculus Quest 2 Technologien diskutiert. Ein großes Thema war auch die Verbesserung von Interaktionsmöglichkeiten und Usability. Hier wäre eine Einführung von Guidelines ein relevantes Thema für zukünftige Forschungsarbeiten. Auch fehlen viele Benutzerstudien, um die beschriebenen Anwendungen auch zu evaluieren und vergleichen zu können.

Zusammenfassend kann man sagen, dass der Großteil der Publikationen einen positiven Einfluss von VR auf die Bereiche von Training, Design und Produktplanung im Bereich BIM aufzeigen und Kosten, Zeit und Produktivität steigern können. Zusätzlich hat VR auch das Potential Nicht-Experten bzw. der breiten Gesellschaft die Welt von BIM verständlich näher zu bringen.

### 3.6. VR Test-Case Innovation District Inffeld

#### Ergebnisse aus der energietechnischen Simulation

Abbildung 20 zeigt ein Ergebnis aus der dynamischen Gebäudesimulation eines Raumes im Gebäude Inffeldgasse 13, durchgeführt mit IDA ICE. Gezeigt ist der dynamische Jahresverlauf

für die Leistungen zur Versorgung von Heiz-, Warmwasser- und Kühlenergie in Stundenmittelwerten für den Raum. Weiters sind die Temperaturen der Lüftungsanlage sowie die Raumlufttemperatur und die operative Raumtemperatur dargestellt.

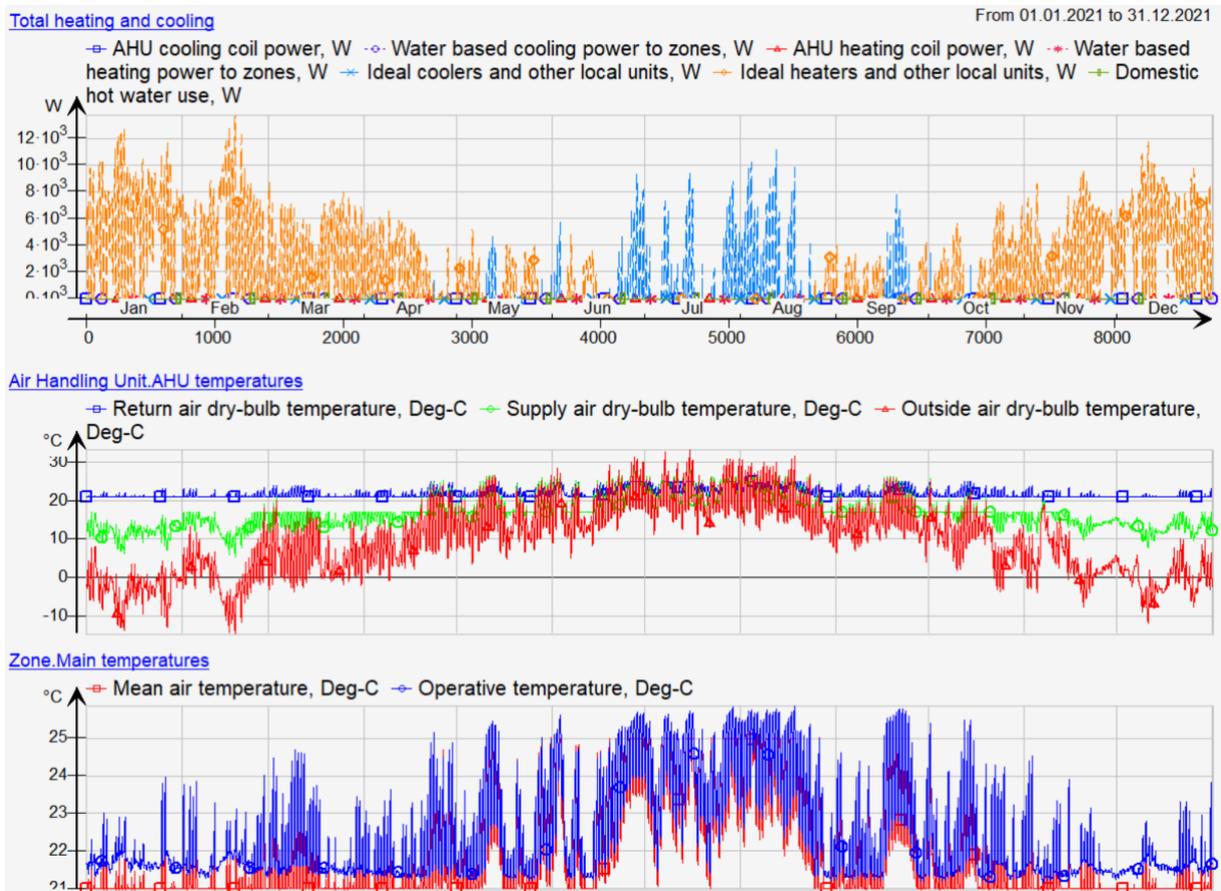


Abbildung 20: IDA ICE Gebäudesimulation; Ergebnis aus der energietechnischen Simulation; dynamischer Jahresverlauf in Stundenmittelwerten für einen Raum im Gebäude Inffeldgasse 13; oben: Heiz-, Kühl- und Warmwasserleistung; Mitte: Temperaturen in der Lüftungsanlage; unten: Raumlufttemperatur und operative Raumtemperatur; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik

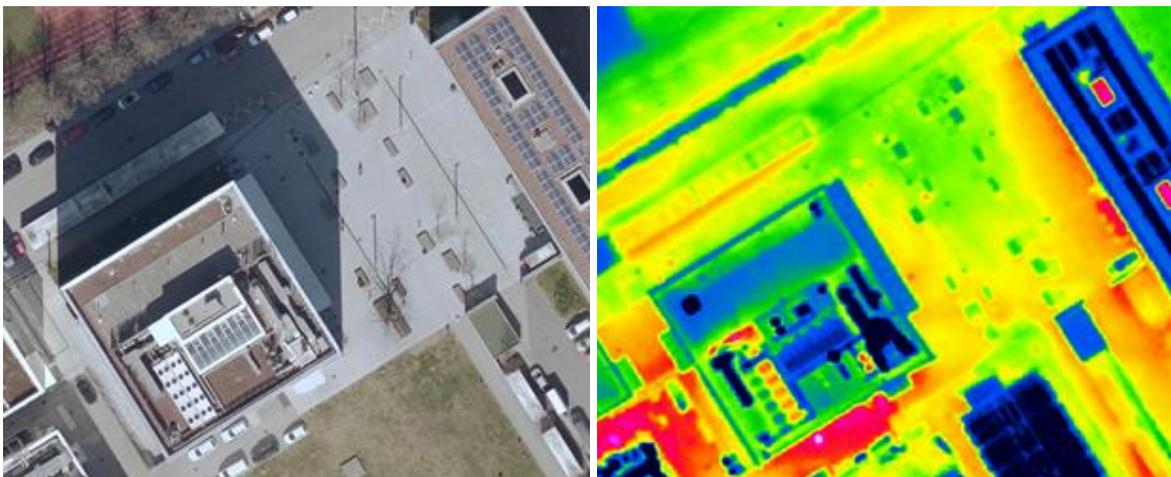


Abbildung 21: Orthografisches Luftbild des in VR dargestellten Gebäudes und Außenraumes im Innovation District Inffeld; links: Tageslichtaufnahme; rechts: Infrarotaufnahme; Quelle: Magistrat Graz, Stadtvermessungsamt

Abbildung 21 zeigt links ein orthografisches Tageslicht-Luftbild des in VR dargestellten Gebäudes Inffeldgasse 13 und den Vorplatz des Gebäudes Inffeldgasse 13 im Innovation District Inffeld. Rechts ist eine entsprechende Infrarotaufnahme des Bereichs dargestellt. Diese stammt aus einer nächtlichen Winter-Infrarotbefliegung des Stadtvermessungsamtes Graz. Es ist sehr gut die Oberflächen-Temperaturverteilung von Schwarz - 8°C bis Rot + 8°C zu erkennen. Temperaturfelder wie dieses wurden mit ENVI\_met errechnet und mit Hilfe der Unreal Engine in VR modelliert und visualisiert.

In Abbildung 22 ist eines dieser Simulationsergebnisse für den Vorplatz Inffeldgasse 13, im Bereich FSI Campus gezeigt. Darin sind die mit ENVI\_met errechneten Außenraumbedingungen dargestellt. Zu sehen sind in Schwarz die Gebäude eines bestimmten Bereichs am Innovation District Inffeld (FSI Campus), in Grün die Bäume und Gebüsche und im Grauverlauf die berechnete, umgebende Außenlufttemperatur. Die Abbildung zeigt den Verlauf der Außenlufttemperatur in 0,2 Meter Höhe über dem Boden für einen Sommertag im Juli um 9 Uhr morgens. Mit Hilfe von Mastermaps wie dieser wurden die Simulationsergebnisse in weiterer Folge in die VR Umgebung übertragen.

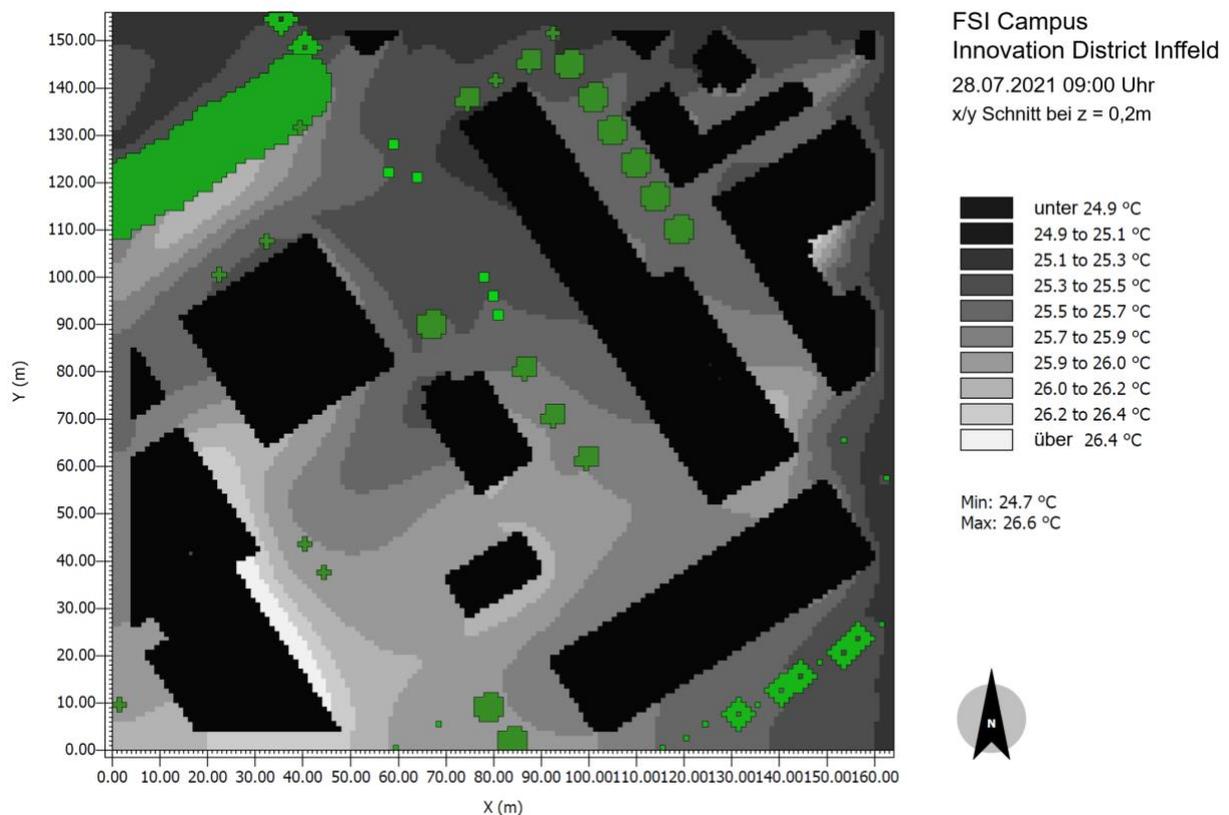


Abbildung 22: Visualisierungs-Mastermap aus der Mikroklima-Außenraumsimulation in ENVI\_met für den Außenbereich Inffeldgasse 13; Gebäude in Schwarz, Bäume und Bepflanzung in Grün, Verlauf der Lufttemperatur in 0,2 m Höhe über dem Boden in Graustufen; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik

### Visualisierung der Simulationsdaten in Virtual Reality

Die beteiligten Forschungsinstitute ISDS und IWT haben immersive VR-Objekte für zwei Umgebungen im Test-Case Innovation District Inffeld erarbeitet. Dabei wurden zwei Beispielszenen entworfen, die einen Innenraum im Gebäude Inffeldgasse 13 und den Vorplatz vor dem Gebäude Inffeldgasse 13 abbilden.

### Innenraum: Visualisierung der energietechnischen Gebäudesimulation

Abbildung 23 zeigt verschiedene Tools, mit denen Ergebnisse aus der energietechnischen Simulation im Innenraum visualisiert wurden. Mit dem Schieberegler-Tool können die Benutzer die Tageszeit verändern, um die Auswirkungen der veränderten Sonneneinstrahlung zu erleben. Gleichzeitig werden auch die entsprechenden Simulationsdaten der jeweiligen Tageszeiten in die Tools geladen und mit dem Button ‚Visualize‘ aktiviert. Die Nutzer können auch das Inventarsystem verwenden, um auf die verschiedenen verfügbaren Tools zuzugreifen. Dieses Inventarsystem wird mit einem Doppeldruck auf die am virtuellen Handgelenk befestigten Uhr aktiviert. Verfügbare Tools sind zum Beispiel das Diagramm Tool in Form einer 3D-Grafik oder das Schnittscanner-Tool. Die 3D-Grafik kann zur Visualisierung von unterschiedlichen energietechnischen Daten verwendet werden. Zum Beispiel wie hier gezeigt, zum Anzeigen der Verteilung des Energiebedarfs aus den Ergebnissen der Gebäudesimulation für den Büroraum. Aber auch die Visualisierung des aktuellen Energieverbrauchs aus der im Gebäude verbauten Messtechnik wäre denkbar. Darüber hinaus können Benutzer:innen mit dem Schnittscanner-Tool einen Schnitt durch den Büroboden machen und diesen dann auf Augenhöhe heraus ziehen. Dieser Schnitt kann die Struktur des Bodens und die Dicke der einzelnen Schichten visualisieren und zusätzlich auch die einzelnen Schichten getrennt darstellen. In Zukunft können wir weitere Datenvisualisierungen für das Scanner-Objekt implementieren. Zum Beispiel Ergebnisse aus energietechnischen Simulationen, wie Verlauf von Feuchtigkeit oder Temperatur über jede Schicht im Schnitt darstellen. Dieses Schnitttool kann dann auch auf die Wände oder die Decke erweitert werden.

Schieberegler-Tool für die Tageszeit



Schnittscanner-Tool



Inventarsystem zur Auswahl von Tools



Darstellung Energiebedarf



Abbildung 23: Verschiedene Visualisierungstools für den Innenraum im Bürogebäude Inffeldgasse 13; oben links: Schieberegler-Tool zum Verändern der Tageszeit; oben rechts: Schnittscanner-Tool um

einen Schnitt durch den Fußbodenaufbau durchzuführen; unten links: Inventarsystem zur Auswahl von verschiedenen Tools; unten rechts: Darstellung der Aufteilung des berechneten Energiebedarfs mit dem Diagramm-Tool;Quelle: ISDS & IWT TU Graz

### Außenraum: Visualisierung der Mikroklima-Simulation

Abbildung 24 zeigt verschiedene Visualisierungen und Tools für den Außenraum am Vorplatz Inffeldgasse 13. In diesem Beispiel wurde die in ENVI\_met errechnete Außenlufttemperatur in Bodennähe visualisiert. Es aber auch die Visualisierung von vielen anderen Parametern aus der Simulation, wie z.B. der relativen Luftfeuchte oder der Windstärke und -richtung denkbar. In diesem Beispiel wurde die bodennahe Außenlufttemperatur in zwei unterschiedlichen Darstellungsarten umgesetzt.

Punktuelle Visualisierung der Außenlufttemperatur



Zeitschieberegler Tool im Außenbereich



Flächige Visualisierung der Außenlufttemperatur



Drohnen-Kamera Tool



Abbildung 24: Verschiedene Visualisierungen und Tools für den Außenraum am Vorplatz Inffeldgasse 13; oben links: Punktuelle Visualisierung der Außenlufttemperatur mit verschiedenen Tools; oben rechts: Schieberegler-Tool zum Verändern der Tageszeit im Außenbereich; unten links: Flächige Visualisierung der Außenlufttemperatur in Bodennähe mit eingefärbten und sich bewegenden Wölkchen; unten rechts: Drohnen-Kamera Tool zum Schweben über dem betrachteten Außenbereich;Quelle: ISDS & IWT TU Graz

Zum einen wurde die Temperatur an einzelnen Punkten mit unterschiedlichen Tools angezeigt. Eine Umrandung mit Viertelkreisen oder Leuchten, um den Ort zu markieren. Eine Anzeigetafel am Ort mit dem Wert, der Bezeichnung und der Einheit des gezeigten Parameters. Und zusätzlich sich aufwärts bewegende Pfeile, die je nach Temperatur von Blau bis Rot eingefärbt sind und sich mit entsprechender Geschwindigkeit aufwärts bewegen.

Zum anderen wurde die bodennahe Lufttemperatur flächig mit Hilfe eines Partikelsystems dargestellt. Diese Partikel hatten die Form von kleinen, halb transparenten Wölkchen, welche

wiederum entsprechend der jeweils vorherrschenden Temperatur von Blau bis Rot eingefärbt wurden und sich vom Boden aufwärts bewegen. Die Höhe und die Geschwindigkeit dieser Bewegung werden auch an die jeweilige Temperatur angepasst. Als Datenhintergrund für diese Partikelverteilung wird die Mastermap aus Abbildung 22 verwendet.

Weiters können die BenutzerInnen das Inventarsystem am Handgelenk auch im Außenbereich benutzen. Dabei ist wieder der Zeitschieberegler-Tool für die Veränderung der Tageszeit und der dazugehörigen Simulationsdaten verfügbar. Weiters wurde ein Drohnen-Kamera-Tool implementiert. Durch das Werfen der Drohne teleportiert sich der Nutzer an den Drohnenstandort und die flächigen Temperaturvisualisierung können aus der Drohnenansicht im Schwebeflug überblickt werden.

Abbildung 25 zeigt wie Mitglieder des KityVR-Projektteams Visualisierungen von Simulationsdaten im Außenbereich entwickeln und erproben. Der Benutzer rechts verwendet gerade das VR-System HTC Vive. Am Bildschirm des Computers können die anderen Personen die Ansicht in der VR Brille mit verfolgen. Der Benutzer steuert die virtuellen Hände mit den zwei Controllern in seinen Händen. Mit unterschiedlichen Bedientöpfen and den Controllern kann man Tätigkeiten wie Greifen ausführen. In diesem Bild hat der Benutzer das Inventarsystem geöffnet und greift gerade nach dem Diagramm-Tool. Die originale, immersive Erfahrung der entwickelten Umgebung kann man, wie hier nur durch das eigenhändige Bedienen des VR-Systems machen. Durch reines Zusehen am Bildschirm kann die Qualität der entwickelten Umgebungen, Tools und Inhalte nicht beurteilt werden.



Abbildung 25: Projektmitglieder entwickeln und testen verschiedene Visualisierungsfunktionen in VR;  
Quelle: ISDS & IWT TU Graz

# 4 Schlussfolgerungen

## Roadmap für VR-Anwendungen im Bereich von 3D-Stadtmodellen

Die Roadmap für VR-Anwendungen im Bereich von 3D-Stadtmodellen ist wie folgt strukturiert: (a) auf der Grundlage des im Projekt veröffentlichten Review Papers werden die in der Literatur diskutierten Anforderungen und Einschränkungen analysiert; (b) basierend auf den im Projekt publizierten Papers zum Thema Information Modelling und Datenverfügbarkeit, werden die Anforderungen und fundamentalen Einschränkungen im Bereich von District/City Information Modelling analysiert; (c) die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse bei der Umsetzung des Test-Cases “Innovation District Inffeld” werden in Relation zu den Erkenntnissen in (a) und (b) gesetzt. Daraus werden sowohl Lessons Learned als auch konkreter zukünftiger Forschungsbedarf abgeleitet.

### (a) Anforderungen und Einschränkungen von VR

Die Resultate basieren auf folgenden im Projekt veröffentlichten Paper (KityVR Autoren sind fett markiert):

- **Safikhani, Keller, Schweiger, and Pirker.** Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: systematic review. International Journal of Digital Earth, 2022.

-

#### Lessons Learned:

Anwendungen lassen sich in drei Kategorien einteilen: (1) Bildung und Ausbildung, (2) Design und Datenaustausch, (3) Projektmanagement und Zusammenarbeit.

#### Vorteile:

- VR kann die Motivation und das Verständnis von Leuten durch die interaktive und immersive Umgebung verbessern.
- Während des Entwurfsprozesses eines AEC-Projekts kann VR als Visualisierungswerkzeug für verschiedene Schritte im Arbeitsablauf von Nutzen sein.
- VR kann einen Einblick in die verborgenen Einrichtungen wie MEP und die Möglichkeit bieten, deren Wartbarkeit im Voraus zu berücksichtigen.
- VR kann als Testumgebung für künftige intelligente Städte oder als Werkzeug für die Instandhaltung und Interaktion mit historischen Gebäuden eingesetzt werden.
- VR kann das Projektmanagement unterstützen.

#### Einschränkungen und Nachteile:

- Oftmals sind traditionelle 2D-Methoden und Visualisierungen weniger zeitaufwändig und einfacher zu handhaben.
- Schwierigkeiten beim Datenaustausch zwischen BIM und VR schränken die Nutzung von VR ein. Die Datenübertragung in Echtzeit ist das ultimative Ziel.

### (b) Information Modelling auf Quartiers- und Stadtebene

Die Resultate basieren auf folgenden im Projekt veröffentlichten Paper (KityVR Autoren sind fett markiert):

- Malhotra, Bischof, Nichersu, Häfele, **Exenberger**, Sood, Allan, Frisch, van Treeck, O'Donnell and **Schweiger**. Information modelling for urban building energy simulation—A taxonomic review. Building and Environment. 2021.
- **Schweiger**, **Exenberger**, Malhotra, Schranz, **Boiger**, Van Treeck, and O'Donnell. Data shortage for urban energy simulations? An empirical survey on data availability and enrichment methods using machine learning. In 28th International Workshop on Intelligent Computing in Engineering. 2021.

**Lessons Learned:** Die Ergebnisse der Studien zeigen, dass

- über 95% der Arbeiten im Bereich City Information Modelling nicht reproduzierbar sind, da Informationen zu Datenquellen, Inputdate, Modellierung, etc. fehlen.
- CityGML-Datenmodelle und das Simulationstool EnergyPlus am weitesten verbreitet sind.
- die Datenerhebung als der zeitaufwändigste Teil des Arbeitsablaufs angesehen wird (im Durchschnitt 40% der gesamten Projektzeit)
- ein Großteil der Entwicklungen und Publikationen auf Open-Source-Datensätzen basiert; nur in 18% der Fälle werden kommerzieller Datensätze eingesetzt.
- mehr als 80% Methoden zur Datenanreicherung (Enrichment) verwenden; Archetyp-Ansätze werden zu 75%, statistische Ansätze zu 50% und Methoden basierend auf maschinellem Lernen zu 36% verwendet.
- ExpertInnen ein mittleres bis hohes Potenzial von Machine Learning in folgenden Bereichen sehen: Pre- und Post-Processing, im Simulations-Workflow, sowie für die Analyse von Eingabedaten und die Datenanreicherung. Das größte Potenzial für Machine Learning erwarten die Experten im Bereich der Datenanreicherung und Inputdaten-Analyse. Folgende konkrete Machine Learning basierte Anwendungen wurden definiert: Parameterschätzung, Füllen von Datenlücken, Erstellung präziserer Archetypen, und Bildanalyse.

### (c) Test-Case Innovation District Inffeld

Die Technische Universität Graz hat mit dem Innovation District Inffeld ein Testfeld definiert, um die Entwicklung innovativer grüner Technologien in Stadtvierteln zu unterstützen. Der größte der drei Universitätscampusbereiche (Campus Inffeldgasse) wurde als Innovationsbezirk definiert und folgt der Strategie "Netto-Null-CO<sub>2</sub> Emission bis 2030" der TU Graz. Der Test-Case Innovation District Inffeld, 2 km vom Grazer Stadtzentrum entfernt, wird sich zu einem Vorbild für innovative und nachhaltige Stadtteile entwickeln. Derzeit sind fast 156.000 m<sup>2</sup> Nutzfläche verbaut. Der Campus benötigt derzeit rund 18,1 GWh/a Strom, 10,6 GWh/a Wärme und 2,7 GWh/a Kälte pro Jahr. Neben der Fernwärme werden derzeit Wärmepumpen (inkl. Tiefensonden) und Abwärme als Wärmequellen genutzt. Zur Kühlung werden reversible Wärmepumpen, Kältemaschinen und ein passiv gekühlter Betonspeicher eingesetzt. Derzeit sind fast 1.800 m<sup>2</sup> PV installiert. Für das nächste Jahrzehnt ist eine erhebliche Vergrößerung der Nutzfläche (60.000 m<sup>2</sup>) geplant, begleitet von einem massiven Ausbau der Nutzung erneuerbarer Energiequellen (hauptsächlich PV und Geothermie) und einer optimalen Steuerung der thermischen (auch geothermischen) und/oder elektrischen Speicher und der Energieversorgung aus volatilen Quellen wie PV oder Abwärme aus den Labors.

Der Test-Case Innovation District Inffeld ermöglichte erst die Umsetzung des Projektes. Die aktuell sehr dynamische und positive Entwicklung durch die Nachhaltigkeits-Bestrebungen seitens der TU-Graz bieten umfangreiche Möglichkeiten, Digitalisierungsprojekte wie KityVR umzusetzen.

Innovationszentren wie dieses innerhalb der Stadt sind unabdingbar, um die Digitalisierung voran zu treiben.

### Datenverfügbarkeit

Die Datenverfügbarkeit über den Gebäudebestand ist nach wie vor sehr gering. Speziell bei privaten Bauträgern, Investoren und Besitzen besteht sehr geringes Interesse zur Kooperation mit Projekten zur Digitalisierung. Zum Beispiel (Stadt-) politische Vorgaben oder eine Veränderung der Gesetzeslage könnten hier zur Verbesserung beitragen.

Häufig sind Daten nur für gewisse Forschungsprojekte freigegeben und können so nicht veröffentlicht werden. Dadurch sind viele Ergebnisse nicht reproduzierbar. Darüber hinaus macht dieser Umstand zeitintensive Datenakquisition und -generierung notwendig.

Die schlechte Datenlage führt zu Schwierigkeiten für machine learning- gestütztes Enrichment, da die Erstellung von sinnvollen Trainingsdatensätzen mit offen erhältlichen Daten nicht möglich ist. Dies führt zu einem langsamen Fortschritt der Forschung in diesem Bereich.

Simulationsmodelle für Gebäude und Außenräumen in urbanen Gebieten benötigen die notwendigen energierelevanten Inputdaten in ausreichender Qualität und Auflösung, um zufriedenstellende und belastbare Simulationsergebnisse zu generieren.

Aufgrund des aktuell sehr hohen manuellen Aufwandes ist auch eine Weiterentwicklung der Automatisierung in allen Bereichen der hier notwendigen Datenverarbeitung notwendig.

### BIM-Modelle als Informationsquelle für Energiesimulationen

Der Datentransfer aus BIM-Modellen aus realen Planungs- und Bauprozessen in Simulationsmodelle für Energiesimulationen bzw. die Anreicherung von Simulationsmodellen mit BIM-Daten sind derzeit nur mit manuellem Mehraufwand realisierbar. Dies resultiert zunächst aus den derzeit verfügbaren Funktionalitäten der Simulationssoftwareumgebungen an sich. Bestimmte Simulationsumgebungen ermöglichen die Verwendung von BIM-Modellen nur indirekt unter Zuhilfenahme von Drittsoftware. Tools für diesen Workflow befinden sich aktuell noch überwiegend im Entwicklungsstadium. Bei Softwareprodukten, welche den direkten Import von BIM-Modellen, z.B. im IFC-Format, ermöglichen, können Mehraufwände aufgrund fehlerhafter Interpretation geometrischer Daten (z.B. abgehängte Decken, Dachgeometrien oder thermische Zonen) und nicht-geometrischer Daten (Metadaten) entstehen.

Metadaten liegen im klassischen nicht BIM-basierten Planungsprozess typischerweise fragmentiert bei unterschiedlichen Planungsakteuren (Architektur, Fachplaner etc.) vor, und müssen aufwändig zusammengetragen und im Simulationsmodell manuell zusammengeführt werden. BIM-Modelle bieten die Möglichkeit die für Energiesimulationen erforderlichen Daten bereits im Zuge des Planungsprozesses in einem Modell zusammenzuführen. Das bedarf jedoch einer entsprechenden Koordination und Durchführung der Planung.

Auch die geometrische Abbildung der Gebäudestruktur in BIM-Modellen, wie sie derzeit oft in Planungsprojekten erstellt werden, entspricht oft nicht den Anforderungen von Simulationsmodellen, was ebenfalls manuelle Vorbereitungs Schritte für die Ableitung eines Simulationsmodells erfordert.

Um BIM-Daten möglichst vollständig und automatisiert in Simulationsumgebungen zu übernehmen, muss daher bei der Erstellung der BIM-Modelle im Planungsprozess darauf geachtet werden, dass die Anforderungen hinsichtlich des späteren Datentransfers in die Simulationsumgebung berücksichtigt

werden. Dies betrifft sowohl die adäquate geometrische Modellierung der Gebäudestruktur und der technischen Anlagen als auch die Abbildung von Metadaten (z.B. thermische Bauteilparameter). Beispielhaft dafür sei die Modellierung von Wandaufbauten genannt. In den im Rahmen des Projektes verwendeten Simulationssoftwareumgebungen zeigte sich beispielsweise, dass durch mehrschichtige bzw. hybride Bauteilmodellierung bei der Ableitung von Simulationsmodellen die Metadaten der nicht direkt an die Räume im BIM-Modell angrenzenden Bauteilschichten verloren gingen.

Im weiteren Projektverlauf wurden basierend auf diesen Erfahrungen optimierte BIM-Modelle von Gebäuden des „Innovation District Innfeld“ als Grundlage für die Ableitung von Simulationsmodellen entwickelt. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Ableitung von Simulationsmodellen auch bei einer optimierten Modellierung entsprechend den Anforderungen der Simulationssoftware noch nicht vollständig automatisiert werden kann, z.B. aufgrund der bereits genannten unzulänglichen Interpretation von IFC-Daten.

Um in Zukunft Gebäudeenergiesimulationen zeiteffizient auf Basis von BIM-Modellen abwickeln zu können sind weitere Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erforderlich. Grundlegend wäre die Entwicklung von Prozessbeschreibungen und Use-Cases um für alle relevanten Projektakteure eine gemeinsame und verständliche Planungsgrundlage (insbesondere für jene ohne Spezialwissen im Bereich der Energiesimulation) für diesen Anwendungsfall zu schaffen. Dies umfasst z.B. die Entwicklung von Modellierungsstandards und Guidelines, beispielsweise in Form von Level-of-Information (LOI) Definitionen, um den beteiligten Projektakteuren zu vermitteln, wann welche Informationen im BIM-Modell vorhanden sein müssen, damit in weiterer Folge die Daten in Simulationsumgebungen übernommen werden können. Entwicklungsbedarf besteht außerdem in der softwaretechnischen Weiterentwicklung der Simulationsumgebungen hinsichtlich der Funktionalität des Datenimports aus BIM-Modellen (z.B. die kontinuierliche Anpassung an aktuelle IFC-Versionen und eine Verbesserung der Qualität des Imports).

#### Interaktion von Simulation and VR

Übertragen von Simulationsdaten in die VR-Umgebung: Austauschformate für Daten sind nicht definiert und mussten vorerst prototypisch implementiert werden. Dies bedeutete einen beträchtlichen Zeitaufwand für die manuelle Bearbeitung der Daten. Eine vertiefte softwaretechnische Entwicklung von Schnittstellen ist notwendig, um einen automatisierten und stabilen Datenaustausch zwischen den benutzten Softwaretools zu ermöglichen.

Erzeugen von Immersion für energierelevante Simulationsergebnisse: Es ist nicht trivial, die aktuell verfügbaren Strategien für immersive VR-Umgebungen aus der Gaming-Entwicklung auf energierelevante Simulationsdaten umzulegen. Erste Erfolge konnten mit immersiven Objekten für den Test-Case erzielt werden. Jedoch ist noch ein weiterer, beträchtlicher Entwicklungsaufwand notwendig, um den vollen Umfang der Möglichkeiten von VR umsetzen zu können.

Eine iterative Erarbeitung von Modellen in Virtual Reality unter Einbezug von den jeweiligen Nutzergruppen ist dringend zu empfehlen. Der Test und die Rückmeldung ermöglicht erst die volle Entwicklung der immersiven Wahrnehmung der VR-Umgebung.

#### **Lessons Learned:**

- Die Datenverfügbarkeit über den Gebäudebestand ist nach wie vor sehr gering. (Stadt-) Politische Vorgaben oder eine Veränderung der Gesetzeslage könnten hier zur Verbesserung beitragen.

- Aktuell hoher manueller Aufwand bei der Datenverarbeitung und beim Übertragen von Simulationsdaten in die VR-Umgebung
- Erzeugen von Immersion für energierelevante Simulationsergebnisse ist nicht trivial; aktuell verfügbare Strategien aus der Gaming-Entwicklung nur bedingt übertragbar
- Relevante Nutzergruppen müssen in die Entwicklung von energierelevanten VR Umgebungen integriert werden
- Simulationswerkzeuge nutzen beim Import von BIM-Daten primär IFC, was die Bedeutung und Relevanz von IFC für diesen Anwendungsbereich unterstreicht.
- Für eine korrekte Abbildung der für Energiesimulationen erforderlichen geometrischen und physikalischen Eigenschaften eines Gebäudes in einem BIM-Modell fehlen klar definierte Anforderungen an die Modellierung und Prozessbeschreibungen (beispielsweise LOI-Definitionen für den Use-Case Energiesimulation), welche im Planungsprozess verankert und umgesetzt werden müssen.
- Es besteht Entwicklungs- und Optimierungsbedarf hinsichtlich der Importfunktionalität für BIM-Daten in Simulationsumgebungen

# 5 Ausblick und Empfehlungen

## **Daten, Datenmodelle, Datenformate**

- Die Tatsache, dass (i) die Datenverfügbarkeit im Bereich City Information Modelling nach wie vor eingeschränkt ist, und (ii) über 95% der Arbeiten im Bereich City Information Modelling nicht reproduzierbar sind, zeigt, dass hier klare politische Vorgaben und eine Veränderung der Gesetzeslage notwendig sind, und andererseits die Wissenschaftsgemeinschaft die Qualität der eigenen Forschung kritisch hinterfragen sollte.
- Zukünftige Arbeiten sollen ausreichende Metadaten zur Beschreibung der Ergebnisse liefern, damit diese überprüft oder reproduziert werden können.
- Beispieldatensätze sollten zusammen mit den Ergebnissen veröffentlicht werden, um verschiedene Ansätze im Bereich der Modellierung vergleichen zu können

## **Virtual Reality und Simulationen**

- Der Einfluss von Visualisierung und Art der Interaktion auf das NutzerInnen-Erlebnis muss im Detail erforscht werden. Hier ist die Einbindung der EndnutzerInnen während des Designverfahren von großer Bedeutung. Eine sozialwissenschaftliche Begleitung bei der Entwicklung von energierelevanten VR Umgebungen ist sinnvoll.
- Um den Datenaustausch zu ermöglichen, müssen geeignete Schnittstellen zwischen Simulationsumgebungen und VR definiert und entwickelt werden.
- Für die Erstellung von Energiesimulationen müssen Anforderungsprofile und Prozessbeschreibungen entwickelt werden, die in realen BIM-basierten Planungsprozessen anwendbar sind.

# 6 Verzeichnisse

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Taxonomie für UBEM.	11
Abbildung 2: Überblick der Arbeitsabläufe vom Shapefile zur Energiesimulation in SHP2SIM.	12
Abbildung 3: Innovation District Inffeld, TU Graz Campus Inffeldgasse; links: Luftbildaufnahme des aktuellen Gebäudebestands mit angedeuteter Vernetzung von Gebäuden und Nutzern; rechts: Gebäudebestand im Planungsmodell und Grundriss für das Jahr 2030; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik	15
Abbildung 4: Luftbild des in VR dargestellten Gebäudes und Außenraumes im Innovation District Inffeld; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik auf Basis Magistrat Graz, Stadtvermessungsamt	16
Abbildung 5: Gebäudemodell Innovation District Inffeldgasse 13; links: BIM IFCSpaces Modell in Vectorworks; rechts: IDA ICE Gebäudesimulationsmodell zur energietechnischen Simulation; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik	17
Abbildung 6: Mikroklima-Simulationsmodell für den Innovation District Inffeld im Simulationstool ENVI_met; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik.	18
Abbildung 7: Software-Tools, welche in UBEM eingesetzt werden.	19
Abbildung 8: Anwendungen für City Information Models.	20
Abbildung 9: Verteilung der Arbeitsbelastung auf die verschiedenen Phasen eines Projekts.	21
Abbildung 10: Herkunft der verwendeten Datenquellen.	22
Abbildung 11: Verwendete Datenmodelle/Formate.	23
Abbildung 12: Digitalisierte Gebäude am Campus Inffeldgasse.	23
Abbildung 13: Tägliche simulierte und gemessene Heizlast für die Inffeldgasse 11.	25
Abbildung 14: Gegenüberstellung von einschichtigem und mehrschichtigem Bauteilaufbau in BIM-Modellen.	26
Abbildung 15: IFC-Export des modellierten EBS-Gebäudes (links) mit Raumbegrenzungsflächen (rechts).	27
Abbildung 16: Von den ExpertInnen verwendete Methoden zur Datenanreicherung.	27
Abbildung 17: Zahl der Publikationen im Bereich BIM und VR.	29
Abbildung 18: Netzwerkanalyse der Themen BIM und VR.	29
Abbildung 19: (a) Verbreitung verschiedener Game Engines für VR Umgebungen, (b) Anteil unterschiedlicher VR Brillenmodelle.	30
Abbildung 20: IDA ICE Gebäudesimulation; Ergebnis aus der energietechnischen Simulation; dynamischer Jahresverlauf in Stundenmittelwerten für einen Raum im Gebäude Inffeldgasse 13; oben: Heiz-, Kühl- und Warmwasserleistung; Mitte: Temperaturen in der Lüftungsanlage; unten: Raumlufttemperatur und operative Raumtemperatur; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik	31

Abbildung 21: Orthografisches Luftbild des in VR dargestellten Gebäudes und Außenraumes im Innovation District Inffeld; links: Tageslichtaufnahme; rechts: Infrarotaufnahme; Quelle: Magistrat Graz, Stadtvermessungsamt	31
Abbildung 22: Visualisierungs-Mastermap aus der Mikroklima-Außenraumsimulation in ENVI_met für den Außenbereich Inffeldgasse 13; Gebäude in Schwarz, Bäume und Bepflanzung in Grün, Verlauf der Lufttemperatur in 0,2 m Höhe über dem Boden in Grauabstufungen; Quelle: TU Graz, Institut für Wärmetechnik	32
Abbildung 23: Verschiedene Visualisierungstools für den Innenraum im Bürogebäude Inffeldgasse 13; oben links: Schieberegler-Tool zum Verändern der Tageszeit; oben rechts: Schnittscanner-Tool um einen Schnitt durch den Fußbodenaufbau durchzuführen; unten links: Inventarsystem zur Auswahl von verschiedenen Tools; unten rechts: Darstellung der Aufteilung des berechneten Energiebedarfs mit dem Diagramm-Tool;Quelle: ISDS & IWT TU Graz	33
Abbildung 24: Verschiedene Visualisierungen und Tools für den Außenraum am Vorplatz Inffeldgasse 13; oben links: Punktuelle Visualisierung der Außenlufttemperatur mit verschiedenen Tools; oben rechts: Schieberegler-Tool zum Verändern der Tageszeit im Außenbereich; unten links: Flächige Visualisierung der Außenlufttemperatur in Bodennähe mit eingefärbten und sich bewegendem Wölkchen; unten rechts: Drohnen-Kamera Tool zum Schweben über dem betrachteten Außenbereich;Quelle: ISDS & IWT TU Graz	34
Abbildung 25: Projektmitglieder entwickeln und testen verschiedene Visualisierungsfunktionen in VR; Quelle: ISDS & IWT TU Graz	35

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Anteil der Zonen in den Gebäuden.	24
Tabelle 2: Simulierte und gemessene Heizlast für ein Jahr.	24

## Abkürzungsverzeichnis

BIM	Building Information Modelling
AEC	Architecture, Engineering, and Construction
ML	Machine Learning
VR	Virtual Reality

