

# **Virtual Reality als innovatives, digitales Werkzeug für die integrative Stadtentwicklung der Zukunft (VR4UrbanDev)**

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 36/2026

Wien, 2026

## 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 (interimistisch): DI<sup>in</sup> (FH) Isabella Warisch

Autorinnen und Autoren:

Dr. Hermann Edtmayer, DI Lisa-Marie Fochler, Dr. Thomas Mach, Institut für  
Wärmetechnik, TU Graz

DI Georg Arbesser-Rastburg, Marco Steiner BSc, Saeed Safikhani Fogh-lis. Lis.,

Prof. Dr. Johanna Pirker, Game Lab Graz, Institute of Human-Centred Computing, TU Graz

Dr. Anna Schreuer, Mag. Jürgen Suschek-Berger, Prof. Dr. Günter Getzinger, Science,  
Technology and Society Unit, Institute of Human-Centred Computing, TU Graz

DI Daniel Ruepp, Dr. Peter Nageler, EQUA Solutions AG

Thomas Schwengler, DI Theresa Kohl, Prof. Dr. Gerald Schweiger, DiLT Analytics Flexco

Arch. DI. Ernst Rainer, Ernst RAINER – Büro für resiliente Raum- und Stadtentwicklung e.U.

Wien, Graz 2026. Stand: März 2026

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 [nachhaltigwirtschaften.at](https://www.nachhaltigwirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und Anwender:innen eine interessante Lektüre.



## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Kurzfassung</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Abstract</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Ausgangslage</b> .....	<b>9</b>
	3.1. Problemstellung und Forschungsbedarf.....	9
	3.2. Ziele des Projektes .....	10
	3.3. Stand der Technik .....	11
	3.3.1. Immersive Analytik mit Virtual Reality (VR) .....	12
	3.3.2. Entwerfen und Planen mit VR .....	12
	3.3.3. Digitale Zwillinge und Virtual Reality.....	14
	3.3.4. Internet of Things (IoT) Datenkommunikation und Visualisierung .....	14
	3.3.5. Wissenschaftliche Inhalte verständlich kommunizieren .....	15
<b>4</b>	<b>Projekthalt</b> .....	<b>17</b>
	4.1. Vorgehensweise und Strategie in VR4UrbanDev.....	17
	4.2. Verwendete VR-Technologien .....	18
	4.3. Testfeld, Datenbasis und Erhebungsmethodik.....	19
	4.4. Sozialwissenschaftliche Begleitung der Technologieentwicklung .....	19
	4.5. Reflexion der Methoden und Herausforderungen .....	20
<b>5</b>	<b>Ergebnisse</b> .....	<b>21</b>
	5.1. Gesamtsystem und Architektur des immersiven VR-Twins.....	21
	5.1.1. Datengrundlage durch Simulation und IoT.....	22
	5.1.2. Kopplung von CAD, Simulation und IoT mit der VR-Umgebung.....	23
	5.2. Detaillierte Ausgestaltung der VR-Umgebungen und Interaktionsebenen .....	24
	5.2.1. Die übergeordnete Tischansicht (Beobachtenden-Perspektive).....	26
	5.2.2. Die Campus-Außenumgebung (Ich-Perspektive).....	31
	5.2.3. Der Büroraum (Detailansicht im Ich-Perspektiven-Modus) .....	37
	5.3. Nutzungszentrierte Evaluierung .....	39
	5.3.1. Usergruppenbefragung mit leitfadengestützten Interviews der Nutzer:innen .....	39
	5.3.2. Ergebnisse der Usergruppen-Interviews .....	40
	5.3.3. Ergebnisse des Stakeholder-Workshops .....	41
	5.3.4. Detaillierte Bewertung der Usability .....	43
	5.3.5. Zusammenfassende sozialwissenschaftliche Einordnung .....	44
	5.4. Wissenschaftliche Highlights und Innovationen.....	45
<b>6</b>	<b>Schlussfolgerungen</b> .....	<b>47</b>
	6.1. Fachliche Erkenntnisse für das Projektteam.....	47
	6.2. Relevanz für Zielgruppen und Nutzungspotenziale .....	47
	6.3. Rechtliche Rahmenbedingungen .....	48

6.4.	Verbreitungsaktivitäten und Stakeholder-Interaktion .....	48
6.4.1.	Aufbereitung der Projekthinhalte für Stakeholder und Vernetzung.....	48
6.4.2.	Wissenschaftliches und populärwissenschaftliches Publizieren .....	51
6.4.3.	Online-Präsenz und Social Media .....	51
6.5.	Verwertungspotenzial und Geschäftsmodelle.....	52
<b>7</b>	<b>Ausblick und Empfehlungen .....</b>	<b>54</b>
7.1.	Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	54
7.2.	Potenzial für Demonstrationsvorhaben.....	55
<b>8</b>	<b>Verzeichnisse.....</b>	<b>57</b>
8.1.	Abbildungsverzeichnis .....	57
8.2.	Literaturverzeichnis .....	59
8.3.	Abkürzungsverzeichnis.....	61
<b>9</b>	<b>Anhang.....</b>	<b>62</b>
9.1.	Data Management Plan .....	62
9.1.1.	Datenerstellung und Dokumentation.....	62
9.1.2.	Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte .....	64
9.1.3.	Datenspeicherung und -erhalt.....	64
9.1.4.	Wiederverwendbarkeit der Daten.....	65

# 1 Kurzfassung

Die Planung klimaneutraler Stadtquartiere erfordert die integrative Berücksichtigung komplexer Datensätze. Herkömmliche Planungswerkzeuge stoßen dabei, insbesondere in der Kommunikation komplexer Zusammenhänge an Entscheidungsträger:innen und andere Stakeholder, an ihre Grenzen. Vor diesem Hintergrund adressierte das Projekt VR4UrbanDev die Forschungsfrage, wie diese heterogenen Datenströme durch die Kombination von Digitalen Zwillingen mit Virtual Reality (VR) intuitiv erfahrbar gemacht werden können. Ziel war die Steigerung der Effizienz und Transparenz in Planungsprozessen durch einen interdisziplinären Ansatz an der Schnittstelle von Informatik, Energietechnik und Sozialwissenschaften. Daten aus Building Information Modeling (BIM)-Modellen, Gebäudeenergiesimulationen (UBEM) und Internet of Things (IoT)-Echtzeitmonitoring werden zusammengeführt und aufbereitet. Technologisch wurde die Unreal Engine 5 über eine eigens entwickelte Middleware, den Data-Translation-Layer, mit der Simulationssoftware IDA ICE und einer auf FIWARE basierenden IoT-Plattform – dem Inframonitor, gekoppelt. Ein zentraler Bestandteil der Methodik war der User-Centred Design-Prozess: Der Prototyp wurde in iterativen Co-Creation-Workshops mit Planer:innen, Facility Manager:innen und Energieforscher:innen entwickelt. Hauptergebnis des Projekts ist ein voll funktionsfähiger, immersiver Digitaler Zwilling des Innovation District Inffeld der TU Graz in VR. Es gelang, die semantische Lücke zwischen abstrakten Energiedaten und geometrischen Modellen zu schließen, indem intelligente Objekte unsichtbare Phänomene – wie Energiebedarf oder CO<sub>2</sub>e-Emissionen – direkt auf Gebäudemodellen und anderen Objekten im virtuellen Raum visualisieren. Die Evaluierung bestätigte mit einem System-Usability-Scale (SUS) Score von 75,3 eine gute Gebrauchstauglichkeit. Das Feedback aus unseren Nutzer:innenbefragungen und Userworkshops zeigte zudem, dass die immersive Darstellung das Verständnis für komplexe Zusammenhänge in der integrativen Quartiersentwicklung verbessern kann. Basierend auf diesen Ergebnissen wurden Geschäftsmodellansätze und Verwertungsstrategien für die Projektpartner abgeleitet. Abschließend demonstriert das Projekt, dass moderne Consumer-VR-Hardware (z.B.: Meta Quest 3) in Kombination mit automatisierten Datenpipelines eine solide Grundlage für die zukünftige Forschungsarbeit darstellt. Die Ergebnisse bilden die Basis für ein Living Lab an der TU Graz sowie für weiterführende Forschungsprojekte im Projektkonsortium und zeigen das hohe Potenzial der Technologie für vielfältige Anwendungsbereiche wie die integrative Stadtentwicklung, Wissenschaftskommunikation, Stakeholder-Beteiligungsprozesse, Qualitätssicherung im Bau oder effizientes Facility Management.

## 2 Abstract

Planning climate-neutral urban districts requires the integrated consideration of complex datasets from Urban Building Energy Modeling (UBEM), Building Information Modeling (BIM) models, and Internet of Things (IoT) real-time monitoring. Conventional 2D planning tools and spreadsheets often reach their limits in this context, making it difficult to communicate complex interrelationships to decision-makers and other stakeholders. Against this backdrop, the VR4UrbanDev project addressed the research question of how these heterogeneous data streams can be made intuitively accessible by combining digital twins with virtual reality (VR). The goal was to increase efficiency and transparency in planning processes through an interdisciplinary approach at the intersection of computer science, energy engineering, and the social sciences. Technologically, Unreal Engine 5 was coupled with the simulation software IDA ICE and an IoT platform based on FIWARE – the Inframonitor – via specially developed middleware, the Data Translation Layer. A central component of the methodology was the user-centered design process: the prototype was developed in iterative co-creation workshops with planners, facility managers, and energy researchers. The main outcome of the project is a fully functional, immersive digital twin of the TU Graz Innovation District Inffeld in VR. The semantic gap between geometric models and abstract energy data was closed by using intelligent objects to visualize invisible phenomena—such as energy demand or CO<sub>2</sub>e emissions—directly on building models and other objects in virtual space. The evaluation confirmed good usability with a System Usability Scale (SUS) score of 75.3. Feedback from our user surveys and workshops also indicated that immersive visualization can improve the understanding of complex interrelationships in integrated district development. Based on these results, business model approaches and commercialization strategies were derived for the project partners. Finally, the project demonstrates that modern consumer VR hardware (e.g., Meta Quest 3), in combination with automated data pipelines, provides a solid foundation for follow-up research work. The results form the basis for a living lab at TU Graz as well as further research projects within the consortium, and they demonstrate the high potential of the technology for diverse applications such as integrated urban development, science communication, stakeholder engagement processes, quality assurance in construction, and efficient facility management.

# 3 Ausgangslage

## 3.1. Problemstellung und Forschungsbedarf

Die Zukunftsfähigkeit urbaner Räume ist untrennbar mit der Umsetzung der Energiewende und der Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels verbunden. Dies erfordert die Entwicklung von Städten und Quartieren, die nicht nur klimaneutral und energieeffizient, sondern auch resilient und lebenswert sind. Der Planungsprozess dieser integrativen Stadtentwicklung zeichnet sich durch die simultane Berücksichtigung und Verknüpfung zahlreicher Disziplinen aus – von der Energieversorgung über die Bautechnik bis hin zu sozialen und sozioökonomischen Aspekten.

Ein exemplarisches Beispiel für diese Komplexität ist das am Institut für Wärmetechnik (IWT) im Rahmen des Forschungsprojektes ECR Smart City 2020 entwickelte Numerische Energiesystemmodell [1], siehe Abbildung 1. Dieses Modell integriert die Wechselwirkungen verschiedener Sektoren wie z.B. Städtebau, thermische Versorgungssysteme, Energieraumplanung oder Stadt-Klima-Simulation und verdeutlicht damit die multivariate Natur des Forschungsgegenstandes.

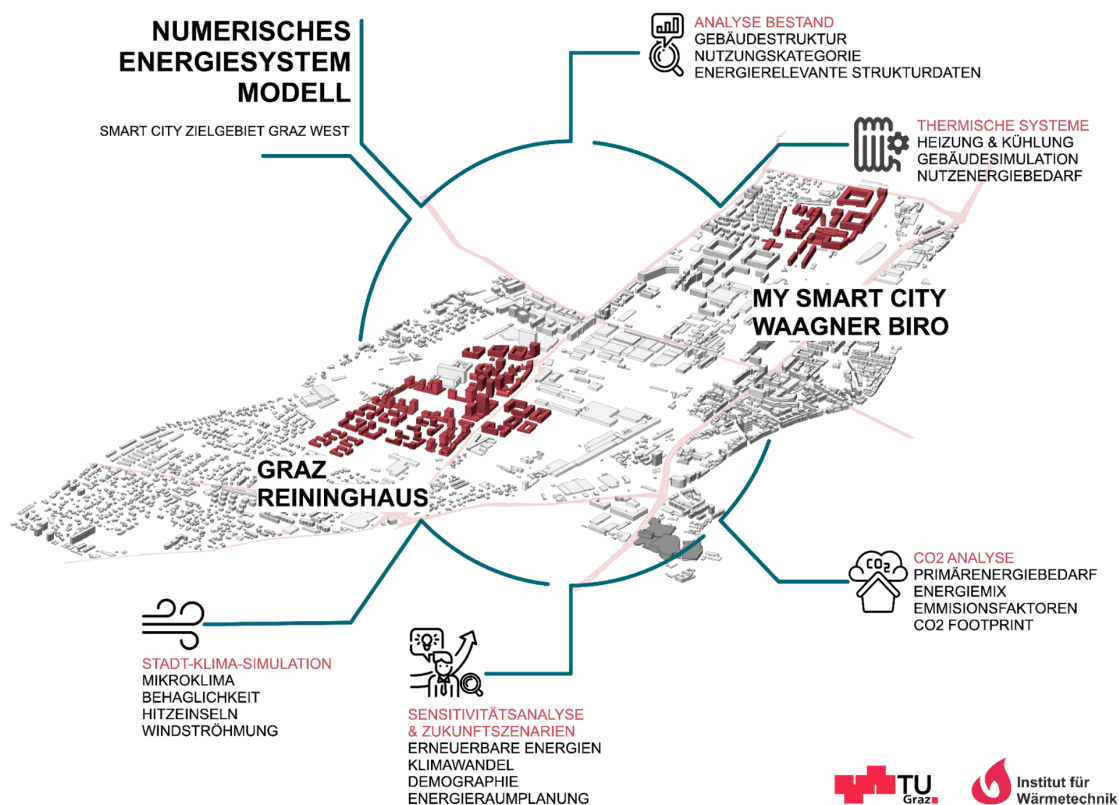


Abbildung 1: Das vom IWT im Rahmen des ECR-Smart City 2020-Projekts entwickelte numerische Energiesystemmodell; Quelle: VR4UrbanDev

Die Transformation hin zu nachhaltigen und klimaresilienten Stadtquartieren stellt ein hochkomplexes Spannungsfeld dar. Planungsentscheidungen erfordern die Berücksichtigung einer umfangreichen Menge an interdisziplinären Daten – von Energieflüssen und Emissionswerten bis hin

zu architektonischen Faktoren. Zum Zeitpunkt der Antragstellung zeigte sich eine signifikante Diskrepanz zwischen der Komplexität dieser Anforderungen und der Leistungsfähigkeit verfügbarer digitaler Werkzeuge. Da Gebäude und Stadtquartiere zunehmend integral entwickelt werden, sind unterschiedlichste Fachdisziplinen simultan in den Prozess eingebunden. Die daraus resultierende Datenvielfalt und die interdependenten Parameter (z. B. Bauphysik in Wechselwirkung mit Energieversorgung) sind für den Menschen kognitiv schwer erfassbar.

Herkömmliche Planungswerkzeuge beschränken sich meist auf zweidimensionale Darstellungen oder isolierte 3D-Ansichten ohne tiefere Informationsschicht. Es bestand daher die dringende Notwendigkeit, digitale Technologien zu entwickeln, die Daten nicht nur verwalten, sondern diese für Planer:innen, Entscheidungsträger:innen und Laien intuitiv verständlich aufbereiten. Die derzeit verwendeten digitalen Werkzeuge generieren massive Datenströme:

- 3D-CAD- und Stadtmodelle (BIM/UIM/CIM) mit hoher geometrischer Komplexität und einer Vielzahl darin hinterlegter Metadaten.
- Gebäudeenergiesimulationen (UBEM) mit zeitlich hoch aufgelösten Ergebnisdaten.
- IoT-Datenmonitoring mit kontinuierlichen Echtzeitströmen aus dem realen Betrieb.

Traditionelle Visualisierungsmethoden wie 2D-Dashboards oder statische Tabellen stoßen bei der intuitiven Aufbereitung dieser multidimensionalen Datensätze an ihre Grenzen. Zur Bewältigung dieser Herausforderung bieten Digitale Zwillinge (Digital Twins, DTs) in Kombination mit Virtual Reality (VR) ein vielversprechendes Potenzial, um Forschungsinhalte effizienter zu erfassen, zu analysieren und zu kommunizieren. Allerdings existiert derzeit eine signifikante Forschungslücke bei der systematischen Kombination von dynamischen Digital-Twin-Konzepten mit immersiver VR-Technologie, insbesondere im Kontext der urbanen Energieforschung.

Das Projekt VR4UrbanDev zielte darauf ab, diese Lücke zu schließen. Durch die Entwicklung einer einfach zu bedienenden, auf natürlichen Interaktionen basierenden Nutzer:innen-Umgebung in VR wurde die Lernkurve für Endanwender optimiert. Dies soll den Einsatz von VR in realen Projekten und Forschungsszenarien zu einer praktikablen Lösung für alle beteiligten Akteur:innen machen.

## **3.2. Ziele des Projektes**

Im Rahmen des VR4UrbanDev-Projekts wurde die identifizierte Forschungs- und Entwicklungslücke aufgegriffen, um eine immersive 3D-Forschungsumgebung für Digitale Zwillinge der nächsten Generation zu realisieren. Die Projektziele lassen sich in drei thematische Schwerpunkte gliedern:

Technologische Integration und Entwicklung:

- Kombination von Kerntechnologien: Die Verschmelzung von Virtual Reality (VR) mit Digital-Twin-Konzepten, um eine Grundlage für eine integrative und smarte Stadtentwicklung zu schaffen.
- Kopplung von Datenquellen: Die direkte technische Verbindung der VR-Umgebung mit der Gebäude-Energiesimulation (UBEM) und der Datenkommunikation im Internet der Dinge (IoT).

Usability und Nutzer:innenzentriertes Design (UX):

- Intuitives Design: Konzentration auf die Gestaltung von natürlichen, intuitiven und einfach zu bedienenden VR-Umgebungen, um komplexe Forschungsinhalte verständlich zu kommunizieren.
- Visualisierungskompetenz: Erprobung und Validierung der immersiven Darstellung von Daten, um Parameteränderungen und Kernaussagen sofort sichtbar und nachvollziehbar zu machen.

Demonstration, Validierung und Verwertung:

- Demonstration: Die Demonstration der neuartigen VR-Umgebung im realen Anwendungsfall, dem Testareal TU Graz - Innovation District Inffeld[2].
- Validierung: Die Durchführung von Tests mit zukünftigen Nutzer:innen unter sozialwissenschaftlicher Begleitung zur Erfassung des Nutzer:innen-Feedbacks und dessen Integration in die Technologieentwicklung.
- Dissemination: Die wissenschaftliche und wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse.

### 3.3. Stand der Technik

Der aktuelle Stand der Forschung verdeutlicht sowohl das Innovationspotenzial des Projekts als auch die Notwendigkeit der gewählten Integrationsstrategie. Die nachfolgenden Abschnitte legen dar, dass in den relevanten Teildisziplinen – der Immersiven Analytik, dem VR-gestützten Planen und der Forschung zu Digitalen Zwillingen – bereits erhebliche Fortschritte erzielt wurden. Dennoch existiert in der Literatur eine nachweisbare Lücke hinsichtlich der systematischen und nutzer:innenzentrierten Verknüpfung dieser technologischen Stränge. Dies gilt insbesondere für die Anforderung, hochfrequente, dynamische Daten aus Gebäudeenergiesimulationen (Urban Building Energy Modeling - UBEM) und Internet of Things (IoT)-Monitoring in Echtzeit in einem immersiven Digital Twin zu verorten und interaktiv zugänglich zu machen.

Zu Projektbeginn war der Stand der Technik durch eine technologische „Silo-Bildung“ gekennzeichnet, die es zu überwinden galt. Auf der einen Seite hatten sich Digitale Zwillinge (Digital Twins) als mächtige Instrumente für das Monitoring und die Simulation von Zuständen in Industrie und Städtebau etabliert. Diese Systeme bleiben in ihrer Darstellung jedoch oft abstrakt und für Nicht-Experten schwer zugänglich („Zahlenfriedhöfe“). Auf der anderen Seite existierten Virtual Reality (VR) Anwendungen, die vorwiegend für visuelle Beeindruckung im Marketing oder im Gaming-Bereich genutzt wurden.

In der wissenschaftlichen Literatur fanden sich zwar Ansätze zur Nutzung von VR in der Landschaftsplanung, wie etwa bei Liu [3], der die Vorteile dreidimensionaler Visualisierung für das Design betonte. Auch Arbeiten wie „Vis-A-Ware“ von Ortner et al. [4] zeigten Wege auf, räumliche und nicht-räumliche Informationen integrativ darzustellen. Es fehlte jedoch an einer tiefgreifenden Kopplung beider Welten: Eine VR-Umgebung, die über statische Geometrien hinausgeht und dynamische Energiedaten eines Digitalen Zwillings in Echtzeit erlebbar macht. Zudem wurden kognitive Aspekte in bisherigen Lösungen oft vernachlässigt. Da das menschliche Gehirn virtuelle

Umgebungen als real wahrnimmt, bietet VR das Potenzial, komplexe Sachverhalte ohne langwierige kognitive Transferleistungen erfassbar zu machen.

Das Projekt baute auf den Erkenntnissen des Vorläuferprojekts „KityVR“ [5] auf. Dieses zeigte zwar das prinzipielle Potenzial der Technologie, unterstrich jedoch gleichzeitig die Notwendigkeit, Entwicklungslücken und technologische Hürden durch ein professionelles, nutzer:innenzentriertes UX-Design systematisch zu adressieren.

### **3.3.1. Immersive Analytik mit Virtual Reality (VR)**

Das Konzept der Immersiven Analytik (Immersive Analytics) repräsentiert eine interdisziplinäre Schnittstelle, welche die Forschungsfelder Visualisierung, immersive Umgebungen und Mensch-Computer-Interaktion (Human-Computer Interaction - HCI) vereint. Der zentrale Zweck besteht in der qualitativen und quantitativen Analyse hochkomplexer, multidimensionaler Datensätze unter Nutzung des räumlichen und intuitiven Potenzials immersiver Technologien.

Eine von Ens et al. [6] durchgeführte Studie hob die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen für die erfolgreiche Umsetzung von Immersiver Analytik hervor. Die Autoren klassifizieren diese Herausforderungen in fünf Kernbereiche:

1. Infrastruktur und Werkzeuge: Limitierungen durch Hard- und Software.
2. Interaktion und Fidelity: Gestaltung natürlicher und präziser Interaktionsmöglichkeiten.
3. Menschliche Faktoren und Zusammenarbeit: Kognitive Belastung und Kollaborationsfähigkeit.
4. Datenintegration und Skalierbarkeit: Umgang mit großen, heterogenen Datenmengen.
5. Evaluierung und Benchmarking: Messung des Nutzens und der Usability.

Diese identifizierten Herausforderungen verdeutlichen die Komplexität des Feldes und untermauern die Notwendigkeit von Projekten, die sich gezielt auf die Überwindung dieser Barrieren konzentrieren, insbesondere im Bereich der Usability (z. B. Intuitives Design). Solche Ansätze nutzen VR-Umgebungen, um Daten – oft als 2D- oder 3D-Diagramme – in den virtuellen Raum zu projizieren.

Whitlock et al. [7] untersuchten in ihrer Arbeit zur grafischen Wahrnehmung für immersive Analytik systematisch die Grundlagen der Darstellung von Datencodierungen. In einem direkten Vergleich zwischen traditionellen 2D-Visualisierungen und neuartigen 3D- oder räumlich verorteten Darstellungen in VR/AR analysierten sie, welche Arten von Datencodierungen (wie Länge, Winkel, Fläche oder Volumen) in immersiven Umgebungen am effektivsten wahrgenommen und interpretiert werden.

### **3.3.2. Entwerfen und Planen mit VR**

VR-Technologien finden bereits Anwendung in der Architektur, im Bauwesen und in der Stadtplanung. Hier dienen sie primär zur statischen Visualisierung von 3D-Modellen, Planungsentwürfen und GIS-Daten.

Die Grundlagen dazu liefern Entwurfs- und Planungsmethoden wie Building Information Modeling (BIM)[8] oder Urban und City Information Modeling[9] (UIM/CIM). BIM ist eine digitale, modellbasierte Methode für Planung, Bau und Betrieb einzelner Bauwerke: Ein zentrales 3D-Modell

bündelt Geometrie, Eigenschaften, Kosten und Termine, unterstützt Kollisionsprüfung, Zusammenarbeit und Lebenszyklus-Management. CIM und UIM überträgt das Prinzip auf Stadt- und Quartiersebene. 3D-Stadtmodelle verknüpfen GIS-, Infrastruktur-, Verkehrs-, Umwelt- und Sozialdaten für Analysen zu Entwicklung, Energie, Mobilität, Resilienz und Klimaanpassung. BIM ist gebäufokussiert und detailliert. CIM und UIM integrieren heterogene Daten skalenübergreifend für strategische Entscheidungen.

Studien und Expert:innenumfragen, wie jene von Davila Delgado et al. [10], belegen den signifikanten Nutzen immersiver Technologien, insbesondere für die kollaborative Planung und das Design-Review. Die Autor:innen betonen, dass VR das räumliche Verständnis fördert und die frühzeitige Identifizierung von Entwurfsfehlern verbessert, wodurch Zeit und Kosten in komplexen Bauprojekten eingespart werden können.

Auch im Bereich der immersiven Analysen in der Stadtplanung existieren Vorarbeiten. Projekte wie UrbanVR [11], Vis-A-Ware [4] und die CityEngine VR Experience for Unreal Engine [12] demonstrieren die Visualisierung von Stadtlandschaften und Planungsdaten (siehe Abbildung 2). UrbanVR stellt beispielsweise eine Plattform zur Untersuchung von Urban-Heat-Island-Effekten dar, lässt jedoch die Verbindung zu dynamischen, hochfrequenten Energiesimulationen vermissen. Das Projekt CityPlanner [13] liefert eine umfassende 3D-Anwendung, die es Nutzer:innen ermöglicht, städtebauliche Pläne zu manipulieren und Szenarien zu vergleichen.

Diese Lösungen legen den Grundstein für die räumliche Darstellung und Interaktion mit statischen oder vordefinierten Datensätzen. Sie bieten jedoch keine Integration dynamischer Simulations- oder IoT-Echtzeitdaten. Die Notwendigkeit der Integration solcher dynamischer Datenströme, um Entscheidungen auf Basis aktueller oder simulierter Betriebsbedingungen zu treffen, stellt die zentrale Lücke dar, die VR4UrbanDev adressiert.

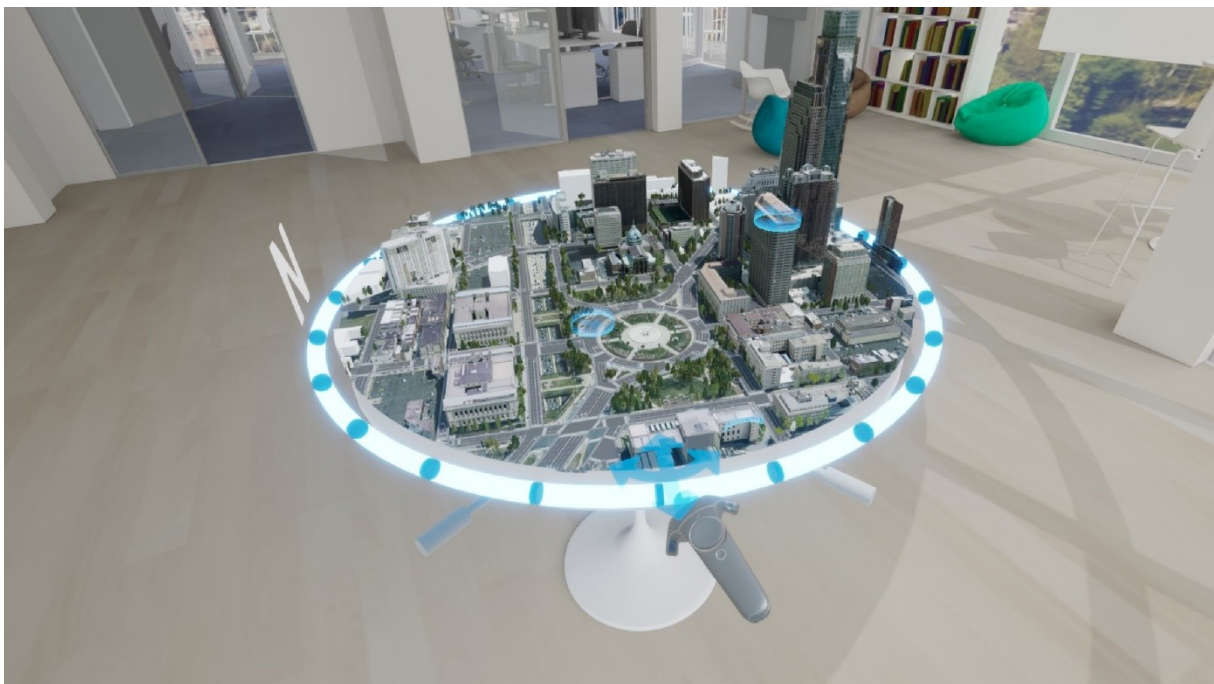


Abbildung 2: The CityEngine VR Experience for Unreal Engine [12]; Quelle: ESRI

### **3.3.3. Digitale Zwillinge und Virtual Reality**

Das Interesse an Digitalen Zwillingen (DT) ist in Wissenschaft und Industrie in den letzten Jahren stark angestiegen, und das Konzept hat sich als zentrale Technologie der Industrie 4.0 etabliert. Enders und Hoßbach [14] identifizierten in ihrer Arbeit die Hauptzwecke von DT-Anwendungen in den Bereichen Simulation, Überwachung und Steuerung physischer Systeme. Die Einführung des DT-Konzepts im urbanen Kontext (Urban Digital Twin) zielt darauf ab, die Stadt als komplexes, lebendiges System abzubilden, wodurch beispielsweise die Auswirkungen der Energiewende auf Quartiersebene simuliert werden können.

Jones et al. [15] charakterisierten in ihrer systematischen Literaturrecherche die Merkmale von Digitalen Zwillingen und identifizierten dabei eine bedeutende Lücke: Das Fehlen geeigneter visueller Interaktionsformen, um die multidimensionalen Daten und dynamischen Zustände des Zwillings intuitiv zugänglich zu machen. Die Autor:innen betonen, dass die volle Ausschöpfung des Potenzials von Digital Twins, insbesondere im Hinblick auf Echtzeit-Analyse und interaktive Szenarienplanung, ohne eine adäquate Mensch-Maschine-Schnittstelle nicht möglich ist. Virtual Reality wird in diesem Kontext explizit als zukünftige Schlüsseltechnologie benannt, da sie die erforderliche räumliche Verortung der Daten und eine natürliche Interaktion ermöglicht.

### **3.3.4. Internet of Things (IoT) Datenkommunikation und Visualisierung**

Innovative Energiedienstleistungen stützen sich auf eine bidirektionale Echtzeitkommunikation mit dem Energiesystem, die durch IoT-Technologien und leistungsfähige Middleware-Plattformen ermöglicht wird. Bekannte kommerzielle Cloud-Lösungen wie Amazon Web Services IoT [16] und Microsoft Azure IoT [17] bieten umfassende Infrastrukturen zur Erfassung, Speicherung und Verarbeitung massiver Datenmengen aus vernetzten Sensoren und Aktoren. Die offene Middleware-Plattform FIWARE [18] hat sich insbesondere im Smart-City-Kontext als Standard etabliert, da sie semantische Datenmodelle (Context Broker) zur Verfügung stellt, welche die Interoperabilität und Kontextualisierung der IoT-Daten gewährleisten. Diese Plattformen erlauben die hochfrequente Erfassung dynamischer Zustände wie Energieflüsse, Temperaturwerte oder Nutzer:innen-Verhaltensmuster.



Abbildung 3: Beispiel für die Darstellung einer Energiemonitoring-Oberfläche in Grafana [19]; Quelle: Grafana

Für die Visualisierung dieser dynamischen Daten werden derzeit jedoch primär vereinfachte 2D-Lösungen eingesetzt. Grafana Dashboards [19] sind weit verbreitet und stellen Daten in Formen wie Zeitreihengrafiken, Tabellen und Diagrammen dar (siehe Abbildung 3). Obwohl diese Dashboards eine hervorragende Übersicht über aggregierte Systemzustände bieten, erfolgt die Darstellung losgelöst vom physischen Ort der Datenerfassung. Dies erschwert die intuitive Zuordnung von Problemen oder Anomalien zu spezifischen Komponenten oder Gebäuden im Quartier, was für die Fehlerdiagnose und das systemische Verständnis von zentraler Bedeutung ist. Eine räumlich verortete und immersive 3D-Visualisierung, die Echtzeitdaten direkt auf die entsprechenden Gebäude im Digital Twin projiziert, stellt daher den notwendigen Entwicklungsschritt dar, um die Lücke zwischen abstrakter Datenanalyse und physischem Kontext zu schließen.

### 3.3.5. Wissenschaftliche Inhalte verständlich kommunizieren

Die verständliche Kommunikation komplexer wissenschaftlicher Inhalte ist ein entscheidender Erfolgsfaktor. Die Forschung im Projekt VR4UrbanDev stützt sich hierbei auf Erkenntnisse der Kognitionspsychologie und die Prinzipien effektiver Wissenschaftskommunikation.

Der Kognitionspsychologe Daniel Kahneman untersuchte in seinem Werk „Thinking, Fast and Slow“ [20] die duale Verarbeitung von Informationen im menschlichen Gehirn: System 1 arbeitet schnell und intuitiv, System 2 langsam und analytisch. Die Überlastung des analytischen Systems 2 geschieht schnell, wenn Planer:innen mit umfangreichen Tabellen und hochfrequenten Zeitreihen konfrontiert sind. Die immersive VR-Umgebung hingegen nutzt die angeborene Fähigkeit des Gehirns, räumliche Informationen schnell zu verarbeiten (System 1). Durch die Verortung von Simulationsergebnissen direkt auf den physischen Gebäuden ermöglicht das System eine unmittelbare, prä-attentive (vorbewusste) Erfassung von Mustern und Anomalien. Dies reduziert die kognitive Belastung und beschleunigt den Übergang von der Datenbetrachtung zur Erkenntnis.

Dieser Ansatz folgt dem Prinzip klarer, intuitiver Kommunikation, wie sie von führenden Wissenschaftskommunikatoren praktiziert wird:

**Hans Rosling** [21,22] wurde bekannt durch seine Praxis, komplexe globale Daten mittels dynamischer Visualisierungen (z. B. animierte Blasendiagramme) in Bewegung zu setzen, um intuitive Kernaussagen sofort erfassbar zu machen. Sein Fokus lag auf der Transformation abstrakter Statistiken in zugängliche Geschichten. In VR4UrbanDev wird dies durch die räumliche Repräsentation von Energieflüssen umgesetzt, etwa durch farbliche Codierung der Gebäudehülle. Diese dynamische Verortung unterstützt das räumliche Gedächtnis, was Retention und Verständnis erhöht.

**Richard Dawkins** [23] betont die Notwendigkeit der anschaulichen Wissensvermittlung komplexer Konzepte durch klare Analogien. Im Kontext des Projekts wird dieser Forderung entsprochen, indem komplexe technische Zusammenhänge (wie der Wärmedurchgang im Bodenaufbau) in intuitive visuelle Erlebnisse übersetzt und somit greifbar gemacht werden.

Die immersive Visualisierung im VR4UrbanDev-Projekt baut auf diesen Prinzipien auf, indem sie abstrakte Zahlen und hochfrequente Zeitreihen in erfahrbare, räumliche Objekte transformiert. Dies dient dazu, langwierige analytische Denkprozesse zu umgehen und das schnelle, intuitive Erfassen von Kernaussagen zu ermöglichen, was die Entscheidungsfindung im dynamischen urbanen Planungskontext erleichtert.

# 4 Projektinhalt

Das Projekt verfolgte einen interdisziplinären Ansatz, der Informatik, Energietechnik und Sozialwissenschaften verknüpfte. Im Folgenden werden die spezifische Strategie, die eingesetzte Technologie sowie die methodische Umsetzung im Testfeld detailliert beschrieben.

## 4.1. Vorgehensweise und Strategie in VR4UrbanDev

Die Kernstrategie von VR4UrbanDev zielte auf die Auflösung der kognitiven Diskrepanz zwischen abstrakten Simulationsergebnissen sowie IoT-Datenströmen und der intuitiven, menschlichen Raumerfahrung ab. In herkömmlichen stadtplanerischen Prozessen dominieren zweidimensionale Pläne und komplexe Tabellenkalkulationen, die eine enorme kognitive Interpretationsleistung erfordern und oft nur von Fachexperten vollständig interpretiert werden können. Der Ansatz dieses Forschungsprojekts transformiert diese abstrakten Informationsschichten in eine direkt erlebbare, räumliche Sprache: Energetische Kennzahlen werden zu sichtbaren Farben auf Fassaden und Objekten und unsichtbare CO<sub>2</sub>e-Emissionen im virtuellen Raum greifbar gemacht.

Abbildung 4 visualisiert schematisch, wie die heterogenen Datenströme in der VR-Umgebung zusammenlaufen, um ein ganzheitliches, immersives Lagebild zu erzeugen. Dabei wurden drei essenzielle Ebenen technisch und inhaltlich fusioniert:

1. Die physische Realität des Stadtquartiers wird durch hochdetaillierte 3D- und BIM-Modelle geometrisch repräsentiert und semantisch angereichert. Als konsistentes Geometrie- und Datenmodell bilden sie das räumlich-visuelle sowie informationelle Referenzsystem für weiterführende Analysen, Simulationen und Planungsprozesse.
2. Die digitale Erfassung des Ist-Zustands durch IoT-Monitoring (Sensorik) belebt das statische Modell mit dynamischen Echtzeitdaten und spiegelt den aktuellen energetischen Zustand des Quartiers wider.
3. Die prädiktive Ebene der Simulation (Zukunftsszenarien) erlaubt es, die Auswirkungen potenzieller Planungsentscheidungen – wie thermische Sanierungen oder Infrastrukturausbau – vorwegzunehmen und visuell kontextualisiert darzustellen.

Durch diese Verschmelzung wird der Digitale Zwilling von einem reinen Analyseinstrument für Spezialisten zu einer immersiven Kommunikationsplattform für alle Stakeholder transformiert.

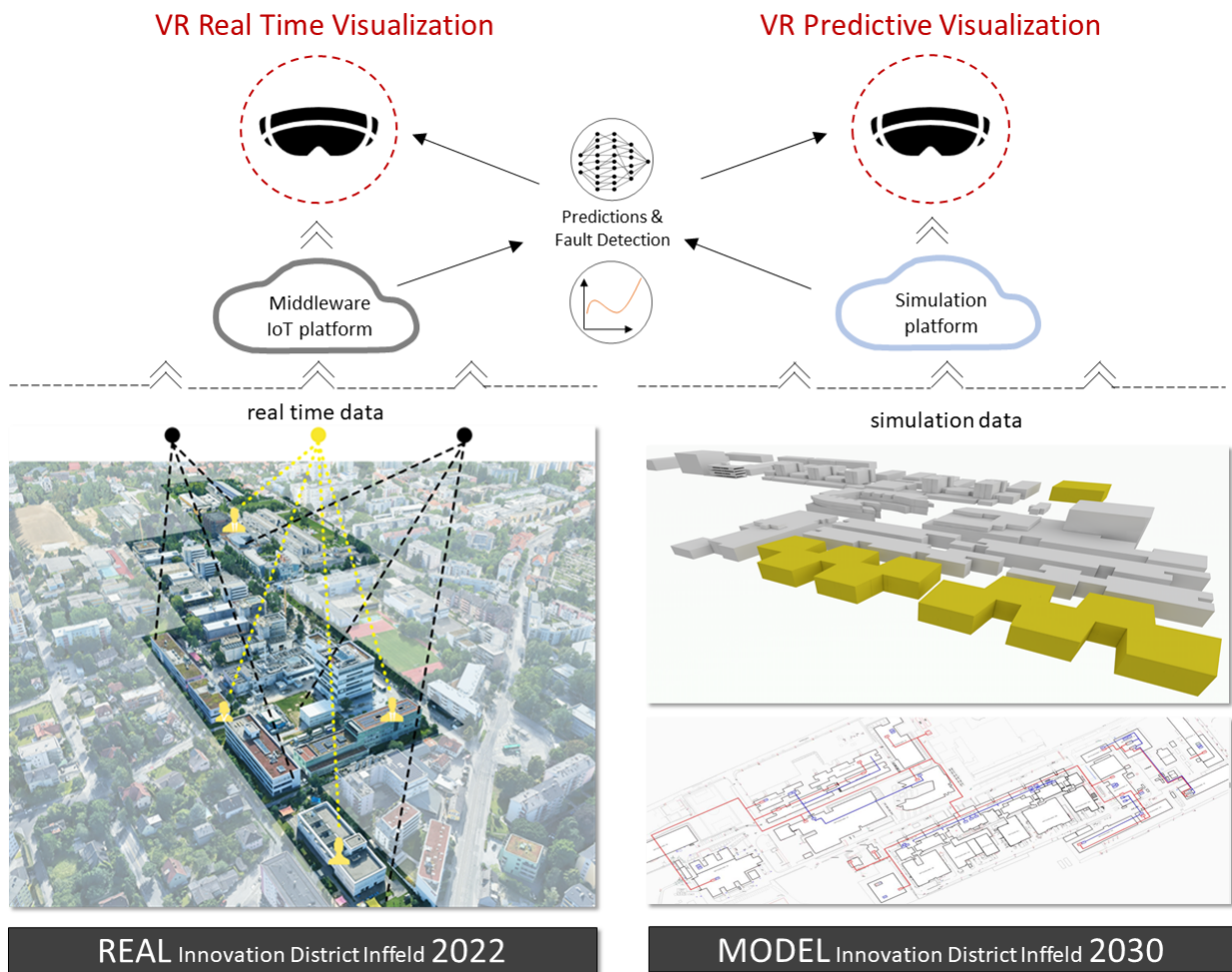


Abbildung 4: Schema, wie Echtzeit- und Simulationsdaten des Innovation District Inffeld in die VR-Umgebung integriert werden. Quelle: VR4UrbanDev

Diese technologische Integration ermöglichte die unmittelbare räumliche Begehung komplexer Szenarien, wie der Variation von Setpoints für Heizung und Kühlung oder der energetischen Sanierung von Gebäuden. Entscheidungsträger:innen sind so in der Lage, die Auswirkungen von Eingriffen visuell und kontextbezogen zu bewerten, bevor reale Investitionen getätigt werden.

## 4.2. Verwendete VR-Technologien

Die Wahl der geeigneten Software-Plattform bildete das Fundament der technischen Entwicklung. Nach einer eingehenden Analyse fiel die Entscheidung bewusst auf die Unreal Engine (UE). Ausschlaggebend war neben der grafischen Leistungsfähigkeit vor allem die Eignung für komplexe Architekturvisualisierungen sowie die mögliche Anbindung an 3D-CAD-Software. Die Unreal Engine bot hierfür entscheidende Werkzeuge:

- VR-Integration via OpenXR: Die native Unterstützung des OpenXR-Standards gewährleistet die Kompatibilität mit gängigen Headsets (z. B. Meta Quest, HTC Vive) und sichert die Zukunftsfähigkeit der Anwendung gegenüber neuer Hardware.
- Fortschrittliches Beleuchtungssystem (Lumen & Raytracing): Die realistische Darstellung von Licht und Schatten ist funktional notwendig. Durch Hardware-Raytracing und das globale

Beleuchtungssystem Lumen konnten Umweltfaktoren wie Solareinstrahlung und Verschattung physikalisch plausibel simuliert werden. Diese hohe visuelle Wiedergabetreue (Fidelity) erhöht die Glaubwürdigkeit der Simulation und das Präsenzgefühl der Nutzer:innen.

- **Datasmith & Modellimport:** Für den Umgang mit komplexen 3D-CAD-Modellen (BIM/UIM) erwies sich die Datasmith-Schnittstelle als gut geeignet. Sie ermöglicht den Import von CAD-Daten samt darin vorhandener Metadaten.

Unreal Engine ermöglicht es außerdem, die Umgebung auf verschiedene Arten zu implementieren: C++ diente der Implementierung performanzkritischer Funktionen, während Blueprints mittels Visual Scripting das schnelle Erstellen von Prototypen ermöglichten. Die Modellierungssoftware Blender wurde außerdem zur Erstellung speziell angepasster Gegenstände in der virtuellen Umgebung genutzt.

### **4.3. Testfeld, Datenbasis und Erhebungsmethodik**

Als Reallabor diente der Innovation District Inffeld[2] der TU Graz. Der Campus Inffeldgasse wurde in Anlehnung an die Nachhaltigkeitsstrategie der Technischen Universität Graz „CO<sub>2</sub>-neutrale TU Graz bis 2030“[24] als Innovationsbezirk definiert. Strategisch relevant ist hierbei die Mischung verschiedener Gebäudetypen (Forschung, Büro, Lehre) sowie die existierende Sensorinfrastruktur. Die verwendeten Daten gliedern sich in drei Kategorien:

1. **Geometrie- und Kontextdaten (BIM/UIM):** Diese umfassen statische 3D-Modelle, BIM- und UIM-Daten, Grundrisse sowie GIS-Informationen. Die Daten wurden teils aus bestehenden Modellen der TU Graz übernommen, teils im Projektverlauf erweitert. Ein zentraler Schritt war die Entwicklung einer Pipeline für den Datentransfer aus der 3D-CAD-Software in die Unreal Engine.
2. **Simulationsdaten (UBEM):** Hierbei handelt es sich um hochaufgelöste Zeitreihen (15-Minuten-Intervalle) für Energieflüsse, Innenraum- und Oberflächentemperaturen. Die Daten basieren auf einem Urban Building Energy Modeling (UBEM), das mit der Software IDA ICE erstellt wurde. Die Ergebnisse wurden als strukturierte Datensätze exportiert und mit den 3D-Objekten in der VR-Umgebung verknüpft.
3. **Echtzeitdaten (IoT-Monitoring):** Diese Ebene umfasst aktuelle Messwerte und daraus berechnete Verbräuche aus dem laufenden Betrieb. Die Datenakquise erfolgt über die Sensorinfrastruktur der TU Graz. Die Aggregation übernimmt eine auf FIWARE aufbauende Middleware-Plattform – dem Inframonitor, dessen Programmierschnittstelle der VR-Anwendung die Abfrage von Zustandsänderungen in Nahe-Echtzeit ermöglicht.

### **4.4. Sozialwissenschaftliche Begleitung der Technologieentwicklung**

Die sozialwissenschaftliche Begleitung fungierte als Bindeglied zwischen technologischer Machbarkeit und praktischer Anwendbarkeit. Um Akzeptanzproblemen vorzubeugen, verfolgte das Projekt einen iterativen Co-Creation-Ansatz, bei dem potenzielle Nutzer:innen (Planer:innen, Facility Manager:innen, Energieforscher:innen) während der Entwicklungsphasen eingebunden wurden. Methodisch kam ein Mix aus qualitativen (Leitfadeninterviews, Think-Aloud-Protokolle) und einem

quantitativen Instrument (Fragebogen zur Usability) zum Einsatz. Die Untersuchung konzentrierte sich auf drei Säulen:

1. Usability und UX-Faktoren (Kognitive Ergonomie): Untersucht wurden die Intuitivität der Navigation und die kognitive Verarbeitung abstrakter Energiedaten. Ziel war die Vermeidung kognitiver Überlastung (Cognitive Overload) durch Optimierung der VR-Umgebung.
2. Technologieakzeptanz und Integrationspotenzial: Analysiert wurde, welche Defizite im Arbeitsalltag durch die VR-Lösung adressiert werden und wo Integrationsbarrieren bestehen. Im Fokus standen der wahrgenommene Nutzen (Perceived Usefulness) und die Handhabung (Perceived Ease of Use) gemäß dem Technology Acceptance Model (TAM).
3. Soziale und Diversitätsaspekte: Aufmerksamkeit wurde in der Technologieentwicklung auch auf das Phänomen der Kinetose (Cybersickness) gelegt. Unterschiedliche Fortbewegungsarten (von Teleportation bis flüssiger oder fliegender Bewegung) wurden implementiert und die Verträglichkeit bei den Usertests abgefragt.

Die Ergebnisse flossen in einer direkten Rückkopplungsschleife in die Entwicklung ein, was beispielsweise zur Anpassung der Fortbewegungseinstellungen und der Einführung visueller Referenzpunkte führte.

## 4.5. Reflexion der Methoden und Herausforderungen

Die Kombination aus Unreal Engine, IDA ICE Simulation und IoT-Kopplung sowie der Co-Creation-Ansatz haben die Machbarkeit des Forschungsansatzes grundsätzlich bestätigt. Die Unreal Engine erwies sich aufgrund ihrer Renderqualität als essenziell für die visuelle Glaubwürdigkeit. Der Co-Creation-Ansatz lieferte entscheidende Impulse zur Reduzierung der Lernkurve. Dennoch traten spezifische Herausforderungen auf:

**Technische Herausforderungen:** Eine zentrale Hürde war die Verschneidung der verschiedenen Daten: Während das physikalische Modell in IDA ICE auf vereinfachten thermischen Zonen basiert, erfordert die VR-Engine hochdetaillierte Geometrien auf Basis der BIM-Modelle. Gleichzeitig musste die IoT-Plattform eingebunden werden, deren Gebäudebezeichnung von den anderen Datenquellen abwich. Dies erschwerte die semantische Zuordnung der Daten. Zur Lösung wurde ein mehrstufiger Data-Translation-Layer implementiert. Dieser basierte auf einem maßgeschneiderten Import der Gebäudegeometrien und -Metadaten sowie einer speziell angepassten Verarbeitungspipeline in der Unreal Engine. Im Zuge dieser Pipeline wird eine Zuordnung der verschiedenen Daten vorgenommen, sodass die Daten in der virtuellen Umgebung korrekt lokalisiert und visualisiert werden können.

**Organisatorische und administrative Herausforderungen:** Die Logistik der Co-Creation-Workshops mit externen Stakeholder erforderte aufgrund der Bindung an die lokale Hardware viel Flexibilität in der Planung. Zudem zeigte sich eine Diskrepanz zwischen schnellen Innovationszyklen und starren Förderrichtlinien. Moderne Consumer-Hardware (z. B. Meta Quest 3) erwies sich oft als leistungsfähiger und kosteneffizienter als spezialisierte Industrie-Hardware, wurde jedoch administrativ zunächst als Unterhaltungselektronik kategorisiert. Dies erforderte proaktive Begründungen der technischen Notwendigkeit.

# 5 Ergebnisse

Als zentrales Ergebnis von VR4UrbanDev wurde eine immersive Virtual-Reality-Umgebung für das Testgebiet TU Graz - Innovation District Inffeld umgesetzt, welche vielfältige und heterogene Daten in einer Visualisierungsumgebung zusammenfasst. Die Resultate lassen sich in technologische Innovationen und nutzer:innenzentrierte Erkenntnisse unterteilen.

## 5.1. Gesamtsystem und Architektur des immersiven VR-Twins

Im Laufe des Projekts wurde eine voll funktionsfähige Systemarchitektur etabliert, die drei bisher getrennte Domänen in einer gekoppelten VR-Umgebung vereint. Erstens umfasst dies die statische Geometrie und Semantik in Form von detaillierten 3D-Modellen und BIM-Daten, welche die physische Struktur der Gebäude und des Quartiers repräsentieren. Zweitens integriert das System zeitreihenbasierte Energiedaten prädiktiver Szenarien (Was-wäre-wenn) aus der Gebäude- und Quartierssimulation (IDA ICE) . Die dritte Domäne bildet das operative IoT-Monitoring, das Echtzeitdaten aus der Sensorinfrastruktur (z.B.: Smart Meters, Temperatursensoren) integriert, um den aktuellen Betriebszustand abzubilden. Erst durch die Fusion dieser drei Ebenen entsteht ein vollständiger immersiver Digitaler Zwilling des Testgebiets.

Eine wesentliche technologische Hürde bestand in der semantischen Lücke zwischen den geometrischen Daten (Mesh) und den Simulationsdaten (Thermische Zonen). Hierfür entwickelte das Projektteam eine eigens implementierte Middleware-Lösung, den Data-Translation-Layer. Dieser Layer fungiert als Schnittstelle zwischen den verschiedenen Datenquellen und der Unreal Engine. Aufgrund der unterschiedlichen Bezeichnungen und Hierarchien der verschiedenen Datenquellen ist eine Vereinheitlichung notwendig, um diese Daten in der Unreal Engine verwenden zu können. Der Layer basiert auf den Importen mit dem Datasmith-Plugin[25] und einer eigens implementierten Datenpipeline in der Unreal Engine unter Zuhilfenahme von zusätzlichen Metadaten. In dieser Pipeline wird auf Basis der verschiedenen Eingangsdaten eine Datenstruktur aufgebaut, über welche die verschiedenen Datenquellen miteinander verschnitten werden können. In der Unreal Engine selbst kann dann über diese Datenstruktur auf die verschiedenen Daten zugegriffen werden, um sie zu visualisieren und mit ihnen zu interagieren.

Neben der datentechnischen Verarbeitung gelang es auch, die in der Gebäudesimulation berechneten physikalische Größen, die für das menschliche Auge unsichtbar sind, wie z. B. der Wärmeverlauf durch den Fußbodenaufbau (Virtuelle Sensoren zur Visualisierung unsichtbarer Phänomene [26]), in intuitive visuelle Metaphern zu übersetzen. Durch die Entwicklung von Parametergesteuerten Objekten in der Unreal Engine können Materialien nun ihre Farbe basierend auf ihren Simulationsergebnissen ändern. Die Integration der hochauflösenden Meta Quest 3 erwies sich als entscheidend für die Bildqualität und die Lesbarkeit von Texten im virtuellen Raum. Durch die Nutzung von OpenXR wurde eine hardware-agnostische Basis geschaffen, die auch zukünftige Headset-Generationen unterstützt. Neben der Meta Quest 3 wurden auch Geräte vom Typ Meta Quest 2, Meta Quest Pro, Valve Index, HP Reverb G2 und HTC Vive im Laufe des Projekts erfolgreich getestet.

### 5.1.1. Datengrundlage durch Simulation und IoT

Zur Generierung der Datengrundlage für die Visualisierung wissenschaftlicher Inhalte in der VR-Umgebung bearbeiteten wir unterschiedliche Simulationstätigkeiten auf Basis der Gebäudesimulationssoftware IDA ICE[27]. Die detaillierte, raumweise Modellierung des Gebäudes Inffeldgasse 19 ermöglicht eine präzise Analyse thermischer, energetischer und komfortrelevanter Eigenschaften sowie die Untersuchung verschiedener Szenarien und Parameter mit räumlicher Auflösung (Abbildung 5). Ergänzend setzten wir Zonenmultiplikatoren ein, um die Simulationsperformance signifikant zu erhöhen. Anstatt jede einzelne Zone im Detail zu berechnen, repräsentiert ein exemplarisch modellierter Zonenbereich bzw. ein Stockwerk das Verhalten, das anschließend mit der realen Anzahl von Stockwerken multipliziert wird. Diese Vorgehensweise reduziert die Rechenzeit erheblich und ist besonders vorteilhaft bei umfangreichen Szenariotests.

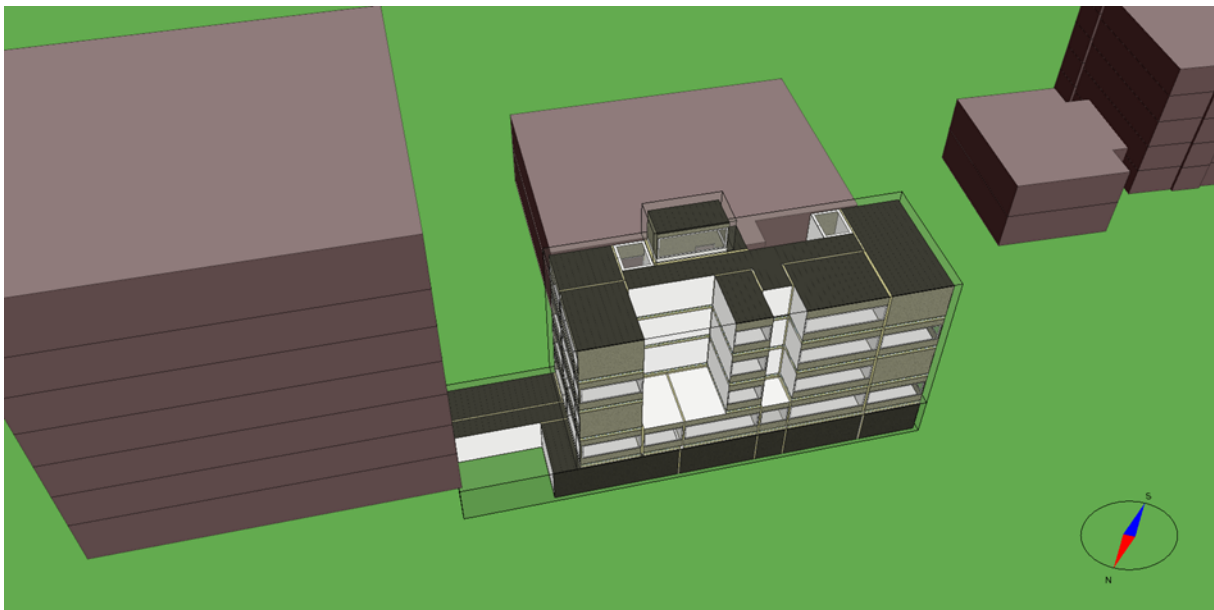


Abbildung 5: Gebäude Inffeldgasse 19, im Detail raumweise modelliert. Quelle: VR4UrbanDev

Für umfassende Szenarienanalysen führten wir Parameterstudien durch, in denen Randbedingungen und Einflussgrößen — etwa Klimadaten oder Sollwerte für die Gebäudeklimatisierung — automatisiert über vordefinierte Wertebereiche variiert wurden. Dazu wurde in IDA ICE die Funktion „Parametric Runs“ genutzt. In dieser Funktion wurden drei Parameter innerhalb definierter Grenzen automatisiert variiert und die entsprechenden Modelle berechnet. Die Parameter waren:

- Sollwert der Raumlufthtemperatur für Heizen (Heating Setpoint): 20°C und 22°C
- Sollwert der Raumlufthtemperatur für Kühlen (Cooling Setpoint): 24°C und 26°C
- Klimatische Randbedingungen (Klimadatensatz für Graz): 2018, 2050 und 2060  
Der Klimadatensatz für 2018 stammt aus Messdaten der Geosphere Austria [28] (ehemals ZAMG) für den Standort Graz Universität. Die Klimadatensätze für 2050 und 2060 wurden mit Hilfe der Software Meteonorm [29], auf Basis der Messdaten für 2018 und dem Klimaszenario RCP 4.5 [30] erstellt.

Die Simulation nutzt einen Solver mit variabler Zeitschrittweite, der sich ereignisabhängig anpasst. Ergebnisse können entweder in der nativen, variablen Schrittfolge des Solvers oder auf konstante Schrittweiten gemappt ausgegeben werden. Die Resultate werden als Textdateien im .prn-Format

mit Header-Zeile und nachfolgenden Zeitreihen gespeichert. Die Werte sind durch Leerzeichen getrennt (Whitespace-Separated Values). Eine maßgeschneiderte Datenstruktur erlaubt den gezielten Zugriff auf Elemente der Zeitreihen für einzelne Zeitpunkte sowie für ganze Zeiträume, wodurch sowohl die VR-Visualisierung als auch weiterführende, energietechnische Auswertungen effizient unterstützt werden.

Hinsichtlich der Integration von IoT-Echtzeitdaten konnte über die Anbindung an den auf FIWARE basierenden Inframonitor[2] demonstriert werden, dass auch Live-Daten aus dem Gebäudebetrieb (z.B. aktueller Wärmeverbrauch) in die VR-Umgebung gestreamt werden können. Für die verlässliche Nutzbarkeit ist eine Bearbeitung der Zählerdaten unerlässlich. Bei Strom-, Wärme-, Wasser- und Kältezählern können plötzliche Auf- und Abwärtsänderungen mit unrealistischen positiven und negativen Peaks, kommunikationsbedingte Artefakte (Sprünge oder verharrende Werte) sowie Zählerüberläufe auftreten. Diese Fehlerursachen können in Kommunikationsproblemen, Gerätetausch u. Ä. liegen und sind nicht zwingend hardwarebedingt. Angesichts dieser Zusammenhänge sowie der heterogenen Messlandschaft (analoge/digitale Zähler, mehrere Gerätegenerationen, verschiedene Betreiber) und der Vielzahl involvierter Akteur:innen ist eine Plausibilisierung aller Zählerdaten erforderlich.

Die für die VR-Umgebung verwendeten Sensordaten wurden dementsprechend einer Bearbeitung auf der Basis heuristischer Regeln (domainspezifische Grenzwerte pro Rohdateneintrag) unterzogen. In der weiterführenden Bearbeitung wurden Datenlücken (z.B. durch Sensorausfälle) mithilfe mathematisch-statistischer Modelle geschlossen, und energietechnische Bilanzen zu gebäudebezogenen Summenwerten erstellt. Aus dieser Grundlage leiteten wir für das vollständige Jahr 2024 energietechnisch relevante Datenreihen und KPIs für die gebäudeweise sowie campusweite Visualisierung ab.

### **5.1.2. Kopplung von CAD, Simulation und IoT mit der VR-Umgebung**

In der Kopplung von Simulations- und IoT-Daten mit der VR-Visualisierung verbanden wir 3D-CAD-Modelle, Simulationsergebnisse aus IDA ICE und IoT-Monitoringdaten mit der VR-Umgebung des Campus Inffeldgasse und entwickelten dafür einen teilautomatisierten Workflow samt definierter Austauschformate und Datenpipeline. Die Implementierung erfolgte über das Unreal-Engine-Toolset Datasmith, das komplexe CAD-/BIM-Datensätze hocheffizient und nahezu verlustfrei in die Echtzeitumgebung konvertiert und dabei Szenenhierarchien, Objektmetadaten und Materialeigenschaften größtenteils konsistent erhält. Im operativen Ablauf bereiteten wir die Gebäudedaten zunächst in Excel auf, verknüpften sie in Vectorworks mit den entsprechenden Gebäudemodellen, exportierten das Modell inklusive Metadaten und importierten es in die Unreal Engine, wo wir Kollisionen für die importierten Gebäudegeometrien generierten und eine Datenstruktur zur Metadatenabfrage je Gebäude aufsetzten. Dies war notwendig, da die native Datenhierarchie beim Import leicht verändert wird. Diese Systematik bildet die Grundlage für die dynamische Manipulation von Gebäudeteilen und die Abfrage von Metadaten innerhalb der VR-Umgebung.

Ein zentraler Bestandteil ist die kontextsensitive Modellaufbereitung, die automatisch zwischen unterschiedlichen Darstellungsanforderungen (siehe Kapitel 5.2) unterscheidet, um für jede Darstellung eine adäquate Performance sicherzustellen. Zur Entkopplung von Modell und Anwendung abstrahierten wir das Campusmodell in ein eigenes Unreal-Engine-Plugin mit separatem

Git-Repository. Dadurch konnten die Teams Modelle in Vectorworks unabhängig bearbeiten und im Plugin aktualisieren, während die VR-Entwicklung ohne Unterbrechung weiterlief.

Für die Simulationseinbindung unterschieden wir zwei Verarbeitungspfade: Parameterstudien mit aggregierten Jahreswerten sowie stündlich aufgelöste Zeitreihen über ein Jahr. Letztere speichert IDA ICE als Textdateien im .prn-Format mit Header-Zeile und nachfolgenden Zeitreihen (Whitespace-separiert) und nutzt einen Solver mit variabler Zeitschrittweite  $\Delta t$ , der ereignisabhängig angepasst wird. Ausgaben können in der nativen, variablen Schrittfolge oder auf konstante Schrittweiten gemappt bereitgestellt werden. Bei aggregierten Parameterruns konvertierten wir die Dateien zur vereinfachten Einbindung in der Unreal Engine in YAML und stellten über eine maßgeschneiderte Datenstruktur gezielte Abfragen für bestimmte Parameterkombinationen bereit. Für die stündlichen Zeitreihen lasen wir die Ergebnisse direkt in der Unreal Engine ein und ermöglichten den Zugriff auf Elemente einzelner Zeitpunkte sowie ganzer Zeiträume.

Sowohl Parametric Runs als auch Zeitserien lassen sich dabei automatisiert und konsistent auslesen und in die VR-Visualisierung integrieren. Insgesamt stellt die kombinierte Pipeline aus Datasmith-Konvertierung, Metadaten-Validierung und kontextsensitiver Modellaufbereitung Abfrage die robuste Basis für eine leistungsfähige, interaktive Kopplung von Gebäudesimulation, IoT-Monitoring und VR-Visualisierung am Campus Inffeldgasse dar.

## **5.2. Detaillierte Ausgestaltung der VR-Umgebungen und Interaktionsebenen**

Die Unreal Engine 5 diente aufgrund ihrer modernen Beleuchtungstechnologie und hohen visuellen Qualität als Entwicklungsplattform für die VR-Umgebung. Für die verschiedenen Anwendungsfälle wurden spezifische virtuelle Umgebungen aufgebaut und Interaktionen entwickelt, die an die Erfordernisse der Energieforschung angepasst sind. Hierbei kamen sowohl C++ als auch Visual Scripting (Blueprints) zum Einsatz, unterstützt durch Blender zur Modellierung spezifischer Objekte.

Ein Schlüsselement ist die Verwendung der OpenXR-API, welche die Kompatibilität der Anwendung mit verschiedenen Endgeräten wie Oculus (Quest 2/3/Pro), HTC Vive und Valve Index ohne zusätzlichen Anpassungsaufwand gewährleistet. Abhängig von der Hardware kann die Anwendung stationär oder innerhalb eines definierten Spielbereichs (Room-Scale) ausgeführt werden.

Zentrales Element der Nutzer:innen-Erfahrung ist der VR-Character, die virtuelle Repräsentanz der Nutzer:innen. Hinsichtlich der Fortbewegung (Locomotion) setzt die Anwendung primär auf Teleportation (siehe Abbildung 6), um das Risiko von Cybersickness zu minimieren. Ergänzend wurde für fortgeschrittene Nutzer:innen eine kontinuierliche Bewegung (Smooth Movement) implementiert.



Abbildung 6: Links: Teleportation, rechts: kontinuierliche Bewegung (Smooth Movement). Quelle: VR4UrbanDev

Das Interaktionssystem (siehe Abbildung 7) umfasst diverse Möglichkeiten der Manipulation. Neben dem in VR-Anwendungen üblichen Greifsystem stehen Hovering, Berühren und Zeigen zur Verfügung. Dabei wurde bewusst versucht, reine Zeigeinteraktionen (als Maus-Ersatz) zugunsten natürlicherer Handlungsweisen zu reduzieren.

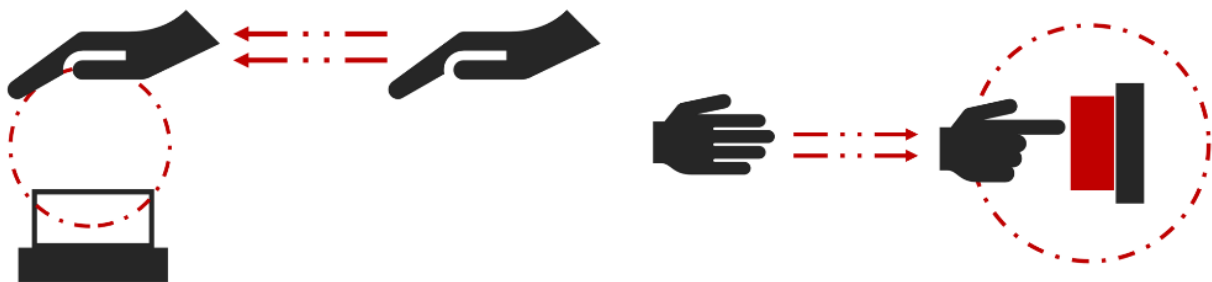


Abbildung 7: Links: Änderung der virtuellen Handpose basierend auf der Entfernung zum berührbaren Objekt, rechts: Hovering-Interaktion der virtuellen Hand. Quelle: VR4UrbanDev

Die VR-Umgebung wurde mit Fokus auf zwei Faktoren entwickelt: immersive Erfahrung und präzise Datenvisualisierung. Um beide Anforderungen abzudecken, stehen zwei Perspektiven zur Verfügung, zwischen denen die Nutzer:innen wechseln können: die Beobachtenden-Perspektive und die Ich-Perspektive. Während die Ich-Perspektive ein unmittelbares Erleben im Maßstab 1:1 ermöglicht, bietet die Beobachtenden-Perspektive eine entkoppelte, übersichtliche Arbeitsumgebung für die gezielte Datenanalyse. Nutzer:innen können jederzeit zwischen den beiden Perspektiven wechseln.

### 5.2.1. Die übergeordnete Tischansicht (Beobachtenden-Perspektive)

Die Beobachtenden-Perspektive wird in einem an ein Architekturbüro angelehnten Raum visualisiert. In diesem Raum stehen verschiedene Objekte zur Interaktion zur Verfügung, mit denen man Daten visualisieren und den digitalen Zwilling manipulieren kann, um einen Überblick zu erlangen. Zentral ist dabei ein spezieller Tisch, der den Mittelpunkt des Raumes bildet (siehe Abbildung 8). Auf diesem Tisch wird der digitale Zwilling auf Basis des UIM visualisiert.



Abbildung 8: Die Beobachtenden-Perspektive im virtuellen Architekturbüro. Ein spezieller Tisch ermöglicht die Manipulation der virtuellen Welt. Quelle: VR4UrbanDev

Der Tisch besteht aus zwei Ebenen: Die obere Ebene wird zur Visualisierung des digitalen Zwillings genutzt, während auf der unteren Ebene verschiedene Interaktionen zur Verfügung stehen (Abbildung 9). Diese Interaktionen sind in zwei Kategorien aufgeteilt: interaktive Gadgets, die auf dem digitalen Zwilling platziert werden können, und Visualisierungsmodi, die aktiviert werden können. Zusätzlich lässt sich der Tisch an sich manipulieren. Durch beidhändiges Angreifen kann er in seiner Höhe angepasst werden, um die Ergonomie zu verbessern. Zusätzlich können die beiden Tischebenen unabhängig voneinander rotiert werden, um leicht an die verschiedenen Objekte am Tisch gelangen zu können.

Auf der oberen Ebene des Tisches wird standardmäßig eine Karte des Universitätscampus und des umliegenden Gebietes dargestellt. Dazu wird ein Plugin (Cesium[31]) verwendet, das sich in die Unreal Engine integrieren lässt. Diese Karte kann ähnlich wie Karten-Apps auf Smartphones genutzt werden. Greift man die Karte mit einer Hand an, wird sie geschoben. Rotiert man die Tischebene, rotiert auch die Karte mit. Greift man sie schlussendlich mit beiden Händen an, kann man hinein- oder hinauszoomen.



Abbildung 9: Verschiedene Gadgets und Interaktionsmöglichkeiten am virtuellen Tisch mit eingeblendetem UIM-Modell. Quelle: VR4UrbanDev

Die Visualisierung der Karte kann über die verschiedenen Modi verändert werden. Diese Modi werden über Buttons aktiviert bzw. deaktiviert, die auf der unteren Tischebene angebracht sind. Der erste (grüne) Button von links aktiviert den sogenannten Isolationsmodus. In diesem Modus wird die Umgebung des Campus mit geringerer Farbsättigung dargestellt, während der Campus weiterhin regulär visualisiert wird. Dies soll den Fokus optisch auf den Campus richten. Über den zweiten Button (blau) können Points of Interest auf der Karte eingeblendet werden. Dies sind vordefinierte Punkte auf der Karte, bei denen Adresse und Zusatzinformationen eingeblendet werden können. Über den roten Button rechts davon öffnet sich ein Menü, in dem zwischen verschiedenen Grundkarten gewählt werden kann. Standardmäßig wird eine 3D-Ansicht von Google Maps verwendet. Zusätzlich können Karten von OpenStreetMap und Bing Maps verwendet werden. Zur Verfügung stehen sowohl klassische Karten als auch Karten mit eingeblendeten Volumenmodellen von Gebäuden sowie Luftbilder.

Weiters kann ein beispielhaftes Universitätsgebäude auf dem Tisch durch Berührung selektiert werden, woraufhin ein höher aufgelöstes Modell dieses spezifischen Objekts über dem Tisch eingeblendet wird, siehe Abbildung 10. Ergänzend zur reinen Modellbetrachtung erscheinen bei der Selektion zwei Schaltflächen, mit denen eine Datenvisualisierung auf einer Wand im Hintergrund aktiviert beziehungsweise das vergrößerte Gebäudemodell samt Datenvisualisierung wieder ausgeblendet werden kann. Bei der anfänglichen Darstellung der Daten handelte es sich um ein Mock-Up, das zu Demonstrationszwecken für die Experteninterviews genutzt wurde. Im weiteren Projektverlauf wurden verschiedene Key Performance Indicators (KPIs), welche für die

Nutzer:innengruppen von Relevanz sind (z. B. Daten zum Heiz- und Kühlbedarf), in einer ähnlichen, aber dynamischen Visualisierung umgesetzt.



Abbildung 10: Tischmodell zur Datenvisualisierung in der Beobachtenden-Perspektive. Auf dem Tisch wurde ein Gebäude selektiert, woraufhin ein hochauflösendes Gebäudemodell und eine Datenvisualisierung eingeblendet werden. Quelle: VR4UrbanDev

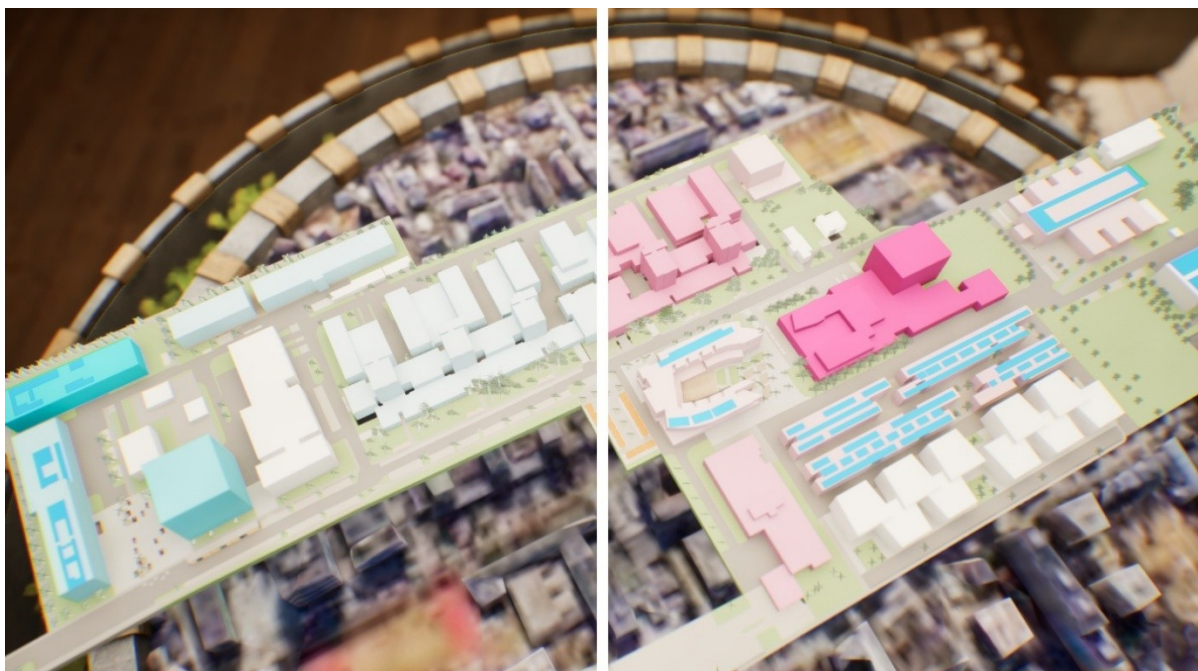


Abbildung 11: UIM-Modell eingefärbt als Heatmap für den simulierten absoluten Kühlenergiebedarf (links) und Heizenergiebedarf (rechts) im Jahr 2022. Quelle: VR4UrbanDev

Über den vierten Button (pink) kann das UIM-Modell des gesamten Innovation District Inffeld schwebend ein- oder ausgeblendet werden. Bei dieser Darstellung kommen bewusst vereinfachte Volumenmodelle zum Einsatz, da die Visualisierung detaillierter Architekturmodelle die erforderliche Rechenleistung unverhältnismäßig steigern würde und geometrische Details aufgrund des Maßstabs nicht deutlich erkennbar wären. Die zwei pinken Buttons rechts davon werden zur Steuerung verschiedener Datenvisualisierungen genutzt. Über den ersten können die Gebäude im UIM mit Simulationsdaten zum absoluten Heiz- und Kühlenergiebedarf im Jahr 2022 überlagert werden. Dadurch entsteht eine dreidimensionale Heatmap am Campusmodell, siehe Abbildung 11. Über den letzten Button lassen sich die vorhandenen Fernwärme- und -kältenetze am Campus visualisieren (siehe Abbildung 12). Die Leitungsinformationen sind dabei ebenfalls Bestandteil des UIM Modells in Vectorworks und können so in den digitalen Zwilling importiert werden. Da die Leitungen auch in der korrekten Tiefe unter der Geländeoberkante verortet sind, wurde eine Visualisierungsform gewählt, mittels der die Leitungen sowohl durch die Bodenoberfläche als auch durch Gebäude hindurch dargestellt werden.

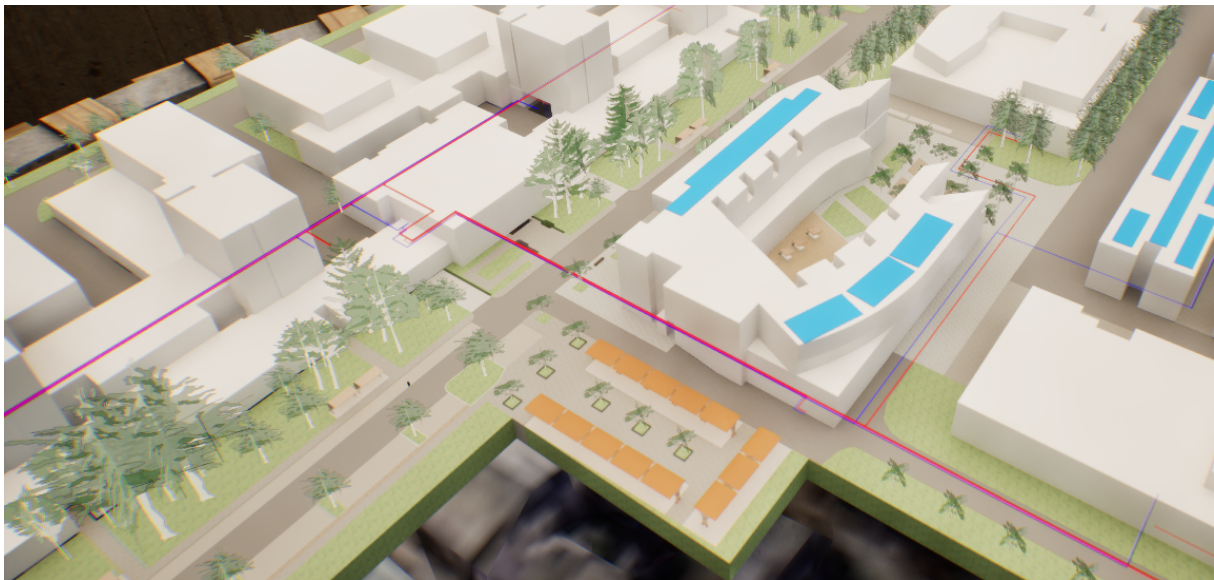


Abbildung 12: Visualisierung der Rohrleitungen der Fernwärme- und -kälteversorgung am Campus Inffeldgasse im UIM-Modell. Quelle: VR4UrbanDev

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Visualisierungsmodi kann mit der Karte bzw. dem UIM mit verschiedenen Gadgets interagiert werden, die links der Buttons auf der unteren Tischebene zur Verfügung stehen. Alle Gadgets haben gemeinsam, dass sie von den Nutzer:innen aufgehoben und auf der Karte oder dem UIM platziert werden können. Das erste Gadget von rechts ist ein Teleportationsgadget, mit dem man in die Ich-Perspektive wechseln kann, indem es auf der Karte platziert wird. Die Nutzer:innen werden dabei an jene Stelle am Campus teleportiert, an der sie das Gadget in der Beobachtenden-Perspektive positioniert haben. Das nächste Gadget kann zur Längenmessung auf der Karte verwendet werden. Dazu werden zwei dieser Gadgets auf der Karte platziert, woraufhin die Distanz zwischen ihnen angezeigt wird. Das letzte Gadget ist ein Selektionstool, mit dem sich einzelne Gebäude im UIM auswählen lassen. Die Daten dieses Gebäudes werden anschließend auf eine Wand projiziert. Zusätzlich wird eine Draufsicht des Gebäudes an einer Wand dargestellt (Abbildung 13).



Abbildung 13. Mit dem Selektionstool wurde ein Gebäude am UIM-Modell markiert (Mitte), woraufhin Simulations- und IoT-Daten des entsprechenden Gebäudes (rechts) und das selektierte Gebäude von oben (links) gezeigt werden. Quelle: VR4UrbanDev



Abbildung 14: Simulationspaneele zur Gegenüberstellung verschiedener Parameterkombinationen. Quelle: VR4UrbanDev

Neben dem Tisch wurde für die detaillierte Datenanalyse von Szenarien aus einer Parameterstudie eines Campusgebäudes in IDA ICE eine Visualisierung neben dem Kartentisch implementiert, siehe Abbildung 14. Diese lässt sich über zwei Paneele steuern, mit denen sich zwei verschiedene

Parameterkombinationen vergleichen lassen. Je Panel können die verschiedenen Simulationsparameter mittels Schieberegler variiert werden, woraufhin die Simulationsergebnisse aktualisiert und am zentralen Ergebnispanel als Balkendiagramme dargestellt werden.

Zusätzlich wurde ein interaktiver Geschossplan implementiert, auf dem einzelne Räume ausgewählt werden können, siehe Abbildung 15. Dies führt zu einer Aktualisierung der Darstellung der gestapelten Visualisierungspaneelen, die neben dem Plan angezeigt werden.



Abbildung 15: Geschossplan, in dem ein Raum ausgewählt wurde (links), interaktive Datenvisualisierung für den selektierten Raum (Mitte) und Schieberegler zum Wechseln zwischen unterschiedlichen Datenvisualisierungen (rechts). Quelle: VR4UrbanDev

### 5.2.2. Die Campus-Außenumgebung (Ich-Perspektive)

Durch das Teleportationsgadget können Nutzer:innen vom Architekturbüro direkt in die Campus-Außenumgebung (Ich-Perspektive) wechseln, siehe Abbildung 16. In diesem Modus ist eine Erkundung des virtuellen Campus möglich, was eine realistische Erfahrung des Ortes ("Sense of Place") vermittelt. Diese Perspektive dient der präzisen räumlichen Vorstellung. In Abbildung 17 ist eine Detailansicht eines Platzes am Campus zu sehen. Beim Detaillierungsgrad wurde versucht, eine ausgewogene Mischung aus realistischer Ortserfahrung und gut erfassbarer Datenvisualisierung zu finden. Zu einfache Umgebungsmodelle vermitteln wenig Immersion, zu komplexe Modelle lenken von den eigentlichen Datenvisualisierungen ab und überfordern die Nutzer:innen.



Abbildung 16: Campus-Außenumgebung (Ich-Perspektive) im Bereich des Gebäudes Inffeldgasse 19, mit Sensorobjekten zur IoT-Datenvisualisierung des Gebäudes. Quelle: VR4UrbanDev



Abbildung 17: Detailansicht der Campus-Außenumgebung im digitalen Zwilling. Quelle: VR4UrbanDev

Grundlage dieser Ansicht ist wiederum das UIM, allerdings in einer für diese Ansicht angepassten Form. Für die Umgebung des Campus wurde wieder das Plugin Cesium genutzt, wobei Google-Maps-Daten mit einem 3D-Erdmodell als Basis visualisiert werden (siehe Abbildung 18). Dieses Plugin ermöglicht, für bestimmte Bereiche der Umgebung verschiedene Kartendatenquellen zu visualisieren. Auf diese Weise ließ sich die 3D-Oberfläche der Erde mit niedrigauflösenden Gebäuden

für die umliegende Umgebung nutzen, während für den eigentlichen Campus-Bereich hochauflösende Gebäude aus dem CAD-Modell eingefügt wurden.

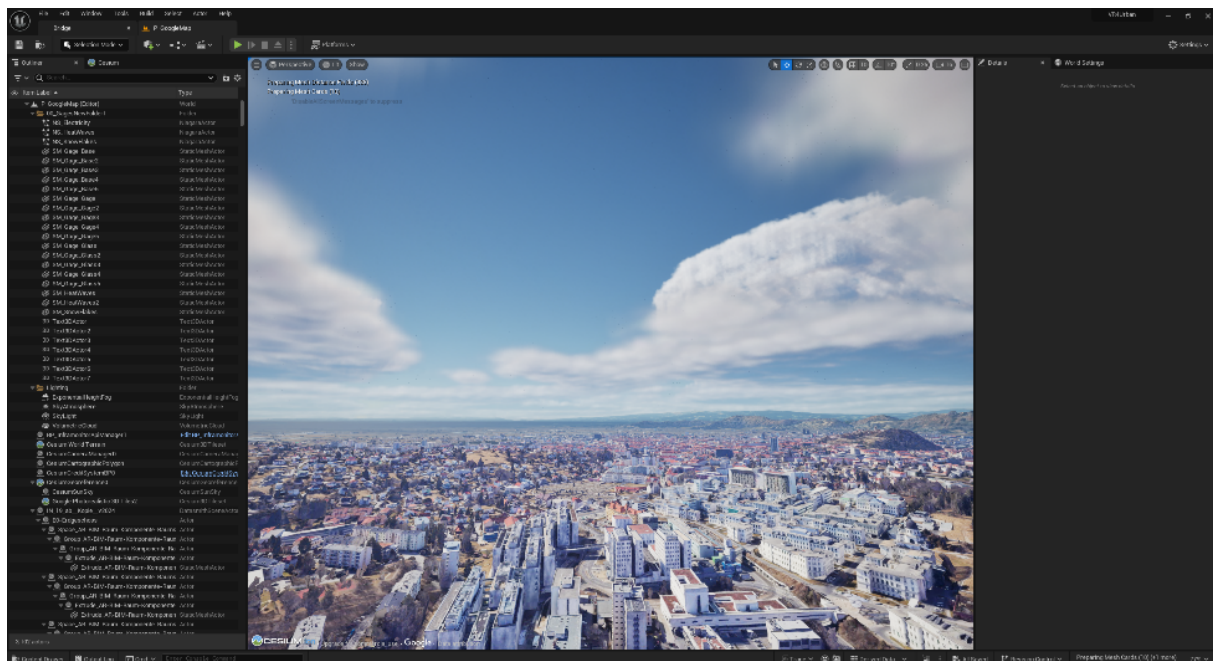


Abbildung 18: Integration von 3D-Kartendaten mittels des Cesium-Plugins als Basisumgebung. Ansicht im Unreal Engine-Editor. Quelle: VR4UrbanDev

Ein weiterer Vorteil des Cesium-Plugins besteht in der Möglichkeit, die Position der Sonne basierend auf einem geographischen Ort und einer Uhrzeit festzulegen. Durch die Kombination dieser Funktion mit der globalen Echtzeitbeleuchtung in der Unreal Engine (Lumen) konnte der Einfluss verschiedener Tageszeiten in der Umgebung erlebbar gemacht werden.

Für einen besseren Überblick über den Campus wurde eine Vogelperspektiven-Funktion implementiert. Dabei kann man sich per Teleportation in eine Position ca. 200 Meter über dem Campus versetzen und ihn von oben betrachten. Diese Ansicht wird durch simples Zeigen auf den Himmel aktiviert. Dieser Modus eignet sich besonders für Visualisierungen, bei denen ein größerer Teil des Campus auf einmal eingesehen werden muss. Während die 1:1-Repräsentation des Campus ein besseres Gefühl für die Größenverhältnisse sowie für Aspekte wie Sonnenstand und Schattenwurf ermöglicht, erschwert sie die vergleichende Betrachtung mehrerer Gebäude, da sie sich gegenseitig verdecken. Die Vogelperspektive fungiert somit als Mittelweg zwischen der Beobachtenden-Perspektive und der Ich-Perspektive. Die Oberflächen von Gebäuden und anderen intelligenten Objekten fungieren dabei als primäre Informationsträger ("Data Canvas").

Auch in dieser Ansicht ist eine Interaktion mit dem digitalen Zwilling möglich. Dies geschieht über ein Inventarsystem, das über Antippen einer virtuellen Uhr am linken Handgelenk geöffnet werden kann (Abbildung 19). Darin stehen verschiedene Funktionen zur Interaktion mit dem digitalen Zwilling zur Verfügung. Ganz links befindet sich ein Auswahlwerkzeug, mit dem analog zur Tischansicht ein Gebäude in der Umgebung ausgewählt werden kann, um weitere Informationen dazu anzuzeigen (Abbildung 20). Der erste Button von links „S“ aktiviert oder deaktiviert die Anzeige der Bodenversiegelung im Digitalen Zwilling (Abbildung 21).



Abbildung 19: Handgelenksinventar mit Zeitschieberegler. Quelle: VR4UrbanDev



Abbildung 20: Auslesen und Anzeigen von Datenwerten einzelner Gebäude mit dem Selektionstool in der Überblicksperspektive. Quelle: VR4UrbanDev

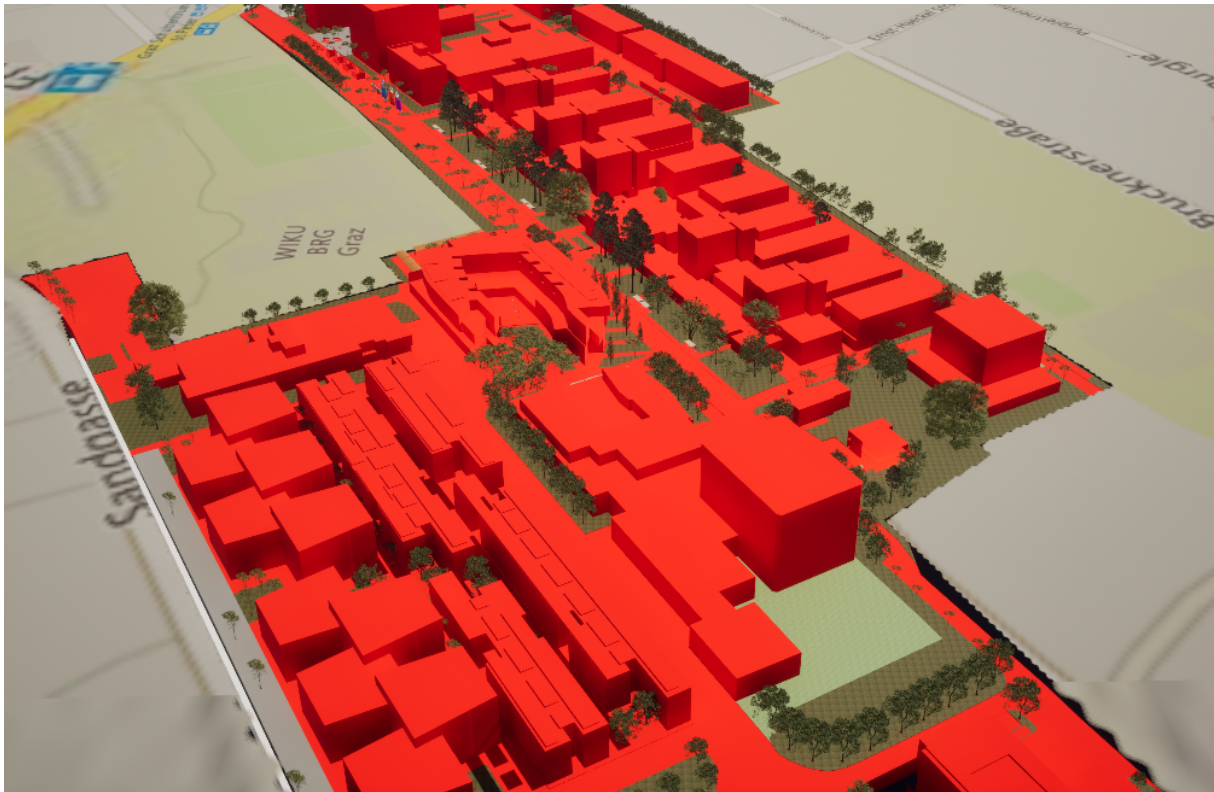


Abbildung 21: Visualisierung der Bodenversiegelung am Campus Inffeldgasse. Quelle: VR4UrbanDev

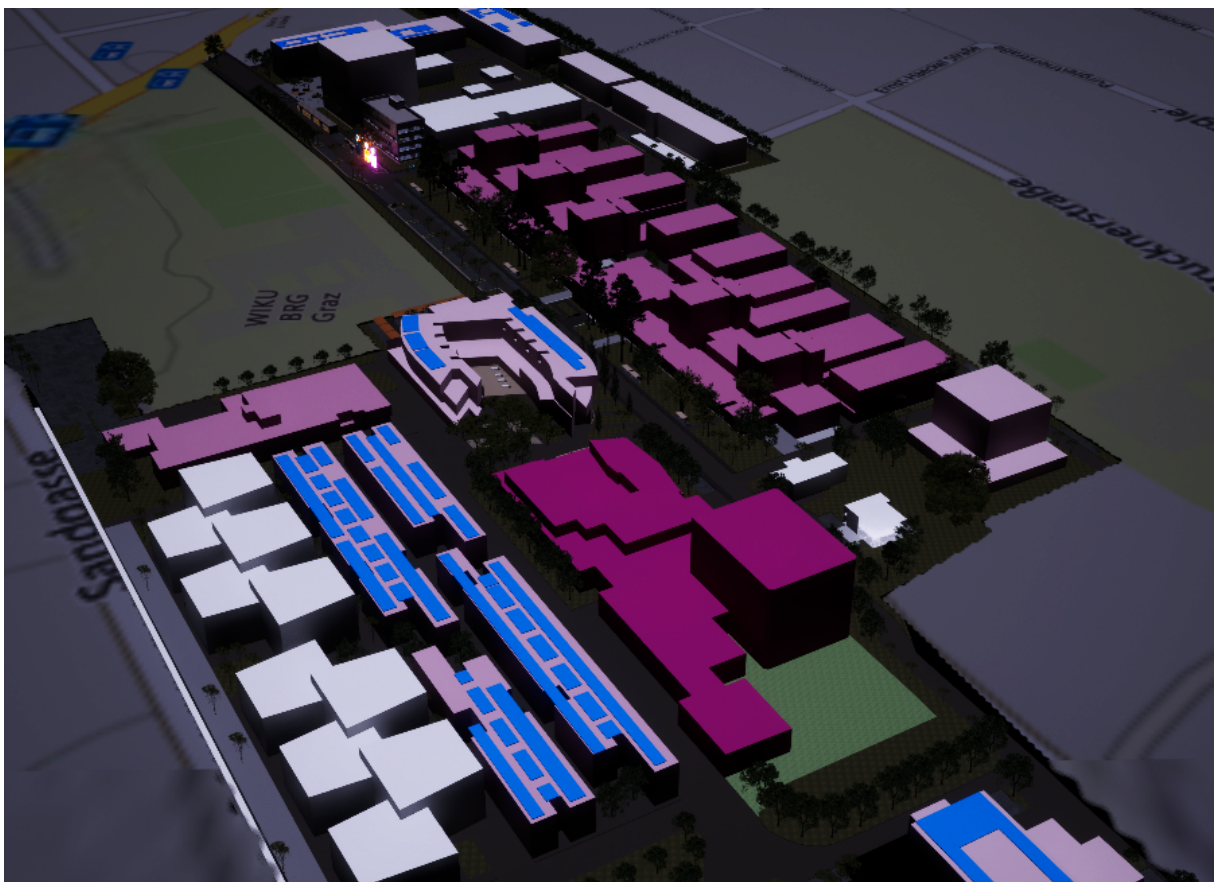


Abbildung 22: Visualisierung von Heatmaps in der Überblicksperspektive (Zoom-Out) im Nachtmodus. Quelle: VR4UrbanDev

Mit einem Druck auf den Button „M“ kehrt man zur übergeordneten Tischansicht zurück. Der Button „T“ aktiviert einen Zeitschieberegler, mittels dessen die Zeit und damit der Sonnenstand manipuliert werden kann (in Abbildung 19 über dem Inventarsystem dargestellt). Die aus der Tischansicht bekannten Heatmaps zu Energiedaten lassen sich über den Button „H“ steuern (Abbildung 22). Auch die Visualisierung der Fernkälte- und -wärmenetze kann im Inventar über den Button „P“ ein- bzw. ausgeschaltet werden (Abbildung 23).

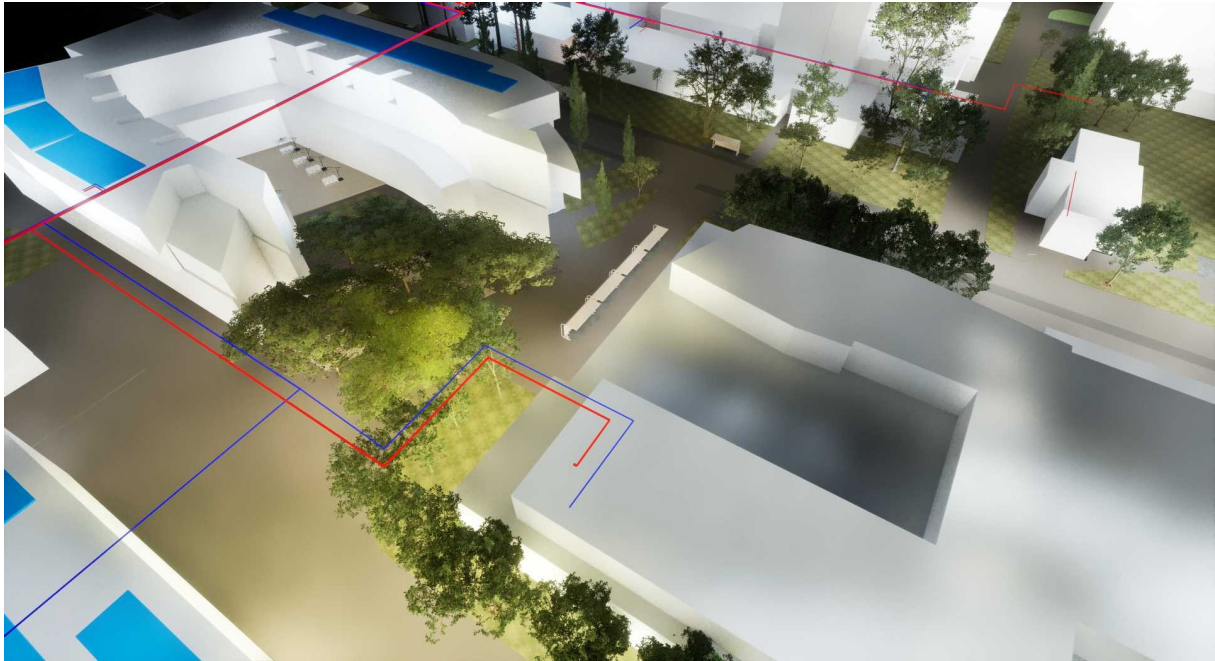


Abbildung 23: Modell mit überlagerter Leitungsinfrastruktur der Fernwärme- und -kälteversorgung am Campus Inffeldgasse. Quelle: VR4UrbanDev



Abbildung 24: Visualisierungsfunktion von IoT-Daten in der Campus-Außenumgebung. Quelle: VR4UrbanDev

Als weitere Visualisierungsfunktionalität wurden mithilfe der verfügbaren IoT-Daten Sensorobjekte in der Außenumgebung generiert, siehe Abbildung 24. Die Messwerte werden zuerst beim Start der VR-Umgebung abgerufen und anschließend im Abstand von 5 Minuten automatisch aus der IoT-Datenbank aktualisiert. Aktuell wurden drei Visualisierungen zur Darstellung des elektrischen Energieverbrauchs sowie des Energieverbrauchs für Heizung und Kühlung für das Gebäude Inffeldgasse 19 in der Umgebung platziert. Diese Visualisierungen bestehen aus zwei Säulen sowie einem Partikeleffekt. Mithilfe der Höhe der zwei Säulen können der aktuelle Messwert sowie ein aggregierter Jahresmesswert angezeigt werden. Neben den Säulen wird zusätzlich der visualisierte Messwert in Zahlen dargestellt. Für jeden der drei Prototypen wird ein unterschiedlicher Partikeleffekt verwendet: Schneeflocken, Blitze und Flammen. Bei höheren Messwerten steigt die Anzahl der dargestellten Partikel, um eine intuitivere Erfassung der Messwerte zu ermöglichen.

### 5.2.3. Der Büroraum (Detailansicht im Ich-Perspektiven-Modus)

Zusätzlich zu den Freiflächen und Gebäudehüllen im Außenbereich wurde im Ich-Perspektiven-Modus auch ein beispielhafter Büroraum im Gebäude Inffeldgasse 19 eingerichtet, um die Visualisierung von Innenbereichen zu demonstrieren (siehe Abbildung 25). Das Betreten und Verlassen dieses Büroraums ist über eine weitere Teleportationsfunktion möglich. Dabei bewegt man sich in einen Ring aus kleinen blauen Bläschen (rechts im Bild zu erkennen). Dieser Raum dient dazu, die Ergebnisse der Gebäudesimulationen mit IDA ICE in einer realistischen Umgebung erlebbar zu machen. Der Fokus liegt hierbei auf der Darstellung thermischer und bauphysikalischer Eigenschaften, die in der Realität schwer oder gar nicht messbar sind und dadurch unsichtbar bleiben (virtuelle Sensoren [26]).



Abbildung 25: Detailansicht des virtuellen Büroraums im Gebäude Inffeldgasse 19 als Beispiel zur Visualisierung von virtuellen Sensoren in Innenräumen. Quelle: VR4UrbanDev

In dieser Umgebung wurde exemplarisch die Darstellung der Temperaturverläufe innerhalb eines Fußbodenaufbaus im Gebäude Inffeldgasse 19 umgesetzt. Hierfür wurden die von IDA ICE generierten Zeitreihen auf zwei repräsentative Wochen begrenzt: eine Woche im Sommer (Kühlfall) und eine im Winter (Heizfall), um die Effekte der Fußbodenkühlung und -heizung deutlich darstellen zu können. Im virtuellen Büroraum kann ein Teil des Fußbodens auf Knopfdruck vertikal ausgefahren werden, wodurch der Schichtaufbau sichtbar wird (siehe Abbildung 26). Über einen Schieberegler lässt sich anschließend der gewünschte Zeitraum (Sommer oder Winter) einstellen. Ein zweiter Schieberegler ermöglicht es dem Nutzer:innen, die Simulation dynamisch abzuspielen, zu pausieren oder zurückzuspulen. Die verschiedenen Schichten des Fußbodens werden auf Basis der Simulationsergebnisse eingefärbt, während die zugehörigen Temperaturwerte dynamisch neben der jeweiligen Schicht angezeigt werden. Zusätzlich kann über das oben beschriebene Handgelenk-Inventar die Tageszeit verändert werden, wodurch der Lichteinfall über verschiedene Tages- und Jahreszeiten hinweg auch im Innenraum beurteilt werden kann.



Abbildung 26: Visualisierung von Temperaturen in unterschiedlichen Schichten des Bodenaufbaus im Büroraum auf Basis von Ergebnissen aus der bauphysikalischen Simulation in IDA ICE. Quelle: VR4UrbanDev

## 5.3. Nutzungszentrierte Evaluierung

Die VR-Umgebung wurde durch verschiedene Nutzungsgruppen wie Expert:innen und andere Stakeholder getestet und bewertet. Der Fokus lag dabei auf der Analyse integraler Elemente zur Verbesserung des VR-Erlebnisses für die Zielgruppen, wobei Faktoren wie berufspraktische Relevanz, Nutzungsfreundlichkeit, Engagement und Zugänglichkeit im Mittelpunkt standen. Zur Datenerhebung wurden wissenschaftliche Methoden wie standardisierte Fragebögen, Datenanalysen und qualitative Interviews eingesetzt.

### 5.3.1. Usergruppenbefragung mit leitfadengestützten Interviews der Nutzer:innen

Im Zeitraum von April bis Juni 2024 wurden zehn leitfadengestützte Interviews mit Personen aus relevanten Usergruppen durchgeführt. Abbildung 27 zeigt Eindrücke aus diesen Interviews. Die Auswahl der Teilnehmer:innen erfolgte sowohl aus methodischen Gründen (Diversität der Perspektiven) als auch aus forschungspraktischen Erwägungen (Zugang über bestehende Kontakte, Testbarkeit des Prototyps). Die Stichprobe setzte sich aus fünf Energieforscher:innen, drei Facility Manager:innen und vier Planer:innen (inklusive Doppelzuordnungen) zusammen.

Alle Interviews fanden im VR-Versuchsraum des Game Lab Graz statt und folgten einem standardisierten Ablauf:

1. Einführung in das Projekt durch das Forschungsteam.
2. Teilstrukturiertes Interview zu bisherigen Methoden der Darstellung energie- und klimarelevanter Parameter.
3. Testen der VR-Umgebung (nach Absolvierung eines Tutorials zu Bewegung und Interaktion).
4. Teilstrukturiertes Interview zur Einschätzung der Potenziale und Grenzen im beruflichen Kontext.
5. Schriftlicher Kurzfragebogen zur Usability (System Usability Scale - SUS).

Die Interviews wurden aufgezeichnet, transkribiert und mittels MaxQDA inhaltsanalytisch ausgewertet. Protokollierte Anmerkungen während der Testphasen ("Think Aloud") flossen ebenfalls in die Analyse ein.

Weiters wurde eine systematische Tabelle erstellt, um die Ergebnisse aus den Interviews zu strukturieren. Ziel war es, die Interessen und Arbeitsschritte der Nutzer:innen direkt aus dem Interviewgespräch heraus zu erfassen und potenzielle Vorteile der Umsetzung in einer VR-Umgebung zu identifizieren. Die Tabelle gliedert sich in folgende Kategorien:

- Nutzer:innen: Unterscheidung zwischen den Usergruppen Facility Management, Planung und Energieforschung.
- Interesse: Erfassung der Interessen und Arbeitsschritte der jeweiligen Usergruppen.
- Praktische Anwendung: Beschreibung der aktuellen Umsetzung der Interessen und Arbeitsschritte in der Praxis.

- Probleme: Identifikation von Problemen, die in der aktuellen Umsetzung auftreten.
- Vorteile durch VR: Darstellung der Gründe, warum die Interessen und Arbeitsschritte in VR visualisiert werden sollten und welche Vorteile dies bietet.
- VR-Implementierung: Beschreibung, wie die Interessen und Arbeitsschritte in VR umgesetzt werden könnten.
- VR-Design: Festlegung des Detaillierungsgrads, den die Interessen und Arbeitsschritte in VR aufweisen sollten.

Während die Interviews durchgeführt wurden, wurde parallel dazu diese Tabelle ausgefüllt. Dadurch wurden die Interessen der teilnehmenden Nutzer:innen systematisch erfasst und dokumentiert. Durch gezielte Fragestellungen in den Interviews wurden dabei sowohl die Interessen als auch potenzielle Interessensüberschneidungen und praktische Herausforderungen in der Umsetzung aufgezeigt.



Abbildung 27: Eindrücke aus den Interviews des VR-Prototypen im Rahmen der Usergruppenbefragung.  
Quelle: VR4UrbanDev

### 5.3.2. Ergebnisse der Usergruppen-Interviews

Die qualitative Auswertung identifizierte vier übergeordnete Themenbereiche, in denen die VR-Umgebung bewertet wurde: Planung, Energiekennzahlen, Energieversorgungsinfrastruktur und Gebäudebetrieb.

**Erkenntnisse zur übergeordneten Planung (Städtebauliche Konzepte):** Die Interviewpartner:innen sahen einen großen Mehrwert in der Visualisierung von Entwicklungsszenarien, insbesondere für die Kommunikation mit Laien und Entscheidungsträger:innen. Die VR-Umgebung wurde als potenzielles

Werkzeug für partizipative Planungsprozesse identifiziert. Besonders positiv hervorgehoben wurde die Möglichkeit, die Auswirkungen von Bebauungsszenarien (z. B. Gebäudeausrichtung, PV-Flächen) auf Energiekennzahlen direkt sichtbar zu machen. Die Interaktivität – also das unmittelbare Erleben von Änderungen an Planungsparametern – wurde als zentrales Anforderungskriterium genannt.

**Erkenntnisse zu Energiekennzahlen (Ist-Stand und Prognose):** Während Facility Manager:innen den Nutzen als moderat einschätzten, sahen Energieforscher:innen erhebliches Potenzial. Herkömmliche Methoden (Excel, 2D-Plots) bieten oft keinen ausreichenden räumlichen Überblick über ein gesamtes Quartier. Die VR-Umgebung ermöglicht es, Gebäude basierend auf Parametern wie dem Heizenergiebedarf unterschiedlich einzufärben (Heatmaps) und so "Hotspots" intuitiv zu identifizieren. Auch für die Validierung komplexer Simulationen (z. B. Strömungssimulationen, thermische Komfortanalysen) wurde die VR-Umgebung als wertvolles Hilfsmittel zur Fehlererkennung und Veranschaulichung eingestuft.

**Erkenntnisse zur Energieversorgungsinfrastruktur:** Die Darstellung von unterirdischer Infrastruktur (Leitungsführung) in VR wurde als hilfreich erachtet, um den Status Quo für Fachplaner:innen und Entscheidungsträger:innen verständlicher zu machen, da bestehende BIM-Modelle oft überfrachtet oder unvollständig sind.

Die Ergebnisse aus den Interviews flossen direkt in die technische Weiterentwicklung ein. Das Feedback der Nutzer:innen wurde in mehreren iterativen Schleifen berücksichtigt, was zu einer gezielten Vereinfachung von Interaktionen und einer Reduzierung visueller Effekte führte, um die kognitive Belastung zu senken. Zudem konnten während der Tests identifizierte technische Fehler unmittelbar behoben werden.

### 5.3.3. Ergebnisse des Stakeholder-Workshops

Am 13. November 2025 fand ein abschließender Stakeholder-Workshop statt, zu dem relevante Akteur:innen eingeladen wurden. In Abbildung 28 ist der Einladungs-Flyer für den Workshop zu sehen. Ziel war es, den finalen Prototypen einem breiteren Fachpublikum vorzustellen und in einem World-Café-Format zu diskutieren.

Von 42 kontaktierten Personen nahmen 13 Personen (inkl. Projektteam) teil. Die Diskussion zeigte eine ambivalente Haltung in der Architekturbranche: Während BIM bei jüngeren Fachkräften etabliert ist, nutzen erfahrene Architekt:innen oft weiterhin 2D-Pläne und verlassen sich auf ihre Abstraktionsfähigkeit. Einig war man sich jedoch über den "Wow-Effekt" der VR-Umgebung. Das immersive Erlebnis im realen Maßstab wurde als "Game Changer" für die Kommunikation komplexer Daten (z. B. Außenraumklima, CFD-Simulationen) bezeichnet. Kritisch diskutiert wurden die Hardware-Verfügbarkeit und der Aufwand für die Datenaufbereitung. Die Teilnehmer:innen betonten, dass der Nutzen der VR-Visualisierung den Aufwand der Konvertierung von BIM-Daten rechtfertigen muss. Als vielversprechendste Anwendungsfelder wurden Bürgerbeteiligungsverfahren und die Akquise (Wettbewerbspräsentationen) identifiziert. Abbildung 29 zeigt Eindrücke aus dem Stakeholder-Workshop.



Abbildung 28: Flyer für die Einladung zum Stakeholder-Workshop. Quelle: VR4UrbanDev

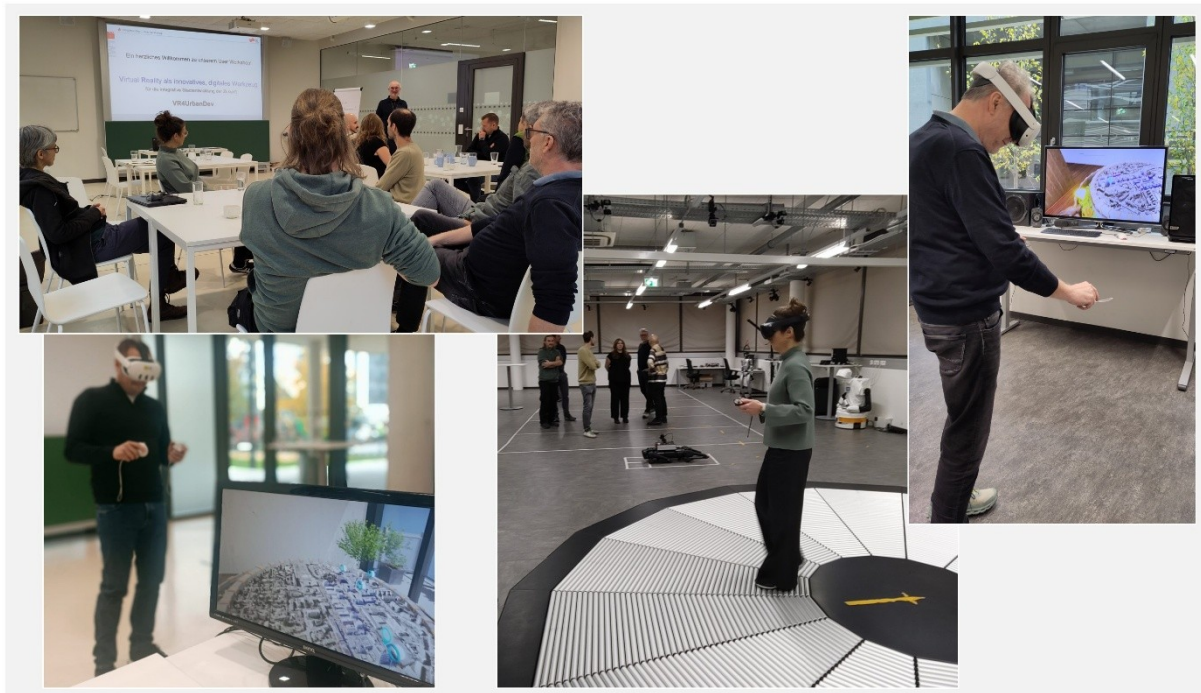


Abbildung 29: Eindrücke aus den Tests des VR-Prototypen im Rahmen des Stakeholder-Workshops. Quelle: VR4UrbanDev

### 5.3.4. Detaillierte Bewertung der Usability

Sowohl während der Experteninterviews als auch im Zuge des Stakeholder-Workshops wurden die Teilnehmenden mit dem standardisierten System-Usability-Scale-Fragebogen (SUS) gebeten, die Bedienbarkeit des Prototypen zu bewerten. Die im SUS enthaltenen Fragen werden mittels einer 5-Punkt-Likert-Skala bewertet (1 = Stimme überhaupt nicht zu, 5 = Stimme voll zu) abgefragt.

Abbildung 16 zeigt die Ergebnisse der Befragung. Die im SUS enthaltenen Fragen lauten:

1. Ich denke, dass ich das System gerne häufig benutzen würde.
2. Ich fand das System unnötig komplex.
3. Ich fand das System einfach zu benutzen.
4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um das System benutzen zu können.
5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in diesem System waren gut integriert.
6. Ich denke, das System enthielt zu viele Inkonsistenzen.
7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit diesem System sehr schnell lernen.
8. Ich fand das System sehr umständlich zu nutzen.
9. Ich fühlte mich bei der Benutzung des Systems sehr sicher.
10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte das System zu verwenden.

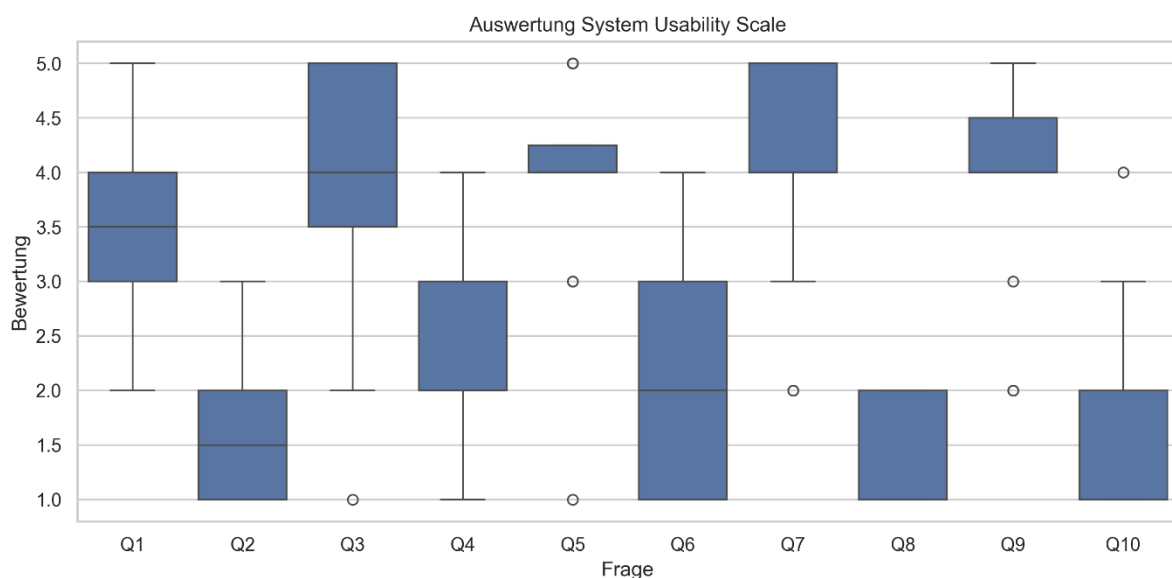


Abbildung 30: Ergebnisse der Befragung mit dem System-Usability-Scale-Fragebogen. Quelle: VR4UrbanDev

Abbildung 30 zeigt die Ergebnisse der Befragung mit dem System-Usability-Scale-Fragebogen. Insgesamt ergab sich eine Bewertung von 75,3 bei einer Standardabweichung von 10,43, was auf

eine gute Bedienbarkeit schließen lässt. Besonders gut wurden die Fragen 8, 2, 10 und 7 bewertet, am schlechtesten die Fragen 4 und 1. Dies lässt darauf schließen, dass der entwickelte Prototyp nicht übermäßig komplex oder umständlich zu bedienen ist und kein hoher initialer Lernaufwand zu erwarten ist. Allerdings denken die Testpersonen tendenziell, dass sie die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen würden, was auf das ungewohnte VR-Setup zurückzuführen sein dürfte. Zudem gaben sie an, das System eher nicht häufig nutzen zu wollen. Dies könnte weniger auf mangelnde Usability zurückzuführen zu sein, als vielmehr mit dem empfundenen Bedarf im täglichen Arbeitsablauf oder der allgemeinen Nutzenwahrnehmung zusammenhängen.

### **5.3.5. Zusammenfassende sozialwissenschaftliche Einordnung**

Die konsequente Einbindung der Nutzer:innen in den gesamten Entwicklungsprozess erwies sich nicht nur als methodische Notwendigkeit, sondern als essenzieller Erfolgsfaktor für die Validität des Gesamtsystems. Aus sozialwissenschaftlicher Perspektive lässt sich der Mehrwert dieser partizipativen Strategie in drei Dimensionen vertiefen:

Erstens ermöglichte der iterative Co-Creation-Ansatz eine Transformation der Nutzer:innenrolle vom passiven Testobjekt zum aktiven Mitgestalter. Dies war besonders relevant, da die Zielgruppe (Planer:innen, Facility Manager:innen, Energieforscher:innen, Entscheidungsträger:innen) oft über eine hohe Fachexpertise, aber teils geringe Erfahrung mit immersiven Technologien verfügte. Durch die direkte Partizipation konnten anfängliche Berührungsängste und Skepsis gegenüber der "Spieler-Technologie" abgebaut werden. Es zeigte sich, dass die intuitive Gestaltung der Interaktionen die technologische Selbstwirksamkeit der Nutzer:innen stärkte. Sie erlebten sich als kompetent im Umgang mit dem neuen Werkzeug, was die Barriere für eine spätere Adoption im Arbeitsalltag signifikant senkte.

Zweitens förderte der Prozess einen transdisziplinären Lernprozess ("Mutual Learning"). Die Nutzer:innen entwickelten ein realistisches Verständnis für die technologischen Möglichkeiten und Grenzen (z. B. Datenaufbereitung, Hardware-Restriktionen), was einer überzogenen Erwartungshaltung entgegenwirkte. Umgekehrt erhielten die Entwickler tiefgreifende Einblicke in die impliziten Arbeitsprozesse und mentalen Modelle der Planer:innen. So wurde deutlich, dass absolute Darstellungsgenauigkeit in der Visualisierung oft weniger wichtig ist als die schnelle Vergleichbarkeit von Szenarien oder eine klare Darstellung durch simpel gehaltene Modelle. Diese Erkenntnis verhinderte eine rein technikgetriebene Entwicklung und schärfte den Fokus auf die tatsächliche Problemlösungskapazität.

Drittens lieferte die Evaluation differenzierte Erkenntnisse zur Technologieakzeptanz. Während die hedonische Motivation ("Spaßfaktor", "Wow-Effekt") initial hoch war, zeigte sich, dass die langfristige Akzeptanz fast ausschließlich von der wahrgenommenen Nützlichkeit abhängt. VR-Lösungen werden im professionellen Kontext nur dann akzeptiert, wenn sie nicht als zusätzliche Hürde, sondern als effektives Werkzeug zur Problemlösung wahrgenommen werden. Als stärkster Treiber für diese Nützlichkeit kristallisierte sich die "Kommunikationsbrücke" heraus: Die Fähigkeit der VR-Umgebung, komplexe, abstrakte Fachdaten für Laien (z. B. Investor:innen, Bürger:innen, fachfremde Stakeholder) übersetzbar und erfahrbar zu machen. Der soziale Mehrwert liegt somit in der Demokratisierung von Expertenwissen: Die Technologie dient als Medium, um die asymmetrische Informationsverteilung zwischen Expert:innen und Laien aufzulösen und Entscheidungsprozesse transparenter und inklusiver zu gestalten.

## 5.4. Wissenschaftliche Highlights und Innovationen

Beitrag, der über den Stand der Technik hinaus geht

- VR4UrbanDev schließt die Lücke zwischen hochentwickelten Simulationsumgebungen und intuitiven, immersiven Darstellungsformen und geht damit deutlich über gängige 2D-Dashboards hinaus, indem Daten orts- und objektspezifisch im Digital Twin erfahrbar werden. Die Evaluation bestätigt die Relevanz dieses Ansatzes für Technologieakzeptanz und Nutzenstiftung in professionellen Kontexten.

Technologische Integration: Durchgängige Daten- und Systemkopplung

- Der eigens entwickelte Data-Translation-Layer koppelt die Unreal Engine 5 mit IDA ICE (UBEM) und der IoT-Plattform Inframonitor und schließt damit die semantische Lücke zwischen Geometrie und Daten im Digital Twin des Innovation District Inffeld.
- Die Architektur wurde modular ausgelegt und am Testfeld erfolgreich validiert; sie ist übertragbar und skaliert von heterogenen Campusarealen hin zu Stadtquartieren.
- Ein kontextsensitive Modellaufbereitung und ein entkoppeltes Campusmodell als Unreal-Plugin sichern Performance und parallele Workflows. Zeitreihen (.prn) werden direkt eingelesen; Parameterläufe werden für die Unreal Engine aufbereitet (u. a. YAML), sodass sowohl Zeitserien als auch Parametric Runs automatisiert und konsistent visualisiert werden können.

Immersive, semantisch verknüpfte Visualisierung

- Unsichtbare Phänomene (z. B. Energiebedarf, CO<sub>2</sub>e-Emissionen, Bauteiltemperaturen) werden über intelligente Objekte direkt auf Gebäudehüllen und Bauteilen erfahrbar gemacht; dies übersetzt abstrakte KPIs in unmittelbare, räumliche Eindrücke.
- Mehrere Interaktionsebenen erhöhen den Erkenntnisgewinn: Beobachter-Perspektive am Tischmodell mit selektierbaren Objekten, dynamischen KPI-Visualisierungen und Heatmaps sowie Ich-Perspektive zur räumlich präzisen Erkundung des Campus.
- Die Fusion von Simulations- und IoT-Daten ermöglicht räumlich verortete Echtzeit- und Szenarioeinsichten, die den nächsten Entwicklungsschritt über 2D-Zeitreihen hinaus markieren.

IoT- und Simulationsdaten im Kontext des physischen Ortes

- Während 2D-Dashboards (z. B. Grafana) Systemzustände abstrahieren, projiziert VR4UrbanDev Live- und Simulationsdaten direkt auf die betroffenen Gebäude und Infrastrukturen. Das verbessert die Zuordnung von Anomalien und unterstützt Diagnose und Systemverständnis.
- Interaktive Werkzeuge (Selektion, virtuelle Sensorik, KPI-Paneele) verbinden Überblick und Detailanalyse und erleichtern Benchmarks sowie den Abgleich geplanter vs. gebauter Zustände.

## Human-Centred Design (HCD), Usability und kognitive Wirksamkeit

- Der verwendete HCD-Ansatz minimiert physische Belastungen (z. B. Cybersickness) und maximiert Nutzbarkeit; ein SUS-Score von 75,3 validiert die hohe Usability für professionelle Anwendungen.
- Die immersive Darstellung transformiert abstrakte Zahlen und hochfrequente Zeitreihen in räumliche Objekte und nutzt so die schnelle, intuitive Verarbeitung räumlicher Informationen zur Entlastung analytischer Denkprozesse.
- Langfristige Akzeptanz wird vor allem durch wahrgenommene Nützlichkeit getrieben: Die VR-Umgebung fungiert als Kommunikationsbrücke, demokratisiert Expertenwissen und macht Entscheidungen transparenter und inklusiver.

## Validierung am Realtestfeld und Skalierbarkeit

- Der erfolgreiche Einsatz im komplexen Testfeld Innovation District Inffeld belegt die technische Machbarkeit, Robustheit und Übertragbarkeit der Lösung und bildet die Grundlage für ein Living Lab sowie die Skalierung auf weitere Quartiere.

## Innovations- und Verwertungsperspektiven

- Der USP liegt in der integrierten IoT- und Simulations-Pipeline mit immersiver 3D-KPI-Visualisierung, virtuellen Sensoren, Heatmaps und Anomalieerkennung; daraus leiten sich mehrere verwertbare Produktideen und Serviceansätze ab (z. B. VR-Dashboard, Scenario Studio).

## Wissenschaftskommunikation und kognitionspsychologischer Unterbau

- Das Design folgt Prinzipien anschaulicher Wissensvermittlung: Komplexe technische Zusammenhänge werden über klare, interaktive Analogien in VR erfahrbar gemacht, was das schnelle Erfassen von Kernaussagen in dynamischen Planungskontexten erleichtert.
- Die räumliche Verortung und dynamische Codierung von Energieflüssen stützt das räumliche Gedächtnis, reduziert kognitive Last und beschleunigt den Weg von Daten zur Einsicht.

# 6 Schlussfolgerungen

Die im Projekt VR4UrbanDev gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse verdeutlichen das immense transformative Potenzial, das in der Kombination von Digitalen Zwillingen und Virtual Reality für die integrative Stadtplanung liegt. Die nachfolgenden Abschnitte fassen die zentralen Schlussfolgerungen für das Projektteam, die relevanten Zielgruppen sowie die rechtlichen und markttechnischen Rahmenbedingungen zusammen.

## 6.1. Fachliche Erkenntnisse für das Projektteam

Eine der fundamentalen Erkenntnisse für das Projektteam ist, dass die technologische Reife von Game Engines wie der Unreal Engine 5 mittlerweile einen Punkt erreicht hat, an dem sie spezialisierte Ingenieursoftware in puncto Visualisierung und Datenhandling übertreffen können. Die erfolgreiche Implementierung des Data-Translation-Layers bestätigte die Hypothese, dass die größte Herausforderung nicht in der reinen Rechenleistung liegt, sondern in der semantischen Interoperabilität zwischen heterogenen Datenwelten. Das Team lernte, dass eine automatisierte Datenpipeline der Schlüssel zur Skalierbarkeit ist; manuelle Datenimporte sind bei der Komplexität ganzer Stadtquartiere nicht praktikabel.

Ein weiteres zentrales Learning betrifft die Mensch-Computer-Interaktion. Die begleitende sozialwissenschaftliche Forschung zeigte unmissverständlich, dass technologische Exzellenz allein nicht ausreicht. Selbst der präziseste Digitale Zwilling scheitert in der Praxis, wenn die Nutzer:innenerfahrung (UX) physiologische Hürden wie Motion Sickness ignoriert. Zudem bestätigte sich, dass moderne Consumer-Hardware (wie die Meta Quest 3) aufgrund des besseren Preis-Leistungs-Verhältnisses gegenüber teurer Spezialhardware für den breiten Rollout zu bevorzugen ist.

## 6.2. Relevanz für Zielgruppen und Nutzungspotenziale

Die Projektergebnisse adressieren vier primäre Zielgruppen, für die sich unterschiedliche Nutzungsszenarien ergeben:

1. **Stadtplaner:innen und Architekt:innen:** Für diese Gruppe dient das System als Entwurfs- und Kommunikationswerkzeug. Sie können Planungsvarianten (z. B. Fassadenbegrünung, Nachverdichtung) visualisieren und deren energetische Auswirkungen in der immersiven Umgebung intuitiv bewerten. Dies vereinfacht sowie beschleunigt Entscheidungsprozesse und reduziert Planungsfehler.
2. **Energieforscher:innen und Ingenieur:innen:** Diese Gruppe profitiert von der kontextualisierten Datenanalyse. Anstatt abstrakte Zeitreihen in Tabellen zu prüfen, können sie Anomalien (z. B. überdurchschnittlicher Energiebedarf in spezifischen Gebäuden) räumlich verorten und systemische Zusammenhänge schneller erkennen.
3. **Facility Manager:innen:** Durch die Integration von IoT-Echtzeitdaten wird der Digitale Zwilling zum operativen Monitoring-Instrument. Facility Manager:innen können den

aktuellen Betriebszustand des Quartiers räumlich überblicken oder im Detail begehen und Wartungsbedarf (z. B. ausgefallene Sensoren) intuitiv lokalisieren.

4. **Politische Entscheidungsträger:innen und Öffentlichkeit:** Für Laien kann die abstrakte Komplexität der Energiewende (z. B. die Bedeutung einer CO<sub>2</sub>e-Reduktion von 20 Prozent) durch die immersive Visualisierung verständlich übersetzt werden. Dies prädestiniert die Technologie für den Einsatz in Bürgerbeteiligungsverfahren, um Akzeptanz für notwendige, aber oft unsichtbare Infrastrukturmaßnahmen zu schaffen.

### 6.3. Rechtliche Rahmenbedingungen

Bei der Weiterentwicklung und Verwertung sind spezifische rechtliche Hürden zu beachten. Ein zentraler Aspekt ist der Datenschutz (DSGVO). Da moderne VR-Headsets über Kameras und Sensoren verfügen, die nicht nur die Umgebung scannen, sondern auch biometrische Bewegungsdaten der Nutzer:innen erfassen, müssen strikte Nutzungsvereinbarungen getroffen werden, insbesondere wenn Cloud-basierte Dienste (wie Spracherkennung) genutzt werden.

Ein weiterer Punkt betrifft die Urheberrechte an BIM- und 3D-Modellen. Die Nutzung detaillierter Architekturmodelle erfordert klare Lizenzvereinbarungen mit den Urhebern (Architekten), insbesondere wenn diese Modelle in einer kommerziellen VR-Anwendung publiziert werden. Zudem sind bei der Nutzung von Geodaten (z. B. Google Maps via Cesium) die Lizenzbedingungen der Anbieter zu prüfen, die oft eine kommerzielle Nutzung einschränken oder gebührenpflichtig machen. Schließlich ist bei der Kommerzialisierung der Software-Lösung das Lizenzmodell der Unreal Engine zu beachten, das ab einer gewissen Umsatzschwelle Lizenzgebühren (Royalties) vorsieht.

### 6.4. Verbreitungsaktivitäten und Stakeholder-Interaktion

Die Aufbereitung und Kommunikation der Projektinhalte erfolgte durch ein breites Spektrum an Aktivitäten, die von akademischen Publikationen über Stakeholder-Workshops bis hin zu Online-Präsenzen reichten.

#### 6.4.1. Aufbereitung der Projektinhalte für Stakeholder und Vernetzung

Dabei wurden die inhaltlichen Ergebnisse der Technologieentwicklung zielgruppengerecht aufbereitet. Die Forschungsergebnisse wurden in Arbeitstreffen mit Kollegen diskutiert, in Meetings und Workshops vorgestellt und thematisiert sowie in einem abschließenden Projektworkshop mit allen beteiligten Akteur:innen kommuniziert. Fokus-Zielgruppen waren dabei Projektpartner und deren erweitertes Netzwerk sowie Mitglieder der Strategie Klimaneutrale TU Graz 2030 und des Entwicklungsschwerpunktes Innovation District Inffeld.

- **Abschlussworkshop UserGRIDs:** Im Rahmen des Projekts UserGRIDs, das für das Projekt Klimaneutrale TU Graz 2030 und dessen Testgebiet Innovation District Inffeld einen wichtigen Baustein bildete, wurden beim Abschlussworkshop auch die Arbeitsinhalte von VR4UrbanDev vorgestellt.

- **Workshop Gebäude und Technik:** In einem TU Graz–internen Workshop wurden die Arbeitsinhalte von VR4UrbanDev den teilnehmenden Mitarbeiter:innen der Abteilung für Gebäude und Technik präsentiert.
- **Arbeitstreffen Institut für Innovation & Industrie Management (IIM) TU Graz:** In einem Arbeitstreffen mit Patrick Herstätter vom Institut für Innovation & Industrie Management an der TU Graz wurden geplante Inhalte, Forschungsfragen und Ziele aus dem Projekt VR4UD diskutiert sowie Parallelen zu Forschungstätigkeiten am IIM besprochen. Das IIM betreibt unter anderem ein Design Lab mit multifunktionaler und multimedialer Infrastruktur sowie VR- & AR-Umgebungen. Eine Kooperation mit Erfahrungs- und Wissensaustausch wurde vereinbart.
- **Arbeitstreffen Universität Stuttgart – Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE):** Mit Stefanie Lott vom IGTE fand ein Arbeitstreffen zum Austausch zwischen dem Projekt VR4UD und DiTEoS (Diskursive Transformation von Energiesystemen) statt. Dabei wurden Ideenansätze, Herangehensweisen und Möglichkeiten der VR-Technologie im spezifischen Kontext der Energieforschung diskutiert.
- **Energiemanagement Audit der TU Graz 2024:** Im Rahmen des jährlichen Audits wurde das Projekt den anwesenden Personen und Auditoren als Teil der Forschungsstrategie Innovation Campus Inffeld vorgestellt.
- **VR als Methode zur Weiterentwicklung des Innovation District Inffeld:** Mitte 2024 wurde mit der Arbeit am Konzept zur Weiterentwicklung des Innovation District Inffeld begonnen. Virtual Reality als Methode bildet hier einen wichtigen Baustein der Strategie und wurde im Jahr 2025 nachhaltig etabliert. Das fertige Entwicklungskonzept und die Publikation darüber sind für 2026 geplant.
- **Workshop mit Vizerektor für Infrastruktur:** Am 12.11.2025 fand ein Workshop mit dem Vizerektor für Infrastruktur und Nachhaltigkeit der TU Graz, Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Michael Monsberger statt (siehe Abbildung 31). Prof. Monsberger wurde das Projekt VR4UrbanDev vorgestellt und er hatte im Anschluss die Möglichkeit, den VR-Prototypen ausgiebig zu testen. In der anschließenden Diskussion wurde gemeinsam mit dem Projektteam über vielfältige Einsatzpotenziale für die TU Graz gesprochen.
- **Energiemanagement Audit der TU Graz 2025:** Im Rahmen der zweitägigen energietechnischen Nachhaltigkeitszertifizierung (Energieaudit) 2025 der TU Graz fand ein Workshop mit einem Mitarbeiter des TÜV-Teams statt. Dabei wurde das Projekt VR4UrbanDev vorgestellt und der Teilnehmer konnte den VR-Prototypen ausgiebig testen. Das Feedback fiel sehr positiv aus.
- **Workshop BIG:** Am 10.12.2025 fand ein halbtägiger Workshop mit sechs Mitarbeiter:innen des Unternehmensbereichs Universitäten der Bundesimmobiliengesellschaft (BIG) statt (siehe Abbildung 32). Den Teilnehmer:innen wurden drei Kernaktivitäten in den Forschungstätigkeiten am Innovation District Inffeld vorgestellt, wobei das Projekt VR4UrbanDev den Schwerpunkt darstellte. Im Anschluss an die Präsentationen konnten die Teilnehmer:innen in zwei Gruppen an zwei Stationen den VR-Prototypen persönlich testen. Zum Abschluss wurden die Inhalte und Erlebnisse im Plenum diskutiert und der System-

Usability-Scale-Fragebogen des Game Lab Graz ausgefüllt. Im Nachgang wurde das Projekt eingeladen, eine Veröffentlichung in der Berichtsreihe NFI-Berichte der BIG zu tätigen.



Abbildung 31: Workshop und Prototypentest mit Vizerektor Prof. Monsberger. Quelle: VR4UrbanDev



Abbildung 32: Eindrücke aus dem halbtägigen Workshop mit 6 Mitarbeiter:innen des Unternehmensbereichs Universitäten der Bundesimmobiliengesellschaft (BIG). Quelle: VR4UrbanDev

## 6.4.2. Wissenschaftliches und populärwissenschaftliches Publizieren

Zur Dissemination in der wissenschaftlichen Community wurden folgende Aktivitäten gesetzt:

- **Publikation Smart Energy Conference 2023:** Besuch der International Conference on Smart Energy Systems and District Heating in Kopenhagen (11.–14. September 2023) und Präsentation der Projektinhalte in einem Vortrag. Der Beitrag mit dem Titel "Virtual reality digital twin for immersive energy research and communication" wurde im Book of Abstracts der Konferenz veröffentlicht [32] - Lund et al., 2023, S. 79-80
- **Vernetzungstreffen Forschungsverbund DiTenS:** Im Februar 2024 fand in Stuttgart ein Vernetzungstreffen im Kontext von partizipativen Verfahren zur Energiewende statt, bei dem das Projekt vorgestellt wurde.
- **Online-Vernetzungsmeeting mit der Hochschule Luzern (HSLU):** Im März 2024 trafen sich das Projektteam und das Team der HSLU online, um Erfahrungen in der Visualisierung von Mikroklimasimulationsdaten über digitale Zwillinge in VR auszutauschen.
- **Konferenz 30th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology (VRST):** Der VR-Twin wurde im Oktober 2024 in Trier als Poster und Paper vorgestellt.
- **Konferenz Motion, Interaction and Games 2025:** Der VR-Twin wurde im Dezember 2025 im Rahmen einer Konferenz der ACM SIGGRAPH in Zürich als Poster und Paper vorgestellt.
- **Kooperation mit Arnaud Prouzeau (Inria, FR):** Über das Projektende hinaus wird an einer Kooperation gearbeitet, um durch gemeinsam betreute wissenschaftliche Arbeiten weitere Erkenntnisse zu Visualisierungsformen in VR zu gewinnen.
- **Publikation Smart Energy Conference 2026:** Besuch der International Conference on Smart Energy Systems and District Heating in Aalborg (September 2026) und Präsentation der Projektergebnisse ist in Planung.
- **Paper Publikation 2026:** Die Publikation der Projektergebnisse in Form eines Papers in einem internationalen Fachjournal ist in Arbeit.

## 6.4.3. Online-Präsenz und Social Media

- **TU Graz Homepage "Innovation District Inffeld":** Die Inhalte des Projekts wurden in einer Kurzfassung auf Deutsch und Englisch für die Veröffentlichung auf der Homepage der TU Graz bereit gestellt.
- **Veröffentlichung TU Graz Pure:** Das Projekt wurde im TU Graz Forschungsportal veröffentlicht und ist über die Elsevier Plattform Pure gelistet.
- **Publikation des Projektes auf Twitter bzw. X:** Es wurden verschiedene Postings auf der Plattform Twitter bzw. X über das Projekt durchgeführt.
- **Projektpublikationen auf Researchgate:** Auf der Plattform Researchgate wurde eine Projektseite angelegt und der SES-Konferenzbeitrag veröffentlicht.

- **Weitere Publikationen:** Kurzbeschreibungen des Projekts erschienen im "UserGRIDs Factsheet" des Green Energy Labs, im UserGRIDs Endbericht sowie auf der Homepage des Projektpartners DiLT.

## 6.5. Verwertungspotenzial und Geschäftsmodelle

Die wirtschaftlichen Projektpartner beschäftigten sich während der Projektarbeit laufend mit möglichen Verwertungspotenzialen der Forschungsergebnisse und Projektinhalte. Dabei wurden interessanten Möglichkeiten für eine zukünftige kommerzielle Nutzung identifiziert. Weiters flossen die gefundenen Verwertungspotenziale in bereits eingereichte oder in Arbeit befindliche Folgeprojektanträge des Konsortiums mit ein.

**Verwertung durch EQUA:** Für EQUA war die innovative Projektarbeit von großem Mehrwert. Die Ergebnisse fließen in die zukünftige Produktweiterentwicklung der IDA-Simulationsumgebung und deren Subsysteme ein (siehe Abbildung 33). Es wird über die Entwicklung eines Addons zur VR-Visualisierung von Gebäudesimulationsdaten und virtuellen Sensoren für fortgeschrittene Nutzer:innen nachgedacht. Da hierfür weiterführende Forschung notwendig ist, beteiligt sich EQUA an Folge-Forschungsanträgen. Zudem kann die Technologie für VR-Animationen in PR-Kampagnen und im Online-Marketing genutzt werden, um einem breiteren Publikum komplexe Simulationsergebnisse verständlich zu machen.

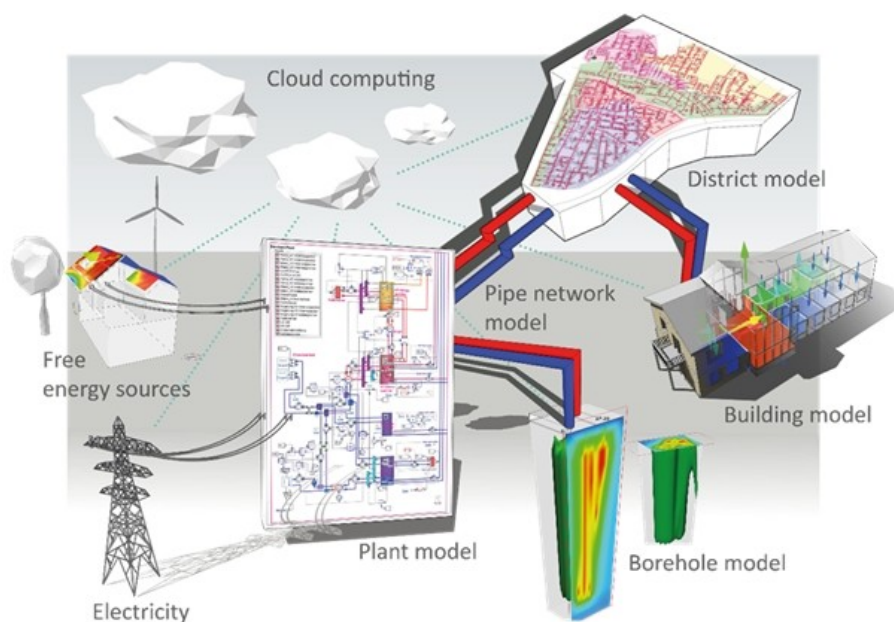


Abbildung 33: Subsysteme der IDA-Simulationsumgebung; Quelle: VR4UrbanDev

**Verwertung durch DiLT Analytics:** Mit den im Projekt entwickelten VR-Visualisierungsmethoden kann DiLT Analytics sein Portfolio an Energiedienstleistungen erweitern und VR als Gamechanger in den Bereichen Energie, Stadtentwicklung und IoT positionieren. DiLT konnte seine Schnittstellenkompetenz in einem innovativen Feld (Energietechnische Simulation, IoT, Realtime, VR-Visualisierung) signifikant erweitern. Als potenzielle Kunden werden Gebäudemanager:innen, Stadtentwickler sowie öffentliche Einrichtungen und politische Entscheidungsträger:innen gesehen.

Aus Stakeholder-Interaktionen (u. a. mit anonymisierten internationalen Netzwerkpartnern in 2025) ergaben sich vier konkrete Ideen für nachfolgende Kommerzialisierungsaktivitäten:

1. **Idee 1: „DiLT VR Facility Twin“:** Ein VR-Tool für Betriebsführung, Fehlerdiagnose und Wartungsoptimierung.
2. **Idee 2: „DiLT VR Facility Twin Quality“:** Ein VR-Tool für die Bauaufsicht und die Inbetriebnahmephase von Heizungs-, Klima-, Lüftungs- und Sanitär(HKLS)-Anlagen. Mögliche Funktionalitäten umfassen virtuelle Sensoren für KPI-Berechnungen, Live-Anomalieerkennung, Heatmaps für Benchmarks sowie den Abgleich von Planned vs. As Built. Der USP liegt in der integrierten IoT- und Simulations-Pipeline, die im D/A/CH-Raum einzigartig wäre.
3. **Idee 3: „DiLT VR Scenario Studio“:** Eine VR-Simulation für Energieeffizienz, Sanierung und Systemauslegung. Kunden sehen live die Auswirkungen optimierter Planungsprozesse (z. B. PV, Dämmung, Lastverschiebung).
4. **Idee 4: „DiLT Immersive Insights“:** Ein VR-Dashboard zur 3D-KPI-Visualisierung. Der USP ist die immersive und intuitive Darstellung komplexer KPIs durch Gamification-Effekte, was die Usability und Verständlichkeit erhöht.

Diese Ideen wurden als Factsheets zusammengefasst und hinsichtlich TRL/CRL (Technology/Commercial Readiness Level) sowie Marktpotenzial bewertet. Zusätzlich wurden im Projekt Nutzer:innenprofile, Probleme und VR-Vorteile in systematischen Tabellen dokumentiert, was ein relevantes Method Asset für die interne Nutzung bei DiLT darstellt.

# 7 Ausblick und Empfehlungen

Das Projekt VR4UrbanDev hat erfolgreich den "Proof of Concept" für einen immersiven Digitalen Zwilling im urbanen Energiekontext erbracht. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen und den identifizierten technologischen sowie soziotechnischen Schnittstellen lassen sich konkrete Empfehlungen für zukünftige Forschungsarbeiten und die Umsetzung in Demonstrationsvorhaben ableiten.

## 7.1. Empfehlungen für weiterführende Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Um das Potenzial der Technologie voll auszuschöpfen und den Übergang vom Prototyp zur marktfähigen Standardlösung zu ebnen, sollten sich zukünftige F&E-Aktivitäten auf vier strategische Schwerpunkte konzentrieren:

**1. Entwicklung von Multi-User-Kollaborationsumgebungen:** Der aktuelle Prototyp ist auf eine Einzelnutzer:innen-Erfahrung (Single-User) ausgelegt. Für komplexe Planungsprozesse ist jedoch der soziale Austausch essenziell. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Implementierung synchroner Multi-User-Umgebungen konzentrieren, in denen mehrere Akteur:innen (z. B. Architekt:in in Graz, Investor:in in Wien, Fachplaner:innen im Homeoffice) als Avatare im selben virtuellen Modell interagieren. Forschungsbedarf besteht hierbei in der Replikation dynamischer Datenzustände über Netzwerke hinweg (Netzwerk-Latenz vs. Simulationsgenauigkeit) sowie in der Gestaltung von Interaktionswerkzeugen für die kollaborative Entscheidungsfindung (z. B. gemeinsames Annotieren von Bauteilen im virtuellen Raum).

**2. Echtzeit-Co-Simulation und KI-Integration:** Bisher basieren die Simulationsdaten auf vorberechneten Zeitreihen (Pre-Calculated). Der nächste evolutionäre Schritt ist die Echtzeit-Kopplung (Co-Simulation). Ändert eine nutzende Person im VR-Raum einen Parameter (z. B. Fenstertyp oder Dämmstärke), sollte eine Cloud-basierte Simulationsengine das Ergebnis "on-the-fly" neu berechnen und zurückspielen. Ergänzend dazu bietet die Integration von Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI) enormes Potenzial. KI-Modelle könnten als "virtuelle Assistenten" fungieren, die Nutzer:innen proaktiv auf energetische Anomalien hinweisen oder Optimierungsvorschläge für den Gebäudebetrieb generieren (Predictive Maintenance).

**3. Erweiterung auf Mixed Reality (MR) und Augmented Reality (AR):** Mit der Verfügbarkeit von leistungsfähigen Passthrough-Geräten (wie der im Projekt genutzten Meta Quest 3) verschwimmen die Grenzen zwischen VR und AR. Forschungsvorhaben sollten untersuchen, wie der Digitale Zwilling direkt vor Ort im Gebäude genutzt werden kann. Ein Szenario wäre die "Röntgenblick"-Funktion für Facility Manager:innen, bei der Leitungsinfrastrukturen oder Sensordaten (z. B. Temperaturverläufe) lagerichtig über das reale Kamerabild der Brille geblendet werden. Hierbei sind technische Herausforderungen im Bereich des präzisen, markerlosen Trackings (Spatial Anchors) in großen Innenräumen zu lösen.

**4. Automatisierung der "Scan-to-Twin"-Pipeline:** Trotz der entwickelten Automatisierungsskripte bleibt die Aufbereitung von BIM-Daten ein sehr zeitintensiver Faktor. Weiterführende Arbeiten sollten sich der Entwicklung von Algorithmen widmen, die unsaubere oder unvollständige Geometriedaten (z. B. aus Punktwolken-Scans oder fehlerhaften IFC-Exporten) mittels Machine Learning automatisch semantisch klassifizieren und für die VR-Engine optimieren. Ziel ist eine "One-Click-Solution", die die Hürde der Datenerstellung minimiert.

## 7.2. Potenzial für Demonstrationsvorhaben

Die Ergebnisse von VR4UrbanDev legen die Basis für großangelegte Demonstrationsprojekte. Die Realisierung solcher Vorhaben bietet spezifische Chancen, birgt jedoch auch Herausforderungen und Risiken, die im Vorfeld adressiert werden müssen.

### Chancen:

- **Partizipative Stadtentwicklung:** Ein sehr großes Potenzial liegt in der Einbindung der Öffentlichkeit. Ein Demonstrationsvorhaben im Rahmen eines realen Stadtentwicklungsprojekts (z. B. Neugestaltung eines Quartiersplatzes) könnte die VR-Technologie nutzen, um Bürger:innenakzeptanz zu schaffen. Die immersive Begehung zukünftiger Szenarien entmystifiziert komplexe Bauvorhaben und fördert einen konstruktiven Dialog.
- **Aus- und Weiterbildung:** Ein "Virtual Training Center" für Facility Manager:innen und Energieberater:innen könnte etabliert werden. Das gefahrlose Simulieren von kritischen Betriebszuständen (z. B. Ausfall der Kühlung) in VR erhöht die Handlungssicherheit des Personals im Ernstfall.
- **Marketing und Standortattraktivität:** Für Immobilienentwickler:innen und Standortbetreibende (wie die BIG) stellt der immersive Zwilling ein innovatives Marketinginstrument dar, um die technologische Vorreiterrolle und Nachhaltigkeitsziele (ESG-Konformität) sichtbar zu machen.

### Herausforderungen:

- **Datenverfügbarkeit und -qualität:** Die Realisierung steht und fällt mit der Qualität der Basisdaten. In vielen Bestandsgebäuden fehlen konsistente BIM-Modelle. Ein Demonstrationsprojekt muss daher Ressourcen für die digitale Nacherfassung (z. B. Laserscanning) einplanen.
- **Integration in Legacy-Systeme:** Für den operativen Betrieb muss der Digitale Zwilling Schnittstellen zu bestehenden Gebäudeleitsystemen (GLT) und CAFM-Software (Computer Aided Facility Management) bieten. Die Heterogenität dieser Altsysteme stellt eine signifikante Integrationshürde dar.
- **Hardware-Management:** Der großflächige Einsatz erfordert Prozesse für das Device-Management (Updates, Hygiene bei Headsets, Diebstahlschutz bei öffentlichen Ausstellungen).

## Risiken:

- **Akzeptanzrisiko ("Novelty Effect"):** Es besteht das Risiko, dass die VR-Anwendung nach dem ersten "Wow-Effekt" nicht mehr genutzt wird, wenn sie keinen dauerhaften operativen Mehrwert bietet. Um dem entgegenzuwirken, muss der Fokus strikt auf der Nützlichkeit (Usability) und der Integration in tägliche Arbeitsprozesse liegen.
- **Technologische Obsoleszenz:** Der VR-Markt ist extrem schnelllebig. Software-Architekturen müssen modular gehalten werden (wie im Projekt durch OpenXR geschehen), um nicht von einem spezifischen Hardware-Hersteller abhängig zu werden.
- **Datenschutz und Cyber-Security:** Die Verknüpfung von kritischer Infrastruktur (Energieversorgung) mit IoT und Cloud-Diensten schafft potenzielle Angriffsvektoren. Ein Demonstrationsvorhaben muss ein robustes Sicherheitskonzept ("Security by Design") beinhalten, um Manipulationen an Steuerungsanlagen oder den Abfluss sensibler Nutzer:innendaten zu verhindern.

# 8 Verzeichnisse

## 8.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Das vom IWT im Rahmen des ECR-Smart City 2020-Projekts entwickelte numerische Energiesystemmodell; Quelle: VR4UrbanDev.....	9
Abbildung 2: The CityEngine VR Experience for Unreal Engine [12]; Quelle: ESRI .....	13
Abbildung 3: Beispiel für die Darstellung einer Energiemonitoring-Oberfläche in Grafana [19]; Quelle: Grafana.....	15
Abbildung 4: Schema, wie Echtzeit- und Simulationsdaten des Innovation District Inffeld in die VR-Umgebung integriert werden. Quelle: VR4UrbanDev.....	18
Abbildung 5: Gebäude Inffeldgasse 19, im Detail raumweise modelliert. Quelle: VR4UrbanDev .....	22
Abbildung 6: Links: Teleportation, rechts: kontinuierliche Bewegung (Smooth Movement). Quelle: VR4UrbanDev .....	25
Abbildung 7: Links: Änderung der virtuellen Handpose basierend auf der Entfernung zum berührbaren Objekt, rechts: Hovering-Interaktion der virtuellen Hand. Quelle: VR4UrbanDev.....	25
Abbildung 8: Die Beobachtenden-Perspektive im virtuellen Architekturbüro. Ein spezieller Tisch ermöglicht die Manipulation der virtuellen Welt. Quelle: VR4UrbanDev .....	26
Abbildung 9: Verschiedene Gadgets und Interaktionsmöglichkeiten am virtuellen Tisch mit eingeblendetem UIM-Modell. Quelle: VR4UrbanDev.....	27
Abbildung 10: Tischmodell zur Datenvisualisierung in der Beobachtenden-Perspektive. Auf dem Tisch wurde ein Gebäude selektiert, woraufhin ein hochauflösendes Gebäudemodell und eine Datenvisualisierung eingeblendet werden. Quelle: VR4UrbanDev .....	28
Abbildung 11: UIM-Modell eingefärbt als Heatmap für den simulierten absoluten Kühlenergiebedarf (links) und Heizenergiebedarf (rechts) im Jahr 2022. Quelle: VR4UrbanDev .....	28
Abbildung 12: Visualisierung der Rohrleitungen der Fernwärme- und -kälteversorgung am Campus Inffeldgasse im UIM-Modell. Quelle: VR4UrbanDev.....	29
Abbildung 13. Mit dem Selektionstool wurde ein Gebäude am UIM-Modell markiert (Mitte), woraufhin Simulations- und IoT-Daten des entsprechenden Gebäudes (rechts) und das selektierte Gebäude von oben (links) gezeigt werden. Quelle: VR4UrbanDev.....	30
Abbildung 14: Simulationspaneele zur Gegenüberstellung verschiedener Parameterkombinationen. Quelle: VR4UrbanDev.....	30
Abbildung 15: Geschossplan, in dem ein Raum ausgewählt wurde (links), interaktive Datenvisualisierung für den selektierten Raum (Mitte) und Schieberegler zum Wechseln zwischen unterschiedlichen Datenvisualisierungen (rechts). Quelle: VR4UrbanDev.....	31
Abbildung 16: Campus-Außenumgebung (Ich-Perspektive). Quelle: VR4UrbanDev .....	32
Abbildung 17: Detailansicht der Campus-Außenumgebung im digitalen Zwilling. Quelle: VR4UrbanDev .....	32

Abbildung 18: Integration von 3D-Kartendaten mittels des Cesium-Plugins als Basisumgebung. Ansicht im Unreal Engine-Editor. Quelle: VR4UrbanDev .....	33
Abbildung 19: Handgelenksinventar mit Zeitschieberegler. Quelle: VR4UrbanDev .....	34
Abbildung 20: Auslesen und Anzeigen von Datenwerten einzelner Gebäude mit dem Selektionstool in der Überblicksperspektive. Quelle: VR4UrbanDev .....	34
Abbildung 21: Visualisierung der Bodenversiegelung am Campus Inffeldgasse. Quelle: VR4UrbanDev .....	35
Abbildung 22: Visualisierung von Heatmaps in der Überblicksperspektive (Zoom-Out) im Nachtmodus. Quelle: VR4UrbanDev .....	35
Abbildung 23: Modell mit überlagerter Leitungsinfrastruktur der Fernwärme- und -kälteversorgung am Campus Inffeldgasse. Quelle: VR4UrbanDev .....	36
Abbildung 24: Visualisierungsfunktion von IoT-Daten in der Campus-Außenumgebung. Quelle: VR4UrbanDev .....	36
Abbildung 25: Detailansicht des virtuellen Büroraums im Gebäude Inffeldgasse 19 als Beispiel zur Visualisierung von virtuellen Sensoren in Innenräumen. Quelle: VR4UrbanDev .....	37
Abbildung 26: Visualisierung von Temperaturen in unterschiedlichen Schichten des Bodenaufbaus im Büroraum auf Basis von Ergebnissen aus der bauphysikalischen Simulation in IDA ICE. Quelle: VR4UrbanDev .....	38
Abbildung 27: Eindrücke aus den Interviews des VR-Prototypen im Rahmen der Usergruppenbefragung. Quelle: VR4UrbanDev .....	40
Abbildung 28: Flyer für die Einladung zum Stakeholder-Workshop. Quelle: VR4UrbanDev .....	42
Abbildung 29: Eindrücke aus den Tests des VR-Prototypen im Rahmen des Stakeholder-Workshops. Quelle: VR4UrbanDev .....	42
Abbildung 30: Ergebnisse der Befragung mit dem System-Usability-Scale-Fragebogen. Quelle: VR4UrbanDev .....	43
Abbildung 31: Workshop und Prototypentest mit Vizerektor Prof. Monsberger. Quelle: VR4UrbanDev .....	50
Abbildung 32: Eindrücke aus dem halbtägigen Workshop mit 6 Mitarbeiter:innen des Unternehmensbereichs Universitäten der Bundesimmobiliengesellschaft (BIG). Quelle: VR4UrbanDev .....	50
Abbildung 33: Subsysteme der IDA-Simulationsumgebung; Quelle: VR4UrbanDev .....	52

## 8.2. Literaturverzeichnis

- [1] Edtmayer H, Schwab E, Hoffer K-U, Mach T. Projektbericht ECR-Smart City 2020: Graz entwickelt sich zu einer „Smarten City“. 2021.
- [2] Innovation District Inffeld - TU Graz n.d. <https://www.tugraz.at/tu-graz/universitaet/klimaneutrale-tu-graz/innovation-district-inffeld> (accessed February 9, 2026).
- [3] Liu X. Three-Dimensional Visualized Urban Landscape Planning and Design Based on Virtual Reality Technology. *IEEE Access* 2020;8:149510–21. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3016722>.
- [4] Ortner T, Sorger J, Steinlechner H, Hesina G, Piringer H, Groller E. Vis-A-Ware: Integrating Spatial and Non-Spatial Visualization for Visibility-Aware Urban Planning. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 2017;23:1139–51. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2016.2520920>.
- [5] Schweiger G, Exenberger J, Pirker J, Safikhani S, Murschetz J, Monsberger M, et al. Künstliche Intelligenz für die Erstellung von CityGML Modellen und VR Visualisierung. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK); 2022.
- [6] Ens B, Bach B, Cordeil M, Engelke U, Serrano M, Willett W, et al. Grand Challenges in Immersive Analytics. *Proceedings of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, New York, NY, USA: ACM; 2021, p. 1–17. <https://doi.org/10.1145/3411764.3446866>.
- [7] Whitlock M, Smart S, Szafir DA. Graphical Perception for Immersive Analytics. *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, IEEE; 2020, p. 616–25. <https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00084>.
- [8] Borrmann A, König M, Koch C, Beetz J, editors. *Building Information Modeling: Technologische Grundlagen und industrielle Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien; 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-33361-4>.
- [9] Gil J. City Information Modelling: A Conceptual Framework for Research and Practice in Digital Urban Planning. *Built Environment* 2020;46:501–27. <https://doi.org/10.2148/benv.46.4.501>.
- [10] Davila Delgado JM, Oyedele L, Demian P, Beach T. A research agenda for augmented and virtual reality in architecture, engineering and construction. *Advanced Engineering Informatics* 2020;45:101122. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2020.101122>.
- [11] Zhang C, Zeng W, Liu L. UrbanVR: An immersive analytics system for context-aware urban design. *Computers & Graphics* 2021;99:128–38. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2021.07.006>.
- [12] Arisona S, Gümügümcü H. The CityEngine VR Experience for Unreal Engine: A Virtual Reality Experience for Urban Planning Applications. *ArcGIS Blog* n.d. <https://www.esri.com/arcgis-blog/products/city-engine/design-planning/ce-ue4-vr-experience/> (accessed January 28, 2025).
- [13] Stenberg T. 3D-Visualisering som hjälpmedel i modern planering : En utvärdering av verktyget City Planner med hjälp av fokusgrupper. 2013.
- [14] Enders M, Hoßbach N. Dimensions of Digital Twin Applications - A Literature Review. 2019.
- [15] Jones D, Snider C, Nassehi A, Yon J, Hicks B. Characterising the Digital Twin: A systematic literature review. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2020;29:36–52. <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.02.002>.
- [16] IoT-Plattformen – Amazon & das “Allesnetz” – Amazon Web Services (AWS). Amazon Web Services, Inc n.d. <https://aws.amazon.com/de/iot/> (accessed January 28, 2025).
- [17] Azure IoT – IoT-Plattform | Microsoft Azure n.d. <https://azure.microsoft.com/de-de/solutions/iot> (accessed January 28, 2025).
- [18] FIWARE - Open APIs for Open Minds 2021. <https://www.fiware.org/> (accessed January 28, 2025).
- [19] Grafana dashboards. Grafana Labs n.d. <https://grafana.com/grafana/dashboards/> (accessed January 28, 2025).
- [20] Kahneman D. *Schnelles Denken, langsames Denken*. Siedler Verlag; 2012.

- [21] Rosling H. Hans Rosling: The best stats you've ever seen | TED Talk. TED Ideas Worth Spreading 2006. [https://www.ted.com/talks/hans\\_rosling\\_the\\_best\\_stats\\_you\\_ve\\_ever\\_seen](https://www.ted.com/talks/hans_rosling_the_best_stats_you_ve_ever_seen) (accessed November 17, 2022).
- [22] Rosling H. Hans Rosling: Global population growth, box by box | TED Talk n.d. [https://www.ted.com/talks/hans\\_rosling\\_global\\_population\\_growth\\_box\\_by\\_box](https://www.ted.com/talks/hans_rosling_global_population_growth_box_by_box) (accessed January 28, 2025).
- [23] Dawkins R. *The Extended Selfish Gene*. Oxford University Press; 2016.
- [24] Klimaneutrale TU Graz - TU Graz n.d. <https://www.tugraz.at/tu-graz/universitaet/klimaneutrale-tu-graz/klimaneutrale-tu-graz/> (accessed February 9, 2026).
- [25] Download Datasmith Exporter plugins for Unreal Engine. Unreal Engine n.d. <https://www.unrealengine.com/en-US/plugins> (accessed March 24, 2026).
- [26] Edtmayer H, Brandl D, Mach T, Schlager E, Gursch H, Lugmair M, et al. Modelling virtual sensors for real-time indoor comfort control. *Journal of Building Engineering* 2023;67:106040. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.106040>.
- [27] IDA ICE - Simulation Software | EQUA n.d. <https://equa.se/de/ida-ice> (accessed March 24, 2026).
- [28] Geosphere, Messnetze n.d. <https://geosphere.at/de/daten/datengrundlage/messnetze> (accessed February 12, 2026).
- [29] Meteonorm n.d. <https://meteonorm.com/en/> (accessed February 12, 2026).
- [30] Lee J-Y, Marotzke J, Bala G, Cao L, Corti S, Dunne JP, et al. Future global climate: scenario-based projections and near-term information. In: Masson-Delmotte V, Zhai P, Pirani A, Connors SL, Péan C, Berger S, et al., editors. *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press; 2021, p. 553–672. <https://doi.org/10.1017/9781009157896.001>.
- [31] Cesium for Unreal. Cesium 2026. <https://cesium.com/platform/cesium-for-unreal/> (accessed March 24, 2026).
- [32] *Book of Abstracts: 9th International Conference on Smart Energy Systems*. Aalborg Universitet; 2023.

### 8.3. Abkürzungsverzeichnis

3D CAD	3-dimensional Computer-Aided Design
API	Application Programming Interface
BIM	Building Information Modeling
CAD	Computer-Aided Design
CIM	City Information Modeling
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
CRL	Commercial Readiness Level
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
DT	Digital Twin
GIS	Geografisches Informationssystem
HCD	Human-Centred Design
HCI	Human-Computer Interaction
HKLS	Heizung, Klima, Lüftung, Sanitär
IFC	Industry Foundation Classes
IoT	Internet of Things
KPI	Key Performance Indicator
LOD	Level of Detail
ROI	Return on Investment
SUS	System Usability Scale
TRL	Technology Readiness Level
UBEM	Urban Building Energy Modeling
UE	Unreal Engine
UI	User Interface
UIM	Urban Information Modeling
UX	User Experience
VR	Virtuelle Realität

# 9 Anhang

## 9.1. Data Management Plan

Da im Projekt VR4UrbanDev umfangreiche Datenmengen erhoben, verarbeitet, analysiert und generiert wurden – von 3D-Geometriedaten über energetische Simulationen bis hin zu Nutzer:innenfeedback – wurde ein Data Management Plan erstellt. Dieser DMP regelt den Umgang mit den Forschungsdaten auf Basis der „FAIR“-Prinzipien (Findable, Accessible, Interoperable, Reusable) und definiert Zugriffsrechte, Speicherung und Dokumentation.

### 9.1.1. Datenerstellung und Dokumentation

Im Projekt wurde auf eine Reihe bestehender Datensätze der TU Graz sowie externer Quellen zurückgegriffen. Die nachfolgende Tabelle 1 fasst diese zusammen.

**Tabelle 1: Übersicht verwendeter (externer/interner) Daten**

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
<b>3D-Bestandsmodelle (Campus Inffeldgasse)</b>	Geometrie / CAD	BIM / IFC / Vectorworks	TU Graz, Institut für Wärmetechnik	Eingeschränkt (Intern)	-
<b>GIS-Daten (Bebauungsplan, Entwicklungskonzept)</b>	Geodaten	Raster- & Vektordaten	TU Graz, Institut für Wärmetechnik	Eingeschränkt (Intern)	-
<b>Wetterdaten (Standort Graz)</b>	Zeitreihen	Klimadaten (TRY - Test Reference Year)	ZAMG / GeoSphere Austria	öffentlich	<a href="#">GeoSphere Data Hub</a>
<b>IoT-Sensordaten (Historisch)</b>	Zeitreihen	CSV / SQL-Dump	TU Graz (Institut für Wärmetechnik)	Eingeschränkt (Intern)	-

Im Zuge der Projektarbeit entstanden neue Datensätze, insbesondere die VR-Umgebung selbst, die Simulationsergebnisse und die Resultate der Nutzer:innenstudien.

**Tabelle 2: Übersicht der im Projekt generierten Daten**

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
<b>VR-Twin</b>	Unreal Engine 5 Projektdateien (Source Code, Blueprints, Assets)	Software / Code	Interaktive 3D-Anwendung	Game Lab Graz / TU Graz	Eingeschränkt (Auf Anfrage für Forschungszwecke)

<b>SIM-RES</b>	Ergebnisse der Gebäudeenergiesimulationen (UBEM) für Szenarien	Numerisch (CSV / PRN)	Generierte Zeitreihen (z.B. 15-min Werte)	EQUA Simulation	Eingeschränkt
<b>DTL-CODE</b>	Source Code des "Data-Translation-Layers" (Python/C++)	Code	Middleware / Skripte	Game Lab Graz / TU Graz	Eingeschränkt
<b>USR-DATA</b>	Anonymisierte Ergebnisse der Nutzer:innenstudien (Workshops)	Text / Numerisch	Transkripte, Fragebögen (SUS)	STS, Game Lab Graz / TU Graz	Eingeschränkt (Datenschutz)
<b>IMG-REN</b>	Gerenderte Bild- und Videodateien aus der VR-Umgebung	Medien	Bilder / Videos	IWT, Game Lab Graz / TU Graz	Öffentlich (Website, Berichte)

Um die Wiederverwendbarkeit sicherzustellen, werden die generierten Daten mit Metadaten beschrieben. Nachfolgend ein Beispiel für die Dokumentation der Simulationsergebnisse (SIM-RES).

**Tabelle 3: Metadaten-Struktur am Beispiel der Simulationsergebnisse**

Attribut	Beschreibung
<b>ID</b>	SIM-RES-2025-INFFELD
<b>Titel</b>	Energetische Simulationsdaten Inffeldgasse 19 (Parametervariation)
<b>Zusammenfassung</b>	Detaillierte bauphysikalische Parameter für alle Räume im Gebäude Inffeldgasse 19 des Campus Inffeldgasse unter der Variation von unterschiedlichen Simulationsparameter (z.B. Setpoints für Heizen und Kühlen, Klimaszenarien, etc.).
<b>Kurzbezeichnung</b>	SimRes_Inffeld_19
<b>Einheit</b>	kWh, kW (Energie), °C (Temperatur)
<b>Zeitintervall</b>	15 Minuten / 1 Stunde
<b>Zeitraum und Referenzjahr</b>	2018, 2050, 2060 (Ganzjahressimulation)
<b>Institution</b>	EQUA Simulation AB / TU Graz (IWT)
<b>Kontakt</b>	thomas.mach@tugraz.at
<b>Mitwirkende und Rolle</b>	daniel.ruepp@equa.ch (Simulation), georg.arbesser-rastburg@tugraz.at (Datenaufbereitung)

<b>Methodik</b>	Dynamische Gebäudesimulation mit IDA ICE 5.0, basierend auf BIM-Modellen und ZAMG-Klimadaten.
<b>Datenvervollständigung</b>	-
<b>Quelldaten</b>	TU Graz UIM-Modell V2.4, GeoSphere Klimadaten 2018, Meteonorm generierte Klimadaten 2050;
<b>Kommentar</b>	Enthält auch Metadaten zur Zuordnung der thermischen Zonen zu Raum-IDs (GUIDs).
<b>Erstellungsdatum</b>	2025-03-15
<b>Datentyp</b>	CSV (Comma Separated Values)
<b>Versionsstand</b>	V1.0 (Final)

### 9.1.2. Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

- **Personenbezogene Daten:** Im Rahmen der Nutzer:innenstudien (Workshops) wurden Meinungen und Feedback von Personen erhoben. Diese Daten unterliegen der DSGVO. Vor der Teilnahme unterzeichneten alle Probanden eine Einverständniserklärung (Informed Consent). Die Daten wurden pseudonymisiert erhoben und für die Auswertung und Veröffentlichung vollständig anonymisiert, sodass keine Rückschlüsse auf Einzelpersonen möglich sind.
- **Urheberrechte:** Die verwendeten 3D-Architekturmodelle unterliegen dem Urheberrecht dem Institut für Wärmetechnik der TU Graz. Die Nutzung im Rahmen des Forschungsprojekts wurde geklärt. Eine Veröffentlichung der rohen Geometriedaten (als Download) ist ohne gesonderte Zustimmung nicht gestattet; die Veröffentlichung von abgeleiteten Bildern und Videos ist zulässig.
- **Software-Lizenzen:** Die Nutzung der Unreal Engine unterliegt dem EULA von Epic Games (Royalty-Free für lineare Inhalte und Forschung). Der entwickelte Code des Data-Translation-Layers ist geistiges Eigentum des Konsortiums.
- **Sicherheit:** Sensible Daten zur kritischen Infrastruktur der TU Graz wurden aus den veröffentlichten Datensätzen entfernt.

### 9.1.3. Datenspeicherung und -erhalt

- **Während der Projektlaufzeit:** Alle Daten wurden auf gesicherten Fileservern der TU Graz gespeichert. Tägliche Backups schützten vor Datenverlust. Für den Quellcode wurden TU-Graz-interne GitLab-Repositories verwendet.

- **Langzeitarchivierung:** Nach Projektende werden die finalen Berichte und die wichtigsten Datensätze (z.B. Simulationsergebnisse) im Forschungsdatensystem des IWT sowie des HCC der TU Graz archiviert. Dies garantiert eine Aufbewahrung für mindestens 10 Jahre.
- **Verantwortlichkeit:** Die Datenhaltung wird von Institut für Wärmetechnik der TU Graz umgesetzt.

#### 9.1.4. Wiederverwendbarkeit der Daten

Das Projekt bekennt sich zu Open Science. Wo rechtlich möglich, werden Ergebnisse geteilt:

- **Publikationen:** Alle wissenschaftlichen Veröffentlichungen erfolgen (wenn möglich) als Open Access (Gold oder Green Road).

#### Opt-Out-Gründe für bestimmte Datensätze:

1. **Datenschutzgründe:** Die Rohdaten der Audioaufnahmen aus den Interviews werden nicht veröffentlicht, um die Anonymität der Teilnehmenden zu wahren.
2. **Unvereinbarkeit mit dem Schutz der Ergebnisse:** Detaillierte BIM-Modelle der Gebäude werden nicht als offene Datei geteilt, um Urheberrechte und Sicherheitsinteressen der TU Graz zu wahren.

