

Virtual-Reality-gestützte Energiedienstleistungen für intelligente Energiesysteme (Beyond)

Berichte aus Energie- und Umweltforschung 61/2025

Wien, 2025

Impressum

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:

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

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

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

Autorinnen und Autoren:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Christina J. Hopfe, Dipl.-Ing. Dr. Matej Gustin, Univ.-Prof. Dr.

Robert S. McLeod (Institute of Building Physics, Services and Construction - IBPSC)

Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr. Johanna Pirker, Fogh-lis. Lis. Saeed Safikhani, Dipl.-Ing. BSc Georg

Arbesser-Rastburg (Institute of Interactive Systems and Data Science - ISDS)

Mag.phil. Dr. Gerald Schweiger (Institute of Software Technology - IST)

Wien, Graz, 2025. Stand: Jänner 2024

Ein Projektbericht gefördert im Rahmen von



Rückmeldungen:

Ihre Überlegungen zu vorliegender Publikation übermitteln Sie bitte an iii3@bmimi.gv.at.

Rechtlicher Hinweis

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

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

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

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

Vorbemerkung

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

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

Inhaltsverzeichnis

1 Kurzfassung	8
2 Abstract	10
3 Ausgangslage	12
3.1. Motivation für das Projekt	12
3.2. Stand der Technik.....	12
3.2.1. IoT und Interoperabilität von Daten	12
3.2.2. Datenmodelle, Modellierung und Simulation	13
3.2.3. Virtual Reality (VR).....	14
3.2.4. VR in BIM.....	15
3.2.5. VR-Spiele als Bildungsumgebung.....	15
3.2.6. Energiedienstleistungen	16
3.3. Forschungsfragen	16
3.4. Zweck und Ziele.....	17
3.4.1. Zweck	17
3.4.2. Ziele.....	17
4 Projektinhalt	19
4.1. Daten und IoT-Plattform	19
4.1.1. Installation des Sensors	19
4.1.2. IoT-Integration	20
4.2. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"	20
4.2.1. Gebäudeenergiemodellierung (BEM) und parametrische Analysen	20
4.2.2. Echtzeit-Simulation und maschinelles Lernen	21
4.2.3. Virtual Reality (VR).....	22
4.3. Energiedienstleistung 2 "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"	23
4.3.1. Maschinelle Lernmodelle für die vorhersagende Wartung	23
5 Ergebnisse	24
5.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"	24
5.1.1. Büroumgebung	24
5.1.2. VR-Lernspiel – Escape Room.....	26
5.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"	34
5.3. Integration in das Programm "Stadt der Zukunft"	35
6 Schlussfolgerungen	37
6.1. Erkenntnisse / Technische Bewertung.....	37
6.1.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden".....	37
6.1.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung".....	37

6.2. Fortsetzung der Arbeit mit den erzielten Ergebnissen	38
6.2.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden".....	38
6.2.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung.....	38
6.3. Zielgruppen	39
6.4. Rechtliche Hindernisse.....	40
6.5. Verwertung, Verbreitungsaktivitäten und weiteres Marktpotenzial/Verteilungspotenzial... ..	41
7 Ausblick und Empfehlungen.....	43
7.1. Empfehlungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.....	43
7.2. Potenzial für Demonstrationsprojekte.....	43
8 Verzeichnisse	45
9 Anhang	48
9.1. Data Management Plan (DMP)	48

1 Kurzfassung

Die österreichische Regierung ist entschlossen, den Übergang ihrer Energiesysteme zu beschleunigen und bis 2040 CO₂-Neutralität zu erreichen. Um dieses Ziel zu erreichen, muss Österreich seine Bemühungen zur Dekarbonisierung des gesamten Energiesektors deutlich verstärken. Gebäude sind für etwa ein Drittel der Gesamtnachfrage nach Energie verantwortlich. Europa befindet sich nun in der vierten Welle der Energieeffizienz, gekennzeichnet durch die zunehmende Digitalisierung der Gesellschaft, den Einsatz verteilter Energieressourcen und den Wandel des Energieangebots- sowie Energie Nachfrage-Mixes. Intelligente Energiedienstleistungen wie vorausschauende Wartung, Lastmanagement und modellprädiktive Regelung sind zentrale Komponenten zur Reduktion des Energieverbrauchs von Gebäuden und zur Transformation von Gebäuden zu intelligenten Akteuren in der nächsten Generation intelligenter Energiesysteme. Die Nutzung von Internet der Dinge (IoT)-Technologien auf der Nachfrageseite in Wohnhäusern, Gewerbe- und Industriegebäuden sowie Bildungs- und Gemeinschaftseinrichtungen bietet ein enormes Potenzial zur Steigerung der Effizienz durch umfassendere Energiemanagementsysteme.

Die aktuelle Landschaft der Ausbildung im Ingenieurwesen offenbart eine deutliche Lücke, die es den Studierenden erschwert, immersive und praktische Elemente zu erlernen, die für ein umfassendes Verständnis komplexer Konzepte im Zusammenhang mit Bauphysik entscheidend sind. Gleichzeitig stoßen vorausschauende Wartungsprozesse in Gebäudesystemen auf Effizienz- und Genauigkeitsprobleme, was die Notwendigkeit innovativer Lösungen unterstreicht. Diese Lücken eröffnen die Möglichkeit für das Projekt "Beyond", sie effektiv anzugehen.

Das "Beyond"-Projekt hatte zum Ziel, die technologische Grundlage für "Next Generation Energy Services" zu entwickeln, die durch das Zusammenspiel folgender Technologien ermöglicht wird: Virtual Reality (VR) für die Visualisierung und Echtzeitinteraktion mit dem realen Gebäude; maschinelles Lernen (ML) und physikalische Simulation zur Darstellung der realen Auswirkungen von Interventionen und Entscheidungen; Internet der Dinge (IoT)-Plattformen zur Umsetzung von intelligenten Systemen und bidirektionalen Echtzeitkommunikation zwischen dem Gebäude und seinen Nutzer*innen. Die technologischen Entwicklungen wurden anhand von zwei Anwendungsfällen von Energiedienstleistungen getestet und bewertet: "Menschliche Aspekte in Gebäuden" und "Vorausschauende Wartung und Fehlerdiagnose".

Der erste Anwendungsfall, Energiedienstleistung 1, "Menschliche Aspekte in Gebäuden", hatte zum Ziel, theoretisches Wissen und praktische Fähigkeiten nahtlos zu integrieren, insbesondere im Bereich der Bauphysik, und ein Verständnis für die Auswirkungen von Nutzer*innenentscheidungen auf die Leistung von Gebäuden zu erleichtern. Dieser Anwendungsfall strebte danach, eine praxisnahe Lernerfahrung durch Virtual Reality zu fördern und so zu einem tieferen Verständnis praktischer Anwendungen durch ein lehrreiches VR-Spiel beizutragen. Der methodische Ansatz in Energiedienstleistung 1 nutzte modernste VR-Technologie in Verbindung mit der IoT-Plattform, Energiesimulation und maschinellem Lernen (ML), um Veränderungen der Benutzenden in Echtzeit zu bewerten. Energiedienstleistung 1, konzipiert als lehrreiches VR-Spiel, bietet eine innovative und immersive Lernumgebung, maßgeschneidert für Ingenieurstudierende. Es integriert nahtlos praktische Szenarien und Datenvisualisierung, um ihr Verständnis komplexer Konzepte zu vertiefen. Die Ergebnisse zeigen eine interaktive VR-Umgebung, bereichert mit visuellem, haptischem und auditivem

Feedback, und bieten so eine bemerkenswert realistische virtuelle Erfahrung. Durch die Teilnahme an praktischen Szenarien im Spiel entwickeln VR-Nutzer*innen ein tiefes Verständnis für nachhaltiges und energieeffizientes Gebäudedesign, wodurch ihre Fähigkeiten und Kenntnisse auf diesem Gebiet weiter ausgebaut werden.

Der zweite Anwendungsfall, Energiedienstleistung 2 "Vorausschauende Wartung und Automatische Fehlererkennung", konzentrierte sich auf reale Anwendungen, um die Effizienz der Überwachung und Wartung von Luftfiltern in Heizungs-, Lüftungs- und Klimaanlage (HLK)-Systemen durch vorausschauende Wartung und automatische Fehlererkennung zu verbessern. Das Projekt strebte an, Wartungspraktiken in Gebäuden durch den Einsatz von fortgeschrittener Datenanalyse, maschinellem Lernen und IoT-Technologien zur Vorhersage und Erkennung potenzieller Fehler in HLK-Systemen zu optimieren. Dieser Ansatz betonte den iterativen Prozess der Verfeinerung von vorausschauenden Wartungsstrategien auf Basis eines erweiterten Datensatzes und der Aufrechterhaltung des technologischen Fortschritts. Trotz Herausforderungen bei der genauen Vorhersage der Lebensdauer von Luftfiltern übertrafen die maschinellen Lernmodelle die Erwartungen und zeigten vielversprechende Ergebnisse bei der Vorhersage von Druckdifferenzänderungen, was wertvolle Einblicke für die Wartung von HLK-Systemen lieferte. Obwohl weitere Datensammlung und technologische Fortschritte als notwendig für die Optimierung erkannt werden, tragen die Projektergebnisse erheblich zum Bereich der vorausschauenden Wartung von HLK-Systemen bei.

Ausblickend sieht das Projekt mehrere zukünftige Entwicklungen vor, um die Auswirkungen von Energiedienstleistung 1 zu verbessern. Dazu gehören die Einführung von Multiplayer-Erfahrungen im VR-Lernspiel für gemeinsames Lernen sowie die Verfeinerung von vorausschauenden Wartungsstrategien durch Fortschritte in Sensortechnologien und Datenanalyse. Die Ergebnisse des Projekts richten sich an verschiedene Zielgruppen, darunter Studierende (z.B. von Bauingenieur, Architektur und Maschinenbau), Fachleute der Bauindustrie und die breitere Forschungsgemeinschaft, mit dem übergeordneten Ziel, nachhaltige Baupraktiken und innovative Bildungsmethoden voranzutreiben. Der Ausblick für Energiedienstleistung 2 ist vielversprechend in realen Anwendungen, insbesondere in der vorausschauenden Wartung und automatischen Fehlererkennung von Luftfiltern in HLK-Systemen. Dennoch wird eine weitere Datensammlung zur Verfeinerung von vorausschauenden Wartungsstrategien für HLK-Systeme vorgeschlagen, und zusätzliche Arbeit ist erforderlich für die Entwicklung genauer Modelle zur Bestimmung der Restnutzungsdauer von Luftfiltern.

2 Abstract

The Austrian government is committed to accelerating the transition of its energy systems and achieving CO₂ neutrality by 2040. To achieve this goal, Austria must significantly step up its efforts to decarbonise all parts of its energy sector. Buildings account for about a third of the total end-use energy demand. Europe is now entering the fourth wave of energy efficiency as characterised by the increased digitization of society, distributed energy resource deployment, and the changing nature of the energy supply and demand mix. Intelligent energy services such as predictive maintenance, demand-side management and model predictive control are central components for reducing the energy consumption of buildings and transforming buildings into intelligent actors in the next generation of smart energy systems. Demand-side adoption of IoT technologies in homes, commercial and industrial buildings, as well as educational and community facilities offers enormous potential to increase efficiency through more comprehensive energy management systems.

The current landscape of engineering education reveals a noticeable gap, hindering students from acquiring immersive and practical components crucial for a comprehensive understanding of complex concepts related to building physics. Simultaneously, predictive maintenance processes in building systems encounter challenges in terms of efficiency and accuracy, underscoring the necessity for innovative solutions. Recognising these gaps sets the stage for the "Beyond" project to address them effectively.

The "Beyond" project aimed to develop the technological foundation for "Next Generation Energy Services", which is made possible by the interplay of the following technologies: Virtual Reality (VR) for visualization and real-time interaction with the real building; Machine learning and physical simulation to show the real-life effects of interventions and decisions; Internet of Things (IoT) platforms for the realisation of smart systems and bidirectional real-time communication between the building and its users. The technological developments were tested and evaluated on two use cases of energy services "Human Aspects in Buildings" and "Predictive Maintenance and Error Diagnosis".

The first use case, Energy Service 1 "Human Aspects in Buildings," aimed to seamlessly integrate theoretical knowledge and practical skills, especially within the domain of building physics, and to facilitate an understanding of the impact of user decisions on the performance of buildings. This use case sought to foster a hands-on educational experience through virtual reality, contributing to a deeper understanding of practical applications through an educational VR game. The methodical approach employed in use case 1 utilised cutting-edge VR technology coupled with the IoT platform, energy simulation, and machine learning (ML) to evaluate users' changes in real-time. Use case 1, designed as an educational VR game, provides an innovative and immersive learning environment tailored for engineering students. It seamlessly integrates practical scenarios and data visualization, elevating their comprehension of intricate concepts. The results showcase an interactive VR environment, enriched with visual, haptic, and auditory feedback, delivering a remarkably realistic virtual experience. Engaging in practical scenarios within the game, VR users cultivate a profound understanding of sustainable and energy-efficient building design, further enhancing their skills and knowledge in the field.

The second use case, Energy Service 2 "Predictive Maintenance and Automatic Fault Detection" focused on real-world applications, seeking to enhance the efficiency of monitoring and maintaining

air filters in buildings' Heating, Ventilation, and Air Conditioning (HVAC) systems through predictive maintenance and automatic fault detection. The project strived to optimise building maintenance practices by leveraging advanced data analytics, machine learning (ML) and Internet of Things (IoT) technologies to predict and detect potential faults in HVAC systems. This approach emphasised the iterative process of refining predictive maintenance strategies based on an increased dataset, staying abreast of technological advancements. Despite challenges in predicting exact air filter lifespan, the machine learning models excelled and showed promise in forecasting changes in differential pressure, providing valuable insights for HVAC system maintenance. Although further data accumulation and technological advancements are recognised as integral for optimisation, the project findings contribute significantly to the field of predictive maintenance of HVAC systems.

Looking ahead, the project envisions several future developments to enhance the impact of use case 1. These include introducing multiplayer experiences in the educational VR game for collaborative learning and refining predictive maintenance strategies through advancements in sensor technologies and data analytics. The project's outcomes target diverse audiences, including students (e.g. from civil engineering, architecture and mechanical engineering), building industry professionals, and the broader research community, with the ultimate aim of advancing sustainable building practices and innovative educational methodologies.

The outlook for use case 2 is promising in real-world applications, particularly in predictive maintenance and automatic fault detection in air filters of HVAC systems. Nevertheless, further data accumulation is suggested for the refinement of predictive maintenance strategies for HVAC systems, and additional work is needed for the development of accurate models to determine the residual useful life of air filters.

3 Ausgangslage

3.1. Motivation für das Projekt

Derzeit ist der Gebäudebestand in der EU energieintensiv und größtenteils ineffizient. Er verursacht 40 % des Energieverbrauchs und trägt zu 36 % der CO₂-Emissionen bei (EU-Kommission, 2019). Energiedienstleistungen wie vorausschauende Wartung, Nachfragemanagement und Model Predictive Control spielen eine entscheidende Rolle bei der Reduktion des Energieverbrauchs in Gebäuden. Sie ermöglichen die Transformation von Gebäuden zu aktiven, intelligenten Einheiten innerhalb umfassenderer Energiesysteme.

Der Begriff 'Energiedienstleistungen' betont, dass es die aus Energie abgeleiteten Dienstleistungen sind, die die Bedürfnisse der Menschen erfüllen und zum Wohlbefinden beitragen, anstatt die Energiequellen selbst (Fell, 2017). Aktuelle Forschung unterstreicht die Bedeutung, Individuen in den Mittelpunkt von Energiedienstleistungen zu stellen, was einen entscheidenden Schritt hin zu einem nachhaltigen Energiesystem auf lange Sicht darstellt (Schweiger et al., 2020). Ein genaues Verständnis dessen, was einen Dienst ausmacht und wie Einzelpersonen mit diesen Dienstleistungen interagieren und zu ihnen beitragen, kann bei der Identifizierung nachhaltiger Alternativen zu aktuellen Praktiken helfen (Siano, 2014).

Im Bereich der Entwicklung neuer und innovativer Energiedienstleistungen sind Echtzeitinteraktionen mit tatsächlichen Gebäuden unerlässlich. Um die umfangreichen generierten Daten effektiv zu verwalten, sehen wir intelligente Lösungen als unverzichtbar. Internet of Things (IoT)-Technologien erweisen sich als das Rückgrat, das die Funktionalität dieser intelligenten Systeme stärkt und eine nahtlose Integration und effiziente Betriebsführung gewährleistet. Unser Projekt zielt darauf ab, die Synergien zwischen IoT, VR, maschinellem Lernen und Simulationen zu nutzen, um den Weg für eine nachhaltigere und intelligentere Energiezukunft zu ebnen. Darüber hinaus erkannte unser Projekt das transformative Potenzial von Virtual Reality (VR) bei der Weiterentwicklung von Energiedienstleistungen. VR kann die Art und Weise revolutionieren, wie wir mit energieeffizienten Räumen interagieren und diese entwerfen. Durch das Eintauchen der Benutzer*innen in virtuelle Umgebungen bietet VR ein verbessertes visuelles, haptisches und auditives Feedback für ein realistischeres und interaktiveres Erlebnis.

3.2. Stand der Technik

3.2.1. IoT und Interoperabilität von Daten

Die Entwicklung neuer und innovativer Energiedienstleistungen umfasst die Einrichtung von Echtzeit-Interaktionen mit tatsächlichen Gebäuden. Zur Verwaltung der umfangreichen generierten Daten sind intelligente Lösungen unerlässlich, und genau hier kommen Technologien des Internets der Dinge (IoT) ins Spiel. Sie dienen als Grundlage für die Funktionalität dieser intelligenten Systeme. Die Hauptherausforderung bei IoT besteht darin, eine reibungslose Verständigung und Kommunikation zwischen verschiedenen Maschinen zu gewährleisten. Zur Bewältigung dieser Herausforderung werden zwei Möglichkeiten in Betracht gezogen:

- Universeller Standard: Stellen Sie sich eine Situation vor, in der alle Maschinen dieselbe Sprache sprechen, ähnlich einem universellen Code. Dies ist vergleichbar mit einem gemeinsamen Regelwerk für die Kommunikation.
- Middleware-Plattformen: Middleware ist ähnlich zu einem Sprachübersetzer für Maschinen. Diese Plattformen erleichtern das Verständnis zwischen unterschiedlichen Maschinen, indem sie ihre individuellen Sprachen übersetzen und als mehrsprachiger Leitfaden für Ihre Maschinen fungieren.

Im Wesentlichen fungieren das Internet der Dinge (IoT) und diese Kommunikationslösungen als Helfer im Hintergrund, die einen mühelosen Austausch von Informationen in unseren intelligenten Systemen gewährleisten. Sie sind die technologische Grundlage, die für einen reibungslosen Ablauf aller Prozesse sorgt.

3.2.2. Datenmodelle, Modellierung und Simulation

Die Rolle von Modellierung und Simulation ist in verschiedenen Energiebereichen von entscheidender Bedeutung und dient unterschiedlichen Zwecken. Erstens sind simulationsbasierte Was-wäre-wenn-Analysen entscheidend, um Systeme unter unterschiedlichen Randbedingungen zu untersuchen, wie zum Beispiel die Bewertung des Energieverbrauchs bei unterschiedlichen Temperaturvorgaben für Heizung und Kühlung. Zweitens benötigt ein System zur Optimierung ein Modell, um spezifische Ziele zu erreichen, wie zum Beispiel die Reduzierung des Energieverbrauchs bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung des gewünschten Komfortniveaus. Die Optimierung verwendet in der Regel ein vereinfachtes Modell. Wang und Zhai (2016) stellten einen umfassenden Überblick über Entwicklungen, Methoden und Tools in der Gebäudemodellierung vor. Abbildung 1 bietet Einblicke in aktuelle Methoden und Ansätze im Bereich der Gebäudemodellierung.

Abbildung 1: Klassifizierung von Simulationsmodellen

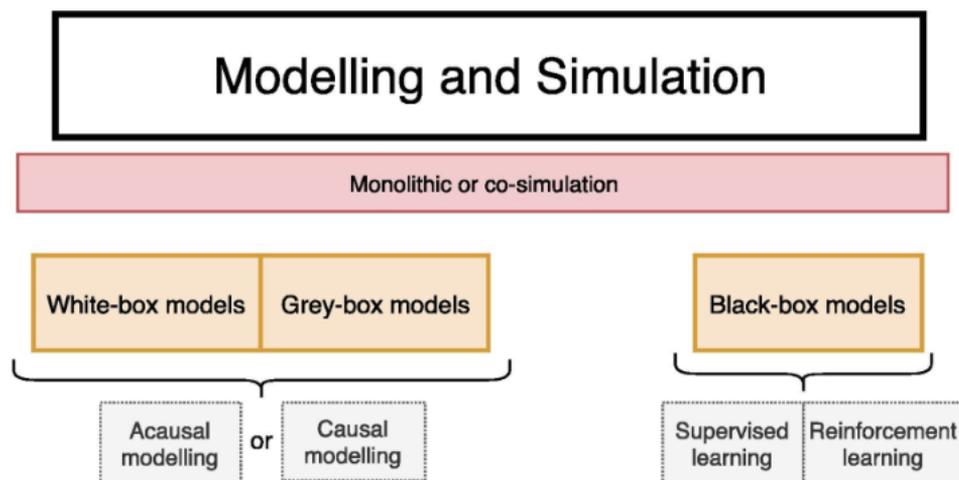


Tabelle 1 bietet einen umfassenden Überblick über die Stärken und Einschränkungen, die mit White-Box- und Black-Box-Modellen verbunden sind. Es sollte beachtet werden, dass auch Grey-Box-Modelle (nicht in der Tabelle enthalten), die als eine Mischform aus Elementen des White-Box- und Black-Box-Ansatzes betrachtet werden, existieren. In der Literatur wird das physikalisch informierte maschinelle

Lernen oft als Grey-Box-Modell bezeichnet, was seine einzigartigen Eigenschaften zeigt, die Transparenz und Komplexität kombinieren (Afroz et al., 2018; Harish and Kumar, 2016).

Tabelle 1: Übersicht über Black-Box und White-Box-Modellierung

Modellierungsansatz	Vorteile	Nachteile
White-box (z.B. Gebäudeenergiemodelle)	<ul style="list-style-type: none"> • Generalisierbarkeit • Interpretierbarkeit • Leicht anpassbar 	<ul style="list-style-type: none"> • Parameter sind oft nicht verfügbar/ bekannt • Modellierung erfordert ein hohes Maß an Kompetenz und Kenntnis des Systems • Modelle müssen zeitaufwendig validiert werden • Leistung
Black-box (z.B Modelle des maschinellen Lernens)	<ul style="list-style-type: none"> • Es sind keine Kenntnisse über den physischen Aufbau des Systems erforderlich. • Leistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Es wird ein großer Datensatz benötigt, der alle möglichen Betriebsbedingungen abdeckt. • Die Verallgemeinerbarkeit des Modells ist durch die Qualität der Trainingsdaten begrenzt. • Nicht leicht zu interpretieren

Es gibt zwei Ansätze zur Simulation von Modellen auf der Grundlage verschiedener Teilsysteme (Gomes et al., 2018): (i) die Verwendung eines einzigen Werkzeugs zur Modellierung und Simulation des Gesamtsystems, bekannt als monolithische Simulation; oder (ii) das Koppeln etablierter Werkzeuge für die jeweiligen Teilsysteme wie Gebäude, Stromerzeugung und Infrastruktur in einer Co-Simulation.

3.2.3. Virtual Reality (VR)

In den letzten Jahren ist das Interesse an Virtuelle Realität (VR)-Technologien aufgrund der zunehmenden Erschwinglichkeit von Brillen mit integriertem Display (HMD) stark gewachsen. Dieser Trend hat den Zugang zu verschiedenen VR-Anwendungen für eine breitere Benutzerbasis erweitert. Insbesondere nutzen große Unternehmen wie IKEA und Audi VR, um ihre Produkte potenziellen Kund*innen zu präsentieren. Während VR in Unterhaltung und Gaming beliebt ist, erstrecken sich seine Anwendungen auf Bildung, Forschung, Medizin und Therapie. Weit verbreitete VR-Headsets wie Oculus Rift, HTC Vive und Valve Index haben einen Reifegrad erreicht, der sie als ernsthafte und dennoch kostengünstige Arbeitsmittel positioniert. Diese Geräte bieten einen hohen Grad an Immersion, sodass Benutzer*innen direkt mit virtuellen Umgebungen interagieren können. Schlüsselfaktoren, die die Entwicklung von virtuellen interaktiven Erlebnissen beeinflussen, sind Immersion, Engagement und Flow. Moderne VR-Technologien bieten verschiedene Grade an Freiheit und Interaktionsniveaus, was zu unterschiedlichen Wahrnehmungen von Aktivitäten und Emotionen basierend auf der VR-Umgebung führt. Designkonzepte spielen eine entscheidende Rolle bei der Gestaltung dieser Erlebnisse. Eine Studie von Settgast et al. (2016) evaluierte VR-Szenarien anhand von Immersion, Engagement, Cyber Leakage und Gesamterlebnis. Die Vorteile von VR liegen in der Fähigkeit, unsichtbare oder komplexe Elemente zu visualisieren und Visualisierungen kosteneffektiv, erlebnisorientiert und reproduzierbar zu machen.

3.2.4. VR in BIM

Die vierte industrielle Revolution versucht, den Entwicklungsablauf im Architektur-, Ingenieur- und Bauwesen (AIB) durch Automatisierung, intelligente Technologien und moderne Kommunikation zu verbessern. Bauinformationsmodellierung (BIM) hat vielversprechende Ansätze im AIB-Bereich, da es verschiedene Vorteile der Industrie 4.0 für beteiligte Akteure bietet (Kozlovská, Klosova und Strukova, 2021). Obwohl BIM das Potenzial hat, die Kommunikation, Visualisierung und den Datenaustausch zwischen den Stakeholdern zu verbessern, begrenzen Implementierungs- und Anwendungsprobleme seine Nutzung (Sun et al., 2017).

Virtual Reality (VR) ist eine Technologie, die eine immersive Visualisierung, Kommunikation und Interaktion mit virtuellem Inhalt ermöglichen kann. Durch die jüngsten Fortschritte bei VR-Geräten für Verbraucher wird der Zugang zu dieser Technologie verbessert und ihre Anwendung in verschiedenen Disziplinen und Zielgruppen erweitert (Liu, 2019). Im Fall von BIM kann VR die Herausforderungen bei Anwendungen und der Kommunikation im AIB-Ablauf erleichtern.

VR kann als Werkzeug für Design und Datenaustausch betrachtet werden, um die Kommunikation zwischen Stakeholdern zu verbessern und Entscheidungsprozesse visueller und verständlicher zu machen. Darüber hinaus kann es das Management und die Zusammenarbeit erleichtern, indem es vor-Ort-Visualisierung, eine virtuelle Kommunikationsumgebung, Katastrophenmanagement, Arbeitsplatzplanung und Gebäudewartung bietet. Ein weiterer Bereich, in dem VR im AIB-Bereich vorteilhaft sein kann, ist Bildung und Training. Es kann den Schulungsprozess mit einer immersiven virtuellen Welt unterstützen, die sicher in der Anwendung ist und kosteneffizient wiederholt werden kann. Außerdem kann es dazu beitragen, die Arbeitssicherheit zu verbessern, indem damit Sicherheitsschulungen abgehalten werden (Safikhani et al., 2022).

3.2.5. VR-Spiele als Bildungsumgebung

Videospiele wurden aufgrund ihres Potenzials zur Verbesserung des Lernens durch kognitive Einbindung und interaktive Erfahrungen anerkannt. Studien haben gezeigt, dass Videospiele die Problemlösungsfähigkeiten verbessern, die Zusammenarbeit fördern und die Motivation bei Lernenden steigern können. Frühere Studien zur Anwendung von Videospielen im Bildungsbereich haben positive kognitive Vorteile und erfolgreiche Nutzung von Spielen in verschiedenen akademischen Fächern wie Sozialwissenschaften, Mathematik, Naturwissenschaften und Fremdsprachen festgestellt. Darüber hinaus wurden Studien zum pädagogischen Potenzial von kommerziellen Videospielen durchgeführt, die darauf hindeuten, dass sie die Schüler dazu ermutigen können, große Mengen an Informationen zu lernen, vergleichbar mit traditionellem Bildungsinhalt (Lee et al., 2004).

Da alleiniges theoretisches Wissen oft nicht ausreicht, um komplexe Phänomene zu verstehen, sind Simulationen und Visualisierungen wertvolle Werkzeuge. Sie können die Lernenden im Lernprozess unterstützen, indem sie ihnen praktische Erfahrungen ermöglichen. In diesem Fall bietet die virtuelle Realität (VR) immersive Lernumgebungen, die das Lernerlebnis erheblich verbessern können. Studien haben gezeigt, dass die VR-Technologie in der Hochschulbildung sich positiv auf das Verhalten der Studierenden und deren Lernerfolge auswirkt. Außerdem haben sie auf die Trends von bildungsbezogenen virtuellen Realitätsspielen hingewiesen und deren technologische, pädagogische

und spielerische Merkmale sowie deren Anwendung in allen Bildungsstufen untersucht, wobei der Schwerpunkt auf Gesundheitswesen und Ingenieurausbildung lag (Holly et al., 2021).

Wir wollen durch die Darstellung des Bildungsinhalts von BIM in VR-Spielen das Lernerlebnis im AIB-Bereich erleichtern und verbessern. Auf diese Weise können sich die Studierenden in eine virtuelle Welt eintauchen und darin interagieren, was zu einem besseren Lernerlebnis führen kann.

3.2.6. Energiedienstleistungen

Die Bedeutung der Berücksichtigung von Nutzern im Bereich der Energiesysteme wird von Hampl et al. (2020) hervorgehoben, die eine vierte Dimension zu den drei grundlegenden Zielen der Energiepolitik einführen: Versorgungssicherheit, Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit. Die Anerkennung der dynamischen Rolle der Nutzer*innen fügt dem Verständnis für Energie-Dynamiken eine differenzierte Ebene hinzu. Forschung, wie sie von Hargreaves et al. (2010) durchgeführt wurde, betont, dass die Effektivität und Auswirkung neuer Technologien in Energiesystemen eng mit sozialen Variablen verbunden sind. Diese Variablen umfassen individuelle Vorlieben, soziale Beziehungen und tägliche Routinen. Die soziale Dimension wird zu einem entscheidenden Faktor, der den Erfolg und die Akzeptanz innovativer Energie-technologien beeinflusst. Die Anerkennung und Integration dieser Aspekte in Energiedienstleistungen und -richtlinien ist entscheidend, um nachhaltige, nutzerzentrierte Ansätze in der sich ständig weiterentwickelnden Landschaft der Energiesysteme zu fördern.

3.3. Forschungsfragen

Das Beyond-Projekt befasste sich mit der Bearbeitung der folgenden Forschungsfragen:

- Wie kann die nahtlose Integration von Virtual Reality (VR), Echtzeit-Simulation, maschinellem Lernen und IoT-Plattformen erreicht werden, um robuste Grundlagen für Energiedienstleistungen der nächsten Generation zu schaffen?
- Welche Herausforderungen und Chancen ergeben sich durch den Einsatz dieser Technologien in zwei unterschiedlichen Energiedienstleistungen?
- Können White-Box- und Black-Box-Modelle in Echtzeit durch hybride Co-Simulation gekoppelt werden?
- Wie können VR-Umgebungen gestaltet werden, um das Verständnis der Benutzer*innen zu verbessern?
- Was ist der effektivste Weg, um den Einfluss von Benutzerentscheidungen auf die Gebäudeleistung durch die Integration von VR-Technologie zu bewerten?
- Wie können erweiterte Analysen und überwachte Daten effektiv genutzt werden, um Systemausfälle vorherzusagen und die Zuverlässigkeit insbesondere in HLK-Systemen zu verbessern?

3.4. Zweck und Ziele

3.4.1. Zweck

Das Ziel von BEYOND war es, drei Schlüsseltechnologien intelligenter Energiesysteme miteinander zu verbinden, um die Grundlagen für Energiedienstleistungen der nächsten Generation zu entwickeln:

- Virtual Reality (VR) zur Visualisierung und Echtzeitinteraktion mit dem echten Gebäude.
- Echtzeit-Simulation und maschinelles Lernen, um die tatsächlichen Auswirkungen von Aktionen und Entscheidungen der Benutzer darzustellen.
- IoT-Plattformen für bidirektionale Echtzeitkommunikation mit dem Gebäude und den Benutzern.

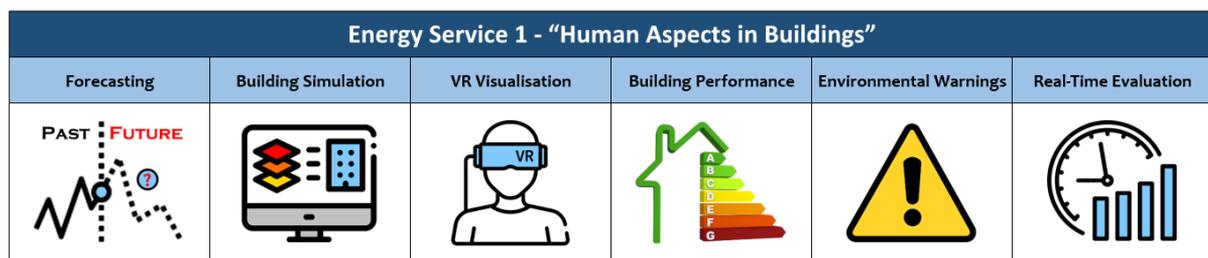
Um dies zu erreichen, werden diese Technologien in zwei verschiedenen Energiedienstleistungen eingesetzt:

- Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden";
- Energiedienstleistung 2 "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung".

3.4.2. Ziele

Das Hauptziel von Energiedienstleistung 1 mit dem Titel "Menschliche Aspekte in Gebäuden" bestand darin, die Auswirkungen von Benutzerentscheidungen auf die Gebäudeleistung umfassend zu verstehen. Durch die Sammlung verschiedener Messdaten sollte der Service VR-Technologie integrieren, um immersive Erfahrungen zu bieten. Bei der Implementierung und Simulation wurden White-Box-Modelle (Gebäudeenergiemodellierung) und Black-Box-Modelle (maschinelles Lernen) kombiniert, um den Energieverbrauch eines Gebäudebereichs zu analysieren und Echtzeitevaluationen durchzuführen.

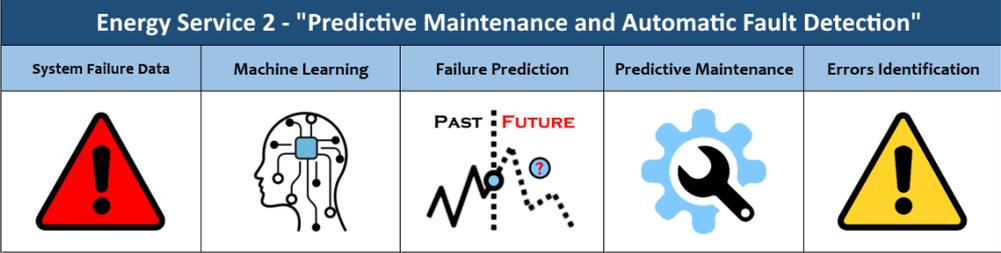
Abbildung 2: Bildliche Darstellung der multidisziplinären Landschaft im Anwendungsfall Nr. 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden".



Die Ziele von Energiedienstleistung 2 mit dem Titel "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung" bestanden darin, erweiterte Analysen und überwachte Daten einzusetzen, um Systemausfälle vorherzusagen und die Zuverlässigkeit insbesondere in HLK-Systemen (Heizung, Lüftung und Klimatisierung) zu verbessern. Das übergeordnete Ziel bestand darin, diese erweiterten Informationen und gemessenen Daten aus den Systemen zu nutzen, um zukünftige Wartungsmaßnahmen genau zu planen. Die Implementierung und Simulation konzentrierten sich auf die vorhersagende Wartung mit dem Ziel, potenzielle Ausfälle frühzeitig zu prognostizieren und zeitnah Wartungsarbeiten durchzuführen, um Störungen zu vermeiden. Die automatische

Fehlerdiagnose zielt darauf ab, Fehler automatisch mithilfe historischer Daten und Vorhersagewerkzeugen wie Methoden des maschinellen Lernens zu erkennen.

Abbildung 3: Bildliche Darstellung der multidisziplinären Landschaft im Anwendungsfall Nr. 2 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"



4 Projektinhalt

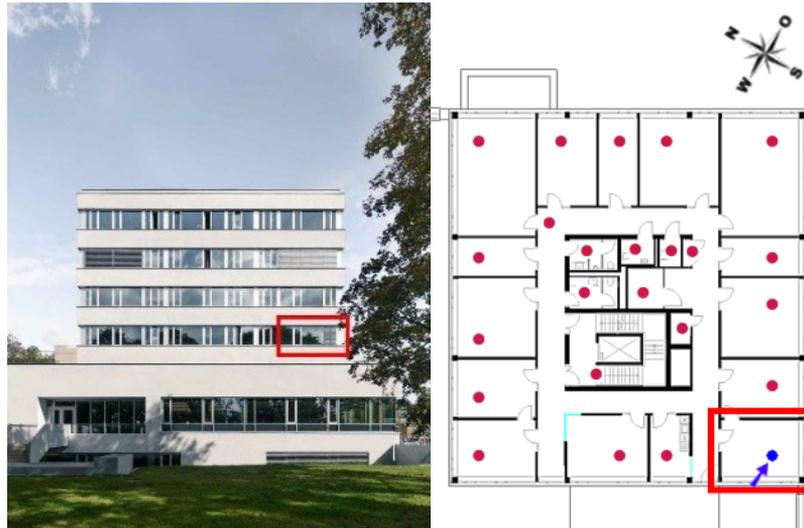
4.1. Daten und IoT-Plattform

4.1.1. Installation des Sensors

Um den konzeptionellen Rahmen zu testen, wurden mehrere Sensoren in einem neuen Bürogebäude auf dem TU Graz Inffeldgasse Campus installiert. Dieses Gebäude, bekannt als das EBS-Center, dient als Drehscheibe für Innovations- und Forschungsaktivitäten im Bereich der elektronikbasierten Systeme.

Für den Energiedienstleistung 1, der sich auf „Menschliche Aspekte in Gebäuden“ konzentriert, haben wir gezielt ein Büro im ersten Stock ausgewählt, das nach Süden ausgerichtet ist und mehr Sonnenlicht empfängt, wodurch der Innenraum erwärmt wird. Dieses Büro wird regelmäßig von Mitarbeiter*innen der TU Graz genutzt, was es uns ermöglicht, Überwachungswerkzeuge zu installieren. Wir haben Sensoren im Inneren platziert, die Variablen wie Temperatur, Luftfeuchtigkeit, CO₂-Gehalt, Luftdruck und Beleuchtungsstärke messen. Zusätzlich wurden Sensoren hinzugefügt, um Datum über den Stromverbrauch, den Zustand von Fenstern/Türen und die Belegung zu erfassen.

Abbildung 4: Südwestansicht des EBS-Centers und des Büros (rot markiert)



Im Energiedienstleistung 2, „Vorbeugende Wartung und Automatische Fehlererkennung“, haben wir die Haupt Luftbehandlungsgerät (AHU) auf dem Dach untersucht. Die AHU zieht Außenluft und rückgeführte Raumluft an, filtert Staub heraus und verteilt Frischluft im gesamten Gebäude. Sensoren wurden an der AHU eingesetzt, um Parameter wie den Druck an den Luftfiltern, die Luftströmung in verschiedenen Systemteilen, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Stromverbrauch zu überwachen. All diese Sensoren sind in ein intelligentes System integriert, das es uns ermöglicht, Modelle zur Vorhersage von Wartungsbedarf zu entwickeln und Fehler automatisch zu erkennen.

4.1.2. IoT-Integration

Die IoT-Plattform der TU Graz ist ein System, das in der Lage ist, Informationen aus verschiedenen Quellen zu sammeln und zu verstehen. Sie besteht aus fünf wesentlichen Komponenten: einer zum Sammeln von Daten, einer weiteren zum Organisieren der Daten, einem Speicherplatz, einem Zugang für Benutzer*innen und Tools zur Auswertung und Analyse der Daten.

Stellen Sie es sich als einen zentralen Hub am Campus Inffeldgasse vor, an dem verschiedene Daten wie Wetterinformationen und Sensorwerte zusammenlaufen. Der Message Queuing Telemetry Transport (MQTT)-Agent fungiert als Vermittler, überwacht Veränderungen in den Daten und speichert sie in einer Datenbank namens NoSQL MongoDB. Diese Speicherung ist komplex mit einem umfassenden Informationsmodell verknüpft, um die Verständlichkeit der Daten zu verbessern. Darüber hinaus werden numerische Zeitreihendaten in einer separaten Datenbank namens InfluxDB gespeichert.

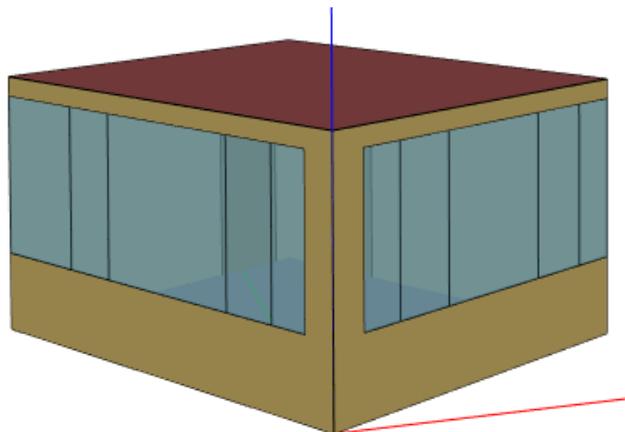
Wenn historische Daten aus der Datenbank oder den Datenbanken benötigt werden, ermöglicht die IoT-Plattform über eine Web-Programmierschnittstelle (API) basierend auf OpenAPI Zugriff auf die Daten. Damit können spezifische Daten, die für die Visualisierung erforderlich sind, aus der Datenbank abgefragt werden.

4.2. Energiedienstleistung 1 “Menschliche Aspekte in Gebäuden”

4.2.1. Gebäudeenergiemodellierung (BEM) und parametrische Analysen

Bei Energiedienstleistung 1 wird ein Computerprogramm namens OpenStudio für das Gebäudeenergiemodell (BEM) verwendet, um zu simulieren, wie der modellierte Büroraum Energie verbraucht. Aufgrund von Einschränkungen bei der Gestaltung der Geometrien innerhalb der Software wurde ein Plug-in namens SketchUp OpenStudio verwendet, um die Form des Büros zu skizzieren. Das resultierende Modell behandelt das Büro als einen einzigen thermischen Bereich und nimmt an, dass innere Wände, Böden und Decken keine Wärmeübertragung zulassen. Wärmeübertragung erfolgt nur durch die äußere Hülle aus Wänden und Fenstern.

Abbildung 5: Außenansicht des BEM-Modells des Büros in OpenStudio.



Um den Energieverbrauch des Büros zu schätzen, wurden dynamische Simulationen mit einem Gebäudeenergiesimulationsprogramm namens EnergyPlus durchgeführt. Verschiedene Parameter wie Wetterdaten, Belegungsmuster und Beleuchtung wurden konfiguriert, um das Simulationsmodell einzurichten. Das Ziel war es, die Leistung des Büros in Bezug auf den Energieverbrauch für Heizung und Kühlung zu analysieren.

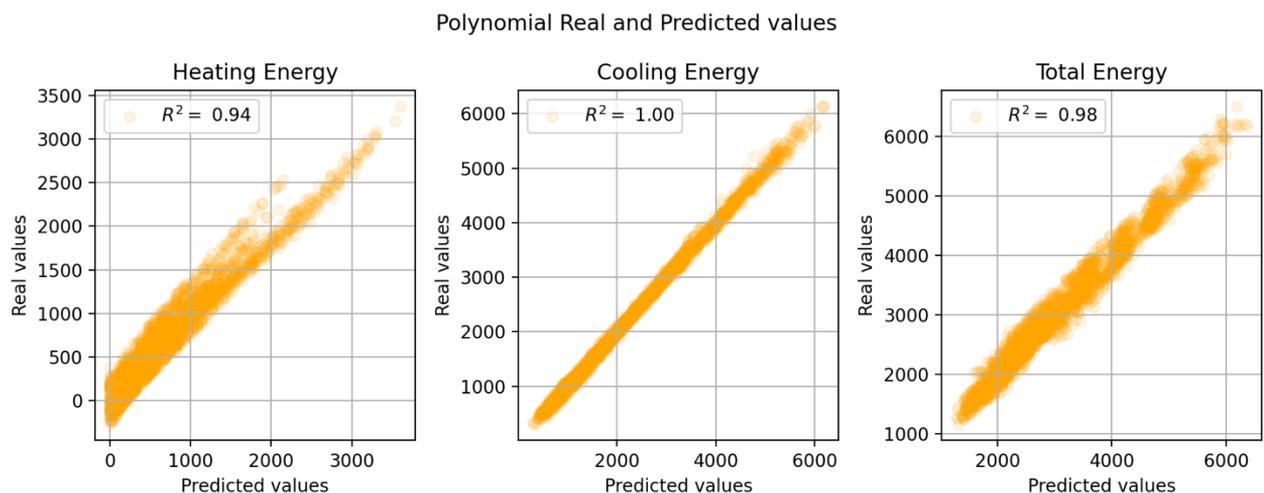
Für Flexibilität und iterative Simulationen wurde das Format epJSON anstelle der herkömmlichen IDF-Dateien ausgewählt, um EnergyPlus-Eingabedateien zu bearbeiten, insbesondere bei der Verwendung von Python für iterative Änderungen am Energiemodell. Der komplexere Teil des Prozesses, die parametrische Analyse, umfasste die Durchführung tausender Simulationen, wobei bestimmte Parameter (wie Dämmstoffstärken) bei jeder Simulation verändert wurden, um deren Auswirkungen auf den Energieverbrauch zu beobachten.

Insgesamt wurden über 12.000 Simulationen durchgeführt, wobei Faktoren wie die Dicke der externen Wanddämmung, Eigenschaften der Fenster und Thermostateinstellungen variiert wurden. Diese umfassende Analyse liefert wertvolle Erkenntnisse darüber, wie unterschiedliche Faktoren die Energieleistung des Bürogebäudes beeinflussen.

4.2.2. Echtzeit-Simulation und maschinelles Lernen

Energiedienstleistung 1 stellt eine Methode vor, um Energie-Simulationen in der virtuellen Realität (VR) schneller und interaktiver zu gestalten. Traditionelle Simulationen, sogenannte White-Box-Simulationen, können langsam sein und sind nicht praktikabel für schnelle Ergebnisse in VR. Daher wurde ein anderer Ansatz gewählt. Ein maschinelles Lernmodell wurde mit Daten aus über 12.000 vorab durchgeführten White-Box-Simulationen in EnergyPlus trainiert. Das entwickelte ML-Modell kann basierend auf den in der VR-Umgebung ausgewählten Eingabeparametern schnell Simulationsergebnisse in Echtzeit schätzen. Stellen Sie es sich vor wie einen intelligenten Assistenten, der sofort vorhersagen kann, wie Änderungen in verschiedenen Faktoren den Energieverbrauch in einem virtuellen Raum beeinflussen.

Abbildung 6: Beziehung zwischen den EnergyPlus-Simulationen und ML-Vorhersagen für Heizung, Kühlung und Gesamtenergie (kWh/a) zusammen mit den entsprechenden R^2 -Werten.



Der Vergleich zwischen den 12.348 EnergyPlus-Simulationen und den Vorhersagen des entwickelten maschinellen Lernmodells (dargestellt in Abbildung 6) zeigt, dass das ML-Modell außergewöhnlich gut ist, wenn es um die Vorhersage des Energieverbrauchs basierend auf den ausgewählten Eingabeparametern geht. Die robuste Beziehung, die sich in dem hohen R^2 -Wert widerspiegelt, deutet darauf hin, dass das ML-Modell den Energieverbrauch für Heizung, Kühlung und Gesamtenergie genau schätzt.

Als Ergebnis können Benutzer*innen in der virtuellen Realität frei Werte für die modellierten Eingabeparameter der Gebäudehülle innerhalb von vordefinierten Bereiche wählen. Nachdem die Simulation gestartet wurde, liefert das ML-Modell prompt und nahtlos präzise Schätzungen des Energieverbrauchs für die ausgewählten Parameter direkt in der VR-Umgebung. Wenn eine Simulation in der virtuellen Umgebung angefordert wird, werden die Ergebnisse in Echtzeit über die Programmierschnittstelle (API) berechnet. Dies spart nicht nur Zeit, sondern trägt auch zu einer reibungsloseren und angenehmeren gesamten virtuellen Erfahrung bei.

4.2.3. Virtual Reality (VR)

Wir haben den VR-Teil dieses Projekts entwickelt, um das Ziel zu erreichen, Gebäudeenergiesimulationsdaten in einer immersiven VR-Umgebung darzustellen. Diese VR-Umgebung wurde in eine Geschichte mit Bildungsinhalten integriert, um zusätzliche Vorteile für Studierende zu bieten.

Die VR-Erfahrung wurde mit Unreal Engine 5.3 umgesetzt. Die Vielzahl von Tools in diesem Spiel-Engine ermöglicht es uns, atemberaubende Grafiken und flexible Interaktionen zu visualisieren. Die implementierte Umgebung kann auf den meisten Geräten verwendet werden, da wir OpenXR als VR-Schnittstelle genutzt haben. Daher können SteamVR-basierte Geräte wie die HTC Vive-Serie oder Valve Index sowie Oculus-Geräte verwendet werden. Die VR-Erfahrung kann in einer festen Stehposition oder in einem dedizierten Spielbereich entsprechend den Benutzerpräferenzen gespielt werden. Wir empfehlen jedoch, die Umgebung in einer Mindestgröße von 4 m² zu nutzen.

Das Projekt begann mit der Implementierung eines anfänglichen VR-Szenarios eines bestehenden Büros an der Technischen Universität Graz am Campus Inffeldgasse. Diese erste Implementierung diente als Proof of Concept für das allgemeine Entwicklungsszenario und zur weiteren Exploration von Möglichkeiten und Optionen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Proof-of-Concept-Umsetzung haben wir ein VR-Lernspiel entwickelt. Das Spiel bietet einen Escape Room mit Rätseln im Zusammenhang mit der Energieeffizienz von Gebäuden. Benutzer*innen können durch das Spiel mehr über den Einfluss verschiedener Faktoren erfahren. Verschiedene Datenvisualisierungen wurden in Betracht gezogen, um eine ansprechende und umfassende Präsentation der Ergebnisse in der VR-Umgebung zu ermöglichen. Alle Datenpräsentationen sind unter Berücksichtigung von Gamification-Elementen gestaltet, um die Benutzermotivation zu verbessern und die Konsistenz mit der Umgebung zu gewährleisten. Die Rätsel im Spiel basieren auf häufigen Herausforderungen und Fehlern, denen Studierende in traditionellen Lernbedingungen begegnen. Visuelles, haptisches und auditives Feedback wurde hinzugefügt, um während des Spiels Hinweise zu geben. Das Befolgen dieser Hinweise kann helfen, die Aufgaben zu erledigen und Rätsel zu lösen. Sie wurden sorgfältig gestaltet, um das Gameplay und die Herausforderungen nicht negativ zu beeinflussen.

4.3. Energiedienstleistung 2 "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"

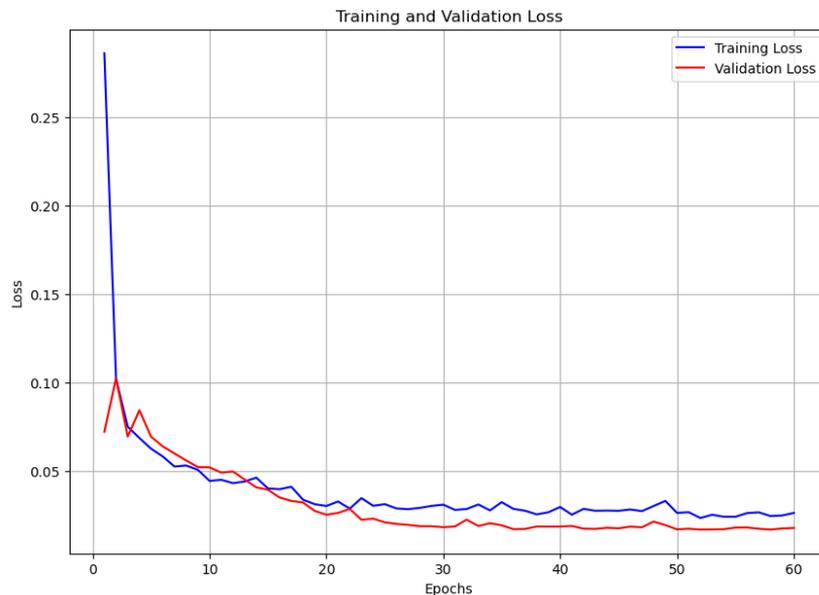
4.3.1. Maschinelle Lernmodelle für die vorhersagende Wartung

Unser Ziel des Energiedienstes 2 bestand darin, sicherzustellen, dass die Luftfilter in der Haupt Lüftungsanlage (AHU) zum richtigen Zeitpunkt ausgetauscht werden, um die Wartungspläne zu optimieren und eine saubere Raumluft zu gewährleisten. Das Ziel bestand also darin, vorherzusagen, wann ein Luftfilter ausgewechselt werden muss, um einerseits einen zu frühen Austausch zu vermeiden und andererseits Zeit und Energie zu sparen, während die Luftqualität hoch gehalten wird.

Bei unserem ersten Versuch, den Zeitpunkt des Filterwechsels vorherzusagen, stießen wir auf Herausforderungen. Das Modell hatte Schwierigkeiten, da wir nur begrenzte Daten zu Filterwechseln hatten, da diese in der Regel nur wenige Male im Jahr ausgetauscht werden. Das machte es schwierig, zuverlässig vorherzusagen, wann der nächste Austausch erfolgen sollte.

Trotz dieser Herausforderungen haben wir einen anderen Ansatz gewählt und positive Ergebnisse erzielt. Wir haben ein Modell erstellt, das den Druckunterschied im Luftsystem und den Filtern betrachtet und es mit verschiedenen Faktoren getestet. Dieses Modell zeigte eine beeindruckende Genauigkeit von 97,5 %.

Abbildung 7: Trainings- und Validierungsverlust in Abhängigkeit von den Epochen



5 Ergebnisse

5.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"

5.1.1. Büroumgebung

Als Ergebnis der ersten Entwicklungsphase haben wir einen Proof-of-Concept für verschiedene Datenvisualisierungen von Gebäuden in der virtuellen Realität entwickelt. Um dieses Ergebnis zu erzielen, haben wir ein reales Büro vom Universitätscampus in einer VR-Entwicklungsumgebung mithilfe von Unreal Engine implementiert (Abbildung 8). Echtzeit-Beleuchtungsmöglichkeiten in der Spiel-Engine ermöglichen es uns, verschiedene Beleuchtungsbedingungen in der Umgebung mühelos zu erleben. Darüber hinaus konnten wir eine breite Palette verfügbarer Assets in der Spiele-Engine-Bibliothek nutzen, um die Visualisierung des Büros zu verbessern. Diese Implementierung bietet uns die Möglichkeit, verschiedene Szenarien der Visualisierung zu erleben, die wir später in unserem Escape-Room-Szenario verwendet haben.

Abbildung 8: Büro im EBS-Centers am Campus Inffeldgasse



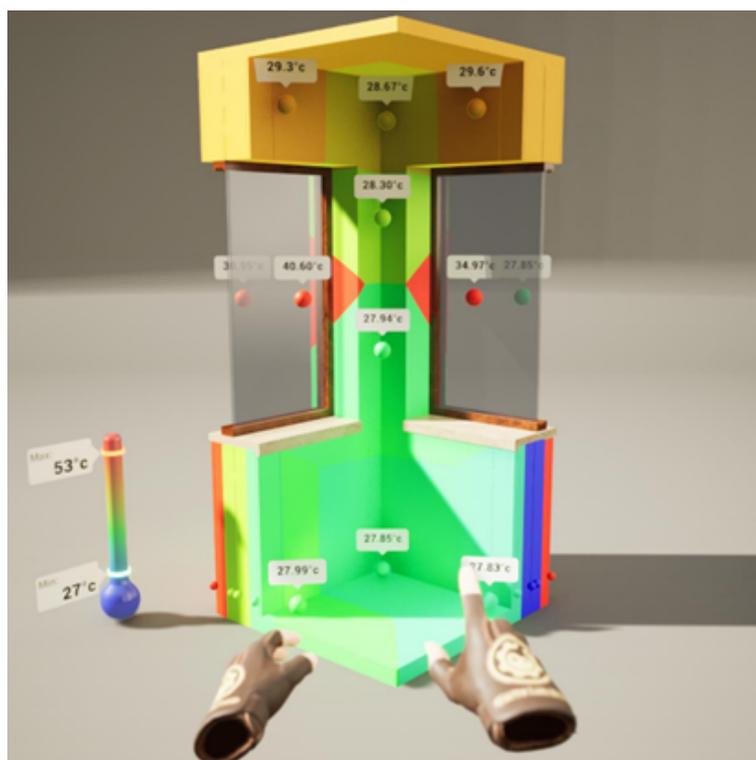
Ein Konzept der ersten Datenvisualisierung bestand darin, Wandebenen und ihre Eigenschaften zu demonstrieren (Abbildung 9). Auf diese Weise geben wir Nutzer*innen die Möglichkeit, einzelne Ebenen des Wandaufbaus darzustellen (später auch zu ändern), um Eigenschaften wie den Wärmewiderstand basierend auf den gegebenen Einstellungen, wie Tages- oder Jahreszeit, zu sehen. Benutzer*innen können jede Ebene auswählen und die entsprechenden Attribute dieser Ebene lesen, wie Typ, Dicke und Wärmewiderstand. Wir haben dieses Konzept später für das Puzzle-Spiel verwendet und geben den Benutzer*innen die Möglichkeit, verschiedene Wandlayouts anzuwenden und aus den Ergebnissen zu lernen.

Abbildung 9: Visualisierung der Wandzusammensetzung mit verschiedenen Schichten und ihren Metadaten (Dicke und R-Wert), einem Farbverlauf, der die Temperatur in der Wand darstellt, sowie dem aktuellen Datum und der Uhrzeit.



Der andere Ansatz, den wir visualisiert haben, bestand darin, Informationen auf der Grundlage der aktuellen Daten aufzubauen. Als Beispiel haben wir die Raumtemperatur anhand von Sensordaten an verschiedenen Orten im Raum dargestellt (Abbildung 10). Dieser Ansatz wurde im Escape-Room-Spiel mit mehr Datentypen und Visualisierungsideen als Gadgets weiter ausgebaut.

Abbildung 10: Visualisierung eines Wandquerschnitts in der virtuellen Realität mit Anzeige verschiedener Temperaturen mithilfe einer Farbskala.



5.1.2. VR-Lernspiel – Escape Room

Anschließend wurde ein VR Escape Room in der Unreal Engine 5 entwickelt. In dem Spiel sind die Spieler*innen in einem Raum eingeschlossen und müssen eine Reihe von Aufgaben im Zusammenhang mit der Simulation von Gebäudeenergie basierend auf dem im Kapitel 5.1.1 beschriebenen Büro lösen, um die Ausgangstür zu öffnen.

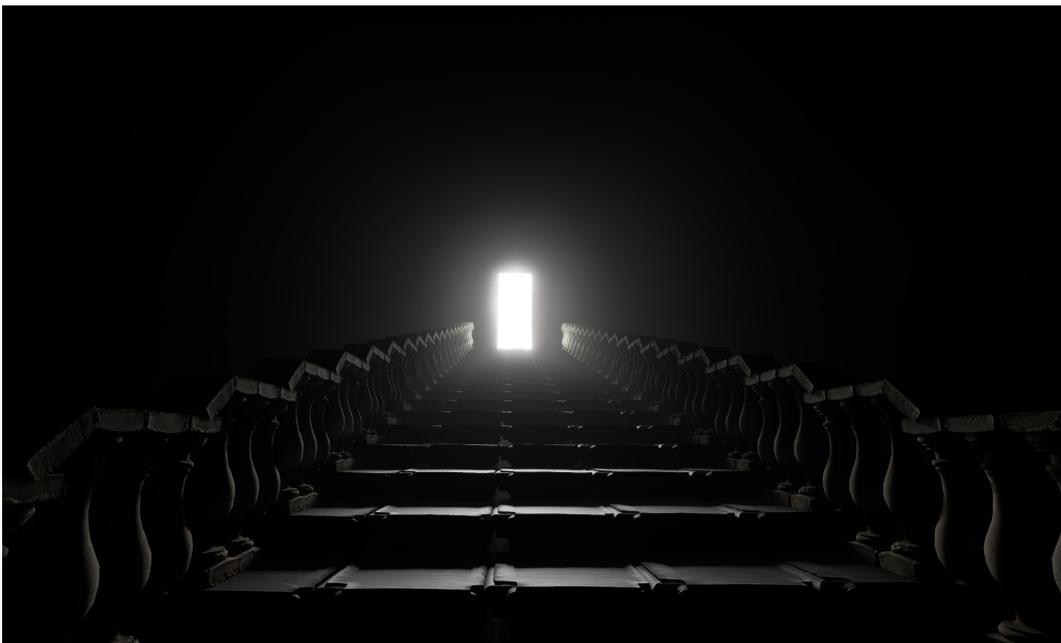
Diese Aufgaben reichen von grundlegenden Einstellungen wie der Tageszeit oder der Ausrichtung des Raums bis hin zur Verwendung verschiedener Wandlayouts für die Außenwände. Das übergeordnete Ziel besteht darin, drei verschiedene Wandlayouts korrekt zu montieren (Holz, Mauerwerk und Beton), während eine Reihe von Anforderungen erfüllt werden müssen (z. B. Kosten, strukturelle Stabilität und ordnungsgemäße Dämmung).

Visuell folgt das Spiel einem Cyberpunk-Stil, wobei Holz, Glas und Metall die vorherrschenden Materialien in der Umgebung sind. Hochwertige Assets wurden erstellt, und es wurde besonderer Wert daraufgelegt, passende Texturen und Soundeffekte einzubeziehen, die zur Umgebung passen. Das Spiel findet sowohl bei Nacht als auch am Tag statt, wobei nachts angemessene Beleuchtung vorhanden ist.

Das Spiel besteht aus zwei Bereichen: einem sehr minimalistischen, dunklen Eingangsbereich, in dem die Spieler anfangs starten (Abbildung 11), und dem Hauptraum, der mehrere Maschinen enthält, mit denen die Spieler*innen interagieren können (Abbildung 12). Wenn die Spieler*innen den Hauptraum betreten, schließt sich die Tür zwischen dem Raum und dem Eingangsbereich hinter ihnen und sperrt sie ein (Abbildung 13).

Ein Auftrag-System in Kombination mit einem Hinweissystem wird verwendet, um die Spieler*innen durch das Spiel zu führen, indem Informationen über die Aufgaben, die sie erledigen müssen, sowie Bildungsinhalte vermittelt werden.

Abbildung 11: Eingangsbereich des Spiels mit Treppen, die zum Hauptbereich führen.



Zusätzlich zur VR-Umgebung wurde auch eine darauf beruhende simplere Desktop-Anwendung entwickelt, die über Maus und Tastatur bzw. ein Gamepad gesteuert werden kann. Damit soll die

Anwendung einem größeren Publikum zugänglich gemacht werden. Der Hauptfokus liegt jedoch auf der immersiven VR-Umgebung, da diese natürlichere Interaktionen mit der Umgebung erlaubt.

Abbildung 12: Blick auf den Hauptraum tagsüber, wenn man neben der Tür zum Eingangsbereich steht.

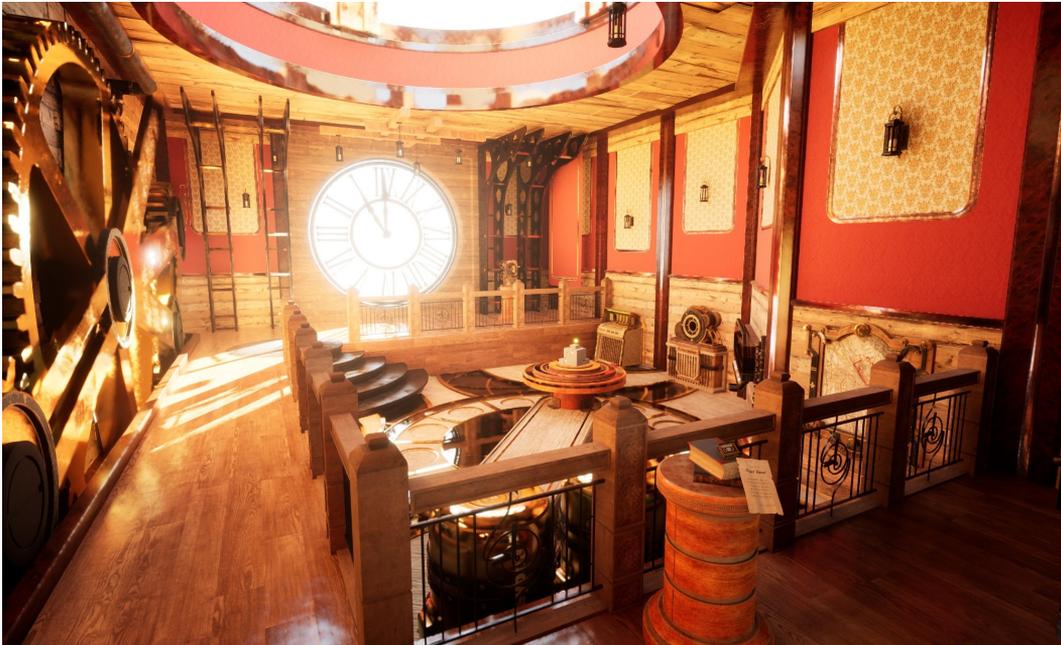


Abbildung 13: Verschlussene Tür zwischen Hauptraum und Eingangsbereich.



Auftrag - und Hinweissystem

Um die Spieler*innen durch diese Umgebung zu führen, wurde ein Leitsystem mit drei Elementen implementiert:

- Lichter
- Papierhinweise
- Audiohinweise

Zu Beginn findet das Spiel nachts statt, und die Umgebung wird nur vom Mond und einigen wenigen Lichtquellen beleuchtet. Zusätzliche Lichter werden nur in Bereichen eingeschaltet, in denen Spieler*innen eine Aufgabe abschließen müssen, der Rest des Raums bleibt dunkel. Dies führt die Spieler*innen nacheinander zu den relevanten Bereichen im Raum.

Visuelle Hinweise werden in Form von Papierhinweisen (Abbildung 14) im Raum platziert. Diese Hinweise enthalten hauptsächlich Skizzen, die mögliche Interaktionen mit der Umgebung beschreiben. Die Spieler können die Hinweise zunächst aufheben und betrachten. Später können sie die Hinweise mithilfe eines Projektors im Raum nochmals ansehen, mit dem die aufgenommenen Hinweise auf eine Leinwand projiziert werden (Abbildung 15). Durch Drehen des horizontalen Rads am unteren Teil des Projektors können die Spieler*innen den aktuell angezeigten Hinweis ändern.

Jeder Papierhinweis wird von einem Audiohinweis begleitet, bei dem eine Stimme zusätzliche Informationen zu der auf dem Papierhinweis dargestellten Skizze liefert. Zu Beginn nehmen die Spieler*innen ein Gerät ähnlich einem Walkman auf, das am Handgelenk befestigt ist. Wenn ein*e Spieler*in dann in die Nähe eines Papierhinweises kommt, wird automatisch der entsprechende Audiohinweis abgespielt. Dieses System wird verwendet, um weitere Informationen zu den Interaktionen in der VR-Umgebung bereitzustellen und den Bildungsinhalt zu erläutern. Der zuletzt gefundene Audiohinweis kann durch Drücken einer Taste am Walkman erneut abgespielt werden. Beim Wechseln des aktuell angezeigten Papierhinweises am Projektor springt der Walkman auch zum entsprechenden Sprachhinweis. Auf diese Weise können die Spieler*innen alle Sprachhinweise erneut abspielen.

Abbildung 14: Erster Papierhinweis mit dem Walkman, der daneben auf einem Stapel Bücher liegt.



Abbildung 15: Hinweisprojektor, der einen Hinweis anzeigt, der die Interaktion mit dem Projektor beschreibt.



Mithilfe dieses Leitsystems muss eine Reihe von Aufträgen im Raum abgeschlossen werden. Es gibt zwei Arten von Aufträgen: Hauptaufträge, die eines der vier Schlösser der Tür öffnen, und Nebenaufträge, die die Spieler*innen zu den Hauptaufträgen führen. Zusätzliche Hinweise im Raum helfen bei der Lösung von Rätseln (z. B. Markierungen auf einer Karte im Raum, die die Ausrichtung des Büros symbolisieren).

Immer wenn ein Auftrag abgeschlossen ist, wird der Spieler je nach Auftragstyp benachrichtigt. Bei Nebenaufträgen wird ein leiser Ton, ähnlich einer Triangel, abgespielt. Wenn ein Hauptauftrag abgeschlossen ist, wird eine längere Melodie abgespielt und das Spiel durchläuft einen vollständigen Tag-Nacht-Zyklus, um einen bedeutenden Fortschritt darzustellen.

Die folgenden Aufträge müssen abgeschlossen werden:

- Aufnahme des Walkmans und des ersten Papierhinweises.
- Interaktion mit dem Hinweisprojektor, um den aktuell angezeigten Hinweis zu ändern.
- Ausrichtung des Büros auf dem Tisch festlegen.
- Festlegung von Tageszeit und Monat durch Drehen zweier Tischebenen.
- Auswahl der richtigen Stadt, indem eine Miniaturstadtstatue vom Tisch genommen und auf einen Indikator gelegt wird, der am Tisch befestigt ist (Hauptauftrag).
- Zusammenstellung einer Holzwand mit den Schichten in der richtigen Reihenfolge.
- Zuweisung des Wandlayouts zum Miniaturbüro.
- Durchführung einer Gebäudeenergiesimulation zur Bestimmung des jährlichen Energieverbrauchs des Büros.
- Optimierung des Wandlayouts und Änderung von Simulationseinstellungen, um einen Energieeffizienz-Rang von B oder besser zu erreichen, unter Einhaltung von Kosten und der Dämmung der Außenwände in einem bestimmten Bereich (Hauptauftrag).
- Finden eines optimalen Wandlayouts für Mauerwerkswände (Hauptauftrag).
- Finden eines optimalen Wandlayouts für Betonwände (Hauptauftrag).

Nachdem alle Aufträge abgeschlossen sind, wird das letzte Schloss geöffnet, und die Tür wird entriegelt. Die Spieler*innen können nun zum Eingangsbereich zurückkehren, woraufhin das Spiel abgeschlossen ist und endet.

Interaktive Maschinen

Um die Aufträge abzuschließen, müssen die Spieler*innen mit verschiedenen Maschinen im Raum interagieren. Die Maschinen können erst genutzt werden, wenn der entsprechende Auftrag erfüllt wurde. Alle Maschinen haben eine einzigartige Interaktionsweise und erfüllen einen bestimmten Zweck. Die folgenden Maschinen wurden implementiert:

- Hinweisprojektor
- Informationszentrum
- Wandschichtgenerator/-Vernichter
- Schichtskalierungsmaschine
- Wandaufbaumaschine
- Wandaufbauten-Regal
- Zentraler Tisch

Der Hinweisprojektor und der Walkman können verwendet werden, um Hinweise im Raum erneut aufzurufen. Durch Drehen des großen horizontalen Zahnrads können sowohl der aktuell angezeigte Hinweis als auch der aktuelle Hinweis am Walkman geändert werden.

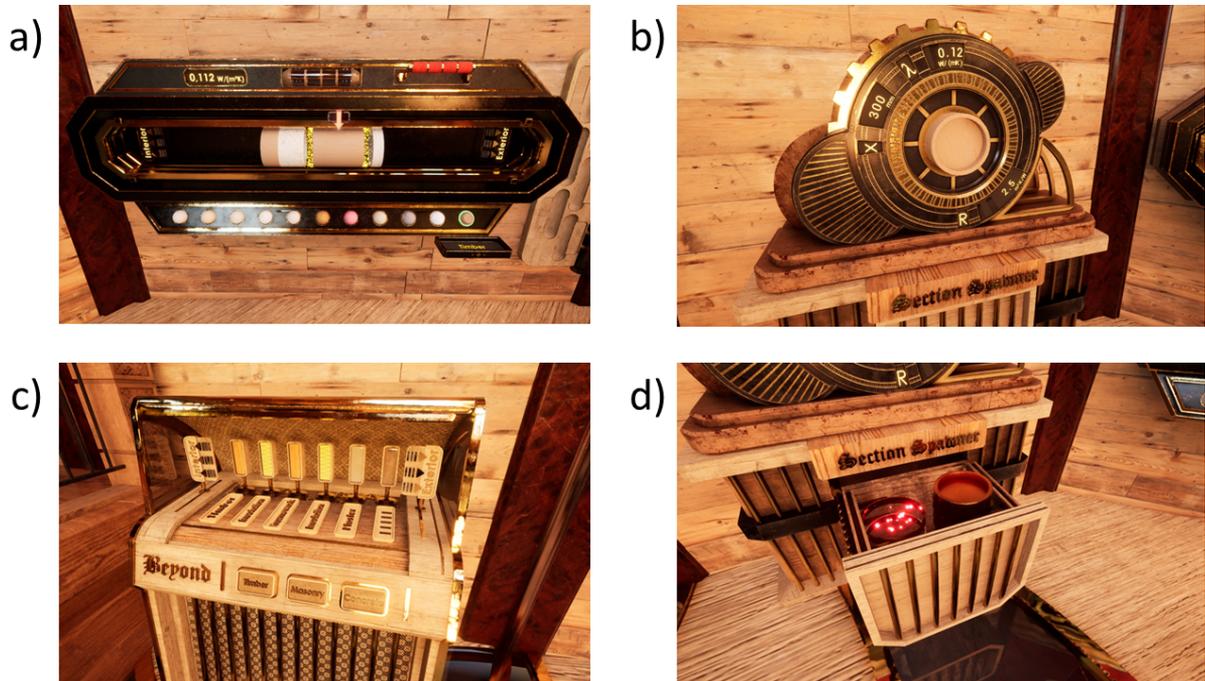
Das Informationszentrum zeigt die Schichten an, aus denen ein bestimmtes Wandlayout besteht (Abbildung 16c). Durch Drücken von Tasten können Benutzer zwischen den verschiedenen Layouts (Holz, Mauerwerk und Beton) wechseln. Die Maschine zeigt nur den Typ der Schicht (z. B. Dämmung) an, sodass es den Spieler*innen freisteht, sich für ein Material zu entscheiden.

Rechts vom Informationszentrum sind zwei Maschinen kombiniert: der Wandschichtgenerator/-Vernichter (Abbildung 16d) und die Schichtskalierungsmaschine (Abbildung 16c). Im unteren Teil der Maschine kann eine Schublade geöffnet werden. In dieser Schublade werden neue Wandschichten erzeugt, und bestehende Schichten können zerstört werden. Im oberen Teil ermöglicht die Schichtskalierungsmaschine dem Spieler, die Dicke einer Wandschicht zu ändern, indem er das große Zahnrad dreht. Diese Maschine zeigt auch die aktuelle Dicke der Wandschicht, den Lambda-Wert des Schichtmaterials (Wärmeleitfähigkeit eines Baustoffes) und den R-Wert der Schicht (Wärmedurchlasswiderstand abhängig vom Lambda-Wert und der Schichtdicke) an.

Die Wandaufbaumaschine ermöglicht es, einen Wandaufbau aus einzelnen Wandschichten zu erstellen (Abbildung 16a). Die Spieler*innen können die Schichten frei umsortieren und das Material der Schichten mithilfe einer Reihe an Materialien unten in der Maschine ändern. In der oberen linken Ecke zeigt ein Display den U-Wert der Wand an. Um ein Muster der Wand für später zu erstellen, müssen die Spieler*innen den roten Griff oben rechts an der Maschine herunterziehen. Dies funktioniert nur, wenn die Schichten in der richtigen Reihenfolge sind; andernfalls werden falsch platzierte Schichten rot hervorgehoben und der Griff klappt zurück nach oben. Wenn die Benutzer*innen alles richtig gemacht haben, wird das Glaskapsel in der Mitte oben mit den Schichten in der Maschine gefüllt.

Die von den Spieler*innen erstellten Wandaufbauten können im Wandaufbauten-Regal aufbewahrt werden. Dies ermöglicht es den Spieler*innen, jeden von ihnen erstellten Wandaufbau erneut zu betrachten, um sie miteinander zu vergleichen.

Abbildung 16: Die verschiedenen Maschinen zum Interagieren mit der Umgebung: a) die Wandaufbaumaschine, b) die Schichtskalierungsmaschine, c) das Informationszentrum und d) der Wandschichtgenerator.



Der Tisch in der Mitte des Raumes wird für verschiedene Interaktionen verwendet. Er enthält drei drehbare Schichten mit einer Miniaturversion des Bürogebäudes oben drauf. Während des Spiels wird das Gebäude durch eine Miniaturversion des Büros selbst ersetzt. Ein roter Griff ist an der Seite des Schreibtischs befestigt. Um die obere Schicht herum wird im späteren Verlauf des Spiels ein Knopf aktiviert, der es den Spieler*innen ermöglicht, Gebäudeenergiesimulationen durchzuführen. Dann werden auch fünf hölzerne Knöpfe an der Seite des Tisches aktiviert.

Die Rotationsfunktionalität wird für verschiedene Zwecke verwendet:

- Einstellen der Tageszeit und des Monats (Abbildung 17a).
- Drehen des Büros in seine korrekte Ausrichtung (Abbildung 17b).
- Einstellen verschiedener Simulationseinstellungen (Abbildung 17d).

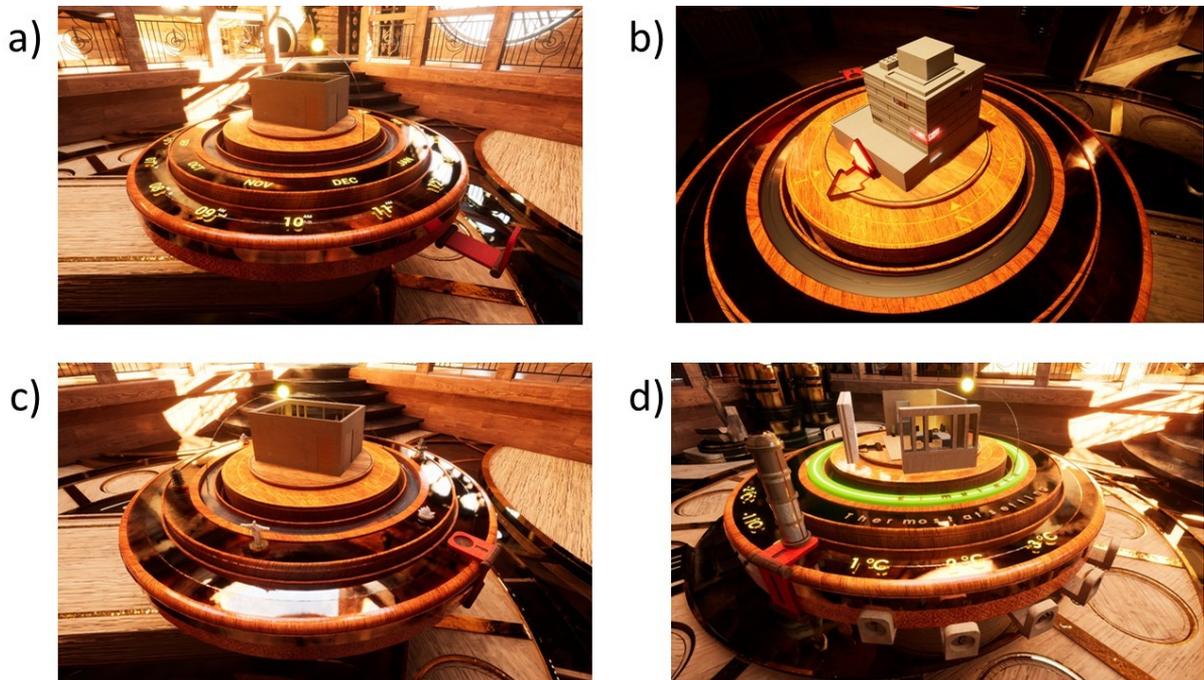
Beim Ändern der Tageszeit und des Monats wird eine Miniatursonne neben dem Büro entsprechend beeinflusst, ebenso wie die Sonne, die den Raum, in dem der Spieler*in steht, beleuchtet. Dies führt auch dazu, dass Spieler*innen zwischen Tages- und Nachtbedingungen im Raum wechseln können. Die Zielzeit ist 13 Uhr und der Zielmonat ist Juni. Nachdem das Spiel in der Nacht begonnen hat, wechseln die Spieler*innen während des Spielens zum Tag und der Raum ist hell erleuchtet.

Der rote Griff am Tisch wird für i) Bestätigung von Zeit- und Monatsauswahlen durch Hochklappen, ii) Auswahl eines Ortes durch Platzieren einer Stadtstatue darauf (Abbildung 17c), und iii) Zuweisen eines Wandlayouts an die äußeren Bürowände durch Platzieren einer Wandaufbaumuster darauf verwendet.

Zusätzlich dazu können verschiedene Simulationseinstellungen auf dem Tisch angezeigt werden. Die Spieler*innen können zwischen den Einstellungen wechseln, indem sie einen der fünf hölzernen Knöpfe an der Seite des Tisches drücken. Dies führt dazu, dass die Werte auf der ersten Schicht des

Tisches angezeigt werden und die Namen der Parameter auf der zweiten Schicht. In diesem Fall dient der rote Griff als Indikator für den gerade ausgewählten Wert.

Abbildung 17: Tisch während verschiedener Phasen: a) Auswahl von Zeit und Monat b) Raumorientierungsmodus c) Stadtauswahl mit Stadtfiguren auf der mittleren Schicht und d) Simulationsmodus mit einem Wandmuster und aktiver Auswahl von Simulationseinstellungen.



Gebäudeenergiesimulation und Visualisierung der Ergebnisse.

Nachdem ein Wandaufbau zusammengestellt wurde, müssen die Spieler*innen ein Muster des Wandaufbaus auf den roten Indikator auf dem Tisch stellen. Dadurch werden die Außenwände des Bürozimmers leicht nach außen geschoben, um eine bessere Sichtbarkeit auf die Wände zu gewährleisten, und der Wandaufbau dieser Wände entsprechend aktualisiert.

Dies aktiviert auch den Simulationsmodus des Tisches. In diesem Modus werden die fünf Holzknöpfe an der Seite des Tisches und ein großer kreisförmiger grüner Knopf zwischen den beiden oberen Schichten des Tisches aktiviert. Während der grüne Knopf eine Gebäudeenergiesimulation startet, können die fünf Holzknöpfe verwendet werden, um einen Parameterauswahlmodus auf dem Tisch zu aktivieren. Die folgenden Einstellungen können innerhalb der entsprechenden Wertebereiche angepasst werden:

- Fenster-U-Wert: 0,6 bis 2,4 W/(m²K)
- Fenster-Energiedurchlassgrad (g-Wert): 0,2 bis 0,80
- Thermostat-Einstellung: -3 °C bis +3 °C (niedrigere/höhere Raumtemperatur-Einstellung in 1-°C-Schritten sowohl im Sommer als auch im Winter)
- Kühlung: ein/aus
- Beschattung: deaktiviert, mittel oder hoch

Beim Drücken des Simulationsknopfs auf dem Tisch wird eine Simulationsanforderung an die Simulations-API gesendet, um den jährlichen Energieverbrauch für Heizung und Kühlung des Büros zu berechnen. Nach Abschluss der Simulation wird das Ergebnis von der API abgefragt. Der berechnete Gesamtenergieverbrauch wird anhand der Energieeffizienzklasse von A++ bis G gemäß der Energieausweiskennzeichnung für Gebäude übersetzt. Zusätzlich dazu werden mehrere andere Ergebnisse berechnet:

- Kosten
- U-Wert
- Strukturelle Stabilität

Die Kosten und die strukturelle Stabilität werden grob anhand der verwendeten Schichten und der entsprechenden Schichtdicke geschätzt. Dies soll verhindern, dass Spieler*innen unverhältnismäßig dicke Dämmschichten verwenden, um gute Energieeffizienzbewertungen zu erzielen, während die strukturellen Schichten unangemessen dünn sind. Basierend auf dem berechneten U-Wert wird auch das Risiko von Schimmelbildung an den Wänden berechnet.

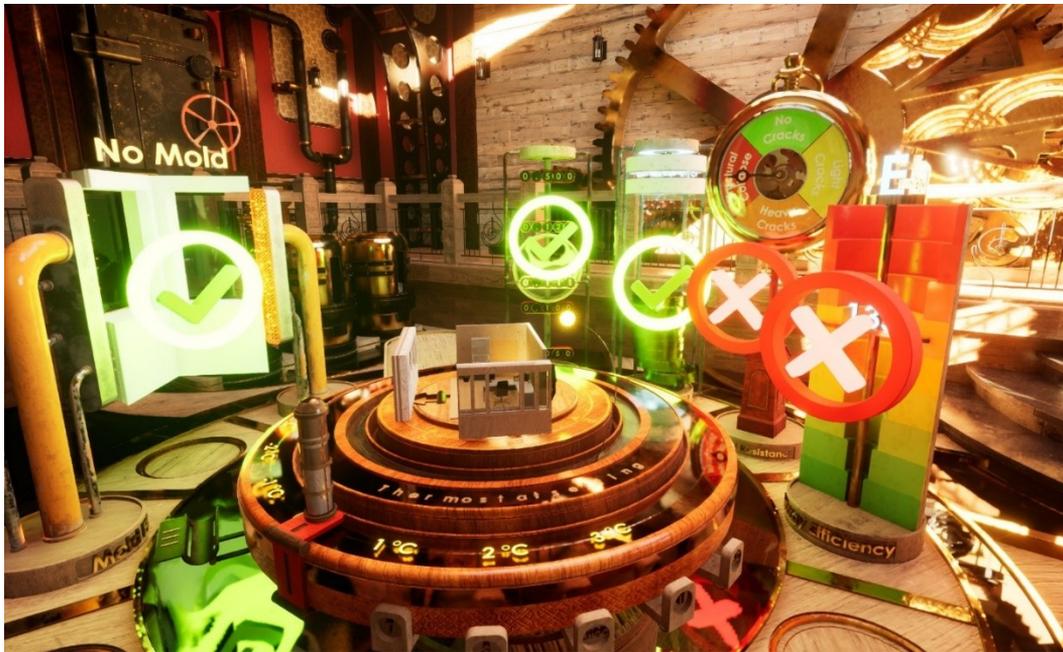
Die Ergebnisse werden um den Tisch herum mithilfe verschiedener Geräte visualisiert (Abbildung 11):

- Das Schimmelrisiko wird visualisiert, indem eine Ecke des Raums in realer Größe mit verschiedenen Stufen der Schimmelbildung in der Ecke dargestellt wird und ein Text die Schwere des Befalls nennt. Es darf schlussendlich kein Schimmel auftreten.
- Der U-Wert wird mit einer Leiste angezeigt, auf der ein Indikator je nach erreichtem U-Wert nach oben und unten gleitet. Der Indikator wird rot, wenn der U-Wert unangemessen hoch oder niedrig ist, und grün, wenn ein U-Wert zwischen 0,1 und 0,125 W/(m²K) erreicht wird.
- Kosten werden mit gestapelten Münzen visualisiert. Diese Kosten werden innerhalb des Spiels ungefähr geschätzt, unter Berücksichtigung der gewählten Materialien und ihrer entsprechenden Dicken. Die ersten acht Münzen sind grün, die nächsten zwei Münzen sind gelb, und jede Münze danach ist rot. Rote Münzen treten bei einer Überschreitung der maximalen Kosten auf.
- Die strukturelle Stabilität wird mit einem an eine Uhr erinnernden Gerät visualisiert, bei dem der Uhrzeiger auf eine von vier Stabilitätsstufen hinweisen kann: Keine Risse, leichte Risse, starke Risse und struktureller Zusammenbruch. Die Spieler*innen müssen die Stufe "keine Risse" erreichen, um fortzufahren.
- Der Energieverbrauch wird mit einem Stapel von Zylindern mit verschiedenen Farben von grün bis rot für die verschiedenen Energieausweiskennzeichnungen angezeigt. Ein Indikator zeigt den berechneten Energieverbrauch in kWh/(m²/a) an und bewegt sich zum entsprechenden Zylinder. Die erreichte Energiebewertung wird auch oben auf dem Gerät angezeigt. Die Spieler*innen müssen mindestens die Energiebewertung B erreichen.

Um besser zu visualisieren, ob die Ziele einer bestimmten Ergebnisart erreicht wurden, wird entweder ein grünes Häkchen oder ein rotes Kreuz vor dem Gerät angezeigt.

Wenn ein*e Spieler*in alle Ziele erreicht und das auf dem Tisch platzierte Wandaufbaumuster aufnimmt, wird sie auf das Wandaufbau-Regal verschoben. Auf diese Weise können die Spieler*innen alle Wandaufbauten, die die oben genannten Kriterien erfüllen, erneut betrachten und untereinander vergleichen.

Abbildung 18: Tisch mit platziertem Wandaufbaumuster und Ergebnisvisualisierung mit verschiedenen Geräten um den Tisch herum i) Querschnitt mit Schimmelanzeige ii) U-Wert iii) Kosten iv) Tragfähigkeit v) jährlicher Energieverbrauch und Energieeffizienzbewertung (von links nach rechts)



5.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"

Energiedienstleistung 2 konzentrierte sich auf "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung". Obwohl es aufgrund von Datenbeschränkungen herausfordernd war, die genaue Lebensdauer von Luftfiltern genau vorherzusagen, zeichnete sich das entwickelte maschinelle Lernmodell durch die präzise Vorhersage von Änderungen im Differenzdruck in der Luftbehandlungsgerät aus. Diese Informationen sind besonders wertvoll, da signifikante Druckveränderungen auf mögliche Probleme mit den Luftfiltern hinweisen können.

Die Integration von Luftbehandlungsgerät-Sensordaten in die IoT-Plattform der TU Graz am Innovation District Inffeld diente als praktische Umsetzung von Energiedienstleistung 2. Diese Integration ermöglicht die Echtzeitüberwachung des Zustands von Luftfiltern und trägt zu proaktiven Wartungsstrategien bei. Das Grafana-Dashboard (Abbildung 19) bietet eine visuelle Darstellung von Schlüsseldaten zu Luftfiltern in der Haupt-Luftbehandlungsgerät. Das Projekt erkennt die Bedeutung an, kontinuierlich verschiedene Ansätze zur vorhersagenden Wartung zu erforschen, insbesondere im Kontext begrenzter Datenverfügbarkeit. Obwohl die genaue Zeitpunktbestimmung für den Filteraustausch eine Herausforderung bleibt, passt sich die Fähigkeit des maschinellen Lernmodells, potenzielle Probleme zu erkennen, in das breitere Ziel der vorhersagenden Wartung ein und betont die Bedeutung der Anpassung von Strategien innerhalb von Datenbeschränkungen. Der Betrieb von Energiedienstleistung 2 unterstreicht das Engagement des Projekts für die Weiterentwicklung innovativer Lösungen im Gebäudemanagement und bei Wartungspraktiken.

Abbildung 19: Grafana-Dashboard, das Schlüsselinformationen der Luftfilter in der Haupt-Luftbehandlungsgerät anzeigt.



5.3. Integration in das Programm "Stadt der Zukunft"

Das Beyond-Projekt steht im Einklang mit den übergeordneten Zielen des Programms 'Stadt der Zukunft', was sich durch seinen Fokus auf die Revolutionierung der Energielandschaft in bestehenden Gebäudebeständen zeigt. Das Projekt adressiert speziell die Herausforderungen energieintensiver und ineffizienter Gebäude und trägt somit zum Ziel des Programms bei, nachhaltige städtische Entwicklung voranzutreiben.

Das Projekt trägt auf verschiedene Weisen zu den übergeordneten Zielen des Programms bei:

- Energiedienstleistungen für Gebäudetransformation: Das Projekt betont die Bedeutung von Energiedienstleistungen wie vorhersagende Wartung, Lastmanagement und modellprädiktive Regelung, um Gebäude in aktive, intelligente Einheiten innerhalb umfassenderer Energiesysteme zu transformieren. Dies steht im Einklang mit dem Fokus des Programms auf innovativen Ansätzen für städtische Energieherausforderungen.
- Menschenzentrierter Ansatz: Indem es Einzelpersonen in den Mittelpunkt von Energiedienstleistungen stellt, erkennt das Projekt die Bedeutung eines menschenzentrierten Ansatzes an. Dies steht im Einklang mit der Betonung des Programms auf die Schaffung widerstandsfähiger und ressourceneffizienter städtischer Räume, die das Wohlbefinden der Bewohner*innen fördern.
- Integration fortschrittlicher Technologien: Die Integration von Virtual Reality (VR), Echtzeitsimulation, maschinellem Lernen und IoT-Plattformen im Projekt entspricht dem Einsatz fortschrittlicher Technologien für nachhaltige städtische Entwicklung im Rahmen des Programms. Diese Technologien spielen eine entscheidende Rolle bei der Schaffung robuster Grundlagen für Energiedienstleistungen der nächsten Generation.
- Fokus auf Gebäudeleistung und -wartung: Die Ziele des Projekts, einschließlich der Bewertung der Auswirkungen von Benutzerentscheidungen auf die Gebäudeleistung und der Implementierung vorhersagender Wartung für HLK-Systeme, tragen direkt zu den Zielen des Programms bei, die Energieeffizienz zu optimieren und die Zuverlässigkeit der städtischen Infrastruktur zu verbessern.
- Nachhaltigkeitsinitiativen: Die Ausrichtung des Projekts auf die Nachhaltigkeitsinitiativen der TU Graz, einschließlich des Ziels 'Netto-Null-CO₂-Emissionen bis 2030' im Innovationsdistrikt Inffeld, steht im Einklang mit dem übergeordneten Ziel des Programms, nachhaltige Praktiken in städtischen Gebieten zu fördern.

- Bildungsaspekt: Das VR Escape Room-Spiel bietet die Möglichkeit, Bauingenieurstudenten über die Grundlagen der Gebäudeenergiesimulation, die Unterschiede zwischen verschiedenen Wandlayouttypen zu informieren und ihnen zu ermöglichen, fundierte Entscheidungen zu treffen. Es sensibilisiert auch für die Bedeutung der Gebäudeenergiemodellierung und des Energieverbrauchs.

Das Projekt integriert sich nahtlos in das Programm 'Stadt der Zukunft', indem es Schlüsselherausforderungen im bestehenden Gebäudebestand angeht, fortschrittliche Technologien übernimmt und zur Schaffung widerstandsfähiger, nachhaltiger und intelligenter städtischer Räume beiträgt. Der innovative Ansatz des Projekts steht im Einklang mit der Mission des Programms, und seine Ergebnisse haben das Potenzial, die Zukunft städtischer Energiedienstleistungen signifikant zu beeinflussen.

6 Schlussfolgerungen

6.1. Erkenntnisse / Technische Bewertung

Sowohl Energiedienstleistung 1 als auch Energiedienstleistung 2 tragen erheblich zu den Bildungs- und Betriebsaspekten des Beyond-Projekts bei. Das VR-basierte Bildungserlebnis im Escape Room nutzt die immersiven Qualitäten von VR, um eine ansprechende Lernumgebung für Studierende des Bauingenieurwesens zu schaffen. Auf der anderen Seite zeichnet sich der vorhersagende Wartungsdienst in der realen Anwendung aus und zeigt seinen Wert in der effektiven Überwachung und Instandhaltung von Gebäudesystemen.

6.1.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"

Der VR-basierte Bildungserlebnis-Raum im Rahmen des Energiedienstes 1 zeigt ein erhebliches Potenzial zur Verbesserung des Lernerlebnisses für Studierende des Bauingenieurwesens. Die immersive Natur von VR dient als motivierender Faktor, indem sie die Studierenden in eine neuartige und interaktive Lernumgebung einbindet. Die Nutzung verschiedener Interaktionen in VR erweist sich als vorteilhaft für die Benutzerbindung, führt jedoch zu einer steileren Lernkurve. Diese Komplexität steht jedoch im Einklang mit dem Ziel des Projekts, ein umfassendes und anspruchsvolles Bildungserlebnis zu bieten.

Die Umsetzung verschiedener Ingenieurskonzepte in Spiel-Szenarien innerhalb von VR, insbesondere die Zusammensetzung von Wandschichten zu einem Wandaufbau mit interaktiven Spielelementen, zeigt die Vielseitigkeit der Plattform. Durch die Integration praktischer Szenarien in eine virtuelle Umgebung können Studierende mit komplexen Konzepten auf eine greifbarere und ansprechendere Weise interagieren. Dieser Ansatz fördert nicht nur ein tieferes Verständnis theoretischer Konzepte, sondern schafft auch eine Brücke zwischen theoretischem Wissen und praktischer Anwendung.

Darüber hinaus macht die Integration von Datenvisualisierung in VR Gebrauch von den immersiven und räumlichen Eigenschaften der virtuellen Welt. Dies ermöglicht die Präsentation von Informationen auf eine ansprechendere und interaktivere Weise. Beispielsweise verbessert die visuelle Darstellung von U-Werten, Kosten, struktureller Stabilität und Energieverbrauch mithilfe verschiedener Gadgets das gesamte Lernerlebnis. Die Einbeziehung visueller Hinweise wie grüner Häkchen und roter Kreuze unterstützt die Studierenden zusätzlich dabei zu beurteilen, ob bestimmte Ziele erreicht wurden.

6.1.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"

Die operationellen Einblicke in Energiedienstleistung 2 verdeutlichen dessen Effektivität bei der vorausschauenden Instandhaltung und automatischen Fehlererkennung, insbesondere bei der Überwachung von Luftfiltern. Obwohl die genaue Lebensdauer der Luftfilter aufgrund von Datenbeschränkungen nur schwer vorherzusagen war, zeichnete sich das Modell durch eine präzise Prognose von Druckdifferenzänderungen aus. Diese Informationen sind wertvoll, da signifikante Veränderungen potenzielle Probleme mit den Filtern signalisieren können.

Die Integration von Sensordaten in die IoT-Plattform der TU Graz zur Überwachung der Luftfiltergesundheit, wie im Grafana-Dashboard dargestellt, zeigt die praktische Implementierung von Energy Service 2. Diese Anwendung in der realen Welt entspricht den übergeordneten Zielen und betont die Bedeutung proaktiver Wartung und frühzeitiger Fehlererkennung bei Gebäudebetrieb.

Zusammenfassend tragen sowohl Energiedienstleistung 1 als auch Energiedienstleistung 2 wesentlich zu den Bildungs- und Betriebsaspekten des Beyond-Projekts bei. Das VR-basierte Bildungsausbruchspiel nutzt die immersiven Eigenschaften von Virtual Reality, um eine ansprechende Lernumgebung für Studierende zu schaffen. Andererseits zeichnet sich der prädiktive Instandhaltungsservice durch seine praktische Anwendung aus und macht damit seinen Wert bei der Überwachung und Wartung von Gebäudesystemen deutlich.

6.2. Fortsetzung der Arbeit mit den erzielten Ergebnissen

6.2.1. Energiedienstleistung 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"

Die Erkenntnisse aus Energiedienstleistung 1 eröffnen Möglichkeiten für weitere Entwicklung und Verbesserung. Die Einführung eines Mehrspielererlebnisses im VR-basierten Lernspiel wird als potenzieller Katalysator für Zusammenarbeit und verbesserte Lernerfolge betrachtet. Indem den Studierenden ermöglicht wird, gemeinsam mit der virtuellen Umgebung zu interagieren, kann das Spiel Teamarbeit, Problemlösung und den Austausch von Wissen zwischen den Teilnehmer*innen fördern.

Der Datenvisualisierungsaspekt von Energiedienstleistung 1 wird als möglicher Bereich zur Erweiterung gesehen. Mehr Datenvisualisierungen innerhalb der VR-Umgebung könnten den Studierenden ein umfassenderes Verständnis von Konzepten der Gebäudeenergiesimulation vermitteln. Die Hinzufügung weiterer Datenelemente und Parameter kann die Komplexität von Szenarien erhöhen und zu einer ganzheitlicheren Lernerfahrung beitragen.

Das Konzept von interaktiven Gebäuden innerhalb des VR-basierten Lernspiels bietet Möglichkeiten für weitere Forschung. Die Integration zusätzlicher interaktiver Elemente, die sich auf Gebäudekomponenten und -systeme beziehen, kann das Lernerlebnis vertiefen. Diese Erweiterung könnte detailliertere Simulationen von Bauprozessen beinhalten und den Studierenden ermöglichen, mit virtuellen Gebäudekomponenten interaktiv zu interagieren und praktische Lernerfahrungen zu machen.

Darüber hinaus besteht Potenzial, Energiedienstleistung 1 in verschiedene Szenarien der Building Information Modeling (BIM)-Ausbildung zu erweitern. Aufgrund der Anpassungsfähigkeit des VR-Spiels eignet es sich auch für die Integration verschiedener BIM-bezogener Szenarien, die den Studierenden verschiedene Aspekte der digitalen Bau- und Designprozesse näherbringen.

6.2.2. Energiedienstleistung 2: "Vorhersagende Wartung und Automatische Fehlererkennung"

Obwohl Energiedienstleistung 2 vielversprechend für die vorausschauende Instandhaltung und Fehlererkennung ist, ist festzuhalten, dass die vollständige Anwendung dieser Modelle vom Sammeln weiterer Daten zum Austausch der Luftfilter abhängt. Da durchschnittlich alle sechs Monate ein

Austausch stattfindet, kann die Zuverlässigkeit der Modelle bei der Vorhersage von Wartungsbedarf durch umfangreichere Tests und Datensammlungen verbessert werden.

Die fortlaufende Arbeit an Energiedienstleistung 2 beinhaltet die Fokussierung auf die Verfeinerung von Strategien für die vorausschauende Instandhaltung auf der Grundlage eines erweiterten Datensatzes. Dieser iterative Prozess ist entscheidend, um die Genauigkeit der Vorhersagen zu verbessern und potenzielle Probleme mit den Luftfiltern rechtzeitig zu identifizieren. Mit zunehmender Verfügbarkeit von Daten können Anpassungen an den Modellen vorgenommen werden, um sie an die tatsächliche Leistung und Lebensdauer der Filter anzupassen.

Zusätzlich sollten laufende Bemühungen darauf abzielen, Fortschritte in den Bereichen Sensor-Technologien und Datenanalyse zu erforschen und einzubinden. Durch die Einbindung technologischer Entwicklungen kann Energiedienstleistung 2 innovative Werkzeuge und Methoden nutzen, um seine Fähigkeiten in der vorausschauenden Instandhaltung und automatischen Fehlererkennung weiter zu verbessern.

6.3. Zielgruppen

Das Projekt identifiziert verschiedene Zielgruppen, die von den Ergebnissen und Anwendungen der entwickelten Energiedienstleistungen und dem VR-Spiel profitieren können. Diese Zielgruppen umfassen Bildungseinrichtungen, Fachleute und Forschungsbereiche und spiegeln die Vielseitigkeit und den Einfluss des Projekts wider.

- Studierende des Bauingenieurwesens:

Energiedienstleistung 1 (VR-Lernspiel): Die Hauptzielgruppe für das VR-basierte Bildungs-Escape-Room umfasst Bauingenieur-/Architektur-/Maschinenbau-Studierende. Dieses innovative Werkzeug fungiert als Bildungsressource und bietet eine immersive und interaktive Plattform zum Erlernen von Gebäudeenergiesimulation, verschiedenen Wandtypen und fundierter Entscheidungsfindung im Kontext nachhaltigen Bauens. Der Fokus der Plattform auf praktischen Szenarien wie dem Zusammenbau von Wänden ermöglicht den Studierenden praktische Erfahrungen in einer virtuellen Umgebung und vertieft ihr Verständnis komplexer Ingenieurskonzepte.

Energiedienstleistung 2 (Vorausschauende Instandhaltung): Studierende insbesondere diejenigen mit Schwerpunkt auf Gebäudesystemen und -instandhaltung, profitieren von Einblicken in vorausschauende Instandhaltung und automatische Fehlererkennung. Dieser Service trägt zu ihrer Ausbildung bei, indem er reale Anwendungen von vorausschauender Analytik bei der Überwachung und Instandhaltung von Gebäudesystemen einführt.

- Fachleute der Bauindustrie:

Energiedienstleistung 1 (VR-Lernspiel): Fachleute der Bauindustrie einschließlich Architekt*innen, Bauleiter*innen und Energieberater*innen stellen eine Zielgruppe dar. Das VR-Spiel bietet einen einzigartigen Ansatz für Schulungen und berufliche Weiterbildungen. Es ermöglicht Fachleuten der Branche, verschiedene Wandkonstruktionen zu betrachten, ihre Energieauswirkungen zu verstehen und fundierte Entscheidungen zu treffen, um ihre Fähigkeiten zu verbessern und das Bewusstsein für nachhaltige Baupraktiken zu schärfen.

Energiedienstleistung 2 (Vorausschauende Instandhaltung): Gebäudemanager*innen, Anlagenbetreiber*innen und Instandhaltungsfachleute bilden eine weitere wichtige

Zielgruppe. Energiedienstleistung 2 bietet ihnen ein Werkzeug zur Verbesserung der Effizienz von Instandhaltungsoperationen durch die Vorhersage potenzieller Probleme mit Luftfiltern. Dieser proaktive Ansatz entspricht den Anforderungen von Fachleuten, die für den betrieblichen Zustand von Gebäuden verantwortlich sind.

- Forscher*innen und Akademiker*innen:

Energiedienstleistung 1 (VR-Lernspiel): Forscher*innen und Akademiker*innen in den Bereichen Bauingenieurwesen, Architektur und Bildungstechnologie sind wichtige Interessengruppen. Das VR-Ausbruchspiel als innovatives Bildungswerkzeug trägt zur wissenschaftlichen Diskussion über die effektive Integration von VR in die Ingenieurausbildung bei.

Energiedienstleistung 2 (Vorausschauende Instandhaltung): Die Forschungsgemeinschaft, die sich für das Gebäudeverhalten, vorausschauende Instandhaltung und IoT-Anwendungen in der gebauten Umwelt interessiert, stellt eine relevante Zielgruppe dar. Erkenntnisse aus Energiedienstleistung 2 tragen zu laufenden Diskussionen über die praktische Umsetzung von vorausschauenden Instandhaltungsstrategien bei.

- VR- und Technikbegeisterte:

Energiedienstleistung 1 (VR-Lernspiel): Begeisterte der VR-Technologie und ihrer Anwendungen im Bildungsbereich stellen eine zusätzliche Zielgruppe dar. Das VR-Spiel des Projekts dient als Demonstration des Potenzials von VR für immersive Lernerlebnisse.

Diese Zielgruppen betonen gemeinsam das Engagement des Projekts, die unterschiedlichen Bedürfnisse von Lernenden, Fachleuten und Forscher*innen im Bereich nachhaltiger Baupraktiken und innovativer Bildungsmethoden anzusprechen.

6.4. Rechtliche Hindernisse

Die Implementierung des VR-Spiels, insbesondere dessen Veröffentlichung auf digitalen Vertriebsplattformen wie Steam (<https://store.steampowered.com/>), wirft verschiedene potenzielle rechtliche Aspekte auf. Die wichtigsten rechtlichen Hindernisse sind mit Lizenzvereinbarungen, Benutzerdaten und Datenschutz sowie der Einhaltung der Nutzungsbedingungen der Vertriebsplattform verbunden.

- Lizenzvereinbarungen: Die Verbreitung des VR-Spiels auf Plattformen wie Steam erfordert die Einhaltung der Lizenzbedingungen der Plattform. Diese Vereinbarungen enthalten oft spezifische Bedingungen in Bezug auf die Verteilung und die Benutzerrechte.
- Benutzerdaten und Datenschutz: Das VR-Spiel als interaktive Bildungserfahrung kann die Erfassung und Verarbeitung von Benutzerdaten beinhalten. Dies wirft Datenschutzbedenken auf, insbesondere bei der Implementierung von Echtzeitsimulationen und interaktiven Elementen. Die Einhaltung von Datenschutzbestimmungen wie der Datenschutz-Grundverordnung (DSGVO) ist entscheidend, um die Privatsphäre der Benutzer zu schützen. Die Erfassung von Belegungs- und Umweltsensordaten im Büro wirft beachtliche Datenschutzbedenken auf. Um die Privatsphäre der Insassen zu schützen, wurden strenge Maßnahmen ergriffen, um die erfassten Daten zu anonymisieren.
- Digitale Vertriebsplattformen: Die Veröffentlichung des VR-Spiels auf Steam erfordert das Navigieren durch die rechtliche Landschaft der digitalen Vertriebsplattformen. Das

Projektteam muss den Nutzungsbedingungen von Steam entsprechen und sicherstellen, dass der Inhalt den Richtlinien und Standards der Plattform entspricht.

6.5. Verwertung, Verbreitungsaktivitäten und weiteres Marktpotenzial/Verteilungspotenzial

Das Projekt hat eine umfassende Strategie zur Verwertung, Verbreitung und zukünftigen Nutzung verfolgt, die durch bedeutende Leistungen und das Bestreben gekennzeichnet ist, akademische Forschung mit praktischen Anwendungen zu verbinden.

- Veröffentlichung des Bildungs-VR-Spiels auf Steam: Ein entscheidender Erfolg ist die Veröffentlichung des VR-Bildungs-Ausbruchspiels auf Steam, einem bekannten Videospiegelvertriebsdienst. Dieser strategische Schritt gewährleistet eine breite Zugänglichkeit und macht das Bildungswerkzeug einem breiten Publikum zugänglich, das an immersiven und interaktiven Lernerfahrungen interessiert ist.
- Vielfältige wirtschaftliche und wissenschaftliche Nutzung: Die wirtschaftliche und wissenschaftliche Nutzung des Projekts ist vielfältig und umfasst sowohl Bildungs- als auch wissenschaftliche Aspekte. Die Integration des Bildungsspiels mit VR in den Unterricht stellt eine neuartige und interaktive Methode für die Bauphysik-Ausbildung dar. Dieser Ansatz hat das Potenzial, die Art und Weise zu verändern, wie sich Studierende mit komplexen Konzepten auf diesem Gebiet auseinandersetzen.
- Veröffentlichungen während des Projekts umfassen:
 1. Safikhani S., Keller S., Schweiger G., & Pirker J., "Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and construction sector: systematic review". International Journal of Digital Earth, 2022. (Impact Factor: 4.88; Q1)
 2. Gustin M., Hopfe C.J., Schweiger G., Petrosino S., Safikhani S., Pirker J., Ebrahimi M., Wilfling S., McLeod R.S. "A Novel Concept For Virtual Reality Enhanced Building Energy Modelling", in Proceedings of the BauSim Conference 2022, Weimar, Germany, September 2022.
 3. Wilfling, S., Ebrahimi, M., Alfalouji, Q., Schweiger, G., & Basirat, M. Learning Non-linear White-box White-box Predictors: A Use Case in Energy Systems. IEEE ICMLA 2022, Bahamas, USA, December 2022.
- Zukünftige Veröffentlichungen: Nach Abschluss des Projekts sind Pläne für die Veröffentlichung von 2-3 zusätzlichen Fachartikeln oder Konferenzbeiträgen vorhanden. Konkret werden, sich 1-2 Veröffentlichungen darauf konzentrieren, die Wirksamkeit des Bildungs-VR-Spiels als ergänzendes Lehrmittel zu bewerten. Diese Beiträge werden tiefer in die Erforschung der pädagogischen Vorteile der VR-Technologie eintauchen und darauf abzielen, das Verständnis komplexer Konzepte im Zusammenhang mit der Bauphysik zu vertiefen. Zusätzlich werden weitere 1-2 Veröffentlichungen die technischen Aspekte des VR-Spiels beleuchten und dabei gründliche Untersuchungen der zugrunde liegenden technologischen Mechanismen, Modelle und Designmerkmale durchführen. Diese Publikationen haben zum Ziel, die komplexen Design- und Betriebsfacetten des Bildungs-VR-Spiels akribisch zu analysieren und die technischen Feinheiten zu beleuchten, die zu seiner Effektivität als Lerninstrument beitragen.

Die Integration des Projekts in die Gaming-Community über Steam sowie die wirkungsvollen Veröffentlichungen positionieren es an der Schnittstelle von Virtual Reality, Bildung und Bauingenieurwesen. Der vielschichtige Ansatz zur Nutzung unterstreicht das Engagement des Projekts für die Förderung von Innovation und praktischen Auswirkungen sowohl im akademischen als auch im realen Kontext.

7 Ausblick und Empfehlungen

7.1. Empfehlungen für weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten

Die Ergebnisse des Projekts ebnen den Weg für zukünftige Forschungs- und Entwicklungsprojekte und bieten wertvolle Erkenntnisse und Chancen zur Weiterentwicklung des Fachgebiets. Zu den wichtigsten Empfehlungen gehören:

Verbesserung von VR-Bildungstools: Weitere Forschung kann sich darauf konzentrieren, VR-Erfahrungen im Bildungsbereich zu verbessern und Möglichkeiten zu erkunden, die Lernkurve in Bezug auf verschiedene Interaktionen zu vereinfachen. Dies beinhaltet die Untersuchung von Methoden zur Optimierung der Benutzerbeteiligung, ohne den Bildungswert des Inhalts zu beeinträchtigen.

Ausweitung von VR-basierten Bildungsspielen: Aufbauend auf dem Erfolg des VR-Spiels könnten zukünftige Entwicklungsanstrengungen die Erweiterung des Repertoires von VR-basierten Bildungsspielen umfassen. Diese Erweiterung kann verschiedene Ingenieurskonzepte abdecken und eine vielfältige Auswahl an interaktiven Szenarien bieten, um Lernende im Bereich des Bauingenieurwesens und verwandter Disziplinen zu begeistern.

Kontinuierliche Verbesserung der Datenvisualisierung in VR: Die immersive und räumliche Umgebung der virtuellen Realität bietet eine einzigartige Plattform für die Datenvisualisierung. Laufende Forschungen sollten sich darauf konzentrieren, Datenvisualisierungstechniken in VR weiter zu verfeinern und zu verbessern, um sicherzustellen, dass Informationen auf ansprechende und interaktive Weise präsentiert werden, um das Lernerlebnis zu verbessern.

Vorausschauende Wartung in Gebäudesystemen: Für Energiedienstleistung 2 wird empfohlen, weitere Forschung zur Verfeinerung von Strategien für die vorausschauende Wartung in Gebäudesystemen durchzuführen. Die Sammlung von mehr Daten zu Luftfilterwechseln ist entscheidend für eine präzise Vorhersage von Wartungsbedürfnissen. Fortlaufende Tests und Datensammlung werden langfristig zur Zuverlässigkeit und Effektivität der vorausschauenden Wartung beitragen.

7.2. Potenzial für Demonstrationsprojekte

Der Ausblick für zukünftige Forschungen beinhaltet eine kontinuierliche Verbesserung von VR-basierten Bildungswerkzeugen und die Verfeinerung von vorausschauenden Instandhaltungsstrategien. Die Wirksamkeit dieser Innovationen in realen Bildungs- und Gebäudemanagement-Szenarien zu demonstrieren, birgt immenses Potenzial, erfordert jedoch eine sorgfältige Abwägung von Herausforderungen und Risiken im Umsetzungsprozess.

- **Möglichkeiten:** Die erfolgreiche Integration des VR-Spiels in den Unterricht bietet die Möglichkeit für Demonstrationsprojekte an Bildungseinrichtungen. Durch die Zusammenarbeit mit Schulen, Universitäten und Schulungszentren kann die Wirksamkeit von VR-basierten Lernwerkzeugen in realen Bildungsumgebungen demonstriert werden.
- **Herausforderungen:** Herausforderungen können beim Ausbau des Einsatzes von VR-Bildungsspielen für eine breitere Anwendung auftreten. Fragen wie Hardware-Kompatibilität,

Zugänglichkeit und institutionelle Bereitschaft müssen angegangen werden, um eine reibungslose und inklusive Implementierung in verschiedenen Bildungsumgebungen sicherzustellen.

- Risiken bei der Umsetzung: Bei der Umsetzung können Risiken auftreten, wie Widerstand gegen die Annahme innovativer Unterrichtsmethoden und potenzielle technische Herausforderungen bei der Bereitstellung von VR-Lösungen auf verschiedenen Plattformen. Maßnahmen zur Risikominderung sollten in Betracht gezogen werden, einschließlich gezielter Schulungsprogramme und kontinuierlicher technischer Unterstützung.
- Demonstrationsprojekt für vorausschauende Instandhaltung: Die Implementierung eines Demonstrationsprojekts für vorausschauende Instandhaltung in Gebäudesystemen erfordert eine Zusammenarbeit mit realen Infrastrukturen. Risiken können Unsicherheiten bei der Echtzeitdatenerfassung und die Notwendigkeit der Abstimmung mit bestehenden Wartungsprotokollen umfassen. Diese Herausforderungen sollten systematisch angegangen werden, um eine erfolgreiche Demonstration zu gewährleisten.

8 Verzeichnisse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Klassifizierung von Simulationsmodellen.....	13
Abbildung 2: Bildliche Darstellung der multidisziplinären Landschaft im Anwendungsfall Nr. 1 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"	17
Abbildung 3: Bildliche Darstellung der multidisziplinären Landschaft im Anwendungsfall Nr. 2 "Menschliche Aspekte in Gebäuden"	18
Abbildung 4: Südwestansicht des EBS-Centers und des Büros (rot markiert)	19
Abbildung 5: Außenansicht des BEM-Modells des Büros in OpenStudio.	20
Abbildung 6: Beziehung zwischen den EnergyPlus-Simulationen und ML-Vorhersagen für Heizung, Kühlung und Gesamtenergie (kWh/a) zusammen mit den entsprechenden R ² -Werten.	21
Abbildung 7: Trainings- und Validierungsverlust in Abhängigkeit von den Epochen.....	23
Abbildung 8: Büro im EBS-Centers am Campus Inffeldgasse	24
Abbildung 9: Visualisierung der Wandzusammensetzung mit verschiedenen Schichten und ihren Metadaten (Dicke und R-Wert), einem Farbverlauf, der die Temperatur in der Wand darstellt, sowie dem aktuellen Datum und der Uhrzeit.	25
Abbildung 10: Visualisierung eines Wandquerschnitts in der virtuellen Realität mit Anzeige verschiedener Temperaturen mithilfe einer Farbskala.....	25
Abbildung 11: Eingangsbereich des Spiels mit Treppen, die zum Hauptbereich führen.	26
Abbildung 12: Blick auf den Hauptraum tagsüber, wenn man neben der Tür zum Eingangsbereich steht.....	27
Abbildung 13: Verschlussene Tür zwischen Hauptraum und Eingangsbereich.	27
Abbildung 14: Erster Papierhinweis mit dem Walkman, der daneben auf einem Stapel Bücher liegt.	28
Abbildung 15: Hinweisprojektor, der einen Hinweis anzeigt, der die Interaktion mit dem Projektor beschreibt.....	29
Abbildung 16: Die verschiedenen Maschinen zum Interagieren mit der Umgebung: a) die Wandaufbaumaschine, b) die Schichtskalierungsmaschine, c) das Informationszentrum und d) der Wandschichtgenerator.....	31
Abbildung 17: Tisch während verschiedener Phasen: a) Auswahl von Zeit und Monat b) Raumorientierungsmodus c) Stadtauswahl mit Stadtfiguren auf der mittleren Schicht und d) Simulationsmodus mit einem Wandmuster und aktiver Auswahl von Simulationseinstellungen.	32
Abbildung 18: Tisch mit platziertem Wandaufbaumuster und Ergebnisvisualisierung mit verschiedenen Geräten um den Tisch herum i) Querschnitt mit Schimmelanzeige ii) U-Wert iii) Kosten iv) Tragfähigkeit v) jährlicher Energieverbrauch und Energieeffizienzbewertung (von links nach rechts)	34
Abbildung 19: Grafana-Dashboard, das Schlüsselinformationen der Luftfilter in der Haupt- Luftbehandlungsgerät anzeigt.....	35

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über Black-Box und White-Box-Modellierung	14
Tabelle 2: Beschreibung der Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet werden	48
Tabelle 3: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert werden	48

Literaturverzeichnis

- Afroz Zakia, Shafiullah G.M., Urmee Tania, Higgins Gary: Modeling techniques used in building HVAC control systems: A review. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 83, 64-84, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.044>, 2018.
- EU commission: Commission Recommendation (EU) 2019/1019 of 7 June 2019 on building modernisation. Link: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/b98262c4-93ee-11e9-9369-01aa75ed71a1>, 2019.
- Fell James Michael: Energy services: A conceptual review. In: Energy Research & Social Science, 27, 129–140, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.erss.2017.02.010>, 2017.
- Gomes Cláudio, Thule Casper, Broman David, Larsen Peter Gorm, Vangheluwe Hans: Co-Simulation: A Survey. In: ACM Computing Survey, 51(3), 1-33, DOI: <https://doi.org/10.1145/3179993>, 2018.
- Hampl Nina, Sposato Robert Gennaro: Social Acceptance of Renewable Energy Technologies. In: Green Banking: Realizing Renewable Energy Projects, 3, DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110607888>, 2020.
- Hargreaves Tom, Nye Michael, Burgess Jacquelin: Making energy visible: A qualitative field study of how householders interact with feedback from smart energy monitor. In: Energy Policy, 38, 6111-6119, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.05.068>, 2010.
- Harish V.S.K.V., Kumar Arun: A review on modeling and simulation of building energy systems. In: Renewable and Sustainable Energy Systems, 56, 1272-1292, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.040>, 2016.
- Holly Michael, Pirker Johanna, Resch Sebastian, Brettschuh Sandra, Gütl Christian: Designing VR experiences—expectations for teaching and learning in VR. In: Educational Technology & Society, 24(2), 107-119. 2021.
- Kozlovska Maria, Klosova Daria, Strukova Zuzana: Impact of Industry 4.0 Platform on the Formation of Construction 4.0 Concept: A Literature Review. In: Sustainability 13 (5): 2683, DOI: <https://doi.org/10.3390/su13052683>, 2021.
- Lee Jeremy, Luchini Kathleen, Michael Benjamin, Norris Cathie, Soloway Elliot: More than just fun and games: Assessing the value of educational video games in the classroom. In: In CHI'04 extended abstracts on Human factors in computing systems, 1375-1378, DOI: <https://doi.org/10.1145/985921.986068>, 2004.
- Liu S.: Forecast augmented (AR) and virtual reality (VR) market size worldwide from 2016 to 2023 (in billion US dollars). Statista: <https://www.statista.com/statistics/591181/global-augmented-virtual-reality-market-size/> (abgerufen am 17.01.2024), 2019.
- Safikhani Saeed, Keller Stephan, Schweiger Gerald, Pirker Johanna: Immersive virtual reality for extending the potential of building information modeling in architecture, engineering, and

construction sector: systematic review. In: International Journal of Digital Earth, 15:1, 503-526, DOI: <https://doi.org/10.1080/17538947.2022.2038291>, 2022.

- Schweiger Gerald, Eckerstorfer V. Lisa, Hafner Irene, Fleischhacker Andreas, Radl Johannes, Glock Barbara, Wastian Matthias, Rößler Matthias, Lettner Georg, Popper Niki, Corcoran Katja: Active consumer participation in smart energy systems. In: Energy and Buildings, 227, 110359, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110359>, 2020.
- Settgast Volker, Pirker Johanna, Lontschar Stefan, Maggale Stefan, Gütl Christian: Evaluating Experiences in Different Virtual Reality Setups. In: Entertainment Computing - ICEC 2016, 115-125, 2016.
- Siano Pierluigi: Demand response and smart grids—A survey. In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, 30, 461–478, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.10.022>, 2014.
- Sun Chengshuang, Jiang Shaohua, Skibniewski Miroslaw J., Man Qingpeng, Shen Liyin: A Literature Review of the Factors Limiting the Application of BIM in the Construction Industry. In: Technological and Economic Development of Economy 23 (5): 764-779, DOI: <https://doi.org/10.3846/20294913.2015.1087071>, 2017.
- Wang Haidong, Zhai Zhiqiang: Advances in building simulation and computational techniques: A review between 1987 and 2014. In: Energy and Buildings, 128, 319-335, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.06.080>, 2016.

Abkürzungsverzeichnis

AHU	Luftbehandlungsgerät / Air Handling Unit
AIB	Architektur, Ingenieurwesen und Bauwesen
API	Programmierschnittstelle / Application Programming Interface
BIM	Bauinformationsmodellierung / Building Information Modelling
DSGVO	Datenschutz-Grundverordnung
GEM	Gebäudeenergiemodellierung
HLK	Heizung, Lüftung und Klimaanlage
HMD	Brillen mit integriertem Display / Head Mounted Display
IoT	Internet der Dinge / Internet of Things
ML	Maschinelles Lernen / Machine Learning
MQTT	Message Queuing Telemetry Transport
VE	Virtuelle Umgebung / Virtual Environment
VR	Virtuelle Realität / Virtual Reality

9 Anhang

9.1. Data Management Plan (DMP)

Das Projekt verpflichtet sich, die "FAIR"-Prinzipien einzuhalten und betont, dass die Datenverwaltungspraktiken darauf abzielen, die Forschungsdaten auffindbar (Findable), zugänglich (Accessible), interoperabel (Interoperable) und wiederverwendbar (Reusable) zu machen. Die Auffindbarkeit wird durch umfassende Dokumentation und klare Metadaten gewährleistet, sodass es für Forscher einfach ist, die Datensätze zu lokalisieren und zu identifizieren. Die Zugänglichkeit wird durch die sichere Speicherung der Daten auf dem TU Graz Inframonitor mit kontrollierten Zugriffsmechanismen gewährleistet. Die Interoperabilität wird durch die Verwendung von standardisierten Formaten und Protokollen erreicht, um eine nahtlose Integration mit vorhandenen Datensätzen oder Plattformen zu ermöglichen. Schließlich sind die Daten strukturiert und dokumentiert, um ihre Wiederverwendbarkeit zu fördern und zukünftige Forschungsprojekte zu unterstützen, was die Langfristigkeit und Auswirkungen der generierten Daten gewährleistet.

1: Datenerstellung und Dokumentation

Das Projekt verwendet eine Kombination aus externen und internen Daten, wobei der Hauptdatensatz innerhalb des Projekts generiert wird. Alle vom Projekt generierten Daten, mit Ausnahme der EnergyPlus-Wetterdatei, werden sicher auf dem TU Graz Inframonitor gespeichert und der Zugriff ist auf das Projektteam beschränkt. Sobald es vollständig veröffentlicht ist, wird das VR-Spiel öffentlich auf Steam zugänglich sein. Der Programmcode für das Spiel ist bereits möglich.

Tabelle 2: Beschreibung der Daten, welche im Rahmen des Projekts verwendet werden

Beschreibung	Typ	Art	Quelle	Zugang	Link
EnergyPlus Wetterdaten für Graz, Österreich	Numerisch	Historische Wetterdaten	EnergyPus	öffentlich	https://energyplus.net/weather-location/europe_wmo_region_6/AUT/AUT_Graz.112400_IWEC

Tabelle 3: Beschreibung der Daten, welche im Projekt generiert werden

ID	Beschreibung	Typ	Art	Verantwortlich	Zugang
Projektdaten auf dem Inframonitor der TU Graz	Numerisch	Historische Sensordaten	TU Graz Inframonitor	eingeschränkt	https://inframonitor.tugraz.at:3000
VR Game	Vollständiger Programmcode des VR Games	Code	Unreal Engine Code	Institute of Interactive Systems and Data Science, TU Graz	https://gitlab.tugraz.at/79CB196E0CDB14D7/chimera_project/-/tree/Beyond-Main

Game Evaluierung	Bei der Evaluierung verwendete Fragebögen	Text	Fragebögen	Institute of Interactive Systems and Data Science, TU Graz	Nicht öffentlich zugänglich
Simulations-GitHub-Repository	Dateien	Dateien	Modelle	DiLT	https://github.com/tug-cps/RoomEnergySimulation
Programmierschnittstelle	API	API	REST API	DiLT	https://beyond.dilt.at

2: Ethische, rechtliche und Sicherheitsaspekte

In Bezug auf das Bildungs-VR-Spiel werden potenzielle ethische, rechtliche und sicherheitsrelevante Aspekte berücksichtigt. Der Inhalt und die Interaktionen des VR-Spiels entsprechen ethischen Standards, und rechtliche Aspekte wie das Urheberrecht werden beachtet. Es wurden Sicherheitsmaßnahmen implementiert, um Benutzerdaten zu schützen und eine sichere VR-Umgebung zu gewährleisten.

3: Datenspeicherung und -erhalt

Die im Projekt generierten Daten werden auf den Datenbanken und der IoT-Plattform der TU Graz gespeichert, wobei regelmäßige Backups durchgeführt werden, um die Integrität der Daten sicherzustellen. Die Verantwortung für diese Backups liegt beim IT-Abteilung, um die Erhaltung wertvoller Forschungsdaten zu gewährleisten.

4: Wiederverwendbarkeit der Daten

Projektdateien, mit Ausnahme sensibler Informationen, werden innerhalb des Projektteams über den TU Graz Inframonitor auf der IoT-Plattform geteilt.

