

BACHELORARBEIT

Mixed Reality als Zukunftstechnologie im Bauwesen

**Interaktive Simulation bauphysikalischer Eigenschaften und
ökonomischer Faktoren von Wandkonstruktionen**

vorgelegt im Dezember 2025
Jan Christoph Reese

Matrikel-Nr.: [REDACTED]
Abgabedatum: 25.12.2025

Erstprüferin: Fr. Prof. Dr. Larissa Putzar
Zweitprüfer: Herr Sune Timon Maute

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Department Medientechnik
Finkenau 35
22081 Hamburg

Zusammenfassung

Mixed Reality hat sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt und findet bereits in vielen Bereichen des Alltags Anwendung. Von immersiven Lernumgebungen bis hin zu unterstützenden Visualisierungen in der Medizin zeigt sich, dass MR nicht nur zur Unterhaltung dient, sondern auch neue Wege eröffnet, komplexe Inhalte verständlich darzustellen. Auch im Bauwesen und Handwerk gewinnt der Einsatz von MR-Technologien zunehmend an Bedeutung, etwa bei der Planung, Visualisierung und Dokumentation von Bauprojekten.

In der Praxis profitieren bislang jedoch vor allem größere Unternehmen von diesen Technologien, da bestehende Lösungen häufig kostenintensiv, komplex oder stark auf industrielle Anwendungsfälle zugeschnitten sind. Kleine und mittelständische Handwerksbetriebe sowie Einzelpersonen haben hingegen oft nur eingeschränkten Zugang zu geeigneter MR-Software.

Vor diesem Hintergrund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine MR-Anwendung konzipiert und prototypisch umgesetzt, die sich gezielt an kleinere Betriebe richtet. Ziel der Anwendung ist es, bauphysikalische Bewertungen – insbesondere die Berechnung von U-Werten und den Tauwasseranfall – direkt mit der realen Umgebung zu verknüpfen. Dazu werden reale Räume mittels eines MR-Headsets erfasst, virtuell abgebildet und interaktiv bearbeitet. Die Anwendung orientiert sich dabei an etablierten Werkzeugen wie Ubakus, erweitert diese jedoch um eine räumliche, intuitive und immersive Darstellung.

Die entwickelte Software wurde hinsichtlich ihrer Funktionalität, Genauigkeit und Praxis-tauglichkeit validiert und mit bestehenden Berechnungstools verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass Mixed Reality ein hohes Potenzial bietet, bauphysikalische Zusammenhänge verständlicher darzustellen und Planungsprozesse zu unterstützen. Gleichzeitig werden bestehende Grenzen aufgezeigt, die insbesondere in der Scanqualität, der Nutzerführung und der aktuellen technischen Reife von MR-Systemen liegen.

Abstract

Mixed Reality has developed rapidly in recent years and is already being used in various areas of everyday life. From immersive learning environments to medical training applications, MR demonstrates its potential not only as an entertainment medium but also as a tool for making complex information more accessible. In the construction sector, Mixed Reality is increasingly applied to support planning, visualization, and documentation processes.

In practice, however, existing MR solutions are mainly used by large companies. Smaller craft businesses and individual practitioners often lack access to these technologies due to

high costs, technical complexity, or solutions that are tailored primarily to industrial use cases. As a result, the potential of Mixed Reality remains largely unused in many small and medium-sized enterprises.

This thesis addresses this gap by developing and prototypically implementing a Mixed-Reality application specifically designed for smaller businesses. The goal of the application is to link building-physics evaluations directly to the real environment. Using an MR headset, real rooms are scanned, digitally reconstructed, and interactively modified. Based on this spatial information, key building-physics parameters such as U-values and condensation according to the Glaser method are calculated and visualized. The application is conceptually based on established tools such as Ubakus but extends them through an immersive and spatially intuitive user interface.

The developed software was evaluated with regard to its functionality, calculation accuracy, and practical usability and was compared to existing calculation tools. The results show that Mixed Reality can significantly improve the understanding and communication of building-physics concepts while supporting planning and decision-making processes. At the same time, the evaluation highlights current limitations, particularly regarding scan accuracy, user guidance, and the technical maturity of MR systems.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Durch fachliche Hinweise, konstruktives Feedback und motivierende Gespräche haben sie wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Ein besonderer Dank gilt meinen Brüdern Konrad und Tilman Hintz von der Hintz Naturbau GmbH, die mich insbesondere bei bauphysikalischen und bautechnischen Fragestellungen unterstützt haben. Ihre praxisnahen Erklärungen, ihr fachliches Wissen und ihre Erfahrungen aus dem Handwerksalltag waren eine wertvolle Hilfe und haben maßgeblich zum besseren Verständnis der behandelten Themen beigetragen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
Listings	VI
Hilfsmittelverzeichnis	VII
Abkürzungsverzeichnis	VIII
1. Einleitung	1
1.1. Motivation und Problemstellung	2
1.2. Zielsetzung und Forschungsfragen	2
1.3. Aufbau der Arbeit	3
2. Grundlagen	4
2.1. Mixed Reality im Bauwesen	4
2.1.1. Definition und Abgrenzung zu VR und AR	4
2.1.2. Technologische Grundlagen	6
2.1.3. Aktueller Stand der Technik und Anwendungsfelder im Bauwesen	8
2.1.4. Unity Engine und MR-Integration	9
2.2. Bauphysikalische Grundlagen	10
2.2.1. Wärmeschutz und U-Wert	10
2.2.2. Das Glaser-Verfahren	12
2.2.3. Relevante Normen und Gesetze	13
3. Konzeption der Software	15
3.1. Zieldefinition der Anwendung	15
3.2. Funktionsumfang und Use Cases	15
3.2.1. Funktionale Anforderungen	16
3.2.2. Nicht-funktionale Anforderungen	16
3.2.3. Use Cases	17
3.3. Konzeptionelle Architektur	17
3.3.1. Architekturübersicht	17

3.3.2.	Zentrale Systemkomponenten	18
3.3.3.	Daten- und Prozessfluss	19
3.3.4.	Abgrenzung zu Ubakus	19
4.	Implementierung der MR-Anwendung	21
4.1.	Technische Architektur	21
4.1.1.	Komponentenbasierter Ansatz in Unity	21
4.2.	Entwurfsprinzipien	22
4.3.	Interne Datenstrukturen und Zustandsverwaltung	24
4.3.1.	Wand- und Layermodell	24
4.3.2.	Scriptable Objects für Baustoffe	26
4.4.	Implementierung zentraler Funktionalitäten	27
4.4.1.	Raumerfassung und Raumgenerierung	27
4.4.2.	Interaktion und Menüsystem	28
4.4.3.	Bauphysikalische Berechnung	30
4.5.	Zusammenfassung des Kapitels	32
5.	Validierung und Vergleich	34
5.1.	Vergleich der Berechnungen mit etablierten Tools	34
5.1.1.	Testfälle	34
5.1.2.	Bewertung	39
5.2.	Diskussion der Genauigkeit der Scans und Berechnungen	39
5.3.	Benutzerfeedback	39
6.	Potenziale und Grenzen	41
6.1.	Vorteile der entwickelten MR-Anwendung	41
6.2.	Herausforderungen und Grenzen	42
6.3.	Wirtschaftliche und ökologische Potenziale	42
7.	Fazit und Ausblick	44
7.1.	Zusammenfassung der Ergebnisse	44
7.2.	Beantwortung der Forschungsfragen	45
7.3.	Ausblick auf zukünftige Entwicklungen	46
	Literatur	48
A.	Anhang	52
A.1.	Voraussetzungen	52
A.2.	Aktivierung des Entwicklersmodus	52
A.3.	Installation über SideQuest	53
A.4.	Start der Anwendung	53

A.5. Hinweise	53
-------------------------	----

Abbildungsverzeichnis

2.1.	XR Abgrenzungen	5
2.2.	VR-Game Superhot	5
2.3.	MR-Game Beispiel	6
2.4.	AR Gerät	7
2.5.	XR Abgrenzungen	9
2.6.	Glaser Verfahren 1	11
2.7.	sd-Diagramm	13
3.1.	Blockdiagramm	18
4.1.	Userflow	29
5.1.	Testfall 1 – Vergleich des Wandaufbaus	36
5.2.	Testfall 1 – Vergleich der sd-Diagramme	36
5.3.	Testfall 2 – Vergleich des Wandaufbaus	38
5.4.	Testfall 2 – Vergleich der sd-Diagramme	38

Tabellenverzeichnis

2.1. Gegenüberstellung von Meta Quest 3 und Valve Index (VRcompare, 2025; Vsr, 2024)	8
5.1. Gegenüberstellung der Ergebnisse für Testfall 1	35
5.2. Gegenüberstellung der Ergebnisse für Testfall 2	37

Listings

4.1.	Vereinfachte Implementierung der Layer-Klasse	25
4.2.	Definition eines ScriptableMaterials zur Beschreibung von Baustoffen	26
4.3.	Berechnung des U-Werts aus den Wand-Layern	31
4.4.	Zentrale Aktualisierung nach Änderungen am Wandaufbau	32

Hilfsmittelverzeichnis

- **Creately (app.creately.com):** Erstellung von Diagrammen und Blockgrafiken zur Darstellung von Architektur- und Prozessabläufen.
- **ChatGPT 5.2 (chatgpt.com):** Unterstützung bei der Strukturierung der Arbeit, der sprachlichen Überarbeitung sowie bei Formulierungshilfen. Die inhaltliche Ausarbeitung, Bewertung und Implementierung erfolgten eigenständig.
- **Writefull (writefull.com):** Unterstützung bei grammatikalischen und semantischen Korrekturen einzelner Textpassagen.

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
BIM	Building Information Modeling
DIN	Deutsches Institut für Normung
ECS	Entity-Component-System
GEG	Gebäudeenergiegesetz
MR	Mixed Reality
SDK	Software Development Kit
SRP	Single Responsibility Principle
OCP	Open-Closed Principle
LSP	Liskov Substitution Principle
ISP	Interface Segregation Principle
DIP	Dependency Inversion Principle
SOLID	Sammlung objektorientierter Entwurfsprinzipien (SRP, OCP, LSP, ISP, DIP)
UI	User Interface
UX	User Experience
VR	Virtual Reality
XR	Extended Reality
MRUK	Mixed Reality Utility Kit (Meta SDK)
U	Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$
R	Wärmewiderstand in m^2K/W
R_{si}	Innerer Oberflächenwärmewiderstand
R_{se}	Äußerer Oberflächenwärmewiderstand
λ	Wärmeleitfähigkeit eines Materials in $W/(m \cdot K)$
μ	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
d	Schichtdicke eines Materials
sd	Äquivalente Luftschichtdicke
e_{sat}	Sättigungsdampfdruck

1. Einleitung

„The over-all point is that new technology will not necessarily replace old technology, but it will date it. By definition. Eventually, it will replace it.“

— Jobs, [1985](#)

Mit diesem Zitat unterstreicht Steve Jobs, den Lebenszyklus und das Wechselspiel zwischen alter und neuer Technologie. Zahlreiche neue Entwicklungen erleichtern unseren Alltag auf vielfältige Weise. Mixed Reality, im weiteren MR genannt, ist eine dieser Technologien. Sowohl im beruflichen als auch im alltäglichen Leben werden MR-Systeme zunehmend beliebter und verdrängen herkömmliche Praktiken, Tools oder Arbeitsweisen. Sie kommt bereits in wichtigen Bereichen wie der Bildung oder der Medizin zum Einsatz. Der Markt für Mixed-, Augmented- und Virtual Reality Geräte ist so groß wie nie zuvor, und die Marktgröße soll Prognosen zufolge von den für 2023 Errechneten fünf Milliarden USD bis 2030 auf über 50 Milliarden USD ansteigen (Grand View Research, [2025](#)). Diese Dynamik unterstreicht das Potenzial von MR, bestehende Prozesse zu verändern.

Die Branche, auf die sich diese Arbeit spezialisiert, ist das Bauwesen. Obwohl XR in Bereichen wie Bildung und Medizin bereits etabliert ist, liegt der Bezug zum Bauwesen auf den ersten Blick nicht unbedingt nahe. Gerade diese Branche, die traditionell stark auf bewährte Arbeitsweisen und physische Prozesse setzt, bietet großes Potenzial für den Einsatz von XR-Technologien. Firmen wie *Autodesk, Inc.* mit ihrer gleichnamigen Software *Autodesk* bieten eine MR-Implementierung an, mit der Experten von verschiedenen Standorten gemeinsam im virtuellen Raum arbeiten können (Autodesk, Inc., [2025a](#), [2025b](#)).

1.1. Motivation und Problemstellung

Der thematische Ausgangspunkt dieser Arbeit liegt in der Entwicklung einer interaktiven, immersiven Anwendung auf der Basis von Extended-Reality-Technologien. Vorgesehen war die Konzeption eines MR-basierten Spiels. Im weiteren Verlauf wurde dem Autor ein laufendes Verbundprojekt zwischen der HAW Hamburg und der Universität Bielefeld vorgestellt. Dieses befasst sich mit der digitalen Unterstützung ökologischer Renovierungs- und Modernisierungsprozesse im Wohnungsbestand und verfolgt das Ziel, energetische Maßnahmen sowohl technisch als auch ökonomisch und ökologisch transparenter darzustellen (Universität Bielefeld, 2025). Vor dem Hintergrund dieses Verbundprojekts entstand die Fragestellung, inwiefern Extended-Reality-Technologien dazu beitragen können, komplexe bauphysikalische Zusammenhänge im Kontext energetischer Sanierungen verständlich und zugänglich darzustellen.

Obwohl große Unternehmen wie Autodesk umfassende MR-Lösungen anbieten, sind diese für kleinere Firmen oft nicht effizient genug. Mit der zunehmenden Anzahl an Aufträgen und Baustellen steigt die Komplexität der Planung, wodurch kleine und mittelständische Bauunternehmen bisher nur eingeschränkt von den Möglichkeiten der MR profitieren.

1.2. Zielsetzung und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist es, eine MR-Software zu entwickeln, die nicht nur von großen Unternehmen genutzt werden kann, sondern auch kleinen Unternehmen oder Einzelpersonen den Vorteil der MR bietet. Sie soll einfach und intuitiv zu bedienen sein und den Nutzern ermöglichen, MR-Funktionen effektiv in ihren Arbeitsalltag zu integrieren.

Daraus ergibt sich folgende zentrale Forschungsfrage:

- Inwiefern kann eine MR-Anwendung entwickelt werden, die bauphysikalische Bewertungen verständlich darstellt und zugleich praktikabel sowie intuitiv bedienbar ist?

Um diese zentrale Forschungsfrage methodisch zu bearbeiten, wird sie im Verlauf der Arbeit in drei Teilfragen untergliedert:

1. **Konzeption und Anforderungen:** Welche funktionalen und nicht-funktionalen Anforderungen müssen erfüllt sein, damit eine MR-Anwendung bauphysikalische Bewertungen verständlich darstellen kann und gleichzeitig für kleine Bauunternehmen bzw. Einzelpersonen nutzbar ist?

2. **Technische Umsetzung:** Wie kann die MR-Anwendung technisch umgesetzt werden, um die erfassten Raumdaten in Unity zu verarbeiten und bauphysikalische Kenngrößen korrekt darzustellen?
3. **Evaluation und Praxistauglichkeit:** Inwieweit erfüllt die entwickelte Anwendung die definierten Anforderungen hinsichtlich Verständlichkeit, Intuitivität und Praxisrelevanz, insbesondere im Vergleich zu etablierten Tools?

1.3. Aufbau der Arbeit

Diese Arbeit gliedert sich in mehrere aufeinander aufbauende Kapitel und folgt einem klaren strukturellen Ablauf. Jede der drei Teilfragen wird als Leitfrage in einem der Kapitel behandelt. Dadurch werden die Konzeption, technische Umsetzung und Evaluation der MR-Anwendung klar voneinander getrennt.

Nach der Einführung und den theoretischen Grundlagen in Kapitel 2.2 werden zunächst die Anforderungen und das Konzept der Anwendung erarbeitet (Kapitel 3). Darauf aufbauend wird in Kapitel 4 die technische Umsetzung beschrieben. Anschließend wird in Kapitel 5 die Praxistauglichkeit und Validität der Anwendung anhand von Testfällen, eines Vergleichs mit etablierten Werkzeugen sowie Nutzerfeedback bewertet. Kapitel 6 reflektiert darauf aufbauend die Potenziale und Grenzen der Anwendung, bevor die Arbeit mit einem Fazit und einem Ausblick in Kapitel 7 abgeschlossen wird.

2. Grundlagen

Um ein tieferes Verständnis für die bau- und softwaretechnischen Aspekte dieser Arbeit zu erlangen, werden in diesem Abschnitt einige Grundlagen vermittelt. Darunter fällt zum einen die Geschichte von MR-Headsets, speziell im Hinblick auf das Bauwesen. Zum anderen wird ein Einblick in die Soft- und Hardwaregrundlagen zur virtuellen Darstellung gewährt. Außerdem werden wichtige Verfahren und Begriffe, wie der *U-Wert*, erklärt und deren Bedeutung für die bauphysikalische Bewertung von Bauteilen erläutert.

2.1. Mixed Reality im Bauwesen

Mixed Reality ist bei weitem keine Neuheit im Bauwesen. Bereits 2008 diskutierten Experten darüber, virtuelle bzw. digital generierte Modelle mit der realen Welt zu verbinden (Bökeler et al., 2008, S. 13). Den Durchbruch für Mixed Reality lieferte die im Januar 2015 vorgestellte *Microsoft HoloLens*. Als erster kabelloser, eigenständiger holografischer Computer eröffnete sich völlig neue Möglichkeiten für die Anwendung von Mixed Reality in sämtlichen Branchen (Microsoft Corporation, 2020). Im Dezember gleichen Jahren kollaborierte *Microsoft* mit *Autodesk* und integrierte die *BIM 360 Docs-Plattform* in die *HoloLens*-Umgebung, um die Nutzung von 3D-Modellen und Bauplänen in MR-Anwendungen zu ermöglichen (Slowey, 2015).

So wurde nicht nur der Grundstein für zukünftige MR-Software gelegt, sondern auch ein wichtiger Impuls für die Digitalisierung von Bauprozessen gesetzt, der den Weg für immersive, kollaborative und effizientere Arbeitsabläufe ebnete.

2.1.1. Definition und Abgrenzung zu VR und AR

Virtual, Augmented, Mixed und Extended Reality. Im Zusammenhang mit digitalen Realitäten kann es schnell zu Verwirrung kommen, was diese Begriffe eigentlich beschreiben. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, dient Extended Reality (XR) als Überbegriff und lässt sich grob in drei Bereiche aufteilen: Virtual Reality (VR), Augmented Reality (AR) und Mixed Reality (MR).

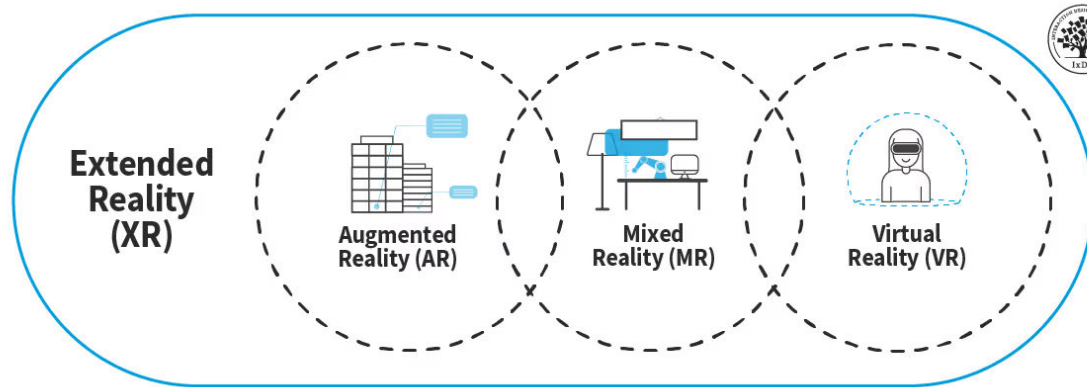


Abbildung 2.1.: Abgrenzungen von verschiedenen Realitäten (Quelle: Tremosa, 2022)

VR ist eine vollständig digitale Umgebung, die keinen Bezug zur realen Welt hat. Sie wird häufig für Videospiele und Simulatoren verwendet, um den Nutzer vollständig in die virtuelle Welt eintauchen zu lassen (Abbildung 2.2).



Abbildung 2.2.: VR-Spiel „Superhot“ (Quelle: Bezmalinovic, 2017)

MR verankert virtuelle Objekte in der realen Welt und ermöglicht deren Interaktion mit dieser. So könnte man beispielsweise mit virtuellen Würfeln auf einem realen Tisch Brettspiele spielen (Abbildung 2.3).



Abbildung 2.3.: Beispiel für ein MR-Spiel (Quelle: Alhadeff, 2018)

AR analysiert die reale Welt mithilfe von Sensoren und Kameras und ergänzt digitale Inhalte in der realen Welt. Ein Handwerker könnte zum Beispiel mit seinem Tablet eine Wand scannen, und das Tablet würde die vorhandenen Heizleitungen in der Wand anzeigen. Auch in der Medizin werden AR-Geräte genutzt, um, wie in Abbildung 2.3 dargestellt, die Venen von Patienten sichtbar zu machen. (Tremosa, 2022).

2.1.2. Technologische Grundlagen

Moderne XR-Headsets kombinieren hochauflösende Displays, integrierte Sensorik und leistungsfähige Prozessoren. Dadurch sind sie in der Lage, digitale Inhalte in Echtzeit in die reale Umgebung zu integrieren oder vollständig virtuelle Umgebungen darzustellen. (Microsoft Corporation, 2020; Steed & Oliveira, 2016). Je nachdem, um welche Art von System es sich handelt, variieren auch Faktoren wie Mobilität oder Interaktionsmöglichkeiten (Milgram & Kishino, 1994). Tabelle 2.1 zeigt einige dieser Unterschiede auf. Die Valve Index übertrifft in puncto Sichtfeld und Controller-Tracking die Meta Quest 3. So ermöglicht Sie eine deutlich intensivere und immersivere VR-Erfahrung. Die Meta Quest 3 ist deutlich mobiler und ermöglicht durch eingebaute Kameras den Einsatz von Mixed Reality.

Ein weiteres zentrales Element von XR-Headsets ist das Tracking. Es ermöglicht eine freie Bewegung innerhalb der „six degrees of freedom“ (6DoF). Darunter versteht man im allgemeinen die Bewegungsfreiheit eines starren Körpers, sich im dreidimensionalen Raum zu



Abbildung 2.4.: AR-Gerät in der Medizin (Quelle: AccuVein Inc., [2025](#))

bewegen und zu drehen. Verglichen mit „3DoF“, bei dem nur die Drehungen nachvollzogen werden können, wird bei „6DoF“ auch die Translation, also die Position des Headsets, berücksichtigt.

Verbreitete Verfahren umfassen Inside-Out-Tracking, bei dem Kameras und Sensoren im Headset die Umgebung erfassen, sowie Outside-In-Tracking mittels externer Marker oder Basisstationen (Pimax, [2025](#); Unity Technologies, [2025b](#)). Diese Methoden gewährleisten die stabile Verankerung virtueller Inhalte im physischen Raum und sind entscheidend für eine glaubwürdige Immersion.

Die 3D-Erfassung der Umgebung erfolgt typischerweise durch Tiefenkameras, Time-of-Flight-Sensoren oder strukturiertes Licht. Sie ermöglicht die Erstellung eines räumlichen Modells der realen Umgebung, das wiederum die Grundlage für Interaktionen zwischen realen und virtuellen Objekten bildet (Newcombe, Izadi et al., [2011](#)). Besonders MR-Systeme profitieren von dieser Funktion, da virtuelle Objekte korrekt auf realen Oberflächen platziert werden können, mit physischen Elementen kollidieren oder durch diese verdeckt werden (Microsoft Corporation, [2020](#)).

Tabelle 2.1.: Gegenüberstellung von Meta Quest 3 und Valve Index (VRcompare, 2025; Vsr, 2024)

Merkmal	Meta Quest 3	Valve Index
Gerätetyp / Mobilität	Standalone-Headset, funktioniert ohne PC; sehr mobil und flexibel	PC-gebundenes VR-Headset; geringe Mobilität, für festen Raum gedacht
Optik / Displayqualität	Hohe Auflösung pro Auge, Pancake-Linsen für eine klare Darstellung	Größeres Sichtfeld (ca. 130°), jedoch eine geringere Pixeldichte.
Interaktion / Tracking	Inside-Out-Tracking, Touch-Pro-Controller, unterstützt Hand-Tracking	Externes Lighthouse-Tracking, sehr präzise Controller mit Fingertracking
Flexibilität / Einsatzszenarien	VR und MR; ideal für mobile Anwendungen und Visualisierung	Präzise VR-Anwendungen, ideal für komplexe Simulationen

2.1.3. Aktueller Stand der Technik und Anwendungsfelder im Bauwesen

Im Bauwesen hat der Einsatz von XR in den letzten Jahren deutlich an Relevanz gewonnen. Besonders großen Einfluss darauf hatte der Prozess des Building Information Modeling (BIM), einem kooperativen, digitalen Planungsansatz, bei dem jedes Detail eines Gebäudes in einem 3D-Modell erfasst und verwaltet werden kann. Dies ermöglicht das kollaborative Planen und Gestalten unter Berücksichtigung sämtlicher Disziplinen des Bauwesens. So können beispielsweise Klempner zusammen mit Elektrikern Kabel- und Rohrführungen durch die Wände planen, um mögliche Interferenzen zu vermeiden (Autodesk, Inc., n. d.). Eine weitere interessante Entwicklung auf dem Feld der XR-Anwendungen im Handwerk und Bau wurde jüngst durch die Kooperation zwischen Strauss und Meta sichtbar. Zusammen entwickelten sie, ihren Aussagen nach, „den Werkzeugkasten der Zukunft“. Dieser äußert sich in Form einer Meta Quest 3S und der dazugehörigen Software. Die Software visualisiert ein Interface (Abbildung 2.5) am Handgelenk des Nutzers, mit dem beispielsweise Winkel und Längen gemessen und berechnet werden können (Strauss GmbH & Co. KG, 2025).

Neben den innovativen XR-Anwendungen werden im Bauwesen auch herkömmliche Softwarelösungen zur Planung, Kalkulation und Ausführung von Bauprojekten eingesetzt. Eines der wohl bekanntesten Beispiele ist der U-Wert-Rechner *Ubakus*, ein Onlinetool zur Berechnung bauphysikalischer Kennwerte verschiedenster Bauteilkonstruktionen. Es dient Archi-



Abbildung 2.5.: Meta x Strauss, Wrist Interface (Quelle: Strauss GmbH & Co. KG, [2025](#))

tekten, Handwerkern und Energieberatern als praktische Entscheidungshilfe in der Planung oder Sanierung von Gebäuden (u-wert.net, [n. d.](#)).

Da Ubakus bereits in vielen Betrieben etabliert ist und praxisnah eingesetzt wird, eignet sich das Tool ideal, um in eine XR-Umgebung integriert zu werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher praktisch untersucht, wie Ubakus durch XR-Technologien erweitert werden kann, um Planungs- und Berechnungsprozesse auch in kleinen und mittelständischen Unternehmen effizienter und intuitiver zu gestalten.

2.1.4. Unity Engine und MR-Integration

Für die Umsetzung der Software wurde die Unity-Engine verwendet. Durch ihre ausgereifte XR-Integration und das von Meta speziell entwickelte *Meta XR Core SDK* eignet sie sich hervorragend als Grundlage für eine MR-Anwendung.

Ein wichtiges Grundprinzip der Unity-Engine ist ihr komponentenbasierter Aufbau, der sich am sogenannten Entity-Component-System (ECS) orientiert. Anstatt Objekte über komplexe Vererbungshierarchien zu definieren, werden sie in Unity aus einzelnen, klar abgegrenzten Komponenten zusammengesetzt. Jedes Objekt, in Unity als *GameObject* bezeichnet, erhält nur die Komponenten, die es tatsächlich benötigt, etwa für Position, Darstellung oder Interaktion. Das Verhalten eines Objekts entsteht dabei nicht durch eine einzelne, große Klasse, sondern durch das Zusammenspiel mehrerer kleiner Bausteine. Diese Struktur erleichtert

es, Funktionen zu erweitern oder auszutauschen, ohne die bestehende Logik grundlegend zu verändern. Gerade für interaktive MR-Anwendungen, in denen sich Objekte und Zustände häufig ändern, hat sich dieser Ansatz als praktikabel und flexibel erwiesen (Smith, 2024; Unity Technologies, 2025a).

Das SDK ermöglicht unter anderem den Zugriff auf Passthrough-Darstellungen, Trackingdaten sowie auf zuvor erfasste Raum- und Flächeninformationen der Umgebung. Dadurch können reale Raummodelle innerhalb von Unity-Anwendungen repräsentiert und genutzt werden (Meta Platforms, Inc., 2025b, 2025c). Die genannten Features lassen sich in Unity ganz einfach durch die von Meta bereitgestellten *Buildingblocks* in der jeweiligen Unity-Szene hinzufügen und ermöglichen so einen schnellen Workflow für Entwickler (Meta Platforms, Inc., 2025a).

2.2. Bauphysikalische Grundlagen

Für die realistische Darstellung und Berechnung von Gebäudekonstruktionen in MR-Anwendungen sind grundlegende bauphysikalische Kenntnisse unerlässlich. Dazu zählen der Wärmedurchgang und der U-Wert, das Verhalten von Feuchtigkeit einschließlich Taupunkt und Dampfdiffusion, die Berücksichtigung relevanter Normen sowie die energetische Bewertung im Hinblick auf gesetzliche Anforderungen. Dieses Wissen bildet die Basis, um bauliche Eigenschaften korrekt in einer XR-Umgebung zu visualisieren und interaktiv zu analysieren. Sie sind zudem entscheidend, um die Bedeutung dieser Arbeit nachvollziehen zu können, da viele Handwerker und Energieberater diese bauphysikalischen Verfahren tagtäglich nutzen und die korrekte Anwendung für die Planung, Bewertung und Optimierung von Gebäuden von zentraler Relevanz ist.

2.2.1. Wärmeschutz und U-Wert

Um den Wärmeschutz innerhalb von Gebäuden zu gewährleisten, ist es notwendig, die Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Materialien sowie den Wärmedurchgang durch Bauteile systematisch zu betrachten. Die Wärmeleitfähigkeit λ eines Materials beschreibt, wie gut dieses Material Wärme leitet und wird in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angegeben. Aus der Wärmeleitfähigkeit und der Dicke d einer Materialschicht lässt sich der Wärmewiderstand R berechnen:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Je größer der Widerstand R , desto geringer ist der Wärmestrom durch die Schicht. Zusätzlich werden bei normierten Wärmeberechnungen die inneren und äußeren Oberflächenwiderstände R_{si} und R_{se} berücksichtigt, um den Einfluss der Wärmeübergänge an der Innen- und Außenseite der Wand zu erfassen.

Der Wärmedurchgang eines Bauteils wird über den Wärmedurchgangskoeffizienten U beschrieben, der angibt, wie viel Wärme pro Fläche und Temperaturdifferenz durch das Bauteil fließt:

$$U = \frac{1}{R_{\text{gesamt}}} = \frac{1}{R_{si} + \sum_{j=1}^n \frac{d_j}{\lambda_j} + R_{se}}$$

Dabei ist R_{gesamt} der Gesamtwärmewiderstand des Bauteils. Ein niedriger U -Wert entspricht einer hohen Wärmedämmung, während ein hoher U -Wert auf einen größeren Wärmeverlust hinweist. Der U -Wert ist somit ein zentrales Maß für die energetische Bewertung von Bauteilen. (Peschel et al., 2022, S. 168)

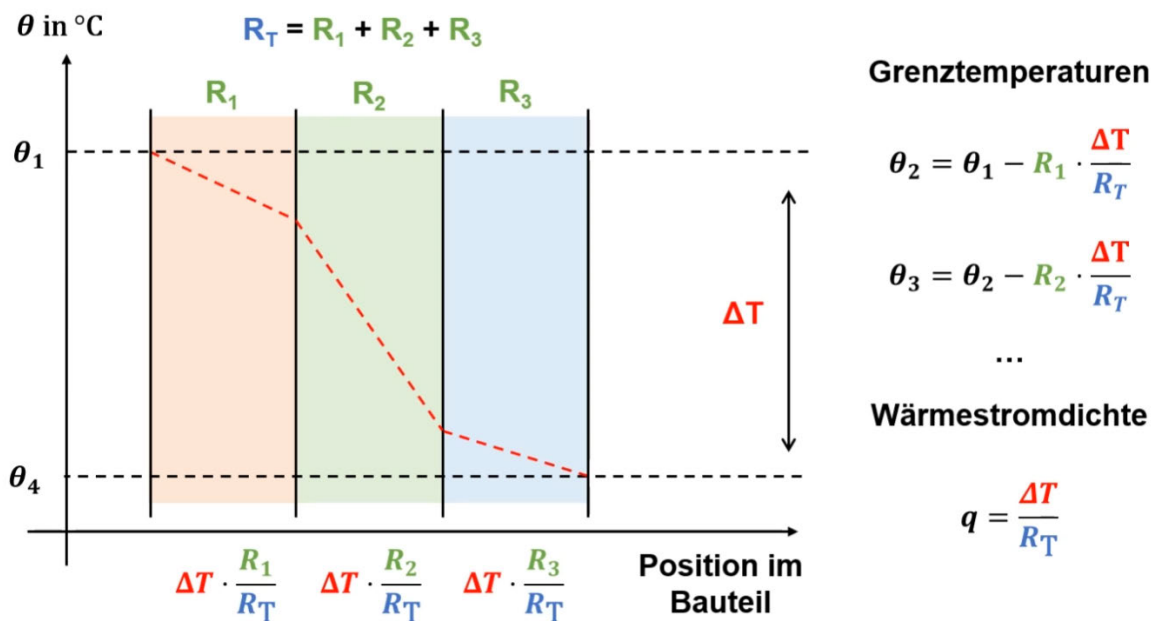


Abbildung 2.6.: Wärmeverlauf mit Berechnungsformeln, Ausschnitt (Quelle: Middendorf, 2020a)

2.2.2. Das Glaser-Verfahren

Durch die Berechnung des U-Wertes kann man bereits evaluieren, ob die gesetzlichen Normen für eine Renovierung oder einen Neubau eingehalten werden. Jedoch kann man nicht einfach einen Wandaufbau aus mehreren Dämmschichten konzipieren und erwarten, dass keine Probleme auftreten. Zwar ist das Erreichen eines möglichst geringen U-Werts ein wichtiger Faktor für die Energieeffizienz, jedoch muss auch der Feuchteschutz gewährleistet sein, damit ein Bauteil keinen Schimmel ansetzen kann und als unbedenklich eingestuft wird. Um den Feuchteschutz zu gewährleisten, wird das Glaser-Verfahren angewandt.

Das Glaser-Verfahren ist ein bauphysikalisches Berechnungsverfahren zur Bestimmung des Wärme- und Feuchteverhaltens von Bauteilen. Es dient dazu, abzuschätzen, ob und wo innerhalb eines mehrschichtigen Bauteils Tauwasser anfällt, das langfristig zu Schäden wie Schimmel, Holzfäule oder Verlust der Dämmwirkung führen kann. Das Verfahren ist eine Annäherung an das tatsächliche Verhalten des Bauteils. Es wird einerseits von genormten Werten für Innen- und Außentemperatur sowie anteiliger Luftfeuchtigkeit ausgegangen; andererseits geht man davon aus, dass der Temperaturabfall innerhalb der einzelnen Schichten linear verläuft (Middendorf, 2020b).

Die Anwendung des Glaser-Verfahrens lässt sich in vier Schritte aufteilen. Zuerst wird der Temperaturverlauf innerhalb des Bauteils bestimmt. Dazu berechnet man, wie in Abbildung 2.6 dargestellt, die *Wärmestromdichte* q . Diese beschreibt, wie viel Energie in $W/(m^2 \cdot K)$ pro Zeiteinheit verloren geht. Durch Multiplikation mit dem *Wärmewiderstand* R lässt sich errechnen, wie viel Wärme pro Schicht verloren geht.

Mit Hilfe der Temperaturkurve lässt sich der *Sättigungsdampfdruck* eines jeden Schichtübergangs errechnen, also der maximale Wasserdampfgehalt, den die Luft bei ihrer Temperatur halten kann. Parallel dazu wird der tatsächliche *Wasserdampfdruckverlauf* ermittelt. Dafür wird die **MAGNUS-FORMEL** genutzt:

Über Wasser (-50 bis +100°C):

$$e_{sat,w}(T) = 6.1094 \exp\left(\frac{17.625 T}{T + 243.04}\right)$$

und über Eis (-50 bis 0°C):

$$e_{sat,i}(T) = 6.112 \exp\left(\frac{22.46 T}{T + 272.62}\right)$$

(Schweizer-FN, n. d.)

Die beiden entstehenden Verläufe werden daraufhin in das sd-Diagramm eingezeichnet. Um das sd-Diagramm zu verstehen, muss man nachvollziehen, warum der Wasserdampf eigentlich durch die Wand zieht. Im Innenraum herrscht ein höherer Wasserdampfdruck als in

der Außenluft. Dieser Druckunterschied lässt die warme Raumluft durch die Wand diffundieren. Jedoch haben die verschiedenen Schichten in der Wand auch unterschiedliche Wasserdampfdiffusionswiderstände μ , wodurch der Druckverlauf nicht linear dargestellt werden kann. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand gibt an, wie gut Wasserdampf durch das Material diffundieren kann. Deshalb werden im Glaser-Verfahren nicht die tatsächlichen, sondern die äquivalenten Luftschichtdicken dargestellt. Oder, um es mit anderen Worten zu sagen: wie dick müsste die Schicht sein, wenn sie aus Luft wäre, um den gleichen Widerstand zu haben wie das tatsächliche Material (Middendorf, 2020a).

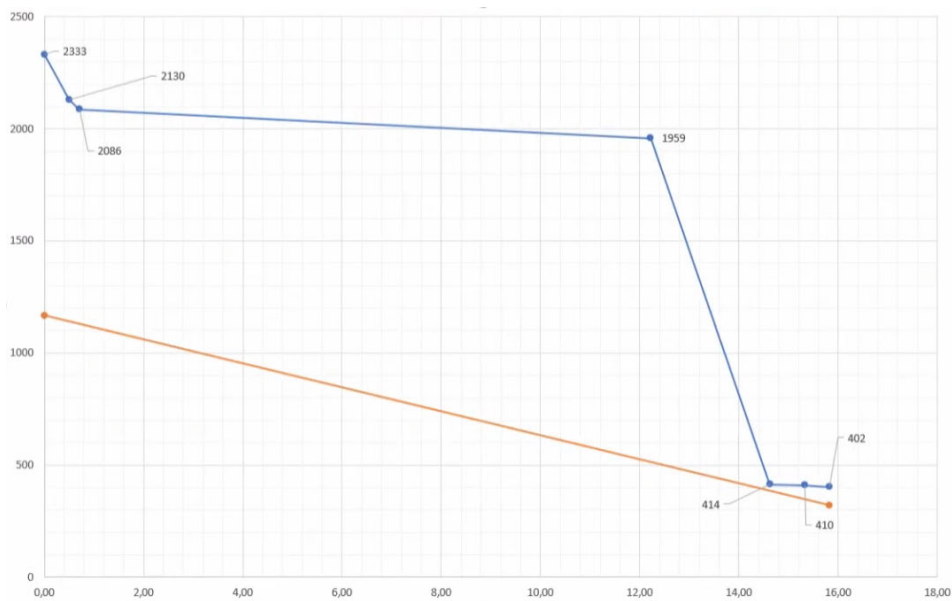


Abbildung 2.7.: sd-Diagramm ohne Tauwasser, Ausschnitt, Blau: Sättigungskurve, Orange: Tatsächlicher Dampfdruck (Quelle: Middendorf, 2020b)

Sollte es zu einem oder gar mehreren Schnittpunkten im sd-Diagramm kommen, kann die Luft kein Wasser mehr halten, und es fällt Tauwasser an. Gibt es, wie in Abbildung 2.7, keinen Schnittpunkt, fällt im Umkehrschluss kein Tauwasser an.

Angefallenes Tauwasser bedeutet nicht, dass das Bauteil unbrauchbar ist. Tauwasser fällt in der Tauperiode im Winter an. In der Verdunstungsperiode im Sommer kann das Wasser verdunsten und die Wand trocknen. So wird im letzten Schritt des Glaser-Verfahrens ermittelt, wie viel Tauwasser anfällt, ob die Menge an Tauwasser zulässig ist und ob das Tauwasser im Sommer vollständig verdunsten kann (Middendorf, 2020c).

2.2.3. Relevante Normen und Gesetze

Für die Sanierung von Gebäuden oder einzelnen Räumen gibt es einige wichtige Normen und Gesetze, die beachtet werden müssen. Für diese Arbeit relevant sind Folgende:

DIN 68800-2 Diese Norm definiert Maßnahmen zum vorbeugenden Schutz und zur langfristigen Gebrauchstauglichkeit von Bauteilen aus Holz und Holzwerkstoffen. Sie findet Anwendung sowohl beim Neubau als auch bei der Modernisierung, Sanierung und Instandsetzung von Bauwerken. („DIN 68800-2“, [2022](#))

DIN 4108-3 Diese Norm beschreibt die Anforderungen, Berechnungsverfahren sowie planerische und ausführungstechnische Hinweise zum klimabedingten Feuchteschutz in Gebäuden. („DIN 4108-3“, [2024](#))

Gebäudeenergiegesetz (GEG) Das Gebäudeenergiegesetz legt Anforderungen an Neubauten und Sanierungen fest und bildet die zentrale Grundlage für energieeffizientes Bauen und Modernisieren in Deutschland. („Gebäudeenergiegesetz (GEG)“, [2024](#))

3. Konzeption der Software

Aufbauend auf den zuvor erläuterten Grundlagen sowie der Bedeutung von Ubakus dient dieser Abschnitt der Herleitung des konzeptionellen Ansatzes der vorliegenden MR-Erweiterung. Zudem sollen insbesondere die Vorteile der *Meta Quest 3* vollständig genutzt werden, um sinnvolle Features im Vergleich zu *Ubakus* anzubieten.

3.1. Zieldefinition der Anwendung

Nach der ausführlichen Darstellung der Hintergründe und Anforderungen werden im Folgenden alle wesentlichen Punkte erneut zusammengeführt, um die Zieldefinition der Software eindeutig festzuhalten.

Große Bauunternehmen profitieren bislang stärker von MR-Software als mittelständische Bauunternehmen, da erst durch eine Vielzahl von Projekten MR-Anwendungen wirklich sinnvoll genutzt werden können. Daher sollte die zu programmierende Software auf häufig genutzten Praktiken oder Werkzeugen basieren und diese sinnvoll erweitern.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Zieldefinition, auf der Grundlage des bereits weit verbreiteten U-Wert-Rechners Ubakus eine MR-gestützte, immersive Anwendung zur Unterstützung der Gebäudesanierung zu entwickeln. Die Software soll dabei nicht nur die Kernfunktionen von Ubakus übernehmen, sondern diese um innovative und praxisnahe Erweiterungen ergänzen, um einen spürbaren Mehrwert für mittelständische Bauunternehmen zu schaffen.

3.2. Funktionsumfang und Use Cases

Die Abbildung der zentralen *Ubakus-Funktionen* stellt die notwendige Grundlage dar, um eine zuverlässige bauphysikalische Analyse zu gewährleisten. Gleichzeitig eröffnet die MR-Technologie neue Potenziale, die in *Ubakus* bislang nicht verfügbar waren. Dazu gehört insbesondere die Möglichkeit, Räume einzuscannen und ihr virtuelles Abbild in Unity darzu-

stellen, sodass beispielsweise die Maße jeder Wand automatisch ausgelesen und verarbeitet werden können.

Wichtig ist dabei, dass die Nutzung von XR-Headsets für den durchschnittlichen Anwender noch ungewohnt ist. Aus diesem Grund muss die Software besonders intuitiv gestaltet werden, damit die bekannten Ubakus-Funktionalitäten in Kombination mit den neuen MR-Möglichkeiten effektiv und benutzerfreundlich zugänglich sind.

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Navigation auf der Baustelle mit dem XR-Headset. Durch die *Passthrough*-Funktion der *Meta Quest 3* bleibt die reale Umgebung sichtbar, während virtuelle Inhalte ergänzend eingeblendet werden. Dies ermöglicht eine sichere Orientierung im Raum und erleichtert den praktischen Einsatz des Systems direkt auf der Baustelle.

Wie bereits erwähnt, sollte der Funktionsumfang mindestens die Kernfunktionen von *Ubakus* umfassen. Darunter fallen folgende funktionale und nicht-funktionale Anforderungen:

3.2.1. Funktionale Anforderungen

Der benutzerdefinierte Wandaufbau ermöglicht aus einer Auswahl an Baustoffen die individuelle Konstruktion eines Bauteils.

Die U-Wert-Berechnung ermittelt den U-Wert des Bauteils und evaluiert, ob dieser *GEG 2020/24-konform* ist.

Das Glaser-Verfahren prüft auf potenzielle Tauwasserbildung, errechnet die Tauwassermenge und untersucht, ob das Tauwasser während der Verdunstungsperiode trocknen kann.

3.2.2. Nicht-funktionale Anforderungen

Benutzerfreundlichkeit: Die Anwendung muss intuitiv bedienbar sein, sodass auch Nutzer ohne Vorerfahrung MR-Funktionen effektiv einsetzen können.

Performance: Berechnungen und Visualisierungen sollen in Echtzeit oder nahezu in Echtzeit erfolgen.

Plattformunabhängigkeit: Die Software soll auf der *Meta Quest 3* laufen und gegebenenfalls später auf andere MR-Geräte portierbar sein.

Skalierbarkeit: Die Anwendung soll unterschiedliche Raumgrößen und Wandkomplexitäten verarbeiten können.

3.2.3. Use Cases

Um die Anforderungen praxisnah zu veranschaulichen, werden im Folgenden typische Anwendungsszenarien beschrieben:

- **Raumscan und Wandaufbau:** Ein Nutzer scannt einen Raum mit der *Meta Quest 3*, wählt eine Wand aus und konfiguriert deren Material- und Schichtaufbau über die MR-Oberfläche.
- **Navigation durch Passthrough:** Um dem Nutzer eine intuitive und zugleich sichere Navigation im Raum zu bieten, soll die Software über eine Passthrough-Funktion verfügen.
- **Berechnung und Analyse:** Die Software berechnet automatisch den U-Wert der Wand und prüft auf Tauwasserbildung nach dem Glaser-Verfahren. Die Ergebnisse werden in der MR-Umgebung visualisiert.
- **Interaktive Anpassung:** Nutzer können Materialien oder Wandaufbauten ändern und sofort die Auswirkungen auf den U-Wert sowie die Tauwasserbildung beobachten, um Entscheidungen bezüglich Sanierungsmaßnahmen zu unterstützen.

Diese strukturierte Darstellung der Anforderungen und Use Cases bildet die Grundlage für die anschließende Implementierung und ermöglicht eine nachvollziehbare Ableitung der entwickelten Funktionen.

3.3. Konzeptionelle Architektur

Im Folgenden wird die konzeptionelle Architektur der entwickelten MR-Anwendung vorgestellt. Sie zeigt den logischen Aufbau des Systems sowie das Zusammenspiel der zentralen Funktionsbereiche unabhängig von der konkreten Implementierung auf.

3.3.1. Architekturübersicht

Die konzeptionelle Architektur der entwickelten MR-Anwendung folgt einem modularen und komponentenorientierten Ansatz. Ziel dieser Struktur ist es, die klare Trennung der funktionalen Anforderungen zu gewährleisten und dennoch eine sinnvolle Verknüpfung sicherzustellen.

Angefangen mit der Erfassung des Raumes durch die *Meta Quest 3* erfolgt eine schrittweise Verarbeitung der erfassten Umgebungsdaten, die von der Generierung eines virtuellen

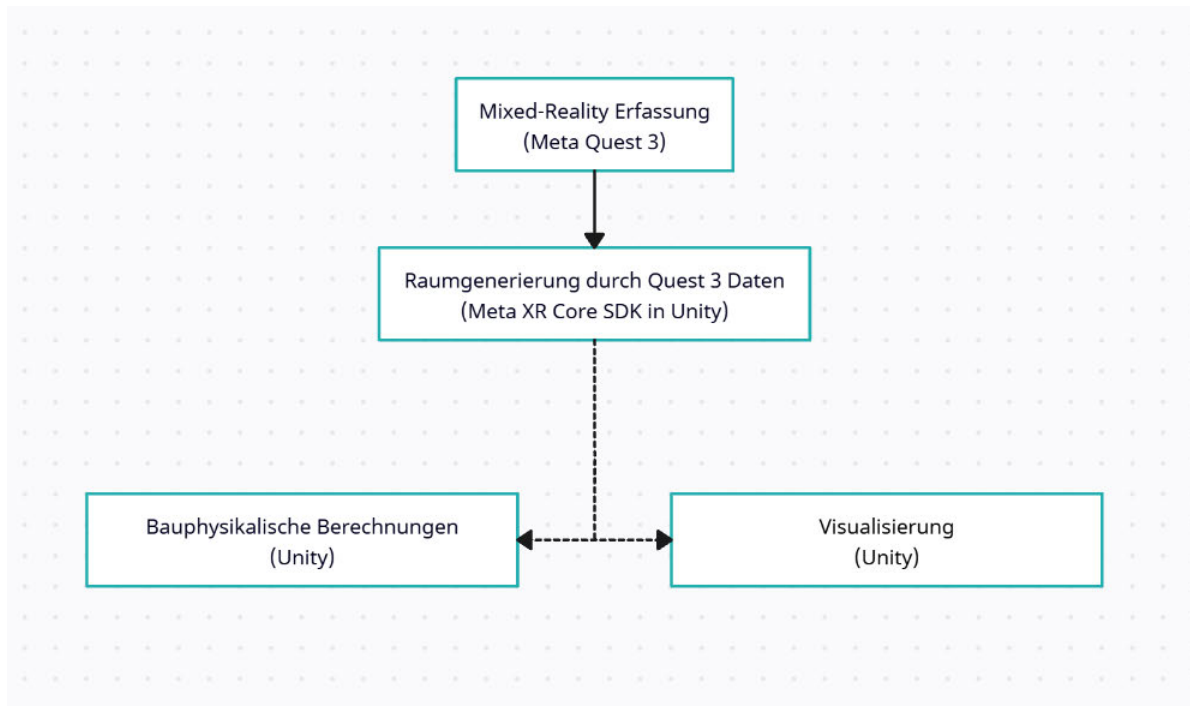


Abbildung 3.1.: Einfache Blockgrafik zur generellen Übersicht der Komponenten, (Quelle: Eigene Darstellung)

Raumabbilds über bauphysikalische Berechnungen bis hin zur Visualisierung der Ergebnisse innerhalb der MR-Umgebung reicht.

Durch die gezielte Trennung der Komponenten, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, soll bei zukünftigen Erweiterungen oder Änderungen an den einzelnen Komponenten eine funktionsfähige Software gewährleistet werden. Jede dieser Komponenten soll, ohne maßgebliche Änderungen vorzunehmen, durch eine gleichwertige Komponente austauschbar sein. Dieser modulare Aufbau schafft einerseits eine leichte Wartbarkeit, andererseits jedoch auch eine stabile Grundlage für mögliche Erweiterungen und Verbesserungen.

3.3.2. Zentrale Systemkomponenten

Aufbauend auf der zuvor beschriebenen Architekturübersicht werden im Folgenden die zentralen Systemkomponenten näher definiert, um eine klare Abgrenzung voneinander zu schaffen.

MR-Erfassung: Durch die räumliche Erfassung der *Meta Quest 3* werden Geometrie- und Positionsdaten erfasst und zur weiteren Verarbeitung bereitgestellt. Sie stellt die Grundlage für alle weiteren Verarbeitungsschritte dar.

Raumgenerierung: Das *Meta XR Core SDK* nutzt diese Daten, um sie in Unity zu einem virtuellen Raumabbild zu überführen. Für die geplante Software ist vorerst nur die Identifizierung aller Wandflächen von Relevanz. Die erzeugte Raumstruktur dient als zentrale Bezugsgröße für die nachfolgenden bauphysikalischen Berechnungen.

Bauphysikalische Berechnungen: Auf Basis des in Unity definierten Bauteils berechnet diese Komponente sämtliche bauphysikalischen Kenngrößen. Sie bildet das logische Zentrum der Anwendung, da sie die Grundlage für die Bewertung energetischer und bauphysikalischer Eigenschaften liefert.

Visualisierung: Abschließend übernimmt die Visualisierungs- und Interaktionskomponente die Aufgabe, die berechneten Ergebnisse in der MR-Umgebung verständlich darzustellen. Sie ermöglicht eine verständliche und interaktive Anpassung der verschiedenen Wandaufbauten.

3.3.3. Daten- und Prozessfluss

Der Daten- und Prozessfluss der Anwendung beschreibt die Abfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte sowie den Weg der Informationen durch die zuvor definierten Systemkomponenten. Ziel dieses Ablaufs ist es, die erfassten Umgebungsdaten schrittweise in aussagekräftige bauphysikalische Bewertungen zu überführen und diese dem Nutzer in der MR-Umgebung zugänglich zu machen.

Der Prozess beginnt mit dem einscannen des Raums via *Meta Quest 3*. Die geometrischen Daten werden in der *Unityengine* mittels des *Meta XR Core SDK* zum virtuellen Raumaufbau verarbeitet. Durch die Interaktion mit den einzelnen Wänden wird dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, über ein Menü einen benutzerdefinierten Wandaufbau zu erstellen. Daraus berechnet die Berechnungskomponente sämtliche Werte und stellt diese im Menü dar.

Zwischen Berechnungs- und Visualisierungskomponente besteht dabei ein kontinuierliches Wechselspiel. Änderungen am Wandaufbau, die über das Menü vorgenommen werden, führen unmittelbar zu einer erneuten Berechnung der bauphysikalischen Werte. Die aktualisierten Ergebnisse werden anschließend fortlaufend im Menü visualisiert, sodass die Auswirkungen unterschiedlicher Material- und Konstruktionsvarianten direkt nachvollziehbar sind.

3.3.4. Abgrenzung zu Ubakus

Die entwickelte MR-Anwendung grenzt sich konzeptionell von etablierten bauphysikalischen Planungstools wie *Ubakus* ab, obwohl sie auf denselben grundlegenden Berechnungsprinzipien basiert. Während *Ubakus* als eine im Browser nutzbare Software konzipiert ist,

bietet die vorliegende Software, zusätzlich zu den üblichen Funktionen, eine große Bandbreite an neuen Anwendungsmöglichkeiten. Diese zeichnen sich besonders durch ihre Nähe zur tatsächlichen Umgebung und die unmittelbare Verknüpfung von räumlicher Wahrnehmung, Interaktion und bauphysikalischer Bewertung aus. Der zentrale Unterschied liegt somit nicht in der fachlichen Berechnungsmethodik, sondern in der Art der Interaktion und Darstellung.

4. Implementierung der MR-Anwendung

In diesem Kapitel wird die technische Umsetzung der im vorherigen Kapitel konzipierten MR-Anwendung beschrieben. Die Maßstäbe für die Software ergeben sich dabei aus dem vorherigen Kapitel [3. Konzeption der Software](#). Zusammengefasst soll die Software die Erfassung realer Räume ermöglichen, diese in eine virtuelle Repräsentation überführen und darauf aufbauend bauphysikalische Bewertungen interaktiv berechnen sowie verständlich visualisieren. Der Schwerpunkt liegt dabei auf einer modularen, erweiterbaren Systemarchitektur, die eine intuitive Bedienung erlaubt und zugleich die Grundlage für eine zuverlässige Verarbeitung und Darstellung bauphysikalischer Kenngrößen schafft.

4.1. Technische Architektur

4.1.1. Komponentenbasierter Ansatz in Unity

In Kapitel [2.1.4](#) wurde bereits erläutert, dass Unity einem komponentenbasierten Ansatz folgt. In Unity werden sogenannte *GameObjects* erstellt, denen sowohl Unity-eigene als auch selbst entwickelte Skripte als Komponenten zugewiesen werden können. Diese Komponenten verleihen den Objekten spezifische Eigenschaften und Verhaltensweisen. Die Skripte werden in C-Sharp, einer objektorientierten Programmiersprache mit Ähnlichkeiten zu Java, implementiert.

Obwohl Unity grundsätzlich objektorientierte Konzepte wie Klassen und Vererbung nutzt, spielen klassische Vererbungsstrukturen in der praktischen Entwicklung eine untergeordnete Rolle. Die Flexibilität der *Unity-Engine* entsteht vielmehr durch das Zusammenspiel unabhängiger Komponenten, die einem *GameObject* zugewiesen werden. Referenzen zwischen einzelnen Komponenten können dabei entweder über den Unity-Inspektor oder programmgesteuert gesetzt werden und ersetzen in vielen Fällen komplexe Vererbungsbeziehungen (Csharp Corner, [2025](#); Grotte, [2025](#)). Dieser Ansatz fördert eine modulare Softwarestruktur und erleichtert die Wiederverwendbarkeit einzelner Funktionseinheiten.

Für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte MR-Anwendung bildet dieser komponentenbasierte Aufbau die technische Grundlage. Die klare Trennung von Funktionen wie Raumfassung, Nutzerinteraktion, bauphysikalischer Berechnung und Visualisierung ermöglicht es, diese Bereiche unabhängig voneinander zu entwickeln, zu testen und gezielt zu erweitern. Gleichzeitig erfordert diese Struktur eine bewusste architektonische Planung, um trotz der losen Kopplung eine nachvollziehbare und langfristig wartbare Gesamtstruktur sicherzustellen. Aus diesem Grund orientiert sich die technische Umsetzung an ausgewählten Entwurfsprinzipien, die im folgenden Abschnitt vorgestellt werden.

4.2. Entwurfsprinzipien

Auch wenn durch den komponentenbasierten Aufbau der Unity-Engine klassische objektorientierte Entwurfsprinzipien nicht immer strikt umgesetzt werden können, bleiben sie dennoch als konzeptionelle Leitlinien relevant. Insbesondere die *SOLID-Prinzipien*, die ursprünglich für die Strukturierung von Klassen und deren Beziehungen zueinander entwickelt wurden, lassen sich nicht eins zu eins auf Unity übertragen. Dennoch können ihre grundlegenden Ideen sinnvoll auf eine komponentenbasierte Architektur angewendet werden und dienen als Orientierung für eine wartbare und erweiterbare Softwarestruktur.

Übertragung der SOLID-Prinzipien auf Unity

Single Responsibility Principle (SRP): In Unity wird Verantwortung weniger auf Klassenebene, sondern primär auf Komponentenebene verteilt. Jede Komponente sollte eine klar abgegrenzte Aufgabe erfüllen. In der entwickelten Anwendung zeigt sich dies beispielsweise in der Trennung zwischen Wandobjekten, Menücontrollern und Berechnungskomponenten. Die einzelnen Menü-Controller sind jeweils für die Steuerung eines spezifischen Menüs zuständig, während bauphysikalische Berechnungen zentral gebündelt erfolgen. Zwar übernimmt der *WallManager* mehrere Aufgaben und stellt damit bewusst eine Ausnahme dar, diese Entscheidung wurde jedoch zugunsten einer klaren Zustandsverwaltung und eines konsistenten Datenflusses getroffen (Martin, 2003, S. 95).

Open-Closed Principle (OCP): Das Prinzip, Systeme für Erweiterungen offen, für Änderungen jedoch geschlossen zu halten, wird in der Anwendung insbesondere durch den Einsatz von *ScriptableObjects* umgesetzt. Neue Baustoffe können durch zusätzliche *ScriptableMaterial*-Instanzen ergänzt werden, ohne bestehende Logik anpassen zu müssen. Auch neue Menüelemente oder Visualisierungen lassen sich durch weitere Komponenten erweitern, ohne bestehende Komponenten grundlegend zu verändern (Martin, 2003, S. 99).

Liskov Substitution Principle (LSP): Da klassische Vererbung in Unity eine untergeordnete Rolle spielt, ist dieses Prinzip weniger stark ausgeprägt. Dennoch wird darauf geachtet, dass austauschbare Komponenten konsistente Schnittstellen aufweisen und vergleichbares Verhalten zeigen. So können unterschiedliche Layer- oder Materialdefinitionen einheitlich verarbeitet werden, solange sie die erwarteten Parameter, Dicke, Wärmewiderstand und das *ScriptableMaterial* bereitstellen (Martin, 2003, S. 111).

Interface Segregation Principle (ISP): Statt umfangreicher, allgemeiner Schnittstellen werden spezialisierte Komponenten eingesetzt, die nur die jeweils benötigte Funktionalität bereitstellen. Beispielsweise sind Menü-Controller ausschließlich für die Interaktion und Darstellung zuständig und greifen nur gezielt auf Berechnungsergebnisse zu, ohne selbst Berechnungslogik zu enthalten (Martin, 2003, S. 135).

Dependency Inversion Principle (DIP): Abhängigkeiten werden in Unity häufig über Referenzen im Inspector oder zur Laufzeit gesetzt. In der Anwendung werden konkrete Abhängigkeiten, zum Beispiel zwischen Menüs und Wanddaten, möglichst lose gehalten, indem Daten über klar definierte Schnittstellen oder zentrale Verwaltungsinstanzen bereitgestellt werden. Dadurch bleibt die Kopplung der einzelnen Komponenten überschaubar. (Martin, 2003, S. 127)

Weitere angewandte Entwurfsprinzipien

Neben den SOLID-Prinzipien wurden weitere bewährte Entwurfsprinzipien berücksichtigt, die sich besonders gut für komponentenbasierte Systeme eignen:

KISS (Keep It Simple, Stupid): Die Implementierung folgt dem Grundsatz, möglichst einfache und nachvollziehbare Lösungen zu bevorzugen. Komplexe Vererbungsstrukturen oder abstrakte Frameworks wurden bewusst vermieden, um die Lesbarkeit und Wartbarkeit des Codes zu erhöhen. (Interaction Design Foundation, 2025)

Separation of Concerns: Die Trennung von Zuständigkeiten zeigt sich deutlich in der Aufteilung zwischen Raumerfassung, Interaktion, Berechnung und Visualisierung (Abbildung 3.1). Jede dieser Aufgaben wird von eigenen Komponenten oder Systemen übernommen, was die Nachvollziehbarkeit der Softwarestruktur erhöht. (GeeksforGeeks, 2024)

Zusammenfassend dienen die genannten Entwurfsprinzipien nicht als starre Regeln, sondern als Orientierungshilfen für die technische Umsetzung. Durch ihre angepasste Anwendung auf die komponentenbasierte Architektur von Unity konnte eine flexible, erweiterbare und zugleich nachvollziehbare Softwarestruktur realisiert werden.

Ergänzend zu den genannten Entwurfsprinzipien wird in der Anwendung stellenweise auch das *Singleton-Entwurfsmuster* eingesetzt. Dieses dient dazu, zentrale Verwaltungskomponenten eindeutig und global verfügbar zu halten. In einer komponentenbasierten Unity-Architektur eignet sich dieses Muster insbesondere für Manager-Klassen, die einen konsistenten Zugriff auf gemeinsam genutzte Zustände oder Datenstrukturen erfordern. In der Software wird das *Singleton-Entwurfsmuster* für das *MenuObject* angewandt.

Durch die Verwendung eines einzelnen, zentralen Menüobjekts wird vermieden, dass mehrere parallele Menüinstanzen gleichzeitig Berechnungen ausführen oder Zustände verwalten. Dies trägt wesentlich dazu bei, redundante Berechnungsvorgänge zu vermeiden und die Systemleistung stabil zu halten. Der Einsatz des Singleton-Musters steht damit in direktem Zusammenhang mit den definierten nicht-funktionalen Anforderungen an die Performance der Anwendung (vgl. Abschnitt 3.2.2), insbesondere im Hinblick auf eine flüssige Interaktion und nahezu verzögerungsfreie Aktualisierung der dargestellten Ergebnisse.

4.3. Interne Datenstrukturen und Zustandsverwaltung

Die interne Datenstruktur der Anwendung bildet die Grundlage für die flexible Konfiguration von Wandaufbauten sowie für die darauf aufbauenden bauphysikalischen Berechnungen. Da Nutzer Wandkonstruktionen interaktiv verändern können, ist eine klare und konsistente Modellierung der zugrunde liegenden Daten erforderlich. Im Fokus stehen dabei insbesondere die Repräsentation einzelner Wände sowie deren mehrschichtiger Aufbau aus unterschiedlichen Baustoffen.

4.3.1. Wand- und Layermodell

Zur Abbildung eines Wandaufbaus wird jede Wand als eigenständiges Objekt mit einer zugeordneten Liste von Schichten modelliert. Jede dieser Schichten wird durch ein *Layer*-Objekt repräsentiert, das die geometrischen und materialbezogenen Eigenschaften einer einzelnen Bauteilschicht kapselt. Dadurch lassen sich Wandaufbauten flexibel zusammensetzen und unabhängig voneinander verändern.

Ein Layer enthält eine Referenz auf ein zugehöriges *ScriptableMaterial*, die Schichtdicke sowie den daraus abgeleiteten Wärmewiderstand. Zusätzlich wird über ein boolesches Attribut gekennzeichnet, ob es sich bei der Schicht um eine Bestandsmauer handelt. Diese Information kann beispielsweise für spätere Erweiterungen oder alternative Berechnungslogiken genutzt werden. Listing 4.1 zeigt einen vereinfachten Ausschnitt der implementierten Layer-Klasse.

Codeblock 4.1: Vereinfachte Implementierung der Layer-Klasse

```
1 public class Layer
2 {
3     public ScriptableMaterial _material;
4     public float _thickness;
5     public float _RValue;
6     public bool _isBestandsMauer;
7
8     public Layer(ScriptableMaterial mat, float thick, bool bestandsMauer)
9     {
10         _material = mat;
11         _thickness = thick / 1000f; // Umrechnung von mm in m
12         _isBestandsMauer = bestandsMauer;
13
14         _RValue = _thickness / _material._thermalResistance;
15     }
16
17     public Layer(ScriptableMaterial mat, float thick, float rValue)
18     {
19         _material = mat;
20         _thickness = thick / 1000f; // Umrechnung von mm in m
21         _RValue = rValue;
22     }
23 }
```

Die Berechnung des Wärmewiderstands erfolgt direkt bei der Initialisierung eines Layers auf Basis der Schichtdicke und der materialabhängigen Wärmeleitfähigkeit. Dadurch ist jeder Layer in sich konsistent und kann unabhängig von anderen Schichten bewertet werden. Alternativ kann der Wärmewiderstand explizit übergeben werden, was eine flexible Anpassung an Sonderfälle oder externe Berechnungsergebnisse ermöglicht. Einer dieser Sonderfälle wäre beispielsweise das Hinzufügen der inneren und äußeren Wärmeübergänge. Diese gehören zwar faktisch nicht zum Bauteil dazu, jedoch ist ihre Berücksichtigung essenziell für eine fachlich korrekte Durchführung des Glaser-Verfahrens.

Durch die klare Trennung zwischen Wandobjekten und den zugehörigen Layer-Instanzen wird eine modulare Struktur erreicht, die sowohl die Erweiterbarkeit als auch die Nachvollziehbarkeit der bauphysikalischen Berechnungen unterstützt.

4.3.2. Scriptable Objects für Baustoffe

Zur Abbildung materialbezogener Eigenschaften einzelner Wandlayers werden in der vorliegenden Anwendung *ScriptableObjects* eingesetzt. Diese dienen als zentrale, editorseitig konfigurierbare Datencontainer für Baustoffe und ermöglichen eine klare Trennung zwischen Materialdaten und der ausführenden Logik der Anwendung (Unity Technologies, 2025c).

Jedes *ScriptableMaterial* repräsentiert einen konkreten Baustoff und enthält sowohl bauphysikalisch relevante Kenngrößen als auch zusätzliche Metadaten für die Benutzeroberfläche. Dazu zählen unter anderem Wärmeleitfähigkeit, Diffusionswiderstand, vordefinierte Schichtdicken sowie optionale Darstellungsinformationen wie Vorschaubilder. Ein vereinfachter Ausschnitt der implementierten Datenstruktur ist in Codeblock 4.2 dargestellt.

Codeblock 4.2: Definition eines ScriptableMaterials zur Beschreibung von Baustoffen

```
1 [CreateAssetMenu(fileName = "Baustoff", menuName="Baustoffe",order=1)]
2 public class ScriptableMaterial : ScriptableObject
3 {
4     public string _materialName;
5     public string _description;
6     public ScriptableType _type;
7     public Sprite _previewImage;
8     public List<float> _thicknessPresets; // in Millimetern
9     public float massPerCubicMeter; // in kg/m³
10
11     [DoNotSerialize]
12     public float _price;
13     public float _thermalResistance; // m²K/W
14     public float _my;
15
16     public bool isScaleable;
17     public bool isStandardLayer;
18
19     public MaterialCategory materialCategory;
20 }
21
22 public enum MaterialCategory
23 {
24     None,
25     Holzbauteil,
26     Holzwerkstoff
27 }
```

Die Verwendung von ScriptableObjects ermöglicht es, neue Baustoffe direkt im Unity-Editor anzulegen und zu konfigurieren, ohne bestehende Klassen oder Berechnungslogiken anpassen zu müssen. Dadurch wird das Open-Closed-Prinzip unterstützt und die Erweiterbarkeit der Anwendung erhöht.

Neben den aktuell genutzten Parametern enthält das *ScriptableMaterial* zusätzliche Felder, die im Rahmen dieser Arbeit nicht vollständig implementiert wurden. Dazu zählt unter anderem die Klassifizierung von Materialien über das *MaterialCategory-Enum*, die zur Prüfung des maximal erlaubten Tauwassergehalts eines Bauteils verwendet werden sollte. Ebenso wurde eine Preisberechnung vorbereitet. Beides wurde aufgrund von Zeitmangel nicht final implementiert. Zudem stellt sich die Frage, ob die Preisberechnung des Bauteils pauschalisiert werden kann, da die Preise für Bauteile nicht einheitlich festgelegt werden können.

Die zusätzlichen Felder sind bereits in der Datenstruktur vorgesehen, wurden im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht weiter genutzt. Sie ermöglichen eine spätere funktionale Erweiterung der Anwendung, beispielsweise zur Berücksichtigung materialabhängiger Grenzwerte oder wirtschaftlicher Aspekte.

4.4. Implementierung zentraler Funktionalitäten

Aufbauend auf der zuvor Beschriebenen technischen Architektur sowie den wichtigsten internen Datenstrukturen befasst sich dieser Abschnitt mit den zentralen Funktionalitäten, deren Funktionen und ihrer Umsetzung in Unity.

Dazu zählt das Scannen des Raums mithilfe der *Meta Quest 3* sowie die Weiterverarbeitung der Daten, das Menu, das als Herzstück der Nutzerinteraktion gilt, und abschließend die bauphysikalischen Berechnungen, die den logischen Kern der Software bilden. Ziel dieses Abschnitts ist es, zu zeigen, wie die zuvor konzipierten Komponenten und Datenmodelle in der Praxis umgesetzt wurden und wie sie innerhalb der *Unity-Engine* zusammenwirken.

4.4.1. Raumerfassung und Raumgenerierung

Die Funktionsweise, mit der die *Meta Quest 3* ihre Umgebung erfasst, wurde bereits in Kapitel [2.1.2](#) erwähnt. Der folgende Abschnitt beschreibt, wie die gewonnenen geometrischen Daten innerhalb der Anwendung weiterverarbeitet und in ein nutzbares virtuelles Raummodell überführt werden.

Die Anwendung greift hierbei auf bereits vorhandene Raumdaten zurück, die von der *Meta Quest 3* im Gerätespeicher abgelegt wurden. Über das *Meta XR Core SDK* werden diese Daten in die Unity-Engine eingebunden und als strukturierte Rauminformationen bereitgestellt.

Dazu zählen unter anderem Position, Ausrichtung und Ausdehnung einzelner Raumflächen sowie erkannter Elemente wie Türen, Fenster oder Möblierung (Meta Platforms, Inc., [2025b](#)).

Im nächsten Schritt wird für jede separat erkannte Geometrie ein eigenständiges *GameObject* instanziiert. Das *Meta XR Core SDK* unterscheidet dabei zwischen verschiedenen vordefinierten Objekttypen, sodass beispielsweise Wände, Fenster, Schränke oder andere Raumobjekte eindeutig klassifiziert werden können. Welche dieser Objekte in der Szene erzeugt werden sollen, lässt sich über den *MRUK-Buildingblock* konfigurieren. Da sich die vorliegende Anwendung zunächst ausschließlich auf Wandflächen konzentriert, werden lediglich diese in das Raummodell übernommen (Meta Platforms, Inc., [2025b](#)).

Die Wandflächen werden mithilfe vordefinierter *Prefabs* generiert, welche die geometrischen Eigenschaften sowie Informationen zum Wandaufbau über ein entsprechendes Skript speichern. Nach Abschluss dieses Verarbeitungsschritts liegt ein virtuelles Raummodell vor, das aus einzelnen Wandobjekten mit definierten Abmessungen und Orientierungen besteht. Jede Wandfläche ist interagierbar und bildet damit die Grundlage für weitere Nutzerinteraktionen sowie die bauphysikalischen Berechnungen innerhalb der Anwendung.

4.4.2. Interaktion und Menüsystem

Die Interaktion der entwickelten MR-Anwendung ist so konzipiert, dass sie einen möglichst klaren Bezug zur realen Welt hat. Hierbei wird bewusst auf eine komplizierte oder abstrakte Bedienung der Software verzichtet, und stattdessen wird eine direkte Interaktion mit den realen Wänden vorgezogen. Durch den *Passthrough-Buildingblock* des *Meta XR Core SDK* wird die Verbindung zwischen Realität und virtuellen Elementen weiter verstärkt.

Bedienkonzept und Nutzerführung

Das Bedienkonzept der Anwendung orientiert sich an einer möglichst intuitiven Nutzerführung. Zentrales Element der Interaktion sind die im Raum generierten Wandobjekte, die die realen Wandflächen repräsentieren und das Menü zur Bearbeitung der jeweiligen Wand. Durch die direkte Auswahl einer Wand wird der Kontext für alle weiteren Interaktionen eindeutig festgelegt. Dadurch müssen Wände nicht abstrakt aus Listen oder Menüs ausgewählt werden, was insbesondere für Nutzer ohne Erfahrung mit MR-Anwendungen von Vorteil ist.

Durch das Auswählen einer Wand wird das Menü dem Nutzer präsentiert oder bei erstmaligem Ausführen instanziiert. Da das Menü kontextsensitiv ist, bezieht es sich zu jedem Zeitpunkt auf die zuletzt ausgewählte Wand mit ihren gespeicherten Daten. Auf diese Weise

wird eine visuelle Überlastung vermieden, und die Aufmerksamkeit des Nutzers wird gezielt auf den aktuellen Arbeitsschritt gelenkt.

Für die Nutzerführung wurde ein Tooltip/Tutorial-System entwickelt. Beim Starten der Software wird dem Nutzer jedes Menü und jede Funktionalität erläutert. Zudem kann der Nutzer bei Unklarheiten Tooltips durch einen einfachen Knopfdruck aufrufen. So wird gewährleistet, dass die Software zu jedem Zeitpunkt nutzerfreundlich und intuitiv bleibt.

Userflow

Der Userflow beschreibt den typischen Ablauf, den der Nutzer beim Benutzen der Software durchläuft. Abbildung 4.1 stellt diesen in vereinfachter Form dar. Das Einscannen des Raumes ist nicht Teil der eigentlichen Software und wurde somit nicht aufgenommen.

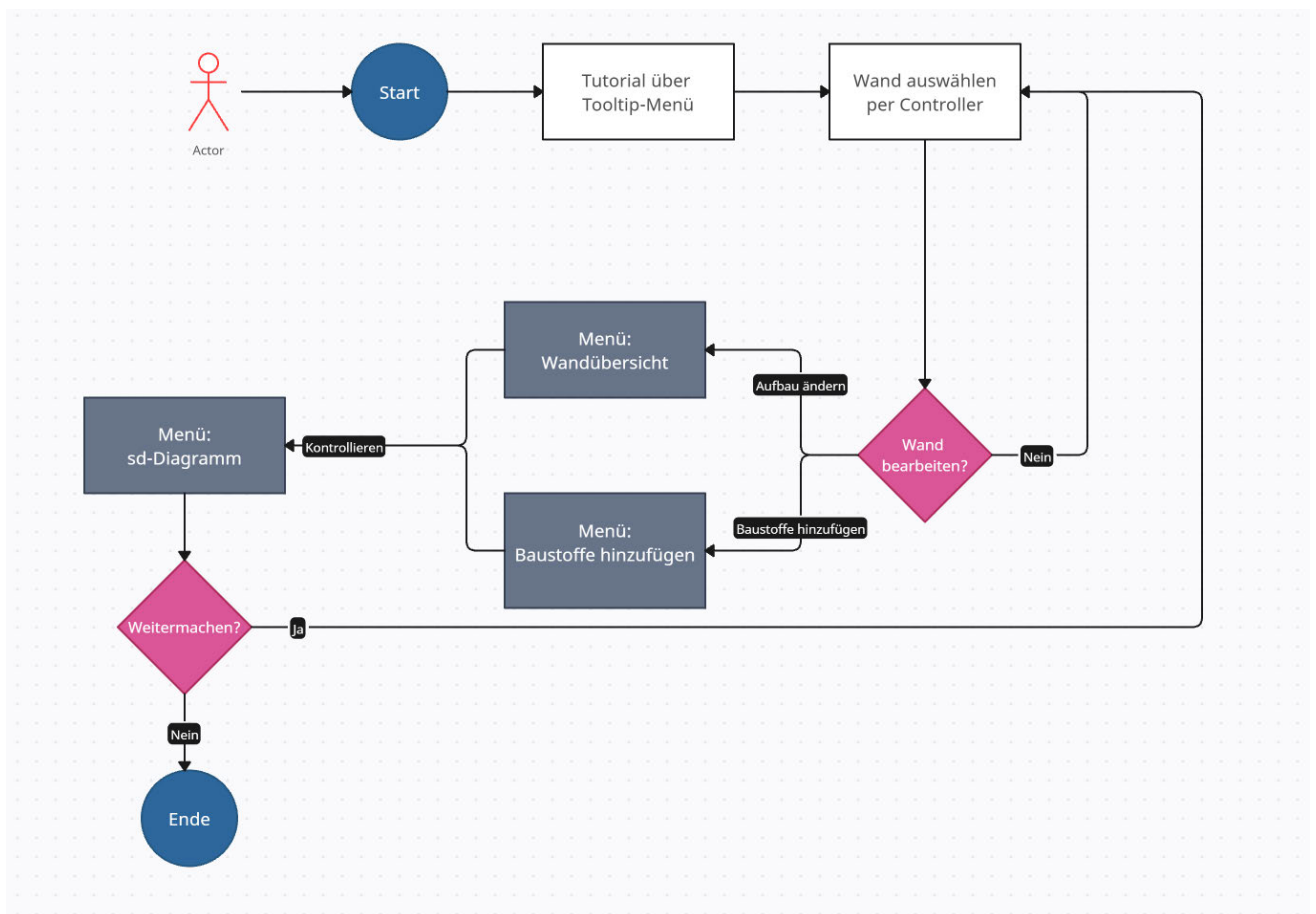


Abbildung 4.1.: Userflow der Software, (Quelle: Eigene Darstellung)

Nach dem Scanvorgang und der Generierung des virtuellen Raums in *Unity* werden dem Nutzer, wie im vorigen Abschnitt bereits erläutert, die Funktionalitäten und Bedienhinwei-

se nahegelegt. Danach kann der Nutzer eine Wand per Controller auswählen, um sie zu konfigurieren. Der Nutzer kann vorhandene Wandaufbauten verändern, anpassen oder ein komplett neues Bauteil erstellen. Nach jeder Interaktion werden die bauphysikalisch wichtigen Werte neu berechnet und geprüft. Zur Visualisierung des Glaser-Verfahrens wird die *sd-Diagramm-Menü-Komponente* genutzt. Durch diese kann der Nutzer den Dampfdruckverlauf im Bauteil nachvollziehen. Ist das Bauteil fertig konstruiert, kann der Nutzer eine andere Wand auswählen und diese Prozedur wiederholen.

Es sei angemerkt, dass es sich bei dem dargestellten Userflow lediglich um eine vereinfachte Darstellung handelt. Innerhalb des Menüs ist eine freie Navigation zwischen den einzelnen Funktionen jederzeit möglich, sodass nicht alle Interaktionspfade strikt linear ablaufen.

4.4.3. Bauphysikalische Berechnung

Die bauphysikalische Berechnung bildet den fachlichen Kern der entwickelten MR-Anwendung. Sie dient dazu, auf Grundlage des vom Nutzer konfigurierten Wandaufbaus relevante energetische und feuchtebezogene Kenngrößen zu bestimmen und diese für die weitere Bewertung und Visualisierung bereitzustellen. Die Berechnungen sind dabei eng an die zugrunde liegenden Datenstrukturen der Wand- und Layerobjekte gekoppelt und werden vollständig innerhalb der Anwendung durchgeführt.

Ausgangspunkt der Berechnung ist der mehrschichtige Wandaufbau, der durch eine Liste von Layer-Objekten repräsentiert wird (vgl. Listing 4.3.1). Jede Schicht enthält Informationen zur Materialdefinition sowie zur Schichtdicke und trägt über ihren Wärmewiderstand zum Gesamtwärmewiderstand des Bauteils bei. Auf Basis dieser Daten wird zunächst der U-Wert der Wand berechnet. Dieser stellt eine zentrale Kenngröße zur energetischen Bewertung dar und erlaubt eine Einschätzung hinsichtlich geltender energetischer Anforderungen (vgl. 2.2.3).

Listing 4.3 zeigt die Implementierung der U-Wert-Berechnung. Dabei werden alle vorhandenen Layer iteriert und deren Wärmewiderstände aufsummiert. Zusätzlich wird ein pauschaler Wert für die inneren und äußeren Oberflächenwiderstände berücksichtigt. Aus dem resultierenden Gesamtwärmewiderstand wird anschließend der U-Wert des Bauteils bestimmt.

Codeblock 4.3: Berechnung des U-Werts aus den Wand-Layern

```
1 private void CalculateUValue()
2 {
3     float totalRValue = 0f;
4
5     if (layers.Count <= 0) return;
6
7     foreach (var layer in layers)
8     {
9         if (layer != null && layer._material._thermalResistance > 0)
10        {
11            totalRValue +=
12                layer._thickness / layer._material._thermalResistance;
13        }
14    }
15
16    totalRValue += 0.17f;
17
18    if (totalRValue > 0)
19    {
20        _uValue = 1f / totalRValue;
21    }
22    else
23    {
24        _uValue = float.MaxValue;
25    }
26 }
```

Ergänzend zur energetischen Bewertung wird das Glaser-Verfahren angewendet, um das Feuchteverhalten des Bauteils zu analysieren. Hierbei werden auf Grundlage des Wandaufbaus die Temperatur- und Dampfdruckverläufe innerhalb des Bauteils ermittelt und miteinander verglichen. Auf diese Weise kann festgestellt werden, ob und in welchem Umfang Tauwasser innerhalb der Konstruktion anfällt. Die Ergebnisse dieser Berechnung dienen als Grundlage für die spätere Visualisierung im sd-Diagramm.

Die bauphysikalischen Berechnungen sind dabei eng mit der Zustandsverwaltung der Wandobjekte verknüpft. Jede Änderung am Wandaufbau führt zu einer zentralen Aktualisierung aller relevanten Kenngrößen. Listing 4.4 zeigt die Methode, die nach einer Änderung der Layerstruktur aufgerufen wird. Sie koordiniert sowohl die Neuberechnung der bauphysikalischen Werte als auch die Aktualisierung der zugehörigen Visualisierungen und Statusanzeigen.

Codeblock 4.4: Zentrale Aktualisierung nach Änderungen am Wandaufbau

```
1 public void LayersUpdated()
2 {
3     tauwasserInnen = false;
4     tauwasserMenge = 0f;
5     _uValue = 0f;
6
7     gameObject.GetComponentInChildren<GraphicScript>()
8         .UpdateIcons(layers);
9
10    GetComponentInChildren<LayerInstanciator>()
11        .UpdateList();
12
13    CalculateUValue();
14    CalculateGlaserParameters();
15
16    bauteilOK =
17        (tauwasserMenge <= 1f && !tauwasserInnen && _uValue <= 0.24f);
18
19    gameObject.GetComponentInChildren<WallOverviewScript>()
20        .UpdateWallOverview(_uValue, wallArea,
21        tauwasserMenge, bauteilOK, tauwasserInnen);
22 }
```

Die dargestellte Methode verdeutlicht das Zusammenspiel zwischen Nutzerinteraktion, Berechnungslogik und Visualisierung. Änderungen am Wandaufbau führen unmittelbar zu einer Neuberechnung aller relevanten Kenngrößen und einer Aktualisierung der Darstellung, ohne dass ein separater Berechnungsschritt durch den Nutzer erforderlich ist. Dadurch entsteht ein konsistenter und reaktiver Systemzustand, der eine intuitive Bewertung unterschiedlicher Wand- und Sanierungsvarianten ermöglicht.

4.5. Zusammenfassung des Kapitels

In diesem Kapitel wurde die Implementierung der MR-Anwendung schrittweise dargestellt. Ausgangspunkt bildete die technische Architektur auf Basis des komponentenbasierten Ansatzes der Unity-Engine, der eine modulare und erweiterbare Struktur ermöglicht. Darauf aufbauend wurden zentrale Entwurfsprinzipien erläutert, die als Leitlinien für eine wartbare und nachvollziehbare Umsetzung dienen.

Anschließend wurden die internen Datenstrukturen vorgestellt, insbesondere das Wand- und Layermodell sowie der Einsatz von ScriptableObjects zur Abbildung materialbezogener Eigenschaften. Diese Strukturen bilden die Grundlage für die flexible Konfiguration von Wandaufbauten und deren bauphysikalische Bewertung.

Darüber hinaus wurde gezeigt, wie die Raumerfassung der Meta Quest 3 in ein virtuelles Raummodell überführt wird und wie Nutzer über ein kontextsensitives Menüsystem mit den erfassten Wandflächen interagieren können. Der dargestellte Userflow verdeutlicht dabei den typischen Ablauf von der Auswahl einer Wand bis zur Analyse und Anpassung des Wandaufbaus.

Den fachlichen Kern des Kapitels bildet die Implementierung der bauphysikalischen Berechnungen. Anhand konkreter Codeausschnitte wurde nachvollziehbar dargestellt, wie der U-Wert sowie feuchtebezogene Kenngrößen berechnet und nach jeder Nutzerinteraktion automatisch aktualisiert werden. Das enge Zusammenspiel von Datenmodell, Berechnungslogik und Visualisierung ermöglicht eine direkte und intuitive Bewertung unterschiedlicher Sanierungsvarianten innerhalb der MR-Umgebung.

Damit legt dieses Kapitel die technische Grundlage für die anschließende Evaluation der Anwendung und deren Einordnung im Vergleich zu etablierten Planungstools.

5. Validierung und Vergleich

Ziel dieses Kapitels ist es, die in Kapitel 5 implementierten Funktionen der MR-Anwendung zu überprüfen und deren Ergebnisse kritisch zu bewerten. Dabei wird untersucht, inwieweit die berechneten bauphysikalischen Kenngrößen mit etablierten Werkzeugen übereinstimmen und wie zuverlässig die zugrunde liegenden Raumscaans sind. Ergänzend wird das Nutzerfeedback betrachtet. Durch das Feedback sollen mögliche Schwächen und Fehler identifiziert werden, um die Praxistauglichkeit der Anwendung in einem möglichst objektiven Kontext einzuordnen.

5.1. Vergleich der Berechnungen mit etablierten Tools

Zur Validierung der bauphysikalischen Berechnungen wurde ein Vergleich mit dem etablierten Online-Werkzeug *Ubakus* durchgeführt. *Ubakus* eignet sich besonders für diesen Zweck, da es in der Praxis weit verbreitet ist und auf denselben grundlegenden Berechnungsverfahren basiert, die auch in der entwickelten Anwendung verwendet werden.

Für den Vergleich wurden identische Wandaufbauten sowohl in der entwickelten MR-Anwendung als auch in *Ubakus* modelliert. Dabei wurden Materialarten, Schichtdicken und Aufbaufolgen möglichst exakt übernommen, um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. Besonders wurde hierbei auf den U-Wert und den Tauwasseranfall geachtet. Wie in Abschnitt 2.2 erklärt, bilden diese beiden Werte die zentrale Grundlage für die Beurteilung des Wärme- und Feuchteschutzes in der Baupraxis.

5.1.1. Testfälle

Zur Überprüfung der bauphysikalischen Berechnungen wurden zwei Testfälle definiert. Diese bilden typische Anwendungsfälle aus der Praxis ab und unterscheiden sich hinsichtlich ihres Feuchteverhaltens. Jeder Testfall wurde sowohl in der entwickelten MR-Anwendung als auch im Referenztool *Ubakus* modelliert. Die Ergebnisse werden jeweils visuell und numerisch gegenübergestellt und anschließend kurz bewertet.

Testfall 1: Wandaufbau mit Tauwasseranfall

Abbildung 5.1a und Abbildung 5.1b zeigen den identischen Wandaufbau in der entwickelten MR-Anwendung sowie in *Ubakus*. Materialabfolge und Schichtdicken wurden in beiden Systemen exakt übernommen, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen.

Die zugehörigen sd-Diagramme sind in Abbildung 5.2a und Abbildung 5.2b dargestellt. In beiden Anwendungen kommt es zu einem Schnittpunkt zwischen Sättigungsdampfdruck- und Dampfdruckkurve, was auf einen Tauwasseranfall innerhalb des Bauteils hinweist. Der Verlauf der Kurven ist in beiden Diagrammen nahezu identisch, sodass von einer vergleichbaren bauphysikalischen Bewertung ausgegangen werden kann.

Die berechneten Kenngrößen sind in Tabelle 5.1 gegenübergestellt.

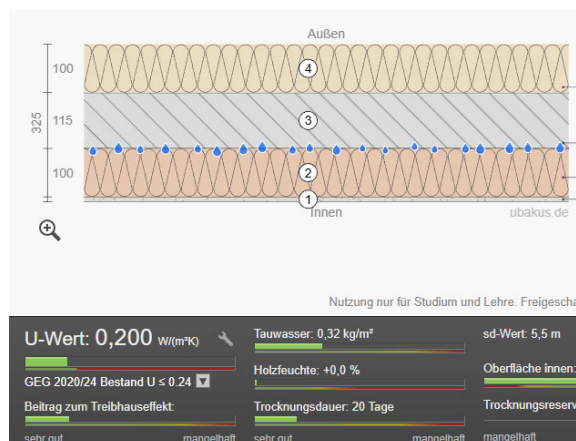
Tabelle 5.1.: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Testfall 1

Kenngröße	Ubakus	MR-Anwendung
U-Wert [W/(m ² K)]	0,200	0,200
Tauwasseranfall	Ja	Ja
Tauwassermenge [kg/m ²]	0,32	0,309

Die Ergebnisse zeigen eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen der entwickelten MR-Anwendung und dem Referenztool *Ubakus*. Der U-Wert wird in beiden Systemen identisch berechnet. Auch die ermittelte Tauwassermenge weist lediglich eine geringe Abweichung von etwa 0,011 kg/m², also etwa 3,44% auf. Diese Differenz ist auf andere Ansätze oder Ungenauigkeiten der Berechnungen zurückzuführen. Insgesamt bestätigt dieser Testfall die korrekte Umsetzung der bauphysikalischen Berechnungen bei einfachem Tauwasseranfall.

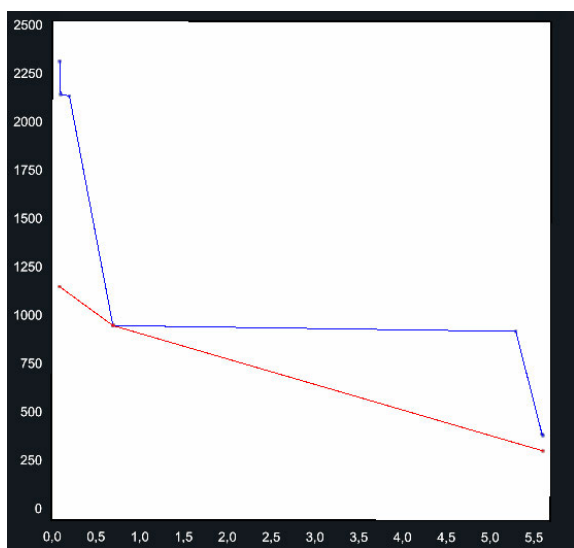


(a) MR-Anwendung, (Quelle: Screenshot aus Software)

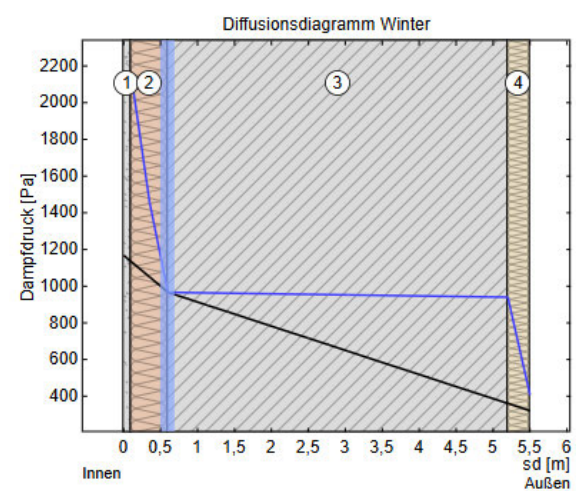


(b) Ubakus (bearbeitet), (Quelle: (u-wert.net, n. d.))

Abbildung 5.1.: Testfall 1 – Vergleich des Wandaufbaus



(a) MR-Anwendung, (Quelle: Screenshot aus Software)



(b) Ubakus (bearbeitet), (Quelle: (u-wert.net, n. d.))

Abbildung 5.2.: Testfall 1 – Vergleich der sd-Diagramme

Testfall 2: Wandaufbau ohne Tauwasseranfall

Der zweite Testfall beschreibt einen Wandaufbau, bei dem gemäß den bauphysikalischen Berechnungen kein Tauwasser innerhalb der Konstruktion anfällt. Dieses Szenario dient dazu, die korrekte Erkennung eines tauwasserfreien Bauteils sowie die Konsistenz der U-Wert-Berechnung zu überprüfen.

Wie bereits im vorherigen Testfall wurden identische Materialsichten und Schichtdicken sowohl in der entwickelten MR-Anwendung als auch in *Ubakus* modelliert. Die Ergebnisdarstellungen des Wandaufbaus sind in den jeweiligen Abbildungen dargestellt. In beiden Anwendungen ergibt sich ein sd-Diagramm ohne Schnittpunkt zwischen Sättigungsdampfdruck- und Dampfdruckkurve, wodurch kein Tauwasseranfall festgestellt wird.

Die berechneten Ergebnisse sind in Tabelle 5.2 gegenübergestellt.

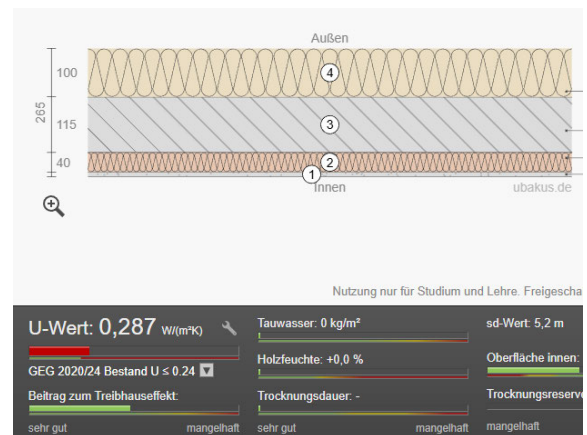
Tabelle 5.2.: Gegenüberstellung der Ergebnisse für Testfall 2

Kenngröße	Ubakus	MR-Anwendung
U-Wert [$\text{W}/(\text{m}^2\text{K})$]	0,287	0,287
Tauwasseranfall	Nein	Nein
Tauwassermenge [kg/m^2]	0	0

Die Ergebnisse zeigen eine vollständige Übereinstimmung zwischen der entwickelten MR-Anwendung und dem Referenztool *Ubakus*. Sowohl der berechnete U-Wert als auch die Bewertung des Feuchteverhaltens stimmen exakt überein. Dieser Testfall bestätigt, dass die Anwendung tauwasserfreie Konstruktionen zuverlässig erkennt und bauphysikalisch korrekt bewertet.

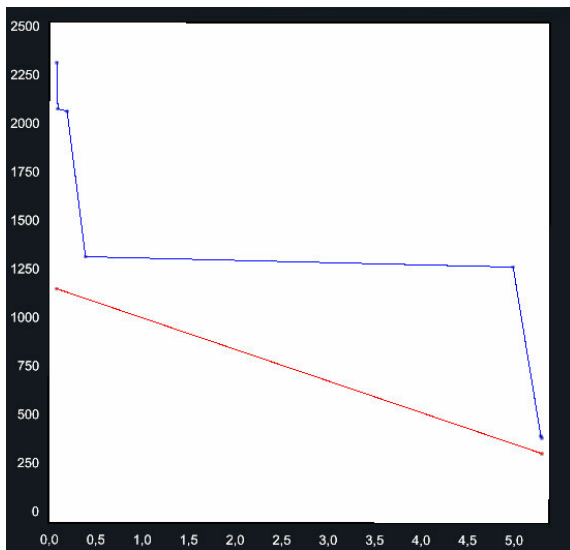


(a) MR-Anwendung, (Quelle: Screenshot aus Software)

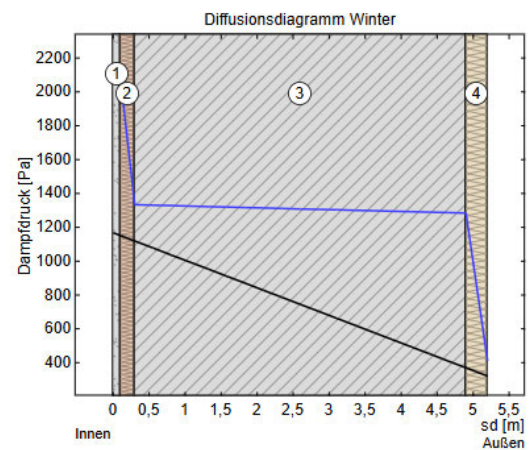


(b) Ubakus (bearbeitet), (Quelle: (u-wert.net, n. d.))

Abbildung 5.3.: Testfall 2 – Vergleich des Wandaufbaus



(a) MR-Anwendung, (Quelle: Screenshot aus Software)



(b) Ubakus (bearbeitet), (Quelle: (u-wert.net, n. d.))

Abbildung 5.4.: Testfall 2 – Vergleich der sd-Diagramme

5.1.2. Bewertung

Die Ergebnisse zeigen, dass die U-Wert-Berechnungen in den getesteten Fällen mit den Werten von Ubakus übereinstimmen oder lediglich geringfügig abweichen. Auch bei einfachem Tauwasseranfall liefern beide Systeme vergleichbare Resultate. Abweichungen traten jedoch bei komplexeren Fällen mit mehrfachem Tauwasseranfall auf. In diesen Situationen wurden in der entwickelten Anwendung andere Tauwassermengen ermittelt als in Ubakus.

Diese Abweichungen verdeutlichen, dass die entwickelte Anwendung insbesondere für einfache bis mittelkomplexe Wandaufbauten zuverlässige Ergebnisse liefert, bei komplexeren Feuchteverläufen jedoch an die Grenzen des verwendeten Berechnungsansatzes stößt.

5.2. Diskussion der Genauigkeit der Scans und Berechnungen

Die Genauigkeit der Raumschans ist ein wichtiger Faktor für die Aussagekraft der entwickelten MR-Anwendung, da alle weiteren Berechnungen auf den erfassten Geometriedaten basieren. In den durchgeführten Tests zeigten die mit der *Meta Quest 3* erstellten Scans eine Abweichung von etwa $\pm 3\text{cm}$ im Vergleich zu den realen Raummaßen. Diese Abweichungen traten vor allem bei Wandlängen und Raumdimensionen auf und sind auf die derzeitigen technischen Grenzen der sensorbasierten Raumerfassung zurückzuführen.

Für den praktischen Einsatz im Bauwesen ist diese Genauigkeit jedoch als ausreichend einzuschätzen. In der Baupraxis werden ohnehin Toleranzen sowie Verschnitt eingeplant, die deutlich größer sind als die gemessenen Abweichungen. Entsprechend wirken sich die Scan- Ungenauigkeiten nur geringfügig auf die berechneten Wandflächen und die darauf basierenden bauphysikalischen Bewertungen aus. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass die Anwendung bislang nur in weniger als zehn Räumen getestet wurde. Die Ergebnisse liefern daher eine erste Einschätzung, sollten jedoch durch weitere Tests in unterschiedlichen Umgebungen ergänzt werden.

5.3. Benutzerfeedback

Im Rahmen der Evaluation der entwickelten Software wurde auch Feedback aus der Baupraxis eingeholt. Konrad Hintz, Zimmerer-, Maurer- und Betonbaumeister sowie Inhaber der Firma *Hintz Naturbau GmbH*, bewertet die Software als einen sehr gelungenen Prototyp. Zwar verfügt die Anwendung derzeit noch nicht über den gleichen Funktionsumfang wie etablierte Programme wie Ubakus; dennoch ist sie insgesamt sehr intuitiv bedienbar.

Zu den Schwächen zählten teilweise schwer lesbare UI-Elemente, Einschränkungen bei bauphysikalischen Berechnungen, wie dem fehlenden doppelten Tauwasseranfall, sowie eine noch zu geringe Auswahl an Baumaterialien. Positiv hervorgehoben wurden insbesondere die automatische Erfassung und Anzeige der Wandmaße, die im Baualltag als äußerst hilfreich eingeschätzt werden. Insgesamt sieht er großes Potenzial in der Software, hält sie für praxisnah und nützlich auf der Baustelle und kann sich vorstellen, eine weiterentwickelte, ausgereifere Version künftig zu nutzen.

6. Potenziale und Grenzen

Aufbauend auf den in Kapitel 2 erläuterten technologischen und fachlichen Grundlagen zu Mixed Reality im Bauwesen, der in Kapitel 3 entwickelten Konzeption sowie der technischen Umsetzung in Kapitel 4 werden in diesem Kapitel die Potenziale und Grenzen der entwickelten Anwendung reflektiert.

Dabei werden die Ergebnisse nicht isoliert betrachtet, sondern in den größeren Kontext von MR-Anwendungen im Bauwesen eingeordnet, wie er in Abschnitt 2.1 beschrieben wurde. Ziel ist es, die Erkenntnisse aus der Implementierung und Validierung (Kapitel 5) kritisch einzuordnen und ihre Relevanz für den praktischen Einsatz zu bewerten.

6.1. Vorteile der entwickelten MR-Anwendung

Wie in Abschnitt 2.1 dargestellt, liegt ein zentrales Potenzial von MR im Bauwesen in der direkten Verknüpfung digitaler Informationen mit der realen Umgebung. Die entwickelte Anwendung greift dieses Grundprinzip auf und setzt es im Kontext bauphysikalischer Bewertungen um.

Besonders deutlich wird dieser Vorteil durch die in Abschnitt 4.4.1 beschriebene Raumerfassung und die anschließende Interaktion mit einzelnen Wandflächen. Anstatt Maße und Bauteile manuell zu erfassen und in separate Werkzeuge zu übertragen, können relevante Informationen direkt im räumlichen Kontext genutzt werden. Dies entspricht dem in Abschnitt 2.1.3 beschriebenen Ziel Planungsprozesse anschaulicher und effizienter zu gestalten.

Ein weiterer Mehrwert ergibt sich aus der unmittelbaren Rückmeldung nach jeder Interaktion. Die automatische Neuberechnung von U-Wert und Tauwasser (vgl. Abschnitt 4.4.3) unterstützt einen iterativen Arbeitsstil, der in klassischen, browserbasierten Tools nur eingeschränkt möglich ist. Der Userflow in Abbildung 4.1 verdeutlicht diesen kontinuierlichen Ablauf.

Die Validierungsergebnisse (Abschnitt 5.1) zeigen zudem, dass die berechneten U-Werte und einfache Tauwasserfälle mit etablierten Werkzeugen übereinstimmen. Damit bestätigt sich, dass die Anwendung fachlich anschlussfähig ist und sich insbesondere für frühe Planungs- und Entscheidungsphasen eignet.

6.2. Herausforderungen und Grenzen

Trotz der aufgezeigten Vorteile machen die Ergebnisse der Validierung auch deutlich, dass MR-Anwendungen im Bauwesen weiterhin mit Einschränkungen verbunden sind. Eine zentrale Grenze liegt in der Genauigkeit der Raumerfassung, die bereits in Abschnitt 2.1.2 als technologische Herausforderung beschrieben wurde.

Die in Abschnitt 5.2 ermittelten Abweichungen von etwa drei Zentimetern liegen zwar innerhalb üblicher Toleranzen im Bauwesen, verdeutlichen jedoch die Abhängigkeit der Berechnungen von der Qualität der erfassten Geometriedaten. Für Anwendungen mit sehr hohen Genauigkeitsanforderungen bleibt dies ein kritischer Punkt, könnte jedoch durch manuelles Nachmessen und späterem Eingebens umgangen werden.

Auch auf bauphysikalischer Ebene zeigen sich Grenzen. Während einfache Tauwasserfälle zuverlässig erkannt werden, traten bei komplexeren Feuchteverläufen Abweichungen gegenüber Ubakus auf (vgl. Abschnitt 5.1.1). Dies unterstreicht, dass die Anwendung nicht als Ersatz für normgerechte Fachberechnungen zu verstehen ist, sondern als unterstützendes Werkzeug.

Darüber hinaus wurde im Benutzerfeedback (Abschnitt 5.3) deutlich, dass die Nutzung von XR-Headsets für viele Anwender noch ungewohnt ist. Dieser Aspekt wurde bereits in der Abgrenzung zu VR und AR (Abschnitt 2.1.1) thematisiert und bestätigt sich in der praktischen Erprobung.

6.3. Wirtschaftliche und ökologische Potenziale

Die in Kapitel 2 beschriebenen Entwicklungen zeigen, dass XR-Technologien zunehmend auch wirtschaftlich relevant werden. Für die entwickelte Anwendung liegt dieses Potenzial vor allem in der schnellen Erfassung und Bewertung von Bestandsräumen.

Wie in Abschnitt 4.4.1 dargestellt, können Räume direkt vor Ort erfasst und anschließend weiterverarbeitet werden. Dadurch lässt sich der Aufwand für wiederholte Ortsbegehungen und manuelle Dokumentation reduzieren, was insbesondere bei kleineren Projekten von Vorteil sein kann.

Aus ökologischer Sicht ermöglicht die Anwendung, unterschiedliche Sanierungsvarianten frühzeitig zu vergleichen. Die in Abschnitt 5.1.1 gezeigten Beispiele verdeutlichen, dass sich Auswirkungen auf U-Wert und Feuchteverhalten schnell nachvollziehen lassen. Dies unterstützt fundiertere Entscheidungen und kann dazu beitragen, Materialien und Energie gezielter einzusetzen.

Gleichzeitig ist zu berücksichtigen, dass es sich um einen Prototyp handelt. Die langfristige wirtschaftliche Nutzung hängt von der weiteren Entwicklung der Hardware, der Erweiterung der Software sowie der Akzeptanz in der Praxis ab. Dennoch zeigt die Arbeit, dass Mixed Reality im Zusammenspiel mit bauphysikalischen Bewertungsmethoden ein relevantes Zukunftspotenzial besitzt.

7. Fazit und Ausblick

Im abschließenden Kapitel dieser Arbeit werden die zuvor erarbeiteten Inhalte zusammengeführt und eingeordnet. Auf Grundlage der theoretischen Grundlagen, der konzeptionellen Ausarbeitung, der technischen Umsetzung sowie der durchgeführten Validierung wird reflektiert, inwieweit die gesetzten Ziele erreicht wurden.

Darüber hinaus werden die Forschungsfragen dieser Arbeit explizit beantwortet und die Ergebnisse in einen übergeordneten Kontext eingeordnet. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche Weiterentwicklungen der Anwendung sowie auf zukünftige Potenziale von MR-Technologien im Bauwesen gegeben.

7.1. Zusammenfassung der Ergebnisse

Im Zuge dieser Arbeit wurden verschiedene Aspekte zum Einsatz von MR-Technologien im Bauwesen betrachtet. Ausgangspunkt war die Frage, ob sich bauphysikalische Bewertungen mithilfe von Mixed Reality verständlicher und praxisnäher darstellen lassen. Um diese Frage zu beantworten, wurden theoretische Grundlagen erarbeitet, eine Anwendung konzipiert und umgesetzt sowie deren Ergebnisse überprüft.

Die in Kapitel 2.2 dargestellten Grundlagen zeigen, dass Mixed Reality grundsätzlich gut geeignet ist, digitale Informationen mit der realen Umgebung zu verbinden. Gerade im Bauwesen kann dies helfen, abstrakte Sachverhalte besser nachvollziehbar zu machen. Gleichzeitig wurde deutlich, dass bauphysikalische Verfahren wie die U-Wert-Berechnung oder das Glaser-Verfahren auf vereinfachten Annahmen beruhen. Diese Grenzen bestehen auch dann weiter, wenn sie in einer XR-Anwendung umgesetzt werden.

Auf dieser Basis wurde in Kapitel 3 eine MR-Anwendung konzipiert, die sich an dem etablierten Werkzeug *Ubakus* orientiert. Ziel war es nicht, bestehende Software zu ersetzen, sondern deren Funktionen räumlich zu erweitern. Ein besonderer Fokus lag dabei auf einer einfachen Bedienung und einer klaren Struktur, um die Anwendung auch für kleinere Unternehmen oder Einzelpersonen nutzbar zu machen.

Die Implementierung in Kapitel 4 zeigt, dass dieses Konzept technisch umsetzbar ist. Durch den komponentenbasierten Aufbau der Unity-Engine konnten Raumerfassung, Interaktion,

Berechnung und Visualisierung getrennt realisiert werden. Vor allem die automatische Neuberechnung der bauphysikalischen Werte nach jeder Änderung am Wandaufbau erwies sich als sinnvoll, da sie einen flüssigen Arbeitsablauf ermöglicht.

Der Vergleich mit *Ubakus* in Kapitel 5 zeigt, dass die berechneten U-Werte und einfache Tauwasserfälle in beiden Systemen weitgehend übereinstimmen. Unterschiede traten vor allem bei komplexeren Tauwasserfällen auf. Dies verdeutlicht die Grenzen der implementierten Näherungen. Auch die Raumschans lieferten mit Abweichungen von etwa drei Zentimetern insgesamt brauchbare Ergebnisse, wobei die geringe Anzahl getesteter Räume berücksichtigt werden muss.

Zusammenfassend zeigt diese Arbeit, dass Mixed Reality als unterstützendes Werkzeug für bauphysikalische Bewertungen sinnvoll eingesetzt werden kann. Die entwickelte Anwendung ersetzt keine detaillierten Fachberechnungen, bietet aber einen anschaulichen und interaktiven Zugang zu wichtigen Kennwerten. Vor allem in frühen Planungs- und Entscheidungsphasen kann sie einen Mehrwert darstellen.

7.2. Beantwortung der Forschungsfragen

Im Folgenden werden die in Kapitel 1.2 formulierten Forschungsfragen aufgegriffen und auf Basis der vorliegenden Arbeit beantwortet. Im Zentrum steht dabei die Frage, „**Inwiefern kann eine MR-Anwendung entwickelt werden, die bauphysikalische Bewertungen verständlich darstellt und zugleich praktikabel sowie intuitiv bedienbar ist?**“. Zur Beantwortung dieser Fragestellung werden die Ergebnisse aus Konzeption, Implementierung und Validierung zusammengeführt und kritisch eingeordnet.

Teilfrage 1: Konzeption und Anforderungen

Die erste Teilfrage befasste sich mit der Frage, welche Anforderungen eine MR-Anwendung erfüllen muss, um bauphysikalische Bewertungen verständlich und praktikabel darzustellen. Wie in Kapitel 3 gezeigt wurde, ist es sinnvoll, sich dabei an etablierten Werkzeugen wie *Ubakus* zu orientieren. Dies erleichtert den Einstieg und knüpft an bestehende Arbeitsweisen an.

Besonders wichtig erweisen sich eine einfache Bedienung, eine klare Struktur der Funktionen sowie eine anschauliche Darstellung der Ergebnisse. Die Konzeption zeigt, dass sich durch die Kombination aus Raumerfassung, direkter Wandinteraktion und visueller Rückmeldung viele dieser Anforderungen erfüllen lassen. Gerade für kleinere Unternehmen oder Einzelpersonen kann dies den Zugang zu bauphysikalischen Bewertungen erleichtern.

Teilfrage 2: Technische Umsetzung

Die zweite Teilfrage untersuchte, wie eine solche Anwendung technisch umgesetzt werden kann. Kapitel 4 zeigt, dass dies mit der Unity-Engine und einem komponentenbasierten Ansatz grundsätzlich gut möglich ist.

Durch die klare Trennung von Raumerfassung, Datenstrukturen, Berechnung und Visualisierung konnten die einzelnen Funktionen übersichtlich umgesetzt werden. Hilfreich erwiesen sich dabei unter anderem der Einsatz von Scriptable Objects für Baustoffdaten sowie die automatische Neuberechnung nach jeder Nutzerinteraktion. Insgesamt zeigt die Implementierung, dass Mixed Reality technisch geeignet ist, bauphysikalische Bewertungen räumlich und interaktiv darzustellen.

Teilfrage 3: Evaluation und Praxistauglichkeit

Die dritte Teilfrage bezog sich auf die Praxistauglichkeit der entwickelten Anwendung. Der Vergleich mit *Ubakus* in Kapitel 5 zeigt, dass die berechneten U-Werte und einfache Tauwasserfälle in beiden Systemen weitgehend übereinstimmen. Damit konnte bestätigt werden, dass die grundlegenden Berechnungen zuverlässig umgesetzt wurden.

Gleichzeitig wurden auch Grenzen sichtbar. Bei komplexeren Tauwasserfällen kam es zu Abweichungen, und die Genauigkeit der Ergebnisse hängt direkt von der Qualität der Raumscans ab. Das Nutzerfeedback zeigt zudem, dass insbesondere für weniger technikaffine Anwender eine stärkere Unterstützung durch die Benutzerführung notwendig wäre.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die entwickelte MR-Anwendung die formulierten Forschungsfragen grundsätzlich beantwortet. Sie eignet sich als unterstützendes Werkzeug für frühe Planungs- und Entscheidungsphasen, ersetzt jedoch keine detaillierten Fachberechnungen oder etablierten Spezialwerkzeuge vollständig.

7.3. Ausblick auf zukünftige Entwicklungen

Die entwickelte MR-Anwendung stellt einen Prototyp dar und kann daher nur einen Teil der möglichen Funktionen abdecken. Gleichzeitig zeigt sie viele Ansatzpunkte für Weiterentwicklungen, insbesondere im Hinblick auf die praktische Nutzung im Alltag.

Ein naheliegender Schritt wäre eine Überarbeitung der Benutzeroberfläche. Das Nutzerfeedback hat gezeigt, dass die Bedienung zwar grundsätzlich verständlich ist, jedoch noch klarer und intuitiver gestaltet werden könnte. Kürzere Wege, verständlichere Menüs und bessere

Hinweise würden den Einstieg erleichtern, vor allem für Nutzer ohne technischen Hintergrund.

Auch die Arbeit mit den erfassten Räumen ließe sich erweitern. Derzeit wird jeweils ein einzelner Raum betrachtet. Zukünftig könnten mehrere Räume miteinander verknüpft werden, um ganze Wohnungen oder Gebäudeteile abzubilden. In diesem Zusammenhang wäre auch eine dauerhafte Speicherung der Räume sinnvoll, sodass sie später erneut geladen und weiterbearbeitet werden können.

Darüber hinaus bietet sich die Möglichkeit, gespeicherte Räume unabhängig von der Baustelle in einer virtuellen Umgebung darzustellen. Eine solche VR-Ansicht würde es erlauben, Wandaufbauten oder Varianten auch außerhalb des realen Raums zu betrachten und zu vergleichen, etwa im Büro oder zu Hause.

Ein weiterer Schritt könnte die Zusammenarbeit mehrerer Personen in einem gemeinsamen virtuellen Raummodell sein. Planer, Handwerker oder Berater könnten gleichzeitig auf denselben Raum zugreifen und Änderungen gemeinsam besprechen. Dies würde Abstimmungen erleichtern, da alle Beteiligten dieselbe räumliche Situation vor Augen haben.

Auch auf fachlicher Ebene bestehen Erweiterungsmöglichkeiten. Eine größere Baustoffdatenbank sowie eine Überarbeitung der bauphysikalischen Berechnungen könnten die Aussagekraft der Anwendung weiter verbessern, insbesondere bei komplexeren Tauwasserfällen.

Neben der XR-Anwendung wäre auch eine ergänzende Smartphone-App denkbar. Da mobile Endgeräte fast immer verfügbar sind, könnten Räume direkt vor Ort mit dem Smartphone erfasst werden. Die gescannten Daten würden in einer Datenbank gespeichert und könnten später in der XR-Anwendung weiterverwendet oder in einer virtuellen Umgebung dargestellt werden.

Eine solche Kombination aus App und XR-Software würde den Einsatz flexibler machen. Nutzer ohne XR-Headset könnten trotzdem Räume erfassen und bearbeiten, während XR-Nutzer zusätzlich von einer immersiven Darstellung profitieren würden. Dadurch ließe sich der Zugang zu der Anwendung deutlich erweitern.

Literatur

- AccuVein Inc. (2025). *AccuVein – Vein Visualization Technology for Improved Patient Care* [Official company website]. Verfügbar 23. Dezember 2025 unter <https://www.accuvein.com/>
- Alhadeff, E. (2018, September). *Metaari's Global Competitive Environment For Mixed Reality Learning Products* [Blog article summarizing Metaari market analysis]. Verfügbar 23. Dezember 2025 unter <https://www.seriousgamemarket.com/2018/09/metaaris-global-competitive-environment.html>
- Autodesk, Inc. (n. d.). *Benefits of BIM*. Verfügbar 1. Dezember 2025 unter <https://www.autodesk.com/de/solutions/bim/benefits-of-bim>
- Autodesk, Inc. (2025a). *Extended Reality (XR) Solutions: Virtual, Augmented and Mixed Reality*. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://www.autodesk.com/de/solutions/extended-reality>
- Autodesk, Inc. (2025b). *Startseite Autodesk*. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://www.autodesk.com/>
- Bezmalinovic, T. (2017, September). *Virtual Reality: Speedrunner spielt Superhot VR in Rekordzeit durch*. Verfügbar 23. Dezember 2025 unter <https://mixed.de/virtual-reality-speedrunner-spielt-superhot-vr-in-rekordzeit-durch-video/>
- Bökeler, K., Encarnação, J., Wallisser, T., Bollinger, K., & Motzko, C. (2008). *IT verändert das Bauen*. Verfügbar 26. November 2025 unter https://www.stiftung-bauwesen.de/wp-content/uploads/2017/09/StiftungBauwesen_2008_IT-ver%C3%A4ndert-das-Bauen.pdf
- Csharp Corner. (2025). *What Are the Fundamental Building Blocks of Unity*. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.c-sharpcorner.com/article/what-are-the-fundamental-building-blocks-of-unity/>
- Gebäudeenergiegesetz (GEG) [§ 48 Baubestand, Fassung 2020–2024, BGBl. I]. (2024, 1. Januar). Bundesrepublik Deutschland. Verfügbar 3. Januar 2025 unter https://www.gesetze-im-internet.de/geg/__48.html
- GeeksforGeeks. (2024). *Separation of Concerns (SoC)* [Software engineering design principle overview]. Verfügbar 24. Dezember 2025 unter <https://www.geeksforgeeks.org/software-engineering/separation-of-concerns-soc/>
- Grand View Research, I. (2025, Januar). *Mixed Reality Market (2024–2030) Size, Share & Trends Analysis Report: Industry Analysis by Component, Application, Region*. Verfügbar 25.

- November 2025 unter <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/mixed-reality-market>
- Grotte, T. (2025, Oktober). *The Unity Component System: Why Composition Beats Inheritance*. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.syntacticsugardaddy.com/blog/unity-component-system-composition-vs-inheritance>
- Holzschutz – Teil 2: Vorbeugende bauliche Maßnahmen im Hochbau. (2022). Deutsches Institut für Normung e. V.
- Interaction Design Foundation. (2025). *Keep It Simple, Stupid (KISS)* [Design principle overview]. Verfügbar 24. Dezember 2025 unter <https://www.interaction-design.org/literature/topics/keep-it-simple-stupid>
- Jobs, S. (1985). *Steve Jobs Quote*. Verfügbar 25. November 2025 unter https://allaboutstevejobs.com/verbatim/interviews/playboy_1985
- Martin, R. C. 1. (2003). *Agile software development principles, patterns, and practices* [Includes bibliographical references and index]. Prentice Hall/Pearson Education. <http://www.gbv.de/dms/hebis-darmstadt/toc/108588939.pdf>
- Meta Platforms, Inc. (2025a). *Explore Meta Quest Features with Building Blocks — Unity Documentation* [Developer Documentation on Unity Building Blocks]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/bb-overview/>
- Meta Platforms, Inc. (2025b). *Unity MR Utility Kit Overview — Meta Horizon OS Documentation* [Developer Documentation for Mixed Reality Utility in Unity]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-mr-utility-kit-overview/>
- Meta Platforms, Inc. (2025c). *Unity Passthrough API — Meta Horizon OS Documentation* [Developer Documentation for Unity Passthrough API]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://developers.meta.com/horizon/documentation/unity/unity-passthrough/>
- Microsoft Corporation. (2020, Dezember). *Microsoft erklärt: Was ist Microsoft HoloLens? Definition & Funktionen*. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://news.microsoft.com/de-de/microsoft-erklaert-was-ist-microsoft-hololens-definition-funktionen/>
- Middendorf, N. (2020a). *Glaser-Verfahren (Periodenbilanzverfahren) 01: Berechnungsverfahren* [YouTube Video]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.youtube.com/watch?v=ouwlZ6pF7KU>
- Middendorf, N. (2020b). *Glaser-Verfahren (Periodenbilanzverfahren) 01: Berechnungsverfahren* [YouTube Video]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.youtube.com/watch?v=GqrKIQARYL4&t=961s>
- Middendorf, N. (2020c). *Glaser-Verfahren (Periodenbilanzverfahren) 01: Berechnungsverfahren* [YouTube Video]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter https://www.youtube.com/watch?v=WWfUKuL_HrY&t=1s
- Milgram, P., & Kishino, F. (1994). A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays. *IEICE Transactions on Information and Systems*, 77(12), 1321–1329.

- Newcombe, R. A., Izadi, S., et al. (2011). KinectFusion: Real-time Dense Surface Mapping and Tracking. *2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 127–136. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092378>
- Peschel, Kickler, Lindau, Mentlein, Schulzig & Trutzenburg. (2022). *Bautechnik Tabellenbuch* (17. Aufl.). Europa-Lehrmittel.
- Pimax. (2025, November). *Inside-Out Tracking: The New Standard in VR?* [VR tracking technology overview]. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://pimax.com/blogs/blogs/inside-out-tracking-the-new-standard-in-vr>
- Schweizer-FN. (n. d.). *Berechnung der Luftfeuchtigkeit in Abhängigkeit der Temperatur*. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.schweizer-fn.de/lueftung/feuchte/feuchte.php>
- Slowey, K. (2015, Dezember). *Autodesk partners with Microsoft on 'mixed reality' project, unveils new BIM doc management service*. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://www.constructiondive.com/news/autodesk-partners-with-microsoft-on-mixed-reality-project-unveils-new-bi/410084/>
- Smith, J. (2024, Juni). *Understanding Entity Component System (ECS)* [Online article explaining core ideas of ECS]. Verfügbar 24. Dezember 2025 unter <https://jenny-smith.medium.com/understanding-entity-component-system-ecs-fa7e5906b025>
- Steed, A., & Oliveira, M. (2016). *Virtual Reality Systems*. ACM Books.
- Strauss GmbH & Co. KG. (2025). *Toolbox XR*. Verfügbar 1. Dezember 2025 unter https://www.strauss.com/de/de/Toolbox_XR
- Tremosa, L. (2022, Februar). *Beyond AR vs. VR: What is the Difference between AR vs. MR vs. VR vs. XR?* Verfügbar 30. November 2025 unter <https://www.interaction-design.org/literature/article/beyond-ar-vs-vr-what-is-the-difference-between-ar-vs-mr-vs-vr-vs-xr?srsId=AfmBOopErbXmChogj5hT6nyvjbgOTCfoTuEdcwunRW2oay6Ms8TvmQdQ>
- Unity Technologies. (2025a). *Entity Component System (ECS) — Datenorientierte Programmierung* [Offizielle Unity-Seite zu ECS]. Verfügbar 24. Dezember 2025 unter <https://unity.com/de/ecs>
- Unity Technologies. (2025b). *Inside-Out/Outside-In Tracking* [Unity Glossary entry on tracking methods]. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://unity.com/glossary/Insideout-outsidein-tracking>
- Unity Technologies. (2025c). *ScriptableObject — Unity Manual (Version 6.3 LTS)* [Unity 6.3 LTS Manual]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/Manual/class-ScriptableObject.html>
- Universität Bielefeld, F. f. I. (2025). *IntelMOD – Intelligente Modernisierungsplattform auf Basis des Funktionalen Kostensplittings* [Projektseite]. Verfügbar 12. Dezember 2025 unter <https://www.uni-bielefeld.de/fakultaeten/rechtswissenschaft/forschung/forschungsstellen/fir/intelmod/>
- u-wert.net. (n. d.). *Über u-wert.net / ubakus.de*. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://www.ubakus.de/uber-u-wert-net/>

- VRcompare. (2025). *Comparison of VR Headsets: Meta Quest 3 vs Valve Index* [Headset comparison tool]. Verfügbar 26. November 2025 unter <https://vr-compare.com/compare?h1=0q3goALzg&h2=0jLuwg808-j>
- Vsr, S. (2024, September). *Meta Quest 3 vs. Valve Index: What's the Difference Between AR vs. MR vs. VR vs. XR?* Verfügbar 1. Dezember 2025 unter <https://www.thegamer.com/meta-quest-3-vs-valve-index/>
- Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden – Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz.* (2024). Deutsches Institut für Normung e. V.

A. Anhang

Dieser Anhang beschreibt den Ablauf zur Installation der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Mixed-Reality-Anwendung auf einer *Meta Quest 3*. Die Anwendung wird als Android-*APK* bereitgestellt und außerhalb des offiziellen Meta Stores installiert. Der beschriebene Prozess eignet sich insbesondere für Entwicklungs- und Testzwecke.

A.1. Voraussetzungen

Für die Installation werden folgende Komponenten benötigt:

- Eine *Meta Quest 3*
- Ein PC oder Laptop (Windows, macOS oder Linux)
- Ein USB-C-Kabel mit Datenübertragung
- Aktivierter Entwicklermodus auf der *Meta Quest*
- Die Desktop-Anwendung *SideQuest*

A.2. Aktivierung des Entwicklermodus

Der Entwicklermodus wird über die *Meta Quest* Smartphone-App aktiviert. Nach Auswahl des verbundenen Headsets kann der Entwicklermodus in den Geräteeinstellungen eingeschaltet werden. Anschließend ist ein Neustart des Headsets erforderlich.

Beim erstmaligen Verbinden der *Meta Quest* mit dem PC erscheint im Headset eine Abfrage zur Zulassung von USB-Debugging. Diese muss bestätigt werden, um eine erfolgreiche Verbindung zu ermöglichen.

A.3. Installation über SideQuest

Nach dem Start von *SideQuest* wird die Meta Quest per USB-Kabel mit dem PC verbunden. Eine erfolgreiche Verbindung wird durch ein grünes Statussymbol in SideQuest angezeigt.

Die Installation der Anwendung erfolgt über die Funktion *Install APK from file* oder durch das direkte Ziehen der APK-Datei in das SideQuest-Fenster. Nach Abschluss des Installationsvorgangs erscheint eine entsprechende Bestätigung.

A.4. Start der Anwendung

Nach erfolgreicher Installation kann die Anwendung über das App-Menü der Meta Quest gestartet werden. Sie befindet sich unter dem Eintrag *Unbekannte Quellen* und kann von dort aus ausgeführt werden.

A.5. Hinweise

Die beschriebene Installationsmethode dient ausschließlich Entwicklungs- und Testzwecken. Eine Veröffentlichung über offizielle Vertriebskanäle wie den Meta Store oder App Lab ist nicht Bestandteil dieser Arbeit.

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel

Mixed Reality als Zukunftstechnologie im Bauwesen

selbstständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

Hamburg, 25. Dezember 2025