

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades „Master of Science“ (M.Sc.)

Innovative Technologien als Treiber für Informationale und Prozedurale Gerechtigkeit: Steigerung der Mieter- akzeptanz bei Modernisierungsmaß- nahmen mittels Building Information Modeling, Augmented Reality und Large Language Models

vorgelegt in Hamburg am 15. Juli 2026

Sune Timon Maute (Matrikelnummer: XXXXXXXXXX)

Erstprüferin: Prof. Dr. Larissa Putzar

Zweitprüfer: M.Sc. Thorben Ortmann

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Studiengang „Digital Reality“

Fakultät Informatik und Digitale Gesellschaft

Finkenau 35

22081 Hamburg

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht, ob digitale Kommunikationsformate die wahrgenommene prozedurale und informationale Gerechtigkeit von Mietenden in einem simulierten energetischen Modernisierungsszenario beeinflussen. Eine prototypische Webanwendung kombinierte ein IFC-basiertes Raummodell und eine LLM-basierte Erklärungskomponente sowohl in einer Desktop- als auch in einer mobilen Augmented-Reality-Umgebung (AR-Umgebung). In einer Cross-over-Studie mit 16 Teilnehmenden wurden die zwei digitalen Versionen mit einer schriftlichen Modernisierungsankündigung verglichen. Die digitalen Anwendungen erhöhten die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit, während die informationale Gerechtigkeit nur für die mobile AR-Version signifikant anstieg. Im direkten Vergleich wurde keine signifikante Überlegenheit von AR gegenüber Desktop hinsichtlich der Gerechtigkeitswahrnehmung, der Technologieakzeptanz oder der Nutzungszufriedenheit festgestellt. Die Befunde sind explorativ und belegen keine reale Akzeptanz durch die Mietenden oder eine Konfliktreduktion.

Abstract

This thesis examines whether digital communication formats affect tenants' perceived procedural and informational justice in a simulated energy-efficient modernization scenario. A prototypical web app combined an IFC-based room model and an LLM-based explanation component in both a desktop and a mobile augmented reality (AR) environment. In a cross-over study with 16 participants, the two digital versions were compared with a written modernization notice. The digital applications increased perceived procedural justice, while informational justice increased significantly only for the mobile AR version. No significant superiority of AR over desktop was found regarding justice perception, technology acceptance, or user satisfaction. The findings are exploratory and do not demonstrate real-world tenant acceptance or conflict reduction.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	V
1. Einleitung	1
1.1. Hintergrund und Motivation	1
1.1.1. Modernisierung im Mietwohnungsbestand	2
1.1.2. Innovative Technologien	3
1.2. Forschungsziel	4
1.3. Aufbau der Arbeit	4
2. Theoretische Grundlagen und Forschungsstand	6
2.1. Informationsasymmetrie bei Modernisierungsmaßnahmen	6
2.1.1. Informationsasymmetrie zwischen Vertragsparteien	7
2.1.2. Informationsasymmetrie bei Modernisierungsmaßnahmen im Miet- verhältnis	8
2.1.3. Strukturelle Verschärfung im deutschen Mietwohnungsmarkt	10
2.2. Gerechtigkeit und Mieterakzeptanz	13
2.2.1. Organisationale Gerechtigkeit	13
2.2.2. Organisationale Gerechtigkeit bei Modernisierungsmaßnahmen	14
2.2.3. Prozedurale Gerechtigkeit, informationale Gerechtigkeit und Akzeptanz	14
2.3. Innovative Technologien in der Laien-Kommunikation	16
2.3.1. Augmented Reality und kognitive Last	16
2.3.2. BIM-basierte Visualisierung in der Informationsvermittlung	17
2.3.3. LLMs in der Laien-Interaktion	19
2.3.4. Innovative Technologien und Mieterakzeptanz	20
3. Methodik	25
3.1. Studiendesign	25
3.2. Versuchsablauf	26
3.3. Hypothesenableitung	29
3.4. Stichprobe	30

3.5.	Fragebogendesign und direkte Messlogik	31
3.5.1.	Gerechtigkeit	31
3.5.2.	Technologieakzeptanz	32
3.5.3.	Usability	34
3.5.4.	Demografie	35
3.5.5.	KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score	36
4.	Softwareentwicklung	37
4.1.	Anforderungen	37
4.2.	Technologiewahl	40
4.3.	Implementierung	41
4.3.1.	Oberflächen	42
4.3.2.	Architektur	44
4.3.3.	Schnittstellen	48
4.4.	Erstellung des Raummodells	49
4.5.	Qualitätssicherung	50
5.	Ergebnisse	52
5.1.	Demografie	52
5.2.	Gerechtigkeit	53
5.3.	Technologieakzeptanz	59
5.4.	Usability	61
5.5.	KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score	63
6.	Diskussion	65
6.1.	Gerechtigkeit	65
6.1.1.	Prozedurale Gerechtigkeit	65
6.1.2.	Informationale Gerechtigkeit	67
6.2.	Technologieakzeptanz	68
6.3.	Usability	69
6.4.	Limitationen	70
6.4.1.	Studiendesign	71
6.4.2.	Messdurchführung	73
6.4.3.	Anwendung	73
7.	Fazit	75
	Literaturverzeichnis	78
A.	Anhang	91
A.1.	Hypothesen und Nullhypothesen	91

A.2. User-Flow-Diagramm	94
A.3. LLM-Qualitätstests	96
A.4. Prompttemplate	99
A.5. Beispielprompt	100
A.6. Modernisierungsankündigung	104
A.7. Vollständige Antwortstatistiken	106

Abbildungsverzeichnis

3.1.	Studienablauf	27
3.2.	Ergebnisse der A-priori-Poweranalyse	31
4.1.	Einführungstext beim Öffnen der Anwendung	42
4.2.	Screenshots derselben Oberflächen in Mobil- und Desktopansicht	43
4.3.	Screenshots diverser Oberflächen	44
4.4.	Komponentenbaum der Anwendung	45
4.5.	Abhängigkeitsgraph der Services in der Anwendung	46
4.6.	Positionierung eines digitalen Objekts auf einem Hiro-Code	49
5.1.	Ergebnisse der demografischen Fragen nach Fragenkürzel	52
5.2.	Antwortverteilung zur empfundenen Gerechtigkeit der AR-zuerst-Gruppe nach Frage und Medium	54
5.3.	Antwortverteilung zur empfundenen Gerechtigkeit der Desktop-zuerst-Gruppe	55
5.4.	Durchschnittlich empfundene Gerechtigkeit der AR-zuerst-Gruppe	55
5.5.	Durchschnittlich empfundene Gerechtigkeit der Desktop-zuerst-Gruppe . . .	56
5.6.	Technologieakzeptanz der AR-zuerst-Gruppe nach Frage und Anwendung . .	59
5.7.	Technologieakzeptanz der Desktop-zuerst-Gruppe nach Frage und Anwendung	60
5.8.	Verhältnis von Effizienz zu Effektivität	61
5.9.	Nutzungszufriedenheit nach Gruppenzugehörigkeit und Anwendung	62
5.10.	Weitere Ergebnisse nach Gruppenzugehörigkeit und Anwendung	63

Tabellenverzeichnis

3.1.	Fragenkatalog: Gerechtigkeit	33
3.2.	Fragenkatalog: Usability und Technologieakzeptanz	33
3.3.	Technische und finanzielle Kennwerte der Modernisierungsoptionen	34
3.4.	Bewertung der Modernisierungsoptionen nach Gütekriterien	35
3.5.	Fragenkatalog: Demografie	36
3.6.	Fragenkatalog: Weitere Angaben	36
4.1.	Anforderungsliste des Studienprototyps	38
5.1.	Ergebnisse der Hypothesentests zur wahrgenommenen Gerechtigkeit (H1-H2: Ankündigung vs. Anwendung)	54
5.2.	Prüfergebnisse der Varianzanalyse-Voraussetzungen	57
5.3.	Ergebnisse der Varianzanalysen	58

1. Einleitung

Dieses Kapitel führt in die Problemstellung der Arbeit ein und begründet die Relevanz einer verständlichen und gerechten Kommunikation energetischer Modernisierungen im Mietwohnungsbestand sowie das Potenzial innovativer Technologien in diesem Bereich. Darauf aufbauend wird der technologische Untersuchungsansatz, das Forschungsziel, die Forschungsfrage sowie der Aufbau der Arbeit dargestellt.

1.1. Hintergrund und Motivation

Das Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) verpflichtet Deutschland zur Reduktion von Treibhausgasen. Nach § 3 Absatz 2 KSG soll Deutschland bis zum Jahr 2045 Netto-Treibhausgasneutralität erreichen. Dieses Ziel erfordert auch im Gebäudesektor deutliche Emissionsminderungen. Aktuelle Projektionsdaten des Umweltbundesamtes (UBA) zeigen eine erhebliche Umsetzungslücke. Mit den bestehenden Instrumenten verfehlt der Gebäudesektor die kumulierten Reduktionsziele bis 2030 um rund 110 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalent [1]. Dies gefährdet ebenfalls das übergeordnete Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität für 2045. Daraus ergibt sich ein direkter Handlungsbedarf unter anderem bei der Modernisierung¹ im Gebäudebestand. Analysen des Umweltbundesamtes zeigen zudem, dass zusätzliche Einzelmaßnahmen allein nicht ausreichen. Die energetische Sanierungsrate² müsste von derzeit knapp 1 % auf mindestens 4 % steigen; zugleich müsste die Sanierungstiefe maßgeblich erhöht werden [2].

Im Mietverhältnis verteilen sich Investitionsentscheidung, Kostenbelastung, Nutzungserfahrung und Energieeinsparung häufig auf unterschiedliche Parteien. Dieses Spannungsverhältnis wird in der Literatur als Split-Incentive-Dilemma beziehungsweise Landlord-Tenant-Dilemma beschrieben [3, 4, 5]. Das Dilemma beschreibt, dass Vermietende Investitionskosten tragen, während Mietende von geringerem Energieverbrauch oder höherem Wohnkomfort profitieren, aber zugleich Modernisierungsmieterhöhungen tragen können. Energetische

¹Energetische Modernisierungsmaßnahmen sind laut § 555b des Bürgerlichen Gesetzbuches bauliche Veränderungen, durch die in Bezug auf die Mietsache Endenergie nachhaltig eingespart wird. Sofern nicht anders angegeben, bezeichnet „Modernisierung“ in dieser Arbeit energetische Modernisierungsmaßnahmen.

²Das mietrechtliche Begriffspaar „energetische Modernisierung“ wird in dieser Arbeit synonym zum bautechnischen Begriffspaar „energetische Sanierung“ verwendet.

Modernisierungen im Mietwohnungsbestand verbinden somit technische, ökonomische, rechtliche und kommunikative Anforderungen. Sie verändern bauliche Eigenschaften und berühren ebenfalls das Verhältnis zwischen Vermietenden und Mietenden.

Die vorliegende Arbeit untersucht, inwieweit innovative Technologien Mietende und Vermietende in dieser herausfordernden Situation bei der Kommunikation unterstützen können. Sie überführt technische, räumliche und rechtliche Informationen zu energetischen Modernisierungen in ein prototypisches Informationssystem und untersucht dessen Nutzung und Wahrnehmung aus der Perspektive von Mietenden. Die Arbeit verschiebt das Ausgangsproblem damit in den Bereich der Mensch-Computer-Interaktion (*human-computer interaction*). Diese befasst sich mit der Gestaltung, Implementierung und Evaluation interaktiver Computersysteme für menschliche Nutzung [6, S. 5]. Für die räumliche Informationsvermittlung knüpft die Arbeit dafür an grundlegende Einordnungen an, die reale und virtuelle Darstellungen entlang eines Reality-Virtuality Continuums verorten [7], sowie an die Charakterisierung von Augmented Reality als Verbindung realer und virtueller Inhalte mit Echtzeitinteraktion und räumlicher Registrierung [8].

1.1.1. Modernisierung im Mietwohnungsbestand

Nach § 555c des Bürgerlichen Gesetzbuchs (BGB) müssen Modernisierungsmaßnahmen den Mietenden vor Beginn angekündigt werden. Die Modernisierungsankündigung ist damit der zentrale formale Kommunikationspunkt zwischen Vermietenden und Mietenden. Sie soll Informationen über Art, Umfang, Beginn, Dauer und mögliche Folgen der Maßnahme vermitteln. In der Praxis ist die Kommunikation zwischen Vermietenden und Mietenden von Informationsasymmetrien geprägt. Vermietende, Planende oder Fachunternehmen verfügen über technische, bauliche und rechtliche Informationen, während Mietende diese häufig nur in verdichteter oder in schwer überprüfbarer Form erhalten. Die rechtlichen Regelungen zur Kostenverteilung bei Modernisierungen sind streitanfällig [9].

Diese Asymmetrie betrifft insbesondere die Qualität und Wirkung energetischer Maßnahmen. Für Mietende ist nicht zwangsläufig nachvollziehbar, welche baulichen Änderungen geplant sind und welche energetischen Effekte oder Mieterhöhungen erwartet werden können. Die Modernisierungsankündigung ist damit nicht nur ein rechtliches Informationsinstrument; sie prägt auch, wie fair Mietende das Verfahren wahrnehmen. Mit der Einschränkung, dass sie keine reale Konfliktreduktion betreibt oder tatsächliche Zustimmung in realen Modernisierungskontexten misst, knüpft diese Studie im Rahmen eines simulierten Szenarios an die im Theorieabschnitt näher erläuterten prozeduralen und informationalen Dimensionen der organisationalen Gerechtigkeit an [10]. Die prozedurale Dimension betrifft hierbei die Gerechtigkeit eines Prozesses, während die informationale Dimension die Qualität der Kommunikation durch den Entscheidungsträger beschreibt [10]. Die Studie prüft, ob eine

digitale Vermittlungstechnologie die wahrgenommene Gerechtigkeit in einem simulierten Modernisierungsszenario verändern kann.

1.1.2. Innovative Technologien

Vor diesem Hintergrund stehen diejenigen digitale Werkzeuge im Fokus, die die Vermittlung technischer Informationen visuell, interaktiv und dialogisch unterstützen. Bei Modernisierungsankündigungen ist dies insofern relevant, als bauliche Eingriffe räumliche, technische und finanzielle Informationen verbinden, die schriftlich nur begrenzt veranschaulicht sind. Konkret wird die Kombination aus Building Information Modeling, Augmented Reality und Large Language Models untersucht.

Building Information Modeling (BIM) ermöglicht die strukturierte digitale Beschreibung baulicher Objekte und ihrer Eigenschaften über den gesamten Lebenszyklus des Bauobjekts hinweg. BIM ist für diese Arbeit insofern relevant, als bauliche Veränderungen modellbasiert visualisiert und nicht nur abstrakt beschrieben werden können. Dadurch lässt sich ein technisches Modernisierungsszenario räumlich darstellen und fachfremden Akteuren verständlicher vermitteln.

Augmented Reality (AR) erweitert die physische Umgebung um digitale Inhalte. Die Rolle von AR im gegebenen Szenario ist, die geplante bauliche Veränderung mit dem analogen Wohnumfeld in Beziehung zu setzen. Aus Sicht der Cognitive Load Theory kann eine solche Darstellung insbesondere dort entlasten, wo Nutzende zweidimensionale oder textliche Informationen sonst selbst in ein räumliches Verständnis übersetzen müssten [11, 12]. AR kann jedoch je nach Anwendungsfall auch vermeidbare kognitive Last und somit eigene Behinderungen erzeugen [13, 12]. Sie wird daher nicht als überlegene Technologie vorausgesetzt, sondern als empirisch zu prüfende Vermittlungsform behandelt.

Large Language Models (LLMs) sind neuronale Netze, die aktuell üblicherweise auf der Transformer-Architektur basieren [14] und durch das Training auf großen Textmengen lernen, semantische Muster in Sprache zu erkennen und zu reproduzieren, ohne für jeden Anwendungsfall neu trainiert werden zu müssen [15]. Sie besitzen das Potenzial, technische und rechtliche Informationen dialogisch aufzubereiten und Rückfragen in natürlicher Sprache zu ermöglichen [16, 17, 18]. Für die Laienkommunikation ist hierbei besonders relevant, dass LLMs Informationen für Laien lesbarer und verständlicher machen können [19, 20].

Die in dieser Arbeit entwickelte Anwendung nutzt BIM als Modellgrundlage zur Visualisierung und als strukturierte Datengrundlage für das LLM. Das integrierte LLM ergänzt die Visualisierung um einen dialogischen Zugang zu erklärungsbedürftigen Inhalten. Gegenüber einer ausschließlich schriftlichen Modernisierungsankündigung eröffnet diese Kombination

zusätzliche Möglichkeiten der räumlichen Veranschaulichung und der interaktiven Exploration. Ob diese Funktionen tatsächlich zu einer anderen Gerechtigkeitswahrnehmung der Informationsvermittlung und des Verfahrens führen, wird nicht vorausgesetzt, sondern im Rahmen der empirischen Untersuchung geprüft.

1.2. Forschungsziel

Diese Arbeit wurde im Rahmen des Forschungsprojekts „Intelligente Modernisierungsplattform auf Basis des Funktionalen Kostensplittings“ (IntelMOD) [21] angefertigt. IntelMOD untersucht, wie eine Online-Plattform Entscheidungs- und Planungsprozesse von Modernisierungsmaßnahmen am Mietwohnungsbaubestand bestmöglich unterstützen kann. Die vorliegende Arbeit vergleicht, wie sich die wahrgenommene Gerechtigkeit aus Perspektive von Mietenden zwischen verschiedenen Vermittlungsformaten unterscheidet. Usability, im Sinne von Nutzungszufriedenheit, Effizienz und Effektivität [22], sowie Technologieakzeptanz ergänzen die Gerechtigkeitsmessung und helfen, die Bewertung der digitalen Anwendungen zu interpretieren. Damit werden wohnungswirtschaftliche und gerechtigkeits-theoretische mit Mensch-Computer-interaktionsbezogenen Perspektiven unter folgender Forschungsfrage verbunden:

Inwieweit unterscheidet sich das prozedurale und informationale Gerechtigkeitsempfinden aus der Perspektive von Mietenden zwischen schriftlicher Modernisierungsankündigung, einer Desktop-Anwendung und einer mobilen AR-Anwendung?

Zur Beantwortung der Frage wurde eine digitale Anwendung entwickelt, die ein Modernisierungsszenario anhand eines BIM-basierten Raummodells darstellt. Die Darstellung erfolgt in zwei Varianten: als Desktop-Anwendung und als mobile AR-Anwendung. Beide Varianten beabsichtigen, technische Informationen, Modernisierungsoptionen und relevante Entscheidungsparameter verständlicher aufzubereiten. Ergänzend ist ein LLM integriert, das Informationen dialogisch erklärt und damit einen niedrigschwelligen Zugang zu technischen und mietrechtlich relevanten Inhalten ermöglichen soll. Nutzende können außerdem Präferenzen und Rückmeldungen zu Modernisierungsoptionen eingeben.

1.3. Aufbau der Arbeit

Der Aufbau der Arbeit folgt der theoretischen Herleitung, der Entwicklung des Prototyps, der empirischen Untersuchung und der Diskussion der Ergebnisse. Kapitel 2 entwickelt die theoretischen Grundlagen und den Forschungsstand. Zunächst werden Informationsasymmetrien bei Modernisierungsmaßnahmen und das Split-Incentive-Dilemma im Mietverhältnis

dargestellt. Darauf aufbauend wird das Konzept organisationaler Gerechtigkeit eingeführt und auf Modernisierungsprozesse im Mietwohnkontext übertragen. Abschließend werden BIM, AR und LLMs als digitale Vermittlungstechnologien eingeordnet. Kapitel 3 beschreibt das methodische Vorgehen. Es konkretisiert den Anwendungsfall, grenzt die untersuchten Gerechtigkeitsdimensionen ein, erläutert das Cross-over-Studiendesign und leitet die Hypothesen ab. Zudem werden Versuchsablauf, Stichprobe und Fragebogendesign dargestellt. Kapitel 4 behandelt die Softwareentwicklung. Dort werden die zentralen Anforderungen an die Anwendung, die Erstellung des Raummodells, Aspekte der Qualitätssicherung sowie die Implementierung der Anwendung, insbesondere Oberflächen, Architektur und Schnittstellen beschrieben. Kapitel 5 stellt die empirischen Ergebnisse dar. Es umfasst die demografischen Angaben der Stichprobe sowie die Ergebnisse zu Gerechtigkeit, Technologieakzeptanz, Usability, KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score. Kapitel 6 diskutiert die Befunde im Verhältnis zur Forschungsfrage, ordnet sie theoretisch ein und benennt zentrale Limitationen der Studie. Kapitel 7 fasst die zentralen Ergebnisse zusammen, ordnet den Beitrag der Arbeit ein und skizziert mögliche Anschlussarbeiten.

2. Theoretische Grundlagen und Forschungsstand

Dieses Kapitel entwickelt die theoretische Grundlage der Arbeit in einem dreistufigen Aufbau. Abschnitt 2.1 beschreibt Informationsasymmetrien und ökonomische Zielkonflikte bei Modernisierungsmaßnahmen als Ausgangsproblem der Mieterkommunikation. Abschnitt 2.2 überführt diese Problemlage in die Perspektive organisationaler Gerechtigkeit und begründet, warum insbesondere prozedurale und informationale Gerechtigkeit für die mieterseitige Akzeptanz von Modernisierungsprozessen relevant sind. Abschnitt 2.3 ordnet BIM, AR und LLMs als digitale Vermittlungstechnologien in der Kommunikation zwischen Mietenden und Vermietenden ein. Im Mittelpunkt steht dabei die Frage, inwiefern diese Technologien theoretisch geeignet sind, bauliche, energetische und mietrechtlich relevante Informationen für fachfremde Akteure adressatengerechter aufzubereiten. Damit führt das Kapitel die wohnungswirtschaftliche Problemlage, den gerechtigkeitstheoretischen Bewertungsmaßstab und die untersuchte digitale Vermittlungsform zusammen. Es bildet die Grundlage für die anschließende empirische Prüfung, ob sich die wahrgenommene prozedurale und informationale Gerechtigkeit zwischen schriftlicher Ankündigung, Desktop-Anwendung und mobiler AR-Anwendung unterscheidet.

2.1. Informationsasymmetrie bei Modernisierungsmaßnahmen

Informationsasymmetrie ist ein wirtschaftswissenschaftlicher Schirmbegriff für eine Interaktion zwischen Individuen oder Organisationen, bei der eine Partei mehr oder bessere Informationen besitzt als eine andere [23]. Wird dieser Informationsvorteil ausgebeutet, kann sich die besser-informierte Partei einen Vorteil verschaffen [23]. Informationsasymmetrien beeinflussen Wettbewerbsgleichgewichte [24] und können, wie im Laufe des Kapitels dargestellt wird, im Kontext der Modernisierung des Mietwohnungsbestands Marktversagen zur Folge haben.

2.1.1. Informationsasymmetrie zwischen Vertragsparteien

Die Vertragstheorie unterscheidet klassischerweise zwischen zwei eng verwandten Folgen von Informationsasymmetrien [25], die es bei Vertragserstellung zu berücksichtigen gilt [26]. Die Adverse Selektion (*adverse selection*) erfolgt aufgrund von Informationsasymmetrie vor Vertragsabschluss. Etabliert wurde dieses Modell vor dem Hintergrund des US-amerikanischen Gebrauchtwagenmarkts, in dem Käufer (im Gegensatz zu Händlern) nur bedingt einschätzen können, ob sie im Begriff sind, einen hochwertigen oder einen minderwertigen Wagen (*lemon*) zu kaufen [27].

Im Gegensatz dazu ist das moralische¹ Risiko (*moral hazard*) das Resultat einer Informationsasymmetrie nach Vertragsabschluss. In der Versicherungswirtschaft beschreibt es den Effekt von Versicherungsanreizen auf Verhaltensweisen, die das Risiko eines Versicherungsschadens erhöhen [29]. Das Modell geht auf die Beobachtung zurück, dass eine weit verbreitete Krankenversicherung die Nachfrage nach medizinischer Versorgung steigert [30]. Dies stellt aus versicherungswirtschaftlicher Sicht ein altbekanntes Problem dar. Denn wenn der Versicherungsstatus die Nachfrage nach versicherten Diensten erhöht, verschiebt sich die optimale Versicherungsbepreisung [31]. Aufgrund ihrer Merkmale² zum Zeitpunkt des Vertragsabschlusses wird Adverse Selektion auch als *hidden information* und das moralische Risiko als Hidden-Action-Problem klassifiziert [25, 24].

Diese beiden Problemtypen lassen sich im Rahmen der Prinzipal-Agenten-Theorie einordnen, sofern zwischen Vertragsparteien eine Delegationsbeziehung besteht. In einer solchen Beziehung überträgt der Prinzipal dem Agenten Aufgaben oder Entscheidungsspielräume, deren Ausführung er nur unvollständig beobachten oder bewerten kann. Treffen divergierende Zielsetzungen und Informationsasymmetrien zusammen, entstehen Anreiz- und Kontrollprobleme: Der Agent kann über Eigenschaften, Handlungen oder Entscheidungsgrundlagen verfügen, die dem Prinzipal nicht vollständig zugänglich sind, und seine Entscheidungen daher stärker an eigenen Nutzenkalkülen als an den Interessen des Prinzipals ausrichten [32, 33]. Die Prinzipal-Agenten-Theorie bündelt damit die zuvor eingeführten Formen von *hidden information* und *hidden action* zu einem Modell vertraglicher Zielkonflikte.

¹Die Bedeutung von „moralisch“ in diesem Begriffspaar ist umstritten. Während vergangene Arbeiten in der Versicherungsliteratur das Wort nutzten, um die ethische Fragwürdigkeit der Agenten negativ zu konnotieren, bietet der historische Kontext ebenfalls eine (ökonomisch rationale [28]), subjektbezogene Entscheidungsfindung der Agenten an [29].

²In den obigen Beispielen: verborgene Eigenschaften des Gebrauchtwagens beziehungsweise verborgene Aktionen des Versicherten

2.1.2. Informationsasymmetrie bei Modernisierungsmaßnahmen im Mietverhältnis

Im Kontext von Mietverhältnissen und Modernisierungsmaßnahmen ist die Prinzipal-Agenten-Theorie nur eingeschränkt als Rollenmodell übertragbar. Mietende beauftragen Vermietende nicht im engen Sinne mit der Durchführung einer Modernisierungsleistung, und auch Vermietende beauftragen Mietende nicht allgemein mit der Erbringung einer Leistung. Die Relevanz des Modells liegt hier daher weniger in einer stabilen Zuordnung von Prinzipal und Agent, sondern in der Analyse von Situationen, in denen Entscheidungsmacht, Kosten-Nutzen-Verteilung und Beobachtbarkeit auseinanderfallen. Je nach betrachteter Informationsasymmetrie verschieben sich die rollenanalogen Positionen: Bei der Qualität und Wirkung energetischer Modernisierungen verfügen Vermietende über die Investitions- und Umsetzungsmacht, während Mietende die resultierende Dämmqualität, Einsparwirkung und Kostenumlage nur eingeschränkt beurteilen können. Beim Heizverhalten kann sich die Beobachtungsproblematik dagegen teilweise umkehren, sofern Vermietende Heizkosten tragen und das mieterseitige Nutzungsverhalten nicht vollständig beobachten können. Das Mietverhältnis wird im Folgenden deshalb nicht als einfache Prinzipal-Agent-Beziehung verstanden, sondern als Konstellation wechselseitiger hidden-information- und hidden-action-Probleme mit zum Teil entgegengesetzten Investitions- und Nutzungsanreizen.

Vor diesem Hintergrund beschreibt das sogenannte *Split-Incentive-Dilemma*, seltener auch *Landlord-Tenant-Dilemma* [3], eine zentrale Anreiz- und Informationsstruktur energetischer Modernisierungen: Vermietende tragen die Investitionskosten für energetische Maßnahmen, während Mietende primär von den resultierenden Energieeinsparungen profitieren [4, 5]. Das Phänomen wurde erstmals im Rahmen einer Fallstudie beschrieben, bei der eine bestehende Informationsasymmetrie zwischen Vermietenden und Mietenden zu weniger guter Dämmung und weniger energieeffizienten Haushaltsgeräten führte als erwartet [34].

Die Literatur unterscheidet zwei Dilemmata. Das primäre Dilemma entsteht durch Mietpreisregulierungen in laufenden Mietverhältnissen, während das sekundäre Dilemma aus der systematischen Unterbewertung von Energieeffizienz bei Neuvermietungen resultiert [3]³. Beide Dilemmata beruhen auf wechselseitigen Informationsasymmetrien.

Unsichtbarkeit der Energieeffizienz

Bei Neuvermietung ist die Effizienz des Mietobjekts für Mietende oft weder unmittelbar erkennbar noch marktübergreifend vergleichbar und kann so im Sinne obiger Definition als *hidden information* begriffen werden. In laufenden Mietverhältnissen ist die Auswirkung einer

³Da die Amortisierungsdauer einer Modernisierungsinvestition die durchschnittliche Mietdauer weit überschreitet, sind diese Dilemmata ergänzend zu verstehen.

geplanten, energetischen Sanierung (insbesondere die tatsächlich resultierende Dämmqualität des modernisierten Bauteils) für Mietende kaum einsehbar und stellt somit zum Ankündigungszeitpunkt eine zu leistende *hidden action* der Vermieterseite dar. Mietende sind aufgrund dieser Informationsasymmetrie (sowie der schwer prognostizierbaren Heizkostenentwicklung) häufig nicht bereit, für die vollen Einsparungen effizienterer Wohneinheiten zu zahlen. So können Vermietende Investitionen im Modernisierungsbereich nicht vollständig über höhere Mieten amortisieren. Dieser Wirkmechanismus führt breit belegt zu einer systematischen Unterinvestition im Modernisierungsbereich [35, 36, 37, 38]. Die der Investitionsentscheidung zugrundeliegende Informationsasymmetrie und das Split-Incentive-Dilemma lassen sich insbesondere im direkten Vergleich zwischen Vermietenden und Eigennutzenden (*homeowner*) sowie anhand des US-amerikanischen Wohnungsmarkts beobachten, in dem Vermietende weitaus häufiger die Heizkosten von Mietenden übernehmen. Verglichen mit Vermietenden, deren Mietenden die Heizkosten selbst zahlen, investieren Vermietende, die selbst die Heizkosten ihrer Mietenden tragen, eher in Energieeffizienz [37, 35]. Das Investitionsniveau von Vermietenden, die für Heizkosten zahlen, ist dabei vergleichbar mit dem Investitionsniveau von Eigennutzenden [39, 40]. Wie eine Untersuchung aus Neuseeland zeigt, ist die Konsequenz dieser Asymmetrie in Form einer signifikant geringeren Zahlungsbereitschaft (*willingness-to-pay*) kein auf Deutschland beschränktes Problem: Die Zahlungsbereitschaft von Vermietenden für eine verbesserte Isolierung liegt dort bei lediglich 50 % bis 70 % verglichen mit Eigennutzenden [41]. In Kalifornien wiesen eigengenutzte Immobilien 2003 eine um 20 % höhere Wahrscheinlichkeit für eine Dachisolierung und eine um 13 % höhere Wahrscheinlichkeit für eine Außenwandisolierung auf als Mietobjekte, bei denen Mietende die Energiekosten tragen. Gleichzeitig ist die Wahrscheinlichkeit für eine Wandisolierung um 9 % geringer, wenn Mietende für Wärme bezahlen und die Isolierung nicht perfekt beobachten können [39].

Unsichtbarkeit des Heizverhaltens

In Deutschland schätzten Daten aus 2018 von 416 befragten Vermietenden, dass ca. 17 % der Vermietenden die Heizkosten tragen, was auf ca. 3,6 Millionen Haushalte hochgerechnet werden kann [42]. Zunächst liegt die Annahme nahe, dass Vermietende, die die Heizkosten selber tragen, ein erhöhtes Interesse an energetischer Sanierung haben sollten. Schließlich beschreibt die im vorangegangenen Abschnitt dargelegte Datenlage, dass die mieterseitige Unsichtbarkeit der Energieeffizienz eine wesentliche Hürde bei der vermierterseitigen Refinanzierung der Investition darstellt. Tatsächlich entsteht in diesem Fall jedoch ein weiteres Hidden-Action-Problem: das mieterseitige Heizverhalten. Wenn Mietende keine Heizkosten tragen müssen, fällt ein starker Anreiz für energiesparendes Heizverhalten weg. Die Auswirkung dieser mangelnden Anreize auf das Mietendenverhalten ist beispielsweise für den US-Wohnsektor empirisch belegt: Haushalte, die ihre Heizkosten selbst tragen, weisen eine

um 16 % höhere Wahrscheinlichkeit auf, die Heizungseinstellungen nachts anzupassen [39]. Wenngleich das vermierterseitige Tragen der Heizkosten im Vergleich zu mieterseitig getragenen Heizkosten also zu mehr Investitionen im Modernisierungsbereich führt, betrachten erweiterte Modelle den Mietmarkt als Matching-Problem mit zweiseitigen Unbeobachtbarkeiten. Die Informationsasymmetrie über mieterseitige Charakteristika (konkret: Heizverbrauch) führt dabei wiederum vermierterseitig zu verminderten Investitionen, da Vermietende bei Verträgen, die Energiekosten enthalten, die Ansiedlung von „High-Demand“-Mietenden in effizienten Wohnungen fürchten [42].

2.1.3. Strukturelle Verschärfung im deutschen Mietwohnungsmarkt

Die spezifischen mietrechtlichen Bedingungen und Dynamiken des Mietwohnungsmarktes verschärfen das Split-Incentive-Dilemma in Deutschland. § 559 des Bürgerlichen Gesetzbuches (BGB) bestimmt, dass Vermietende Modernisierungskosten auf Mietende umlegen können. Die Höhe ist auf 8 % der jährlichen Kaltmiete gedeckelt. Gleichzeitig erhöhen die im internationalen Vergleich sehr hohe Mieterquote [43] sowie der überwiegende Anteil privater Kleineigentümer im Mietwohnungsbestand [44] die gesellschaftliche Relevanz des Problems. Durchgeführte Untersuchungen zeichnen für die ökonomischen Effekte von Modernisierungen im deutschen Mietwohnungsbestand ein gemischtes Bild, dessen Auflösung im Kontext der Arbeit mit dem informationsvermittelnden Schwerpunkt nicht geleistet werden kann. Die folgenden vier Konstellationen verdeutlichen jedoch die strukturelle Konfliktlage, in der Modernisierungskommunikation zwischen Mietparteien stattfindet.

Szenario 1: Ausbleibende Kapitalrendite

Es existieren im deutschen Wohnungsmarkt Fälle, in denen Heizkostenersparnisse die Modernisierungskosten ohne staatliche Subventionen oder ohne eine massive Kostensteigerung der Wärmeträgerpreise nicht refinanzieren können. So wurde eine vergleichsweise homogene Wohnungskohorte von ca. 8 Millionen Wohnungen untersucht, bei denen bestimmte, hocheffiziente Modernisierungen technisch nicht durchführbar sind. Für diese zwischen 1946 und 1979 in Westdeutschland erbaute Kohorte übersteigt eine Mieterhöhung um die gesetzliche Modernisierungsumlage von 8 % (im Schnitt monatlich ca. 240 € bei einer durchschnittlichen Modernisierung in einer durchschnittlichen Wohnung der Kohorte) die am freien Markt tatsächlich durchsetzbare Mieterhöhung um über ein Fünffaches [45]. Aus Vermietendensicht besteht das Problem darin, dass die durchschnittliche Modernisierung einer durchschnittlichen Wohnung dieser Kohorte circa 40.000 € kostet und eine durchschnittliche Lebenszeit von 25 Jahren hat. Die am Markt durchsetzbare monatliche Mieterhöhung von 44 € würde über die 25-jährige Lebenszeit jedoch lediglich 13.200 € zusätzliche Mieteinnahmen einspielen [45]. Aus Mietendensicht ist zugleich relevant, dass die hier angeführte durchschnittliche Modernisierung eine Energieersparnis von ca. 8.000 kWh/Jahr zur Folge hat

[45]. Bei dem in der Untersuchung angeführten, historisch niedrigen Gaspreis von 6 ct/kWh bedeutet dies eine durchschnittliche Heizkostenersparnis von jährlich 480 € beziehungsweise monatlich 40 €. Diese Summe liegt noch unter der am Mietmarkt durchsetzbaren Mieterhöhung (44,00 €). Unter diesen Annahmen wäre die Modernisierung weder aus Sicht der Vermietenden noch aus Sicht der Mietenden wirtschaftlich attraktiv.

Szenario 2: Ausbleibende Zahlungsbereitschaft für Energieeffizienz

Andere Erhebungen des Mietmarktes kommen zu dem Schluss, dass das grundlegende Problem darin liegt, dass zukünftige Mietende die durch die Modernisierungen geschaffene Energieeffizienz strukturell unterbewerten (sekundäres Split-Incentive-Dilemma) [3]. In einer Stichprobe von 844.229 Wohnungsangeboten zwischen 2014 und 2020 in Nordrhein-Westfalen war beispielsweise die Energieersparnis je nach Art des Energieausweises um einen Faktor 3 bis 7 größer als die zusätzliche Miete, die Mietende bereit waren zu zahlen [38]. Als Treiber für die massive Unterbewertung der Energieeffizienz wird neben der Marktträgheit die Qualität und Sichtbarkeit der Informationen zur Energieeffizienz (beispielsweise in Form eines Energieausweises) vermutet [3, 38]. Tatsächlich fällt die Zahlungsbereitschaft von Mietenden wesentlich höher aus, wenn es um direkt ersichtliche Ausstattungsmerkmale wie einen Balkon oder eine Einbauküche geht [36]. Eine schwedische Studie betont, dass die Mieterakzeptanz gegenüber energetischen Modernisierungen an Verbesserungen geknüpft ist, die direkt erfahrbar und sichtbar sind [46]. Eine Analyse von 12.232 Mietinseraten in Wuppertal (2012–2019) zeigte dabei: Die erzielbare Mietsteigerung für Energieeffizienz beträgt lediglich ca. 0,017 % pro jährlich verbesserter 1 kWh/m^2 [36]. Um die gleiche Marktpreisprämie wie für eine Einbauküche zu erreichen, müssten Vermietende die Energieeffizienz unrealistisch um 223 kWh/m^2 steigern [36] (zum Vergleich: eine der oben angeführten Wohnungen der extrem ineffizienten Wohnungskohorte hat einen durchschnittlichen jährlichen Energieverbrauch von 147 kWh [45]). Damit verbleibt häufig nur die Möglichkeit, die Modernisierungsinvestition durch ein Abwälzen der Kosten auf die Mietenden im laufenden Mietverhältnis zu refinanzieren (primäres Dilemma), was nicht ausreichend durch mietrechtliche Regelungen unterbunden werden kann [3]. Besonders relevant in der Wuppertal-Studie ist zudem die Erkenntnis, dass in einfachen, einkommensschwachen Wohnlagen nicht nur keine Zahlungsbereitschaft für Energieeffizienz existiert; hocheffiziente Wohnungen werden am Markt teilweise sogar mit einem Mietpreisabschlag (Penalisierung) belegt [36]. Die Rationalität und Beweggründe hinter diesen Mietpreisabschlägen blieben in der Studie explizit unsicher, wobei unter anderem Bildungsniveau und Heizkostendeckung durch Sozialleistungen als mögliche Erklärungen diskutiert werden [36].

Szenario 3: Geringe Heizkostenersparnis bei steigender Kaltmiete

In einer Feldstudie im sozialen Wohnungsbau (N = 109 Haushalte) zeigte sich, dass trotz einer Heizenergieeinsparung von 70 % mehr als die Hälfte der Haushalte durch die gestiegene Kaltmiete finanziell schlechter gestellt war [4]. Selbst unter Berücksichtigung von Energiepreissteigerungen verbleibt für ein Drittel der Haushalte eine höhere finanzielle Ge-

samtbelastung [4]. Besonders relevant ist diese Belastung für Mietende, die bereits vor einer energetischen Modernisierung sparsam heizten und deren Verbrauch unter dem theoretischen Bedarf lag. Diese werden durch die Modernisierungsumlage überproportional belastet, da ihre geringen Einsparungen die Mieterhöhung nicht kompensieren können [4]. Das Umlagesystem benachteiligt somit Haushalte mit niedrigem Ausgangsverbrauch und begünstigt solche mit hohem Verbrauch [4].

Szenario 4: Kopplung von Modernisierung und Instandhaltung

Ein weiteres Szenario entsteht, wenn ohnehin Sanierungsmaßnahmen (*Sowieso-Maßnahmen*) an einem Gebäudeteil für dessen Instandhaltung anfallen würden. Wird diese *Sowieso-Maßnahme* mit dieser Instandhaltung gekoppelt, können die Modernisierungskosten laut der Deutschen Energieagentur (dena) so weit sinken, dass energetische Maßnahmen für Vermietende und Mietende wirtschaftlich werden [47]. Dieses Vorgehen wird auch als *Kopplungsprinzip* beschrieben [47]. Die gesetzliche Modernisierungsumlage (§ 559 BGB) ermöglicht es Vermietenden auch in diesem Szenario, bis zu 8 % der *energiebezogenen Modernisierungskosten*⁴ auf die Jahresmiete umzulegen. Da die Miethöhe jedoch nicht zwingend mit Wohnwertsteigerung oder Energieeinsparung korreliert [47], kann aus Mietendensicht der Verdacht entstehen, dass Vermietende über die Modernisierungskosten hinaus *Sowieso-Kosten* auf Mietende umlagern könnten. Diese Perspektive stützt sich insbesondere auf eine unzureichende Legaldefinition der abzuziehenden „erforderlichen Erhaltungsmaßnahmen“. Gesetzlich bleibt damit unklar, welcher Teil der Modernisierungskosten tatsächlich energiebezogen ist. Dieser Umstand führt in der Praxis zu einer Variabilität der Kostenabzüge zwischen 0 % und ca. 33 %, da die Schätzung von Instandhaltungskosten oft wenig belastbar und streitanfällig ist [48]. Das Funktionale Kostensplitting [48] bietet hierfür eine Methode, mithilfe derer Bauteile anhand ihrer Funktionen (zum Beispiel baustatischer oder bauphysikalischer Merkmale) bewertet und so bei Sanierungsarbeiten der Modernisierungsanteil und der Instandhaltungsanteil trennscharf identifiziert werden können⁵.

Die Szenarien zeigen, dass sich in der Praxis ein diffuses Bild für die ökonomischen Auswirkungen von Modernisierungen auf den Mietmarkt in Deutschland ergibt. Es zeigt fehlende finanzielle Anreize in verschiedenen Szenarien sowohl auf Mietenden- als auch auf Vermietendenseite sowie unterschiedliche Interessenkonflikte zwischen den Parteien. Eine mangelhafte Informationslage verschärft das Split-Incentive-Dilemma im deutschen Mietwohnungsmarkt – wie beispielsweise durch die systematische mieterseitige Unterbewertung energetischer

⁴„Energiebezogen“ wird hier wie in der Quelle verwendet in Abgrenzung zum Instandhaltungsanteil der Modernisierungskosten [47].

⁵Das Funktionale Kostensplitting zeichnet sich dadurch aus, dass es Modernisierungsmieterhöhungen an den tatsächlichen bautechnischen Sanierungserfolg statt nur an die reinen Kosten koppelt, wodurch ökologische Alternativen für Investoren an Attraktivität gewinnen und gleichzeitig der Mieterschutz gestärkt wird. Für seinen Beitrag wurde die Dissertation, im Rahmen derer die Methode entwickelt wurde, 2020 vom BUND mit dem deutschen Forschungspreis für Nachhaltigkeit ausgezeichnet [49].

Effizienz. Im beschriebenen Kopplungsszenario können Vermietende die Informationsasymmetrie beispielsweise ausnutzen, wenn Mietende nicht wissen, dass Instandhaltungskosten nicht umlagefähig sind.

Abschnitt 2.1 zeigt, dass energetische Modernisierungen im Mietverhältnis durch asymmetrische Informationslagen, divergierende Investitions- und Nutzungsanreize sowie schwer überprüfbare Kosten- und Wirkungsannahmen geprägt sind. Für die vorliegende Untersuchung ist nicht die vollständige ökonomische Bewertung der Modernisierung entscheidend, sondern die Frage, wie diese Informations- und Verfahrensbedingungen von Mietenden wahrgenommen werden. Der folgende Abschnitt ordnet diese Problemlage daher aus Perspektive organisationaler Gerechtigkeit ein.

2.2. Gerechtigkeit und Mieterakzeptanz

Während organisationale Gerechtigkeit im Folgenden als theoretischer Bezugsrahmen eingeführt wird, ist der Begriff der Mieterakzeptanz in der Literatur nicht einheitlich definiert. Der Begriff ist mit Konstrukten wie „Akzeptanz“, „Zufriedenheit“ oder „Akzeptierbarkeit“ (*acceptability*) verwandt, die unter anderem in sozialwissenschaftlichen oder medizinischen Kontexten untersucht werden [50, 51]. Diese Arbeit versteht Akzeptanz in Anlehnung an das theoretische Rahmenmodell der Akzeptierbarkeit [50] als das Ausmaß, in dem eine Intervention als angemessen empfunden wird. Im Untersuchungsfall bezeichnet Mieterakzeptanz entsprechend die wahrgenommene Angemessenheit einer Modernisierungsmaßnahme aus Mietendensicht. Die Studie misst daher keine reale Zustimmung, Duldung oder rechtliche Akzeptanz einer tatsächlichen Modernisierungsmaßnahme, sondern Bewertungen in einem simulierten Szenario.

2.2.1. Organisationale Gerechtigkeit

Organisationale Gerechtigkeit (auch: organisationale Fairness) bezeichnet in der Arbeits- und Organisationspsychologie die *subjektiv wahrgenommene* Fairness innerhalb organisationaler Kontexte. Aus den klassischen Dimensionen der reaktiven/proaktiven und prozessbezogener/inhaltsbezogener Gerechtigkeit [52] entwickelten sich vier distinkte Dimensionen: (1) distributive Gerechtigkeit bezieht sich auf die wahrgenommene Fairness von Entscheidungsergebnissen. Sie nimmt zu, wenn die Zuteilung von Ressourcen oder Belohnungen mit impliziten Verteilungsnormen wie Gleichbehandlung (*equality*) oder Chancengerechtigkeit (*equity*) übereinstimmt [10]. (2) Prozedurale Gerechtigkeit betrifft die Fairness der Prozesse und Verfahren, die zu den Entscheidungsergebnissen führen. Sie nimmt zu, wenn Betroffene

während des Prozesses Gehör finden (*voice*), Einfluss ausüben können oder faire Prozesskriterien (wie Unvoreingenommenheit oder ethische Standards) eingehalten werden [10]. (3) Interpersonale Gerechtigkeit bezieht sich auf den zwischenmenschlichen Umgang bei der Umsetzung von Verfahren. Sie umfasst Höflichkeit, Respekt oder das Unterlassen unangebrachter Bemerkungen [10]. (4) Informationale Gerechtigkeit bezieht sich auf die Qualität der Kommunikation durch die Entscheidungsträger und beschreibt, inwiefern Erklärungen für Entscheidungen gründlich, vernünftig, zeitnah oder aufrichtig kommuniziert werden [10].

2.2.2. Organisationale Gerechtigkeit bei Modernisierungsmaßnahmen

Die Literatur zu Transitionsprozessen versteht Gerechtigkeit zunehmend interdisziplinär. Als Beispiel dafür ist das Konzept des „gerechten Wandels“ [53] (*just transition*) zu nennen [54]. Dieses verbindet Dimensionen der sozialen Gerechtigkeit (insbesondere distributive und prozedurale Gerechtigkeit) mit den umwelt-, klima-, ressourcen- oder energiebedingten Gründen für einen Wandel [54]. Auch wenn diese Zusammenführung theoretische Anschlussfähigkeit bietet, wird auf diese weitere interdisziplinäre Klammer in der methodischen Herangehensweise dieser Arbeit verzichtet. Grund dafür ist die engere methodische Ausrichtung der Untersuchung auf wahrgenommene prozedurale und informationale Gerechtigkeit in einem konkreten Kommunikationsszenario. Trotz ihres Ursprungs in der Organisationspsychologie lässt sich das etablierte Konstrukt der organisationalen Gerechtigkeit als Analysewerkzeug auf die Dynamiken von Modernisierungsprozessen im Mietwohnsektor übertragen. Die Ankündigung und Durchführung von Modernisierungen im Mietwohnkontext sind durch formale Verfahrensgestaltung (prozedurale Dimension), die konkrete Verteilung von Kosten und Nutzen (distributive Dimension), die kommunikative Umsetzung zwischen Mietenden und Vermietenden (interpersonale Dimension) sowie die Art und Weise der Informationsvermittlung (informationale Dimension) geprägt [55]. Das Modell der organisationalen Gerechtigkeit bildet somit die zentralen Elemente des Modernisierungsprozesses zwischen Mietenden und Vermietenden plausibel ab. Im Folgenden wird kurz auf die spezifische Rolle der prozeduralen und informationalen Gerechtigkeit für Akzeptanz und Ablehnung eingegangen.

2.2.3. Prozedurale Gerechtigkeit, informationale Gerechtigkeit und Akzeptanz

Prozedurale Gerechtigkeit wird nicht lediglich prozessbezogen verstanden, sondern auch zur Untersuchung von Institutionsstrukturen verwendet. So wurde die prozedurale Dimension von Gerechtigkeit beispielsweise im Rahmen einer qualitativen Fallstudie unter dem Begriff „procedural energy (in)justice“ genutzt, um zu beschreiben, wie Institutionen Bürgerinnen

und Bürger beim Zugang zu bezahlbarer Energie behandeln und wie Bürgerinnen und Bürger durch diese Beziehung ermächtigt oder entmachtet werden [56]. In einer anderen, länderübergreifenden Fallstudie zur Schnittstelle von Energiearmut in Europa und Plusenergiequartieren (*Positive Energy Districts*, kurz PEDs) wurde prozedurale Gerechtigkeit in Form von inklusiver Governance als zentrales Element identifiziert, das alle Faktoren der Energievulnerabilität durchzieht und die Basis für ein nicht-diskriminierendes und inklusives Engagement der Bewohner bildet [57]. Prozedurale Gerechtigkeit ist dabei mit Akzeptanz und Ablehnung grundlegend verknüpft. So erklären im Kontext lokaler Infrastrukturvorhaben projektbezogene Variablen (primär prozedurale Gerechtigkeit und wahrgenommene Auswirkungen) 31 % zusätzliche Varianz in der Akzeptanz, wobei die Überzeugung, dass Planungs- und Konsultationsverfahren ungerecht sind, direkt mit starkem Widerstand assoziiert ist [58]. Neben der Wahrnehmung der Gerechtigkeit ist das Vertrauen in den Projektentwickler ein entscheidender Korrelat der Akzeptanz [54]. Dies stützt Forderungen nach einer Abkehr von „Top-Down“-Entscheidungsmodi zugunsten transparenter Planungsprozesse mit höheren Partizipationsmöglichkeiten, da Öffentlichkeiten ohne authentische Partizipation und Anerkennung marginalisiert werden, was systematisch Widerstand begünstigen kann [58, 54]. Auch im arbeitswissenschaftlichen Kontext kann Partizipation den Widerstand gegenüber Veränderungen unter Mitarbeitenden reduzieren, da sie die Wahrnehmung sowohl von der prozeduralen als auch der informationalen Gerechtigkeitsdimension direkt steigert [59]. Faire Kommunikation und prozedurale Korrektheit (und organisationale Gerechtigkeit als Ganzes) sind hierbei Hebel, um Angst und Unsicherheit gegenüber Veränderungen abzubauen. Mitarbeitende können Veränderungen als unfaire Vorgänge wahrnehmen, wenn sie mögliche Vorteile nicht kennen [60]. Zudem fungiert informationale Gerechtigkeit als Prädiktor für kollektives Selbstwertgefühl und signalisiert Vertrauenswürdigkeit sowie Inklusion innerhalb eines Kollektivs [10].

Letztere Erkenntnisse unterstreichen die enge Verbindung der Gerechtigkeitsdimensionen untereinander (hier prozedural und informational). Darüber hinaus gestaltet sich diese Verwobenheit und ihr Zusammenspiel mit oben beschriebenen Informationsasymmetrien in der Realität äußerst komplex. Die Wirkrichtung stellt sich jedoch grundsätzlich wie folgt dar. In Veränderungsprozessen ist die Bereitstellung zeitnaher, akkurater und nützlicher Informationen essenziell, um Widerstände abzubauen, wobei dieser Effekt über die Wahrnehmung von prozeduraler, interpersonaler und informationaler Gerechtigkeit mediiert wird [59]. Empirische Daten belegen, dass Individuen mit einer höheren Wahrnehmung informationaler Gerechtigkeit signifikant weniger Widerstand gegen Veränderungen zeigen [59]. Falls diese Befunde auf das Verhältnis zwischen Mietenden und Vermietenden übertragbar sind, könnten prozedurale und informationale Gerechtigkeit relevante Faktoren für die Akzeptanz von Modernisierungsprozessen darstellen.

2.3. Innovative Technologien in der Laien-Kommunikation

Die in Abschnitt 2.1 beschriebenen Informationsasymmetrien und die in Abschnitt 2.2 eingeführten Gerechtigkeitsdimensionen bilden den Ausgangspunkt, um niedrigschwellige Kommunikationsformate zu prüfen. Da traditionelle, textbasierte Modernisierungsankündigungen komplexe bauliche und energetische Veränderungen oft nur unzureichend vermitteln, rücken innovative digitale Technologien in den Fokus der Laien-Kommunikation. Das nachfolgende Kapitel untersucht das Potenzial von AR sowie BIM und LLMs, um technische Daten in verständliche, transparente Informationen für fachfremde Akteure zu übersetzen. Dabei wird zunächst analysiert, wie visuelle Technologien die kognitive Verarbeitung steuern, bevor deren konkrete Integration in die Bau- und Mietwirtschaft sowie deren Einfluss auf die Mieterakzeptanz beleuchtet werden.

2.3.1. Augmented Reality und kognitive Last

In der Kognitionspsychologie wird davon ausgegangen, dass das Verstehen und besonders das Lernen von Informationen mit kognitiver Belastung verbunden ist. Die Theorie der kognitiven Belastung (*cognitive load theory*) unterscheidet dabei klassischerweise zwischen intrinsischer kognitiver Belastung (*intrinsic cognitive load*) und extrinsischer kognitiver Belastung (*extrinsic cognitive load*) [61, 62]. Während die intrinsische Belastung durch die Komplexität des Lerngegenstands bestimmt wird, wird die extrinsische Belastung durch sachfremde Gegebenheiten wie die Gestaltung von Informationsmaterial bestimmt und bindet kognitive Ressourcen, die für die Informationsaufnahme benötigt würden. Später wurden die beiden Belastungsarten noch durch die lernrelevante Belastung (*germane load*) ergänzt, welche den Aufwand des eigentlichen Verstehens und Abspeicherns der Informationen umfasst [63]. Es folgt, dass Informationen auf eine Weise präsentiert werden sollten, die keine schwere extrinsische kognitive Belastung verursacht [62].

Räumliche AR-Visualisierungen können die sachfremde (extrinsische) kognitive Belastung bei Laien senken, indem sie Nutzenden den mentalen Transfer von 2D zu 3D abnehmen. Reviews und Meta-Analysen der vergangenen Jahre weisen darauf hin, dass AR im Vergleich zu klassischen Medien überwiegend als weniger belastend wahrgenommen wird und gleichzeitig eine Steigerung der kognitiven Leistung zur Folge hat [11, 12, 64]. Dieser Effekt ist für Laien besonders stark ausgeprägt, während er bei Anwendern mit mittlerem Vorwissen (*intermediate learners*) etwas geringer ausfällt [64]. Zudem zeigt sich, dass der positive Effekt auf Leistung und kognitive Entlastung bei der Vermittlung prozeduralen Wissens (Handlungswissen) stärker als bei deklarativem Wissen (Fakten- und Sachwissen) ausgeprägt ist, wobei die Untersuchung von AR in der Mehrheit der Studien auf die Förderung prozeduraler Kenntnisse

fokussiert [11, 12]. Für prozedurale oder motorische Aufgaben, bei denen die Hände benötigt werden, reduzieren zusätzliche Integrationen wie Sprachsteuerung oder auditive Informationen die Arbeitsbelastung, Fehlerquote und Bearbeitungszeit [65]. Für die Einordnung dieser Ergebnisse ist zwischen unterschiedlichen Formen der AR-Darstellung zu unterscheiden. Bei der sogenannten Spatial Augmented Reality werden digitale Inhalte nicht über ein am Körper getragenes Display, sondern über externe Anzeige- oder Projektionssysteme in den physischen Raum eingebettet. Head-Mounted Displays (HMDs) bezeichnen demgegenüber am Kopf getragene Anzeigesysteme, etwa AR-Brillen, bei denen digitale Inhalte in das Sichtfeld der nutzenden Person eingeblendet werden. Experimentelle Vergleiche zeigen, dass solche Darstellungsformen unterschiedliche kognitive Anforderungen erzeugen können: Spatial Augmented Reality führte im Vergleich zu Head-Mounted Displays oder Monitoren zu schnelleren Reaktionszeiten und geringerem mentalen Aufwand [66]. Dieser Befund ist für die vorliegende Arbeit jedoch nur eingeschränkt übertragbar, da die untersuchte mobile Anwendung keine projektionsbasierte Spatial-AR-Lösung und kein Head-Mounted Display verwendet, sondern eine mobile AR-Darstellung über ein Smartphone. Relevanter ist daher die allgemeinere Schlussfolgerung, dass technische Anzeigeeigenschaften, insbesondere ein begrenzter sichtbarer Darstellungsbereich (*field of view*), die kognitive Belastung erhöhen können [66]. Wird die Aufgabe so gestaltet, dass relevante Inhalte vollständig im sichtbaren Bereich liegen, kann sich die kognitive Belastung dem Niveau einer monitorbasierten Darstellung annähern [66]. Der kognitive Aufwand kann zudem durch visuelle Hinweise zur Aufmerksamkeitssteuerung, 3D-Visualisierungen und eine aufgabenangemessene Gestaltung reduziert werden [11, 12].

2.3.2. BIM-basierte Visualisierung in der Informationsvermittlung

Da BIM-Modelle 3D-Informationen enthalten, können sie als Visualisierungsgrundlage dienen (*BIM-based XR*) und Informationen zugänglicher machen, wie die folgenden Beispiele belegen. So können Laien im Behördenkontext durch die Transformation von zweidimensionalen Plänen in AR-visualisierte 3D-Modelle die Auswirkungen eines Bauprojekts räumlich beurteilen und werden dazu befähigt, Bauvorhaben asynchron sowie ortsunabhängig zu prüfen [67]. BIM-zu-XR-Plattformen bieten Laien und Stakeholdern ein signifikant besseres räumliches Verständnis als konventionelle Ausführungspläne oder handgezeichnete isometrische 3D-Skizzen [68]. Die immersive gemeinsame Betrachtung von Modellen kann Missverständnisse reduzieren, die häufig im Kontext von statischen 2D-Zeichnungen oder 3D-Renderings entstehen [69]. Auch Befunde aus anderen asymmetrischen Kommunikationskontexten sprechen dafür, dass immersive Systeme das Verständnis von Laien verbessern können. Befunde aus dem medizinischen Bereich zeigen, dass der Einsatz von 3D-Modellen in VR und AR sowohl die Patientenaufklärung als auch den Prozess der informierten Zustimmung verbessert [70]. Auch wenn sich die Kontexte hinsichtlich Entscheidungsstruktur, rechtlichem Rahmen und

Risikotyp deutlich unterscheiden, stehen ebenso Patienten vor operativen Eingriffen einer ausgeprägten Informationsasymmetrie gegenüber. Ein systematisches Review von 16 Studien (N = 1067) belegt hierzu, dass VR, AR und MR-HMDs das Patientenverständnis, die Zufriedenheit und die Reduktion präoperativer Angst positiv beeinflussen [71]. Die Befunde für VR-HMDs sind dabei jedoch konsistenter als die limitierte und heterogene Literatur zu AR und MR [71] und ein Scoping Review identifizierte dabei ebenfalls eine deutlich stärkere Evidenzbasis für VR (n = 17) gegenüber AR (n = 5) [70].

Das oft gemeinsam erforschte Feld der VR- und AR-Visualisierung belegt für den Gebäudebereich, dass In-situ-Anwendungen oder schnelle Demonstrationen besonders von AR profitieren, während VR für die detaillierte Untersuchung von BIM-Parametern und vertiefende Visualisierungen in Meetings mit Laien Vorteile bietet [68]. Dieser Nutzen ist jedoch abzuwägen gegen die kognitiven Kosten der Immersion: systematische Befunde widersprechen einer pauschalen Eignung von VR für komplexe Vermittlungsprozesse. Da VR-Umgebungen Nutzende vollständig von der physischen Realität isolieren, verursachen sie häufig eine erhöhte sachfremde kognitive Belastung, was den tatsächlichen Lernerfolg insbesondere bei Laien behindern kann [64]. Für die Mieterkommunikation deutet dies darauf hin, dass die Beibehaltung des physischen Bezugsraums (wie bei AR) der vollständigen Virtualisierung (VR) vorzuziehen sein könnte. Die technologische Verteilung in der Praxis zeigt dennoch eine Präferenz für VR (52 % der untersuchten Fallstudien), insbesondere zur Erhöhung des Nutzer-Engagements [72]. Die empirische Validierung eines BIM-basierten Mixed-Reality-Systems für die interaktive Fernzusammenarbeit belegt eine signifikante Steigerung der Prozesseffizienz: Die Zeit zur Identifikation markierter Aufgaben sank durch die kollaborative Unterstützung um 85 % (von 11,88 s auf 1,82 s), während die Fehlerquote um 62 % reduziert wurde [73]. Ergänzend zeigt ein Experiment mit 38 Studierenden bei Instandhaltungsaufgaben eines Laborgebäudes, dass die Nutzung einer BIMxAR-Applikation zu einer signifikant kürzeren Aufgabenbearbeitungszeit im Vergleich zum traditionellen Ansatz führt [74]. Ein wesentlicher Befund für die Barrierefreiheit ist hierbei, dass keine Korrelation zwischen dem Vorwissen der Teilnehmenden über BIM oder AR und ihrer Leistung (Bearbeitungszeit) besteht [74]. Dies deutet darauf hin, dass die Technologie ohne umfangreiches Vorwissen effektiv von fachfremden Personen genutzt werden kann. AR-Interfaces ermöglichen zudem einen schnelleren Informationsabruf und eine Reduktion von Fehlern gegenüber traditionellen Technologien im AECO-Sektor⁶ [75]. Insbesondere gegenüber papierbasierten 2D-Dokumenten ermöglicht BIM-basierte AR einen schnelleren und informationsgestützten Zugriff auf gebäudebezogene Inhalte [74]. Nutzende können durch das Tippen auf 3D-Modelle in der AR-Umgebung direkt auf relevante Informationen in Echtzeit zugreifen, was insbesondere auch das Verständnis komplexer technischer Systeme im physischen Raum verbessert [74]. Eine Fallstudie belegt hier zudem die Machbarkeit, papierbasierte Prozesse durch BIM-basierte AR auf mobilen Endgeräten zur

⁶Architektur, Ingenieurwesen, Bauwesen und Betrieb (*Architecture, Engineering, Construction, and Operations sector*)

Steigerung von Informationsteilung und Kommunikationseffizienz zu ersetzen [76].

Obwohl AR aufgrund von Herausforderungen wie beispielsweise Lokalisierungsproblemen oder Hardwarelimitierungen in der Implementierung noch nicht als technisch ausgereift galt [75], erreichte ein markerbasierter AR-BIM-Prototyp bei der Inspektion eine Positionierungsgenauigkeit von 98,5 % und konnte virtuelle Objekte mit einer Geschwindigkeit von 15 s pro Objekt platzieren [76]. Die Erfolgsrate der Superimposition zwischen virtuellen und realen Objekten lag bei 90 % [76] und resultierte in einer Steigerung der Aufgaben-Effizienz um 40 % und einer Verkürzung der Revisionszeit um 25 % [76]. Mit einer durchschnittlichen Lernzeit von 30 Minuten und einem User-Satisfaction-Score von 95/100 wird auch hier die Nutzbarkeit für fachfremde Anwender gestützt [76]. Grundsätzlich ermöglicht die Präzision bei der Fernmarkierung und Skizzierung (durchschnittliche Abweichung von 0,31 cm) eine verlustarme visuelle Kommunikation komplexer räumlicher Informationen [73]. Mobile AR-Lösungen wie „EasyBIM“ erweitern diesen Zugang durch kostengünstige und einfach zu bedienende Schnittstellen auf Smartphones und Tablets, die Funktionen für Messungen, Datenabfrage und Kollaboration via Benachrichtigungen direkt mit dem BIM-basierten Modell verknüpfen [77]. Sensordaten (aus BIM-IoT-Modulen), die Informationen über Gebäudeperformance wie Temperatur und Feuchtigkeit sowie daraus resultierende Risikoscores enthalten, lassen sich dadurch direkt im AR-Raum visualisieren [77].

Die Integration von BIM-Informationen in AR verbessert signifikant die Transparenz und das Verständnis im Rahmen von Einreichungs- und Genehmigungsverfahren [67]. Während XR-BIM-Systeme in der Entwurfsphase primär der Steigerung der Stakeholder-Kollaboration und dem Entwurfsverständnis dienen, was eine informiertere Entscheidungsfindung ermöglicht [72], stehen in der Konstruktionsphase die Informationszugänglichkeit sowie das Mängelmanagement im Vordergrund [72]. Die AR-BIM-Integration verbessert hier die Stakeholder-Kommunikation durch den Fernzugriff auf Vor-Ort-Visualisierungen, was die Kluft zwischen Planungsbüros und Feldeinsätzen überbrückt [69]. Die Assoziation von BIM/AR-gestützten Schnittstellen mit erhöhter wahrgenommener Transparenz wird durch quantitative Risikoanalysen gestützt: Der Einsatz von XR-Technologien in Brückenbauprojekten reduzierte die notwendige Kosten-Contingency bei einem Sicherheitsniveau von 80 % von 38 % auf 24 % [68]. BIM-basierte AR gilt als Ansatz zur Verbesserung der Koordination. Die flächendeckende Einführung scheitert jedoch oft an Hardware-Limitierungen und der Modellkomplexität [69].

2.3.3. LLMs in der Laien-Interaktion

Während die Kombination von BIM und AR zur Informationsvermittlung etabliert ist, befindet sich die Integration von LLMs im Anwendungsbereich von BIM-basierten AR-Workflows aktuell noch in einer frühen Entwicklungsphase, die stark von Robotik-Anwendungsfällen geprägt ist (siehe beispielsweise [78] und [79]). Die technische Grundlage für die Fähigkeit von

LLMs, komplexe verbale Muster zu verstehen und kohärente Antworten zu generieren, bildet die Transformer-Architektur, deren Self-Attention-Mechanismus entfernte Beziehungen in der Sprache erfasst [80]. Die Integration virtueller Assistenz in AR-Anwendungen kann hier durch die Bereitstellung von Anleitungen oder Vorschlägen die Arbeitslast (*workload*) senken und zu kürzeren Aufgabendauern und besseren Lernergebnissen führen [65]. Die Integration von Erklärkomponenten birgt jedoch auch Risiken: Erklärbare KI-Ansätze verändern nachweislich die mentalen Modelle von Nutzenden nachhaltig. Erklärkomponenten machen einerseits einen Nutzen vieler KI-Ansätze aus, führen jedoch andererseits dazu, dass sich Fehlvorstellungen verfestigen und fehlerhafte Verhaltensweisen auf benachbarte Domänen übertragen können [81].

Neben klassischer Textgenerierung kann die Integration multimodaler LLM-Schnittstellen die Kommunikationsbarrieren zwischen unterschiedlichen Stakeholdern reduzieren und die Förderung von gemeinsamen Verständnissen begünstigen [82]. So konnten mit agentenbasierten Ansätzen im Kontext von 3D-Modellierungs-Workflows Diskussionen simuliert und iterative Prompts zur Generierung visueller Entwürfe erzeugt werden, die Stakeholdern mithilfe von AR präsentiert wurden [82]. Im Vergleich reduzierte dieser Ansatz die durchschnittliche Modellierungszeit bei Novizen von 30 Stunden auf 3 Stunden, bei Fachpersonen von 10 Stunden auf 2 Stunden [82]. In einem anderen Anwendungsfall ermöglichten BIM-basierte Echtzeit-Visualisierungen in AR die Darstellung von Gefahrenzonen für das Sicherheitsmanagement und den Abgleich von Ist-Zuständen mit BIM-Zeitplänen zur Qualitätssicherung [69]. Die Integration generativer KI mit strukturierten Bauprojektdaten ergänzt dieses Echtzeit-Sicherheitsmanagement durch kontextbezogene Sicherheitsprotokoll-Empfehlungen, die in Pilotprojekten eine Relevanz von 92 % erreichten und zu einer Reduktion von Sicherheitsvorfällen um 23 % führten [83].

2.3.4. Innovative Technologien und Mieterakzeptanz

Aus den zuvor dargestellten Informationsasymmetrien und Interessenkonflikten im Mietwohnungsmarkt folgt nicht, dass zusätzliche Informationen automatisch zu höherer Akzeptanz führen. Entscheidend ist vielmehr, ob Informationen verständlich, situationsbezogen und als verfahrensbezogen fair wahrgenommen werden. Informations- und Freiwilligenprogramme setzen seit langem an Marktversagen infolge unvollständiger Information an, indem sie Investitionshemmnisse durch verbesserte Informationsbereitstellung reduzieren sollen [84]⁷. Für Modernisierungsmaßnahmen bedeutet dies, dass nicht nur der Umfang der bereitgestellten Informationen relevant ist, sondern auch deren Vermittlungsform. Gerade bauliche,

⁷Teil dieser Strategie sind seit längerem auch (kosteneffiziente) Ansätze wie die verpflichtende gesetzliche Offenlegung der Energieeffizienzmaßnahmen einer Wohneinheit in Mietverträgen [39, 37, 35]. Eine diesbezügliche Pflicht ergibt sich inzwischen für den deutschen Mietmarkt grundsätzlich aus dem Gebäudeenergiegesetz.

energetische und finanzielle Folgen einer Modernisierung müssen von Mietenden häufig aus abstrakten textlichen Angaben erschlossen werden. Hier setzen BIM, AR und LLMs als digitale Vermittlungstechnologien an: BIM kann bauteilbezogene Informationen strukturiert bereitstellen, AR kann diese Informationen räumlich verorten, und LLMs können Rückfragen niedrigschwellig in natürlicher Sprache bearbeiten.

Dass die Art der Informationsvermittlung die Bewertung energetischer Modernisierungen beeinflussen kann, zeigen empirische Befunde aus dem niederländischen öffentlichen Wohnungsbau [85]. Demnach sind Mietende im Durchschnitt erst dann bereit, energetischen Sanierungen zuzustimmen, wenn die erwarteten Einsparungen bei der Energierechnung die Mieterhöhung um mindestens 30 % übersteigen. Während jedoch die Bereitstellung von Informationen über Komfortgewinne und verbesserte Wohnausstattung (hedonische Motive) die Zustimmung erhöht, führt die isolierte Betonung finanzieller Folgen paradoxerweise zu einer Reduktion der Akzeptanz [85]. Dies macht die theoretische Eignung von Technologiekombinationen wie BIM und AR (zur visuellen Vermittlung von Wohnwert- und Komfortgewinnen durch räumliches Verständnis) sowie BIM und LLMs (für einen niedrigschwelligen, dialogbasierten Informationszugang) plausibel. Außerdem bieten Befunde aus der medizinischen Kommunikation Anhaltspunkte für die theoretische Anschlussfähigkeit der Technologien. Immersive Technologien (VR und AR) werden hier zur Verbesserung medizinischer Kommunikation überwiegend positiv bewertet [70]. Diese Kommunikation ist ebenfalls durch eine grundsätzliche Informationsasymmetrie zwischen Experten (Arzt) und Laien (Patient) sowie möglichen Split-Incentives (Behandlungskosten) geprägt⁸.

Landlord-Technologien und Mieterakzeptanz

Für ein ganzheitlicheres Bild der Eignung innovativer Technologien im Kontext von Mieterakzeptanz ist jedoch noch eine weitere Betrachtung relevant. So ist das Verhältnis zwischen Mietenden und Vermietenden in der wohnungswirtschaftlichen Realität durch Machtdynamiken geprägt, welche das Beheben von Missständen erschweren und Interventionen teilweise wirkungslos machen [86]. Technologische Lösungsansätze laufen in dieser Beziehung Gefahr, mieterseitig auf Ablehnung zu stoßen. Denn wo technologische Modernisierung als Überwachungsinstrument (sogenannte „Landlord-Tech“) auftritt, kann die angestrebte Akzeptanz in aktiven Widerstand umschlagen [87]. Machtasymmetrien werden durch den Einsatz dieser „Landlord-Technologien“ (zum Beispiel Biometrie, Überwachung), welche Informationsasymmetrien gezielt als Instrument nutzen, anstatt sie abzubauen [87], verschärft. Anstatt Akzeptanz zu fördern, können Technologien dazu dienen, Mietvertragsverletzungen

⁸Wenngleich die Studienlage (insbesondere für AR) noch zu dünn ist, um eine abschließende Einschätzung treffen zu können [70] und der Einfluss der Technologien auf die intrinsische Motivation wissenschaftlich umstritten ist: Ein systematisches Review von 36 Studien stuft die Effekte als nicht schlüssig ein, was jedoch primär auf Inkonsistenzen in den Messmethoden zurückgeführt wird [64].

automatisiert zu erfassen und damit auch Räumungen zu forcieren [87]. Teil von Landlord-Technologien sind ebenfalls digitale Tools zur Risikobewertung, welche angehende Mietende als „ordinale Mietende“ kategorisieren, indem sie subjektive Aspekte auf algorithmische Messgrößen reduzieren [88]. Automatisierte Mietenden-Screening-Mechanismen verankern moralische Bewertungen in ihren Algorithmen und reproduzieren diskriminierende Verzerrungen, die vulnerablen Gruppen, wie Personen im Leistungsbezug oder Personen mit fehlender Standardbeschäftigung und einer dünnen Datenlage (*thin credit files*), überproportional vom Markt ausschließen [88]. Auch wissenschaftliche Messinstrumente wie die Erhebung einer Technologieakzeptanz stoßen hier in der Praxis an ihre Grenzen. So muss die Einwilligung von Mietenden in intrusive Datenextraktionen wie Open Banking kein Ausdruck von Technologieakzeptanz oder wahrgenommener prozeduraler Gerechtigkeit sein, sondern kann das zwingende Resultat von massiven informationellen Machtasymmetrien und dem existenziellen Druck der Wohnungssuche sein [88]. Auch vermietetseitig sind diese stark vermietetseitig ausgerichteten Instrumente nicht einheitlich erwünscht: qualitative ($N = 50$) und quantitative Daten ($N = 113$) belegen, dass britische Vermietende in der Praxis hybride Systeme präferieren, eine Automatisierungs-Skepsis aufweisen und manuelle, qualitative Kontrolle beibehalten [88].

Ohne explizite Berücksichtigung der sozialen Dimension riskieren Smart-Home-Innovationen daher, Energiearmut nicht zu reduzieren, sondern bestehende Ungleichheiten zu verschärfen [57]. In der praktischen Umsetzung von Plusenergiequartieren (*positive energy districts*), also Quartieren mit über das Jahr positiver Energiebilanz, zeigt sich: technische Dekarbonisierungsziele ersetzen oder überlagern in der Wahrnehmung professioneller Stakeholder oft die sozialen Dimensionen der Inklusivität [57]. Um wirksam zu sein, muss soziale Inklusion jedoch bereits im Entwurfsstadium von Smart-City-Konzepten⁹ verankert werden (oder im Modernisierungskontext von Mietwohnbeständen in der Planungsphase der Modernisierungsmaßnahme); eine nachträgliche Implementierung wird als problematisch und schwer steuerbar bewertet [57]. Hierbei werden interaktive Maßnahmen wie Augmented-Reality-Ausstellungszentren als innovative Werkzeuge zur proaktiven Energieberatung und zur Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern identifiziert [57].

Insgesamt verändern technologische Lösungen die Kommunikations- und Machtbeziehungen im Mietverhältnis, was im günstigsten Fall den Austausch fördern und im ungünstigsten Fall sowohl mieterseitigen als auch vermietetseitigen Interessen widersprechen kann. Grundsätzlich gilt: faire Kommunikation und prozedurale Korrektheit sind Hebel, um Angst und Unsicherheit abzubauen [60]. Für die vorliegende Arbeit folgt daraus eine wichtige Einschränkung: Die untersuchte Anwendung darf nicht als allgemeiner Beleg für die soziale Unbedenklichkeit digitaler Technologien im Mietverhältnis verstanden werden. Untersucht

⁹Das Ziel von „Smart-City-Konzepten“ ist es, Städte durch datengestützte Entscheidungen nachhaltiger und resilienter zu gestalten.

wird ein eng begrenztes, prototypisches Informationssystem, das bauliche Informationen visualisiert, Rückfragen ermöglicht und eine kommunikative Rückmeldung zu Modernisierungsoptionen abbildet. Es ersetzt keine rechtliche Beteiligung, verschiebt keine reale Entscheidungsmacht und löst keine distributiven Konflikte um Mieterhöhung, Umlagefähigkeit oder tatsächliche Energieeinsparung. Gerade deshalb ist die Unterscheidung zwischen technologischer Informationsunterstützung und tatsächlicher Verfahrensmacht zentral: Ein digitales System kann prozedurale und informationale Gerechtigkeit nur dann plausibel unterstützen, wenn es nicht primär als Kontroll- oder Selektionsinstrument erscheint, sondern als transparentes, nachvollziehbares und begrenztes Kommunikationsangebot.

Zusammenfassende Bedeutung für die Arbeit

Die direkte empirische Evidenz für die Technologiekombination (BIM, AR und LLM) in Bezug auf das Gerechtigkeitsempfinden (im Mietwohnkontext) fehlt beziehungsweise bildet die in dieser Arbeit adressierte Forschungslücke. Konzeptionelle Rahmenwerke für behördliche Bauverfahren schreiben der Kombination aus BIM und AR zwar das Potenzial zu, technische 2D-Pläne für Nicht-Experten verständlich zu visualisieren und Prozesse transparenter zu gestalten [67], verwenden jedoch keine LLM-Integration und entbehren jeglicher empirischer Messung. Eine aktuellere Arbeit [68] belegt zwar die technische Machbarkeit integrierter BIM-zu-XR-Workflows für das Monitoring durch Stakeholder und Nicht-Experten in der Infrastrukturplanung, berücksichtigt jedoch keine LLM-basierte Interaktion. Ein erstes Rahmenmodell demonstriert lediglich im Produktdesign die kombinierte Nutzung von LLMs, generativer KI und Mixed Reality (MR) zur Etablierung eines gemeinsamen Verständnisses unter Stakeholdern verschiedener Hintergründe [82].

Die Landlord-Tech-Literatur zeigt ein Spannungsfeld: während immersive, BIM- und KI-basierte Technologien das theoretische Potenzial besitzen, Informationsasymmetrien abzubauen und nicht zuletzt durch kognitive Entlastung die informationale Gerechtigkeit zu stärken, kann digitaler Wandel im Wohnungssektor mieterseitig als repressives Kontrollinstrument („Landlord-Tech“) wahrgenommen werden. Genau an dieser Schnittstelle verortet sich die vorliegende Arbeit. Es bleibt empirisch zu klären, ob ein auf Transparenz, Rückfragemöglichkeiten und kognitive Entlastung ausgerichteter Visualisierungsansatz in der Lage ist, diesen technologischen Generalverdacht zu entkräften und das prozedurale Gerechtigkeitsempfinden von Laien positiv zu beeinflussen. Die Arbeit untersucht dabei nicht, ob digitale Technologien reale Modernisierungskonflikte auflösen oder tatsächliche Zustimmung zu energetischen Sanierungen erzeugen. Die Arbeit prüft vielmehr zwei Fragen: Erstens, ob eine BIM-basierte Anwendung mit AR- und LLM-Modul in einem simulierten Modernisierungsszenario anders bewertet wird als eine schriftliche Modernisierungsankündigung. Zweitens, ob sich mobile AR- und Desktop-Darstellung hinsichtlich Gerechtigkeitsempfinden, Techno-

logieakzeptanz und Usability unterscheiden. Aus dieser theoretischen Herleitung werden im folgenden Kapitel die zentralen Untersuchungshypothesen abgeleitet.

3. Methodik

Dieses Kapitel beschreibt das methodische Vorgehen zur empirischen Beantwortung der Forschungsfrage. Dazu werden der Anwendungsfall abgegrenzt, das Cross-over-Studiendesign einschließlich der Hypothesen und des Versuchsablaufs erläutert sowie Stichprobe und Fragebogendesign dargestellt.

3.1. Studiendesign

Rechtlicher Ausgangspunkt der Forschungsfrage ist der eingangs beschriebene § 555c BGB, der Vermietende dazu verpflichtet, eine Modernisierungsmaßnahme spätestens drei Monate vor ihrem Beginn in Textform anzukündigen (Modernisierungsankündigung). Zur Beantwortung der Forschungsfrage soll die Wahl des Studiendesigns die Vergleichsmessung der empfundenen Gerechtigkeit zwischen schriftlicher Modernisierungsankündigung, Desktop-Anwendung und AR-Anwendung unterstützen. Hierzu wurde ein experimentelles Cross-over-Design (Messwiederholungsdesign) gewählt. Die Teilnehmenden werden hierbei in zwei disjunkte Sequenzgruppen eingeteilt. Beide Gruppen durchlaufen eine Untersuchung mit drei Perioden, in deren Verlauf ihnen eine traditionelle Modernisierungsankündigung (siehe Anhang A.6) sowie anschließend zwei digitale Anwendungen (eine Desktop-Anwendung und eine mobile AR-Anwendung) präsentiert werden. Die Anwendungen sind im anschließenden Kapitel ausführlich beschrieben.

Das entwickelte Design sieht dabei drei Perioden vor: Periode 1 ist für alle Teilnehmenden identisch. Hier lesen die Teilnehmenden die traditionelle, schriftliche Modernisierungsankündigung. Diese feste Sequenzierung ergibt sich aus dem mietrechtlichen Ablauf, da im realen Anwendungsfall die schriftliche Ankündigung gemäß § 555c BGB stets den ersten Berührungspunkt für die Mietenden darstellt. Die digitalen Anwendungen könnten dort über QR-Codes oder Hyperlinks im Dokument aufrufbar sein. Direkt im Anschluss an Periode 1 wird die Baseline für das Gerechtigkeitsempfinden mithilfe des in Abschnitt 3.5.1 beschriebenen Fragebogens erhoben. In den darauffolgenden Perioden 2 und 3 variiert die Reihenfolge der technologischen Interventionen systematisch nach dem Cross-over-Prinzip, um sequentielle Verzerrungen sichtbar zu machen. Nach der Interaktion mit der Anwendung in Periode 2

und Periode 3 findet eine Erhebung der abhängigen Variablen (wahrgenommene prozedurale und informationale Gerechtigkeit, Technologieakzeptanz sowie Nutzungszufriedenheit) statt.

Die Wahl dieses Cross-over-Designs bietet für die vorliegende Arbeit zwei wesentliche methodische Vorteile. Erstens erhöht das Within-Subjects-Design die statistische Power erheblich, wodurch eine deutlich geringere Anzahl an Teilnehmenden für den Nachweis von Effekten erforderlich ist als bei einem reinen Between-Subjects-Design. Zweitens erlaubt dieses Design eine differenzierte Untersuchung von Interaktionseffekten. Es lässt sich prüfen, ob sich die Bewertungen nach Nutzung beider Anwendungen verändern und ob die spezifische Reihenfolge der Mediennutzung (Carry-over- oder Lerneffekte) das Gerechtigkeitsempfinden und die Technologieakzeptanz moderiert.

3.2. Versuchsablauf

Der Versuch fand im Usability-Labor am Campus Finkenau statt. Der Raum war aufgrund seiner Geräumigkeit und großen Außenwand inhaltlich für das Szenario geeignet. Die Durchführung der Studie in Räumlichkeiten der Universität war mit der Hoffnung verbunden, Studierende niedrigschwellig als Testpersonen anwerben zu können. Der Versuchsablauf umfasste dabei vier Phasen: die administrative Vorbereitung inklusive der Baseline-Messung, die erste Interaktionsphase, die zweite Interaktionsphase sowie den formalen Abschluss der Studie. Abbildung 3.1 stellt den Ablauf schematisch dar.

Teil 1: Administrative Vorbereitung und Baseline-Messung

Zu Beginn der Untersuchung wurden die Teilnehmenden im Usability-Labor empfangen. Vor dem Start des eigentlichen Experiments erhielt die Testperson das Informationsblatt zur Studie und die Datenschutzerklärung zur Einsicht und die Einwilligungserklärung zur Unterzeichnung.

Nach der Unterzeichnung wurden die Teilnehmenden in das Szenario eingewiesen. Unabhängig von der späteren Gruppenzugehörigkeit lasen alle Teilnehmenden an dieser Stelle die traditionelle, schriftliche Modernisierungsankündigung. Unmittelbar im Anschluss knüpfte Periode 1 an: Die Testperson füllte den ersten Fragebogen aus, welcher die wahrgenommene Baseline-Gerechtigkeit bezüglich dieser rein textbasierten Ankündigung erfasste. Erst danach erfolgte die Aufteilung in die zwei disjunkten Sequenzgruppen.

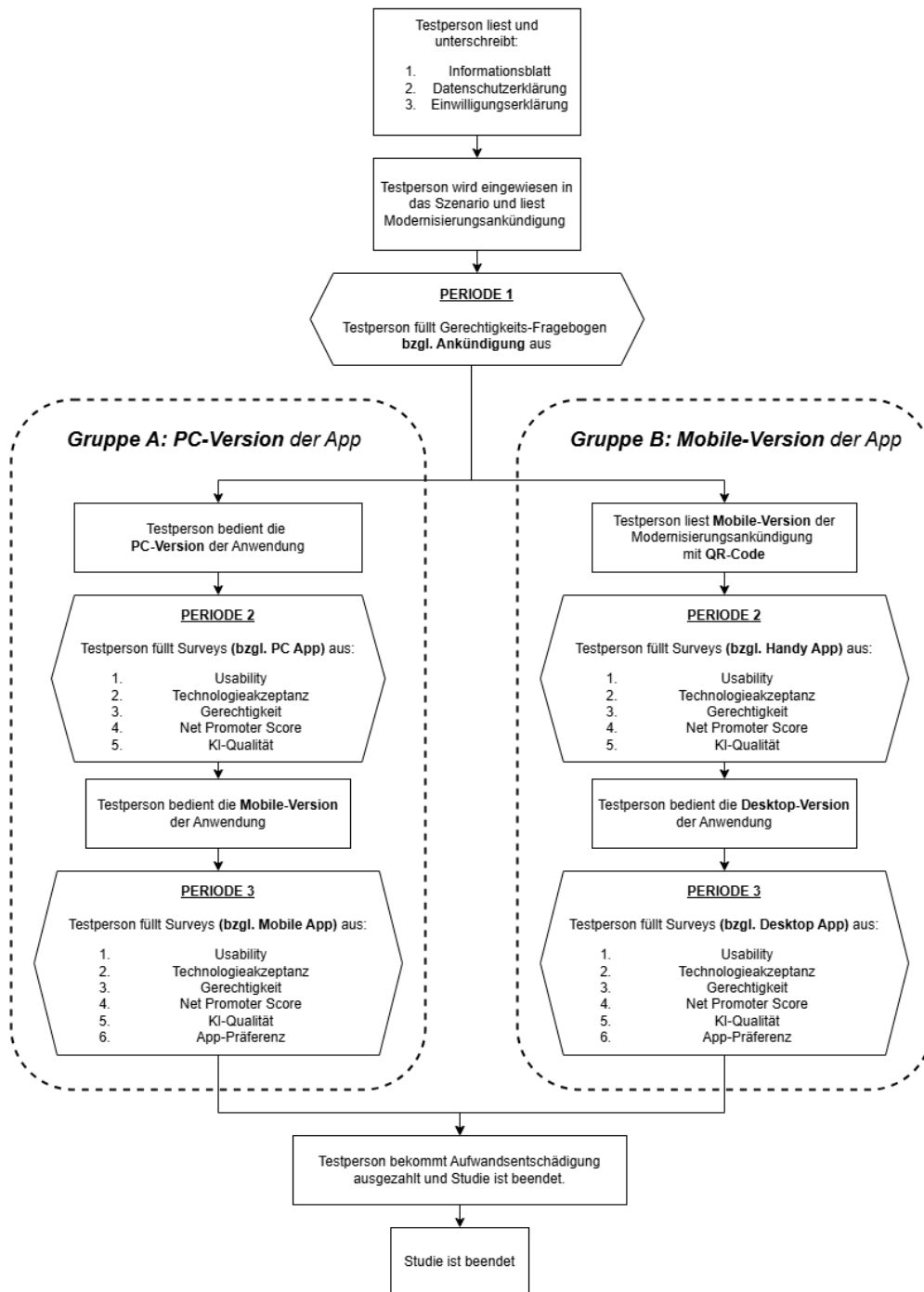


Abbildung 3.1.: Studienablauf

Teil 2: Erste Interaktionsphase (Periode 2)

In der ersten technologischen Interaktionsphase bedienten die Teilnehmenden abhängig von ihrer Sequenzgruppe die ihnen zugewiesene Erst-Anwendung:

- Teilnehmende der **Gruppe A** interagierten mit der **Desktop-Anwendung**.
- Teilnehmende der **Gruppe B** interagierten mit der **AR-Anwendung**.

Direkt nach der Nutzung füllten die Teilnehmenden den Fragebogensatz für Periode 2 aus. Dieser bezog sich auf die jeweils genutzte Anwendung (bezüglich der Desktop-Anwendung beziehungsweise bezüglich der mobilen AR-Anwendung) und umfasste die fünf Fragekategorien Nutzungszufriedenheit, Technologieakzeptanz, prozedurale und informationale Gerechtigkeit, Net-Promoter-Score (NPS)¹ und wahrgenommene KI-Qualität der generierten Inhalte. Die baseline-bereinigten Werte werden in beiden Interaktionsphasen jeweils als einfache Differenz zur Baseline-Messung berechnet.

Teil 3: Zweite Interaktionsphase (Periode 3)

Nach Abschluss der ersten Evaluation erfolgte der Medienwechsel gemäß dem Cross-over-Design:

- **Gruppe A** bediente nun die **AR-Anwendung**.
- **Gruppe B** bediente komplementär dazu die **Desktop-Anwendung**.

Direkt im Anschluss an diese zweite Nutzungsphase wurde der Fragebogensatz für Periode 3 erhoben. Die Teilnehmenden bewerteten hierbei die zweite Anwendung anhand derselben Kriterien wie in der Vorperiode (Usability, Technologieakzeptanz, Gerechtigkeit, Net-Promoter-Score und KI-Qualität). Zusätzlich wurde in dieser Periode als sechstes Element die direkte *App-Präferenz* abgefragt, um einen unmittelbaren Präferenzvergleich zwischen beiden Systemen zu erhalten.

Teil 4: Abschluss der Studie

Nachdem alle Messwiederholungen vollständig durchlaufen waren, wurde die Testphase beendet. Die Testperson erhielt die vereinbarte Aufwandsentschädigung in Höhe von 15 € bar ausgezahlt. Damit endete die Teilnahme.

¹Der NPS ermittelt anhand einer einzelnen Frage, wie viele Fürsprecher (*promoters*) und Kritiker (*detractors*) ein Produkt hat. Auf dieser Basis wird die Kundenloyalität ermittelt, die wiederum Aufschluss über das Wachstum eines Produkts gibt [89].

3.3. Hypothesenableitung

Wie im Forschungsabschnitt dargelegt, bildet die Kombination aus BIM und AR zur kognitiven Entlastung einerseits sowie LLMs zur dialogischen Erklärung andererseits das theoretische Fundament für die postulierten Effekte der Hypothesen.

Gerechtigkeit

- H1a: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (Periode 1).
- H1b: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (Periode 1).
- H2a: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (Periode 1).
- H2b: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (Periode 1).
- H3a: Es gibt einen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H3b: Es gibt einen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H4a: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H4b: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.

Die Nullhypothesen können dem Anhang [A.1](#) entnommen werden.

Technologieakzeptanz

- H5: Es gibt einen Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H6: Der Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.

Nutzungszufriedenheit

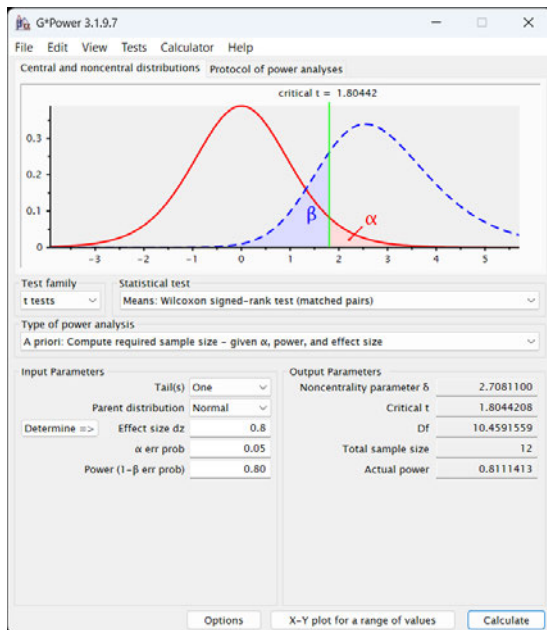
- H7: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H8: Der Unterschied in der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.

Da H1 und H2 jeweils den Vergleich zwischen der Baseline-Messung nach der schriftlichen Modernisierungsankündigung und der ersten digitalen Interaktion in Periode 2 adressieren, werden diese Hypothesen sequenzgruppenspezifisch geprüft. Für H1 werden entsprechend nur die Teilnehmenden berücksichtigt, die in Periode 2 zunächst die mobile AR-Anwendung nutzen; für H2 nur diejenigen, die in Periode 2 zunächst die Desktop-Anwendung nutzen. Die effektive Stichprobengröße dieser Tests entspricht damit jeweils der Hälfte der Gesamtstichprobe, weshalb die Ergebnisse insbesondere hinsichtlich ihrer Teststärke vorsichtig zu interpretieren sind.

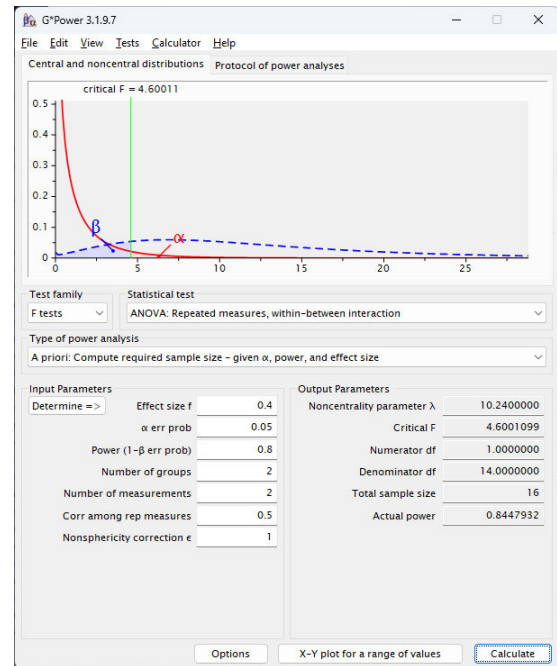
3.4. Stichprobe

Eine A-priori-Poweranalyse ergab, dass für die Studie eine Stichprobengröße von 16 Teilnehmenden erforderlich ist. Dabei wurden große erwartete Effekte angenommen, was aufgrund der fehlenden direkten Vorstudien zur spezifischen Technologiekombination als pragmatische Planungsannahme zu verstehen ist. Kleinere und mittlere Effekte können mit der gewählten Stichprobengröße nur eingeschränkt erkannt werden. Abbildung 3.2a zeigt für die gepaarten Wilcoxon-Tests (Hypothesen H1 und H2), dass bei einem erwarteten großen Effekt ($d_z = 0,8$) und einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) für eine Teststärke von mindestens 80 % eine Stichprobengröße von mindestens 12 Teilnehmenden notwendig ist. Abbildung 3.2b zeigt für die Varianzanalysen (Hypothesen H3 bis H8), dass bei einem erwarteten großen Effekt ($f = 0,4$), einem Signifikanzniveau von 5 % ($\alpha = 0,05$) und einer Power von 80 % mindestens eine Stichprobengröße von 16 Teilnehmenden erforderlich ist.

Die Teilnehmenden wurden mithilfe eines Posts im internen Moodle-Board, Print-Aushängen in der Uni sowie mündlich im Bekannten- und Arbeitskreis rekrutiert. Ihnen wurde für die



(a) Gepaarter Wilcoxon-Test (H1-H2)



(b) Gemischte Varianzanalyse (H3-H8)

Abbildung 3.2.: Ergebnisse der A-priori-Poweranalyse

circa 45 Minuten lange Studienteilnahme eine Aufwandsentschädigung in Höhe von 15 € ausgezahlt. Die Zuteilung zur Sequenzgruppe erfolgte durch alternierende Zuweisung.

3.5. Fragebogendesign und direkte Messlogik

Dieser Abschnitt beschreibt die Items der zur Erhebung verwendeten Selbstauskunfts-Fragebögen und legt die Überlegungen dar, auf deren Basis die Auswahl der Items erfolgte. Im Fall der Usability geht der Abschnitt ebenfalls auf die Messlogik hinter der direkten Messung von Effizienz und Effektivität ein.

3.5.1. Gerechtigkeit

Um die reine Medienwirkung (Desktop-Anwendung versus mobile AR-Anwendung) isoliert zu betrachten, fokussiert sich diese Arbeit bewusst auf ausgewählte Kernvariablen und grenzt sich von zwei Dimensionen der organisationalen Gerechtigkeit ab:

- Die interpersonale Gerechtigkeitsdimension wird nicht eigenständig untersucht, obwohl sie für Modernisierungskommunikation grundsätzlich relevant sein kann. Sie

würde eine gesonderte Analyse des wahrgenommenen Umgangs durch Vermietende beziehungsweise durch die Anwendung erfordern, was in der praktischen Umsetzung mutmaßlich primär auf den Vergleich textlicher Formulierungen und Designentscheidungen und auf ein angepasstes Studiendesign hinauslaufen würde. Da der Schwerpunkt dieser Studie auf Informationszugang, Verfahrenswahrnehmung und medialer Vermittlung liegt, wird diese Dimension nicht untersucht.²

- Die **distributive Gerechtigkeitsdimension** (Ergebnisgerechtigkeit) wird ebenfalls ausgespart. Diese Dimension betrifft den Interessenkonflikt zwischen Mietenden und Vermietenden, indem sie die Relation zwischen baulichem Nutzen, energetischen Effekten, Kostenbelastung und möglicher Mieterhöhung abbildet³. In der praktischen Umsetzung reduziert sie sich auf die Abwägung zwischen harten Materialeigenschaften und baurechtlichen Umlageberechnungen, die beide nicht im Fokus dieser Studie stehen. Eine belastbare Untersuchung würde ein eigenes Studiendesign unter Einbeziehung ökonomischer, bautechnischer und mietrechtlicher Bewertungen erfordern.

Um die prozedurale und informationale Gerechtigkeit zu messen, wurde eine deutsche Übersetzung [90] des Originalfragebogens [10] als Vorlage verwendet. Alle Fragen bezüglich der organisationalen Gerechtigkeit können der Tabelle 3.1 entnommen werden. Dass lediglich eine Auswahl an Fragen (drei von sieben) zur prozeduralen Gerechtigkeit aufgenommen wurde, liegt daran, dass die übrigen vier Fragen nicht ohne Bedeutungsverschiebung aus dem ursprünglichen Arbeitsorganisationskontext in den Mieterkontext übersetzt werden konnten (zum Beispiel die Frage „*Wie sehr wurde das (Vorgehen) einheitlich angewandt?*“ oder „*Wie sehr war das (Vorgehen) unvoreingenommen?*“). Wie im Original wurde bei den Fragen eine fünfstufige Likert-Skala verwendet.

3.5.2. Technologieakzeptanz

Zur Erfassung der Technologieakzeptanz wurden folgende Kategorien verwendet: Leistungserwartung, Aufwandserwartung, hedonische Motivation und Verhaltensabsicht. Die Formulierungen entstammen einer deutschen Übersetzung [91] des Fragebogens zur „Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2“ (UTAUT2) [92] und können der Tabelle 3.2 entnommen werden. Die Auswahl orientiert sich an einem auf Usability, Gerechtigkeit und Verhaltensabsicht basierenden Akzeptanzmodell (vgl. [55], S. 34). Eine Frage zur hedonischen

²Eine mögliche, an das KIMM-Forschungsprojekt angelehnte Aussage wäre hier gewesen: „Mein Vermieter hat angemessen und respektvoll mit mir kommuniziert.“ [55].

³Mögliche, aus dem KIMM-Forschungsprojekt entnommene Aussagen wären hierbei gewesen: „Die Mieterhöhung spiegelt die Vorteile, die ich durch die Modernisierung habe, angemessen wider.“ oder „Ich empfinde die Kostenaufteilung und meine daraus resultierende Mieterhöhung als fair und gerecht.“ [55].

Tabelle 3.1.: Fragenkatalog: Gerechtigkeit

Kürzel	Frage
Proz 1	<i>Wie sehr konntest Du Deine Sichtweisen und Empfindungen während der Vorhabensplanung ausdrücken?</i>
Proz 2	<i>Wie sehr hast Du Einfluss auf das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme)?</i>
Proz 3	<i>Wie sehr ist es Dir möglich, gegen das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme) Widerspruch einzulegen?</i>
Info 1	<i>Wie sehr hat Dein Vermieter sich in seinen Auskünften offen und ehrlich verhalten?</i>
Info 2	<i>Wie sehr hat Dein Vermieter das Verfahren gründlich erklärt?</i>
Info 3	<i>Wie sehr waren die Erklärungen Deines Vermieters zum Verfahren nachvollziehbar?</i>
Info 4	<i>Wie sehr hat Dein Vermieter Dir Einzelheiten rechtzeitig mitgeteilt?</i>
Info 5	<i>Wie sehr hat Dein Vermieter seine Erklärungen auf Deine persönlichen Bedürfnisse zugeschnitten?</i>

Motivation wurde explizit aus dem UTAUT2 aufgenommen, um diesen potenziellen Vorteil innovativer Technologien gezielter erfassen zu können.

Tabelle 3.2.: Fragenkatalog: Usability und Technologieakzeptanz

Kürzel	Frage
Usability	<i>Auf einer Skala von 1 bis 7 – wie zufrieden warst Du mit der Nutzung der Anwendung?</i>
Leistung 1	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Ich empfinde die Anwendung in meinem Alltag als nützlich.</i>
Leistung 2	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Die Nutzung der Anwendung erhöht meine Chancen, Dinge zu erreichen, die mir wichtig sind.</i>
Aufwand 1	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Die Anwendung zu lernen ist einfach für mich.</i>
Aufwand 2	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Meine Interaktion mit der Anwendung ist klar und verständlich.</i>
Hedonisch	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Die Anwendung zu nutzen macht Spaß.</i>
Verhalten	<i>Inwiefern stimmst du dieser Aussage zu? Ich beabsichtige, in der Zukunft auch weiterhin die Anwendung zu nutzen.</i>

3.5.3. Usability

Zur Bestimmung der Usability eines Systems werden typischerweise drei Dimensionen erhoben [22]:

- **Effektivität:** das Ausmaß, in dem die beabsichtigten Ziele erreicht werden.
- **Effizienz:** der im Verhältnis zu den Ergebnissen eingesetzte Aufwand (zum Beispiel Zeitaufwand, mentale Anstrengung oder Klicks, um das Ziel zu erreichen).
- **Zufriedenheit:** die positive Einstellung gegenüber der Nutzung des Produkts.

Sowohl die Effektivität als auch die Effizienz waren keine Schwerpunkte der Studie. Das Hauptanliegen der Studie besteht darin, eine gelungene Informationsvermittlung zu ermöglichen. Insbesondere Effizienz ist hier nur eingeschränkt relevant, da es den Mietenden auch im realen Anwendungsfall freigestellt sein soll, wie lange sie sich mithilfe der Anwendung informieren möchten. Gleichwohl kann die benötigte Bearbeitungszeit Hinweise auf Bedienhürden oder Orientierungsprobleme liefern und wird daher ergänzend erhoben. Die Effektivität war aufgrund des Untersuchungsschwerpunktes beziehungsweise des Studiendesigns nur eingeschränkt messbar. Hierzu hätte sich beispielsweise ein Interventionsstudiendesign angeboten, um die Zielerreichung direkter zu messen und sie weniger stark konstruieren zu müssen. Effektivität und Effizienz wurden ergänzend erfasst; hypothesenrelevant war nur die Nutzungszufriedenheit.

Die Effizienz wurde vereinfacht in Form der Nutzungsdauer erhoben.

Tabelle 3.3.: Technische und finanzielle Kennwerte der Modernisierungsoptionen

Maßnahme	U -Wert [W/(m ² K)]	FK-Umlage- Faktor	Mieterhöhh. [€]	Kosten [€]
Innend. Kalziumsilikat	0,25	0,70	151	27.000
Innend. Holzweichfaser	0,33	0,25	22	11.000
WDVS Mineralwolle	0,14	0,40	64	20.000
Wärmedämmputz	1,27	0,80	29	4.500
WDVS Steinwolle	0,19	0,50	124	31.000
Hohlraumdämmung	0,51	0,90	25	3.500

Die Anwendung beinhaltet einen Katalog von Modernisierungsoptionen, die als Alternativen zur geplanten Maßnahme dienen. Tabelle 3.3 zeigt diesen Katalog, inklusive der enthaltenen Kennwerte. Der Katalog wurde vom baufachlichen Verbundpartner des IntelMOD-Projekts erarbeitet. Die Auswahl der Maßnahmen sowie ihre Kennwerte sind laut Aussage des baufachlichen Verbundpartners grundsätzlich plausibel. Es wurde jedoch darauf geachtet, die

Tabelle 3.4.: Bewertung der Modernisierungsoptionen nach Gütekriterien

Maßnahme	Dämmung	Heizkosten	Mieterhöhung	Kosten
Innend. Kalziumsilikat	erfüllt	erfüllt	–	–
Innend. Holzweichfaser	erfüllt	erfüllt	erfüllt	erfüllt
WDVS Mineralwolle	erfüllt	erfüllt	knapp erfüllt	–
Wärmedämmputz	–	–	erfüllt	erfüllt
WDVS Steinwolle	erfüllt	erfüllt	–	–
Hohlraumdämmung	knapp erfüllt	knapp erfüllt	erfüllt	erfüllt

Maßnahmen sowohl durch die Auswahl als auch durch bewusst kontrastierte Werte (bezüglich Dämmfähigkeit und Kosten) für Laien möglichst unterscheidbarer zu machen. Im Laufe der Anwendung markierten Nutzende die durch sie präferierte Maßnahme aus dem Katalog und gaben anschließend Feedback an den Vermieter darüber, welche Gütekriterien ihnen bei der Wahl der Maßnahme besonders wichtig sind. Die Effektivität wurde explorativ bezüglich der Übereinstimmung zwischen diesen beiden Interaktionen gemessen. Erfüllt die vorgeschlagene Modernisierungsmaßnahme die als relevant angegebenen Gütekriterien nicht, wird davon ausgegangen, dass das Nutzerziel (Verständnis der relevanten Inhalte des Modernisierungsprozesses und Abgabe eines nachvollziehbaren Feedbacks an den Vermieter) bezüglich dieser Präferenz nicht erreicht wurde. Tabelle 3.4 zeigt für die sechs Modernisierungsoptionen, ob sie die vier Gütekriterien Dämmwirkung, Reduzierung der Heizkosten, Höhe der Mieterhöhung und Gesamtinvestitionskosten erfüllen.

Die Messung der Zufriedenheit erfolgt traditionellerweise mithilfe von Selbsteinschätzungsfragebögen wie der System Usability Scale (SUS) [93]. Der Fragenkatalog der Studie umfasst jedoch bereits viele Fragen, von denen aufgrund des Studiendesigns diverse bis zu dreimal gestellt werden. Da Usability nur ergänzend erhoben wurde, wurde auf eine vollständige SUS-Erhebung verzichtet. Es wurde daher ein Ansatz Jakob Nielsens verfolgt, der vorschlägt, eine einfache Frage zur Nutzerzufriedenheit zu stellen und aus den Antwortwerten einen Durchschnitt zu bilden [94]. Die deutsche Übersetzung der Frage kann der Tabelle 3.6 entnommen werden und basiert auf Nielsens Formulierung: „On a 1–7 scale, how satisfied were you with using this website (or application, intranet, etc.)?“ [94].

3.5.4. Demografie

Von allen Teilnehmenden wurden demografische Angaben erhoben. Die konkreten Formulierungen der Fragen sind in Tabelle 3.5 geführt. Die demografischen Daten dienen in erster Linie der Beschreibung der Stichprobe und der Einordnung ihrer Limitationen. Die Daten wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht vertiefend ausgewertet, um Aussagen über Altersgruppen oder Gruppen mit bestimmter KI- oder AR-Erfahrung treffen zu können. Aufgrund

der geringen Stichprobengröße sind differenzierte Subgruppenanalysen nach Alter, Mieterfahrung, KI-Erfahrung oder AR-Erfahrung nicht belastbar möglich. Die demografischen Angaben dienen daher ausschließlich der Beschreibung der Stichprobe und der Einordnung der Generalisierbarkeit.

Tabelle 3.5.: Fragenkatalog: Demografie

Kürzel	Frage
Alter	<i>Wie alt bist Du?</i>
AR-Nutzung	<i>Wie häufig nutzt Du Augmented Reality?</i>
KI-Nutzung	<i>Wie häufig nutzt Du digitale Assistenten oder Chatbots wie ChatGPT, Perplexity, Gemini oder Claude?</i>
Mieter	<i>Stehst Du aktuell als Mieter:in in einem Mietverhältnis?</i>
Mieter Mod	<i>Falls ja: weißt Du von einer energetischen Sanierung an Deinem angemieteten Gebäude, die während der Dauer Deines Mietverhältnisses vorgenommen wurde?</i>
Vermieter	<i>Stehst Du aktuell als Vermieter:in in einem Mietverhältnis?</i>
Vermieter Mod	<i>Falls ja: hast Du in der Vergangenheit eine energetische Sanierung an einem durch Dich vermieteten Gebäude vorgenommen?</i>

3.5.5. KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score

Zusätzlich wurde je eine Frage zur wahrgenommenen KI-Qualität, zur App-Präferenz und zum NPS erhoben. Die Angaben dienen als explorative Zusatzindikatoren zur Einordnung der hypothesenrelevanten Ergebnisse. Die Fragen sind in Tabelle 3.6 gelistet, wobei die Fragen zur KI-Qualität und zum NPS nach der Nutzung beider Anwendungen erhoben und die Frage zur App-Präferenz nach Nutzung der zweiten Anwendung gestellt wurde.

Tabelle 3.6.: Fragenkatalog: Weitere Angaben

Kürzel	Frage
KI-Qualität	<i>Wie bewertest Du die Gesamtqualität der KI-generierten Inhalte?</i>
Net Promoter	<i>Wie wahrscheinlich ist es auf einer Skala von 0 bis 10, dass Sie die Anwendung einem befreundeten Mieter weiterempfehlen würden?</i>
App-Präferenz	<i>Welche App hat Dir besser gefallen?</i>

4. Softwareentwicklung

Dieses Kapitel beschreibt die Konzeption und Entwicklung des Studienprototyps als Grundlage der empirischen Untersuchung. Das Kapitel leitet aus den Anforderungen die Technologiewahl her, beschreibt im Implementationsabschnitt Architektur, Schnittstellen und Oberflächen und schließt mit der Erstellung des BIM-basierten Raummodells und einem Abschnitt zur Qualitätssicherung.

4.1. Anforderungen

Aus dem dargelegten Forschungsinteresse und dem gewählten Studiendesign ergaben sich mehrere Anforderungen an die entwickelte Anwendung. Die Anforderungen wurden in der Zusammenarbeit mit dem IntelMOD-Forschungsteam teilweise verbundübergreifend erarbeitet. Die Entwicklung verlief inklusive der Anforderungsaufnahme iterativ, um Feedback aus dem interdisziplinären Forschungsverbund während der Entwicklung einarbeiten zu können. Die finale Liste der Anforderungen ist in Tabelle 4.1 dargestellt. Der nachfolgende Abschnitt leitet die Anforderungen her und ordnet ihre Relevanz im Kontext der Studie ein.

Der erste inhaltliche Anforderungsbereich (FR-1 bis FR-6, NFR-1, NFR-2) umfasste Vorgaben, die Mietenden eine möglichst nachvollziehbare Visualisierung des Modernisierungsszenarios ermöglichen sollten. Bauliche Maßnahmen sollten räumlich verortbar sein, anstatt nur textlich beschrieben zu werden. Dafür wurde ein 3D-Raummodell verwendet, das Modernisierungsoptionen und zugehörige technische Kennwerte räumlich darstellt. Gegenüber einer rein zweidimensionalen Darstellung bietet die 3D-Darstellung den Vorteil, dass Bauteile und Maßnahmen direkt im räumlichen Zusammenhang dargestellt und ausgewählt werden können. Diese Entscheidung ist durch die theoretische Annahme begründet, dass räumliche Visualisierungen insbesondere bei fachfremden Nutzenden die Nachvollziehbarkeit technischer Informationen unterstützen können. Als Datenbasis wurde BIM gewählt. Eine einfache 3D-Datei hätte für die reine Endnutzeransicht teilweise ähnliche Darstellungsfunktionen erfüllen können. Die Entscheidung zugunsten von BIM folgte jedoch daraus, dass die Anwendung nicht nur Geometrie visualisieren, sondern perspektivisch bauteilbezogene Informationen strukturiert an Objekte binden soll. Die Anwendung ist damit kein isolierter

Tabelle 4.1.: Anforderungsliste des Studienprototyps

Funktionale Anforderungen (FR)	
FR-1	Die Anwendung muss ein minimierbares Menü enthalten.
FR-2	Das System muss ein IFC-basiertes 3D-Modell anzeigen können.
FR-3	In der Desktop-Ansicht muss das 3D-Modell mithilfe der Maus gedreht, verschoben und vergrößert werden können.
FR-4	In der AR-Ansicht muss das Modell über die Kamera mittels eines Bildmarkers im realen Raum positioniert werden können.
FR-5	In AR müssen die digitalen Entsprechungen der analogen Raumabschnitte über Ausrichtung der Kamera einsehbar sein.
FR-6	Nutzende müssen einzelne Bauteile im digitalen Modell selektieren können. Ausgewählte Bauteile müssen visuell hervorgehoben werden.
FR-7	Nutzende müssen im Menü eine Übersicht von Modernisierungsmaßnahmen einsehen und eine Maßnahme als „präferiert“ auswählen können.
FR-8	Nutzende müssen über das Menü relevante Kriterien und präferierte Maßnahme zur Weiterleitung an den simulierten Vermieter übermitteln können.
FR-9	Das Menü muss Erklärungstexte anzeigen können.
FR-10	Nutzende müssen allgemeine sowie anwendungskontextspezifische Fragen zum Prozess, zum Modell oder zu Modernisierungsoptionen an ein LLM stellen können.
FR-11	Die Anwendung muss Nutzenden je nach erkanntem Endgerät eine angepasste Ansicht (Desktop-Layout vs. AR-Layout) bereitstellen.
FR-12	Das System muss spezifische Ereignisse in einer Logdatei speichern.
Nicht-Funktionale Anforderungen & Restriktionen (NFR)	
NFR-1	Das Menü muss Interaktionselemente (Buttons) beinhalten.
NFR-2	Die Steuerung der Benutzeroberfläche muss über das WebXR DOM Overlay auf Standard-HTML-Elementen (Bootstrap/Material) basieren.
NFR-3	Die simulierte Beteiligung darf keine rechtliche Wirksamkeit oder tatsächliche Entscheidungsmacht suggerieren.
NFR-4	Die Anfrageverarbeitung erfolgt ohne persistente Chat-Historie und mit kontrolliertem Kontext.
NFR-5	Die Benutzeroberflächen von Desktop- und AR-Variante müssen visuell und funktional weitgehend identisch sein (Mobile-First-Ansatz).
NFR-6	Die Anwendung muss browserbasiert sein.
NFR-7	Die KI-Inferenz muss über einen lokalen Ollama-Server erfolgen.
NFR-8	Schriftliche Ankündigung, Desktop und AR müssen inhaltlich äquivalent sein.
NFR-9	Der Zugang soll ohne Installation über Hyperlink oder QR-Code erfolgen.

3D-Viewer, sondern eine prototypische Schnittstelle zwischen Gebäudemodell und laienverständlicher Informationsvermittlung. BIM ist hierfür geeignet, weil geometrische, technische und bauteilbezogene Informationen in einem gemeinsamen Modellzusammenhang verarbeitet werden können. Die konkrete Umsetzung verwendet das Industry Foundation Classes (kurz: IFC)Format. IFC wurde gewählt, weil es ein offener, nicht-proprietärer Austauschstandard für BIM-Daten ist und deshalb zum prototypischen, forschungsnahen Anwendungskontext passt. Zudem eröffnet IFC Anschlussmöglichkeiten an etablierte BIM-nahe Kommunikations- und Kollaborationsformate wie das BIM Collaboration Format (BCF). Ausschlaggebend ist nicht ein vollständiger BIM-Workflow, sondern ein strukturiertes Modell für Visualisierung und Informationszuordnung. Die räumliche Visualisierung sollte nicht auf eine passive Betrachtung beschränkt bleiben. Nutzende sollten das Modell abhängig vom Endgerät navigieren, einzelne Bauteile auswählen und die zugehörigen Informationsangebote aufrufen können. Die Bedienoberfläche musste deshalb sowohl die Modellinteraktion unterstützen als auch bei Bedarf reduziert werden können, um den räumlichen Inhalt nicht dauerhaft zu verdecken.

Der zweite Anforderungsbereich (FR-7, FR-8, NFR-3) bezieht sich auf die prozedurale Beteiligung ohne rechtliche Bindungswirkung. Da der Prototyp keine reale Entscheidungsmacht verschiebt, durfte er keine rechtlich wirksame Beteiligung suggerieren, in der Mietende beispielsweise ein Mitspracherecht bei der Wahl der durchzuführenden Modernisierungsmaßnahme hätten. Gleichzeitig sollte im Studienszenario eine kommunikative Rückmeldemöglichkeit eingebunden werden. Daher wurde eine Präferenz- und Feedbackfunktion vorgesehen, über die Nutzende ihre Sichtweise auf Modernisierungsoptionen ausdrücken können. Diese Funktion ist als operationalisierter „voice“-Ansatz zu verstehen. Sie bildet im Experiment die Möglichkeit ab, eigene Präferenzen und Einschätzungen sichtbar zu machen, ohne daraus eine reale Verbindlichkeit für Vermietende abzuleiten. Dadurch wird der prozedurale Gerechtigkeitsbezug der Anwendung gestützt, ohne die Grenzen des simulierten Modernisierungsszenarios zu überschreiten.

Der dritte Anforderungsbereich (FR-9, FR-10, NFR-4) betraf die kontrollierte informationale Unterstützung. Nutzende sollten nicht nur vorstrukturierte Informationen abrufen, sondern niedrigschwellig Fragen zu Bauteilen, Kennwerten und Verfahrensaspekten stellen können. Dafür wurde ein LLM-Endpunkt in die Anwendung integriert. Das LLM dient dazu, technische und mietrechtlich relevante Informationen in eine laienverständlichere Sprache zu übersetzen. Die Komponente ersetzt keine Fach- oder Rechtsberatung, sondern dient als prototypische Erklärungsschnittstelle. Um die Kontrollierbarkeit der Antworten zu erhöhen, wurde die Dialogfunktion eingeschränkt und auf die Implementierung einer Chat-Historie verzichtet. Damit soll vermieden werden, dass frühere Dialogbeiträge den Antwortkontext zunehmend verschieben und so die Einhaltung der vorgegebenen Instruktionen erschweren.

Ein vierter Anforderungsbereich (FR-11, FR-12, NFR-5 bis NFR-9) ergab sich bezüglich der experimentellen Vergleichbarkeit und technischen Zugänglichkeit. Neben den inhaltlichen

Funktionen musste die Anwendung Anforderungen erfüllen, die sich unmittelbar aus dem experimentellen Studiendesign ergaben. Unterschiede zwischen schriftlicher Ankündigung, Desktop-Anwendung und mobiler AR-Anwendung sollten möglichst auf die jeweilige Vermittlungsform zurückzuführen sein und nicht auf unterschiedliche Informationsinhalte oder Funktionsumfänge. Die digitalen Varianten mussten deshalb auf verschiedenen Endgeräten angepasste, aber funktional weitgehend äquivalente Oberflächen bereitstellen. Eine browserbasierte Bereitstellung sollte den direkten Zugang ohne vorherige Installation ermöglichen. Die lokale Ausführung des LLM-Moduls und die Aufzeichnung definierter Systemereignisse dienten zusätzlich der technischen Kontrollierbarkeit und der Nachvollziehbarkeit des Versuchsablaufs.

4.2. Technologiewahl

Die Anwendung wurde als browserbasierte Web-Anwendung umgesetzt. Eine native App hätte grundsätzlich einen direkteren Zugriff auf gerätespezifische Funktionen erlauben können. Für den vorliegenden Anwendungsfall überwogen jedoch die Vorteile einer Web-Lösung. Erstens lässt sich eine Web-Anwendung über einen QR-Code¹ oder Hyperlink direkt in eine Modernisierungsankündigung einbinden. Zweitens ermöglicht sie eine einheitlichere technische Basis für Desktop- und mobile Nutzung, was für den Vergleich der beiden Varianten relevant ist. Drittens ist die browserbasierte Umsetzung mit einer künftigen, webbasierten IntelMOD-Projektplattform kompatibel. Schließlich wird für webbasierte AR-Anwendungen angenommen, dass der Verzicht auf eine vorherige Installation die Nutzungsbarriere senkt.

Für die mobile AR-Darstellung wurde WebXR gegenüber nativen AR-Frameworks wie ARCore priorisiert. Diese Entscheidung folgt aus der übergeordneten Browserstrategie. WebXR erlaubt die Einbindung immersiver beziehungsweise augmentierter Darstellungen im Browser und unterstützt damit die angestrebte mediale Kontinuität zwischen Desktop- und mobiler Variante. ARCore wäre als native Alternative stärker an bestimmte Plattform- (insbesondere Android) und App-Strukturen (insbesondere Google Chrome) gebunden gewesen. Diese Plattformbindung widersprach dem Ziel eines direkt zugänglichen Studienprototyps. Die räumliche Ausrichtung des Modells sollte dabei möglichst einfach erfolgen. Deshalb wurde eine markerbasierte Ausrichtung über einen Hiro-Code vorgesehen. Diese reduziert die Notwendigkeit manueller Kalibrierungsschritte und verbindet zugleich den Einstieg in die Anwendung mit dem Dokument beziehungsweise dem konkreten Modernisierungsszenario.

Die Entscheidung für AR gegenüber VR ergibt sich aus dem Anwendungsfall. Während VR eine vollständig virtuelle Umgebung erzeugt, bleibt bei AR der physische Bezugsraum erhalten. Für die Mieterkommunikation ist dieser Bezug relevant, weil bauliche Veränderungen

¹Der QR-Code kann gleichzeitig als Hyperlink und als Positionierungswerkzeug dienen.

gerade im Verhältnis zum realen Wohnraum beziehungsweise zum konkreten Raummodell verständlich gemacht werden sollen. VR wäre für vertiefende Modellinspektionen denkbar, setzt aber im realen Anwendungsfall unrealistische Hardwareanforderungen voraus und reduziert den physischen Raumbezug. Die Anwendung wurde deshalb so konzipiert, dass AR als mobile Variante und eine Desktop-Ansicht als nicht-immersive Vergleichsvariante untersucht werden können.

Für die technische Umsetzung der 3D-Darstellung wurde Three.js verwendet. Three.js stellt eine verbreitete JavaScript-Bibliothek zur Darstellung interaktiver 3D-Szenen im Browser bereit. Gegenüber einer stärker umfassenden Engine wie BabylonJS wurde Three.js für diesen Prototyp als ausreichend und vergleichsweise leichtgewichtig bewertet, da Gameengine-Kernkomponenten wie Physik- oder Audio-Engines nicht benötigt wurden. Ein weiterer Grund für die Wahl war die Kompatibilität mit den verwendeten ThatOpen-Elementen. ThatOpen/Components wurde eingesetzt, um IFC-basierte Modelle und BIM-nahe Standardfunktionen nicht vollständig eigenständig implementieren zu müssen. Eine Eigenentwicklung des generischen Mappings von IFC-Daten auf 3D-Objekte wäre für den Studienprototyp unverhältnismäßig gewesen. Die Nutzung vorhandener Komponenten erleichtert zudem eine perspektivische Erweiterbarkeit über den unmittelbaren Untersuchungsfall hinaus.

Für die Einbindung des LLM-Moduls wurde Ollama als niedrigschwelliges und lokal einbindbares Inferenz-Framework gewählt. Ausschlaggebend war hierbei nicht die Skalierbarkeit, sondern die kontrollierbare Einbindung eines lokalen LLM-Workflows. Spezialisierte Inferenzsysteme wie vLLM wären für Szenarien mit höheren Skalierungs- oder Durchsatzanforderungen denkbar, waren für den Studienprototyp jedoch nicht erforderlich. Entscheidend war, dass das LLM-Modul im Rahmen der Anwendung kontrolliert und datenschutzkonform angesprochen werden kann. Der Inferenzserver befand sich im selben Netzwerk wie die im Versuch bedienten Endgeräte.

4.3. Implementierung

Dieser Abschnitt beschreibt die Implementierung des vorab konzipierten Studienprototyps. Die Oberflächen werden bezüglich ihrer Bedeutung für die Studiendurchführung beschrieben; besonders relevant war hier die Vergleichbarkeit zwischen den Endgeräten. Anschließend erfolgt die technische Beschreibung des Gesamtsystems mit einer Dokumentation der Architektur und den relevantesten Schnittstellen. Die iterative Entwicklung und Versionierung folgte dem GitFlow-Workflow. Das zur Modellierung des Userflows genutzte Diagramm kann dem Anhang [A.2](#) entnommen werden.

4.3.1. Oberflächen

Die Oberflächen der Anwendung wurden so konzipiert, dass die App zwischen Desktop und AR möglichst ähnlich und damit möglichst vergleichbar ist. Da die Bildschirmgrößen sich zwischen den Endgeräten sehr unterschieden, wurde ein Mobile-First-Ansatz verfolgt und die Oberflächen so schlicht wie möglich gehalten. Die Benutzeroberfläche wurde mehrfach umgeschrieben, um die dynamische Anzeige und interaktivere Elemente zu unterstützen. Zunächst wurde die Three.js-basierte Bibliothek „three-mesh-ui“ [95] verwendet, um neben Desktop und mobilem Endgerät auch Headsets zu unterstützen. Nachdem die Anforderung der Headset-Unterstützung aus einer früheren Iteration der Anwendung entfiel, konnte die WebXR DOM Overlays API [96] genutzt werden. Diese API erlaubt die Einbindung eines HTML-basierten Overlays in die AR-Szene, sodass CSS Media Queries zur dynamischen Anpassung der Benutzeroberfläche an die Bildschirmseigenschaften des Endgeräts verwendet werden konnten.

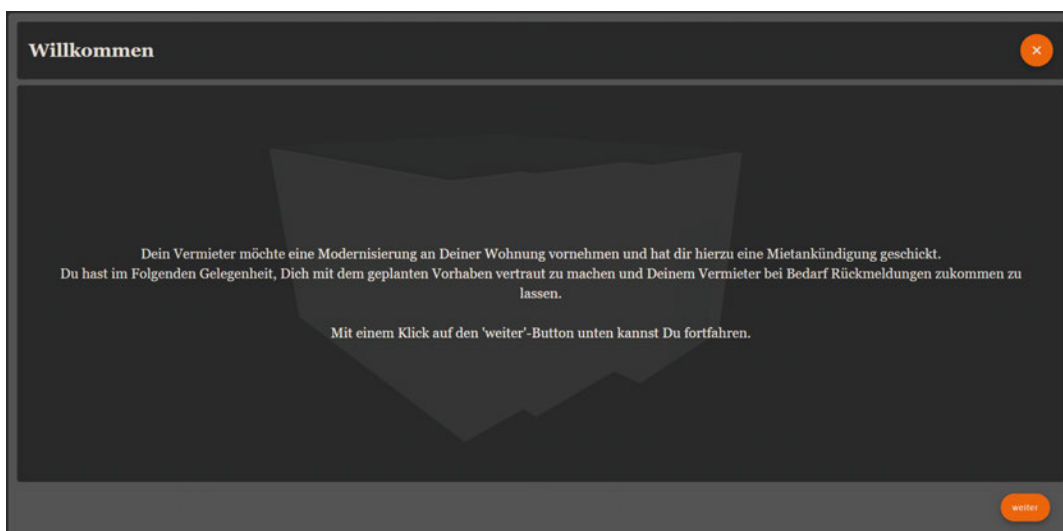
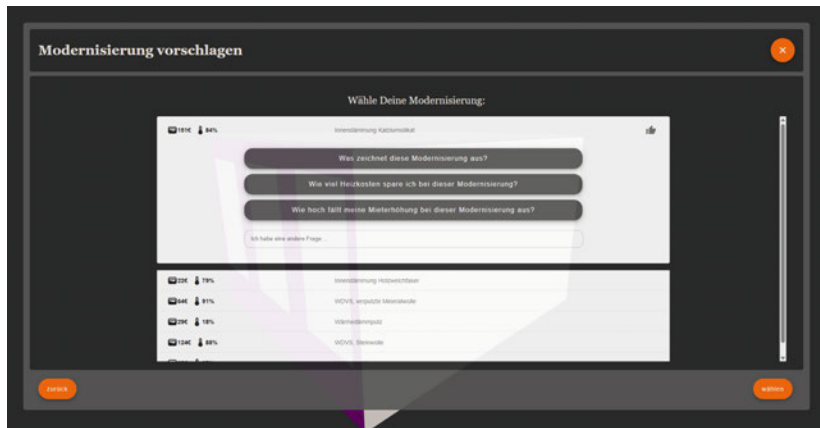


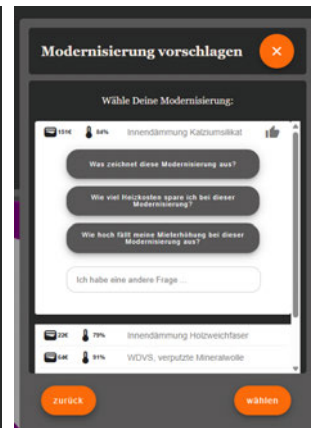
Abbildung 4.1.: Einführungstext beim Öffnen der Anwendung

Mithilfe des Overlays konnten neben statischen Informationen (siehe beispielsweise Abbildung 4.1) auch interaktive Elemente dargestellt werden. Da das Overlay im Gegensatz zu vorherigen Implementierungen (bei denen Buttons noch mithilfe von Raycasts manuell implementiert werden mussten) auf HTML basierte, waren Standard-Elemente wie Buttons, Checkboxes oder Formulare direkt vorhanden und ließen sich mit Bibliotheken für Benutzeroberflächen (Bootstrap und Material) im Design niedrigschwellig anpassen.

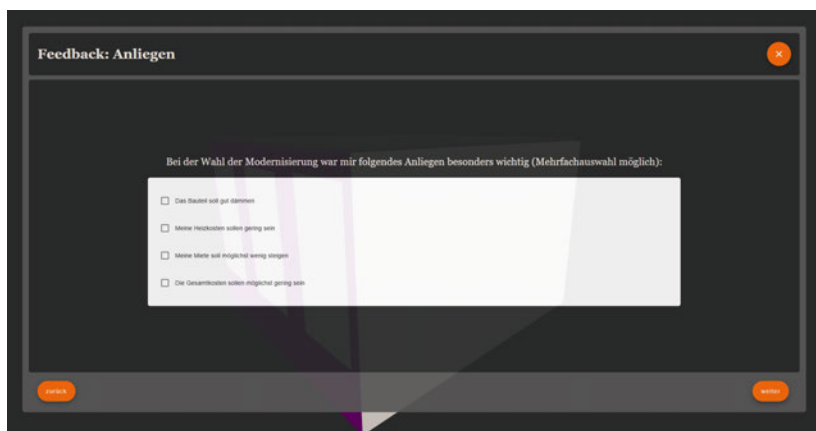
Dadurch konnten Mobil- und Desktop-Ansicht funktional und visuell weitgehend identisch umgesetzt werden. Die verfolgte Mobile-First-Strategie sicherte die Darstellbarkeit am mobilen (schmalere) Endgerät, während die identische Darstellung am größeren Endgerät



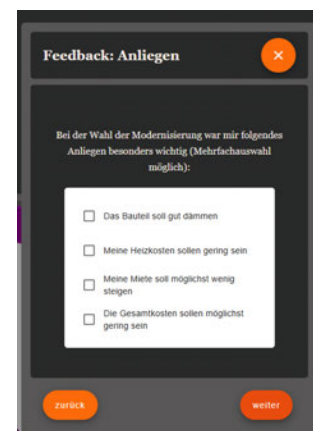
(a) Maßnahmen (Desktop)



(b) Maßnahmen (AR)



(c) Präferenzen (Desktop)



(d) Präferenzen (AR)

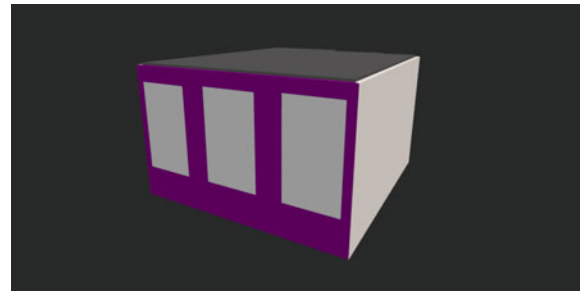
Abbildung 4.2.: Screenshots derselben Oberflächen in Mobil- und Desktopansicht

übernommen werden konnte, wie die Abbildungen in 4.2 zeigen. Die oberen beiden Abbildungen 4.2a und 4.2b zeigen die Übersicht der möglichen Maßnahmen, welche Nutzende auswählen und zu denen sie Fragen stellen können. Da der Prompt um den Zustand der Anwendung kontextuell angereicht wird, enthält er Informationen darüber, welche Modernisierungsmaßnahme aktuell betrachtet wird. So sind hier direkte Fragen wie beispielsweise „Was zeichnet diese Modernisierung aus?“ möglich. Mit einem Klick auf „wählen“ wird die aktuell betrachtete Maßnahme als präferierte Maßnahme gespeichert. In der angezeigten Ansicht (untere beiden Abbildungen in 4.2) informieren Teilnehmende ihren Vermieter im simulierten Szenario über die für sie relevanten Kriterien und die präferierte Maßnahme.

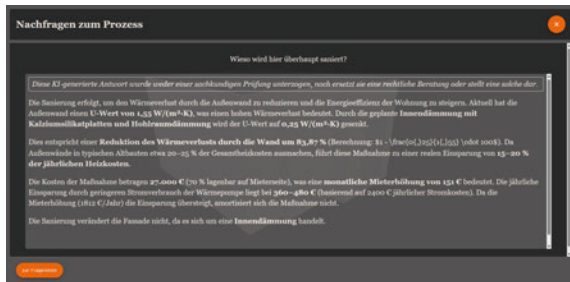
Weitere Ansichten sind in Abbildung 4.3 dargestellt. Abbildung 4.3a zeigt die Ansicht, die Nutzenden direkt nach der Einführungsansicht (vergleiche Abbildung 4.1) gezeigt wird und mithilfe derer Nutzende dem LLM Nachfragen zum Prozess stellen können. Dieselbe Ansicht öffnet sich auch mit bauteilspezifischen Fragen, wenn ein Bauteil des Raummodells



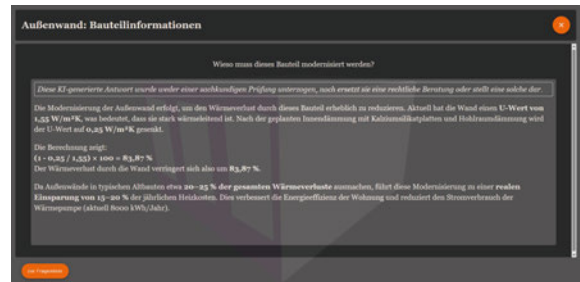
(a) Frage zum Prozess



(b) Raummodell



(c) Gebäudebezogene Antwort



(d) Bauteilbezogene Antwort

Abbildung 4.3.: Screenshots diverser Oberflächen

ausgewählt wird. Abbildung 4.3b zeigt diese hierzu verwendete 3D-Ansicht des visualisierten Gebäudemodells. In der Desktop-Ansicht kann das Modell mit der Maus gedreht, vergrößert und verschoben werden. In der mobilen AR-Ansicht können Nutzende durch Ausrichten der Kamera den jeweiligen Modellbereich räumlich verortet betrachten. Das violett hervorgehobene Bauteil ist dabei die zu modernisierende Außenwand des Raums. Abbildungen 4.3c und 4.3d zeigen die Ansicht zu zwei beispielhaften LLM-Antworten.

4.3.2. Architektur

Nachfolgend wird die Architektur anhand ihrer Komponenten, Services und Konfigurationsdateien dargestellt.

Komponenten

Zur Organisation des Codes wurde das Webframework Angular verwendet. Angular nutzt unter anderem Komponenten, um einzelne und gegebenenfalls wiederverwendete Teile der Anwendung zu kapseln. Eine Komponente besteht dabei typischerweise aus einer Template-Datei (HTML), einer Style-Datei (CSS beziehungsweise SCSS), einer Logikdatei (TypeScript) sowie einer Unit-Test-Datei (TypeScript).

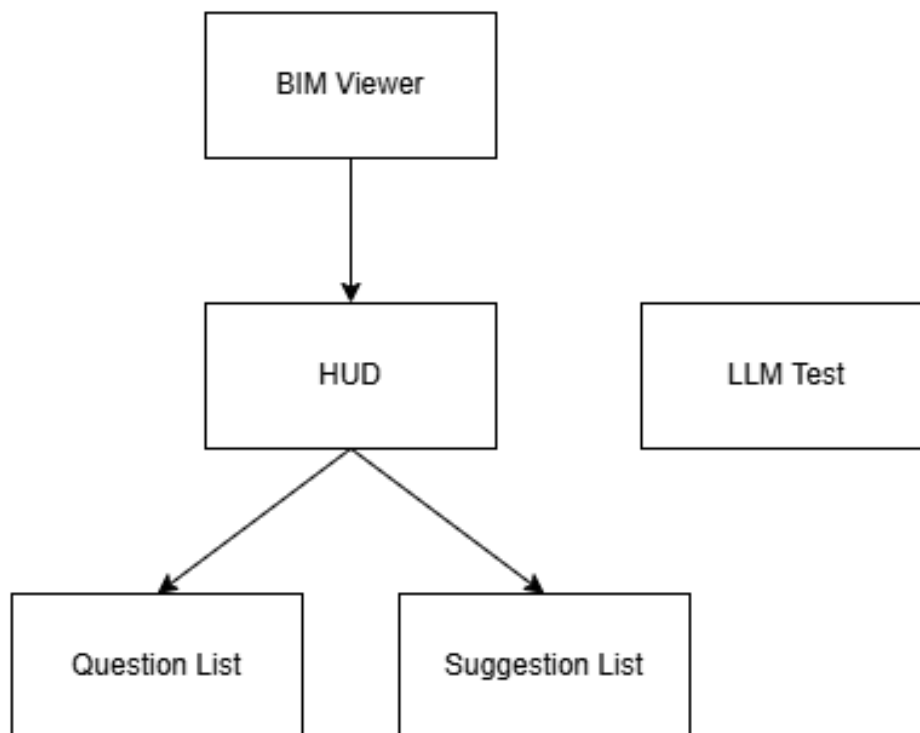


Abbildung 4.4.: Komponentenbaum der Anwendung

Anmerkung: Die Beziehungen zeigen in Richtung der Kind-Komponente (zum Beispiel: die HUD-Komponente bindet die „Question List“-Komponente ein).

Abbildung 4.4 zeigt die in der Anwendung verbauten Komponenten sowie ihre Beziehung zueinander. Erst das HTML-Overlay ermöglichte die Nutzung templatebasierter Angular-Komponenten für die Benutzeroberfläche. Andernfalls hätte die Benutzeroberfläche wie in frühen Iterationen vollständig in TypeScript erstellt werden müssen.

Services

Der Großteil der Anwendung besteht aus Template-unabhängiger Logik, weshalb auch die Anzahl der in Abbildung 4.4 dargestellten Komponenten vergleichsweise gering ausfiel. Diese wird in Angular klassischerweise mithilfe von Services modelliert. Die Kommunikation zwischen diesen Services läuft über Signale, wobei Referenzen über Angulars Dependency Injection-System bereitgestellt werden. Abbildung 4.5 gibt einen Überblick über alle in der Anwendung verwendeten Services sowie ihre Beziehung zueinander. Zur zentralen

Verwaltung des Anwendungszustands wurden die Services als Singletons umgesetzt, die in Angular über den `'providedIn: root'`-Wert niedrigschwellig einbindbar sind.

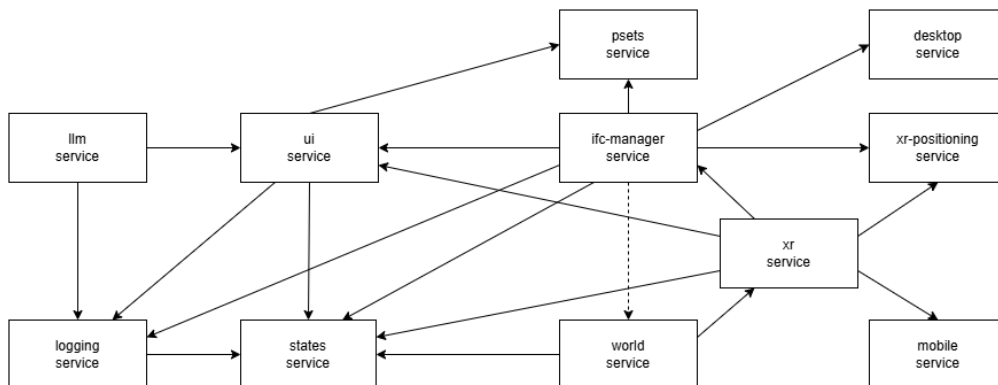


Abbildung 4.5.: Abhängigkeitsgraph der Services in der Anwendung

Anmerkung: Die Pfeile zeigen vom abhängigen Service zum injizierten Service (zum Beispiel: der LLM-Service injiziert den Logging-Service und den UI-Service). Um zirkuläre Abhängigkeiten zu vermeiden, wird der World-Service nicht über Angulars Dependency-Injection an den IFC-Manager übergeben, sondern manuell nach der Instanziierung aller Services.

Die Services erfüllen folgende Funktionen:

- **UI-Service:** verwaltet Zustände und Logik der Benutzeroberfläche
- **LLM-Service:** erstellt die verschiedenen Prompt-Kategorien und sendet den Prompt an den Inferenz-Server (Ollama)
- **Desktop- und Mobile-Service:** verwalten die gerätespezifischen Implementationen der Raycast-Logik für die Bauteilauswahl
- **IFC-Manager-Service:** verwaltet die Logik rund um den IFC-Viewer
- **PSets-Service:** implementiert diverse Methoden zum Auslesen, Erstellen und Anpassen von Property Sets des IFC-Modells
- **XR-Service:** erstellt und verwaltet die XR-Szene
- **XR-Positioning-Service:** beinhaltet Logik zur Positionierung des Gebäudemodells in AR mittels Hiro-Code
- **States-Service:** verwaltet globale Zustände, darunter die aktuelle Ansicht und den verwendeten Gerätetyp

- **Logging-Service:** zuständig für die Aufzeichnung der Logdaten und Erstellung der CSV-Logdatei. Dabei wurden folgende Ereignisse erfasst: Änderung des Levels, Bedienung eines Elements der Benutzeroberfläche, Frage an das LLM samt Antwort, Auswahl eines Bauteils, Absenden der präferierten Modernisierungsmaßnahme, Absenden der als relevant bewerteten Kriterien.
- **World-Service:** verwaltet die Three.js-Welt und bindet die nötigen Komponenten des ThatOpen-Frameworks ein

Die Abhängigkeiten zwischen den Services erhöhen die Kopplung und wären in einem produktiven System aus Wartbarkeitssicht problematisch. Dass viele Services vom UI-Service, Logging-Service und States-Service abhängen, ist aufgrund ihrer zentralen und anwendungsweiten Funktionen vertretbar. Die gesamten Abhängigkeitsbeziehungen rund um den World-Service, XR-Service und IFC-Manager-Service sowie insbesondere die indirekte zirkuläre Abhängigkeit sind für einen Studienprototyp vertretbar, jedoch für den Produktivbetrieb nicht geeignet. Diese Abhängigkeiten betreffen den technisch zentralen Teil der Anwendung (IFC über das ThatOpen-Framework im Browser in AR darstellbar zu machen). Diese Modellierung ist daher als prototypische Integration der beteiligten Funktionen zu verstehen. Da zum Entwicklungszeitpunkt keine Weiterentwicklung in ein Produktivsystem vorgesehen war, wurde Entwicklungsgeschwindigkeit höher gewichtet als langfristige Wartbarkeit.

Konfigurationsdateien

Die Komponenten und Services werden durch Konfigurationsdateien ergänzt. Diese Dateien kapseln (weitestgehend) logikunabhängige Einstellungen wie Texte und Farbwerte sowie Voreinstellungen bezüglich Darstellungen und Zustandsreihenfolgen. Die Konfigurationsdateien umfassen:

- **ui.config.ts:** definiert global verfügbare Farbwerte der Benutzeroberfläche.
- **ui/hud.config.ts:** enthält Größeneinstellungen verschiedener Elemente der Benutzeroberfläche.
- **ui/texts.config.ts:** enthält diverse Texte zur Darstellung in der Benutzeroberfläche.
- **ui/navigation.config.ts:** enthält die Definition der Zustandsreihenfolge der Oberflächen.
- **ai/prompt.config.ts:** enthält Prompt-Template-Teile.
- **ai/context.config.ts:** enthält Kontext-Textbausteine zum Füllen des Prompt-Templates.
- **ai/llm-answers.config.ts:** enthält Antwortvorformulierungen für bestimmte Prozessfragen.

4.3.3. Schnittstellen

Die Anwendung enthält zwei erwähnenswerte Schnittstellen, die im Folgenden beschrieben werden.

LLM-Schnittstelle

Die Anwendung verarbeitet Nutzeranfragen wie folgt. Die Nutzereingabe wird je nach Zustand der Anwendung in eine der vier Kategorien klassifiziert: Frage zum Prozess, Frage zu einem nicht zu modernisierenden Bauteil, Frage zu einem zu modernisierenden Bauteil und Frage zu einem Modernisierungsvorhaben. Je nach Kategorie wird das Prompt-Template mit unterschiedlichem relevantem Kontext befüllt (beispielsweise welche Maßnahme der Nutzer gerade ausgewählt hat). Der Prompt wird an den `/api/generate` Endpunkt einer Ollama-Instanz auf einem Inferenz-Server im Netzwerk gesendet. Zur Beantwortung der Anfrage wurde ein Q4_K_M-quantisiertes Qwen3:32b-Modell genutzt. Das verwendete Prompt-Template ist in Anhang A.4 dokumentiert. Eine ausgefüllte Version befindet sich in Anhang A.5.

IFC-basierte 3D-Viewer- und AR-Implementierung

Das Framework ThatOpen [97] (ehemals *IFC.js*) basiert im Kern auf der Bibliothek web-ifc [98], die eine C++ Geometrie- und Parsing-Engine für IFC in WebAssembly (WASM) kompiliert. Die Darstellung im Browser läuft über Three.js. Das Framework befindet sich in aktiver Entwicklung und bietet zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit bereits mehrere relevante Funktionen an, die zum Entwicklungszeitpunkt nicht vorhanden waren. Unter anderem wird nun die Selektion einzelner Bauteile standardmäßig unterstützt [99], während diese zum Entwicklungszeitpunkt noch selbstständig entwickelt werden musste. Dabei war es ursprünglich noch notwendig, auf den rohen Raycaster aus Three.js zurückzugreifen und die Verknüpfung zwischen Meshes und deren IFC-Entsprechungen im Modell in mehreren Einzelschritten zu rekonstruieren. Die Version 3.1 enthielt Breaking Changes und weitere tiefgreifende Änderungen, was die Implementierung dieser Basisfunktion (Bauteilauswahl) extrem aufwändig gestaltete und dazu führte, dass auf die veraltete Version 2.4.3 des Frameworks ausgewichen wurde ².

Die WebXR-Integration, hier speziell AR, ist inzwischen fester Bestandteil der Three.js-Dokumentation (vgl. [101]). Insgesamt wies die Integration zum Entwicklungszeitpunkt

²Siehe dazu auch das GitHub Issue #619 des Frameworks [100] .

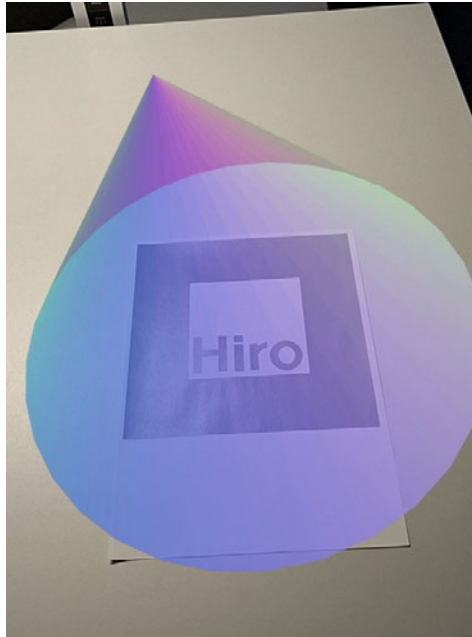


Abbildung 4.6.: Positionierung eines digitalen Objekts auf einem Hiro-Code

mehrere Inkompatibilitäten auf. Die verwendete ThatOpen-Version 2.4.3 setzte die Three.js-Version 0.160.1 voraus. Deren WebXR-Unterstützung war im Vergleich zu späteren Versionen unausgereift, sodass eine veraltete (und nicht mehr offiziell dokumentierte) WebXR-Implementierung genutzt werden musste. Auch diese WebXR-Version unterstützte bereits eine experimentelle Implementierung zur Verortung eines Bildes in AR (über *XRFrame.getImageTrackingResults*). Auf diese Weise konnte ein Hiro-Marker erkannt und dessen Position zur Verortung von digitalen Objekten im Raum verwendet werden, wie in Abbildung 4.6 dargestellt.

4.4. Erstellung des Raummodells

Der Scan des Raumes im Usability-Labor wurde mit der App „Metaroom - 3D Raumscanner“ [102] an einem iPhone 15 Pro angefertigt. Die App nutzt die RoomPlan API [103], die den Light Detection and Ranging (LiDAR) Sensor der iPhone- und iPad-Pro-Reihen verwendet und mithilfe eines Klassifizierungssystems ein Raummodell erstellt. Metaroom kann das Raummodell anschließend serverseitig in verschiedene Dateiformate konvertieren. Für einen IFC-Export muss nach der einwöchigen Testphase jedoch ein kostenpflichtiges Abonnement in Höhe von mindestens 60 € pro Monat abgeschlossen werden.

Die von Metaroom erstellte Datei wurde anschließend nachbearbeitet, um sie einerseits zu vereinfachen (nicht benötigte Modellinformationen wurden entfernt) und andererseits, um die

Informationen bezüglich der geplanten Modernisierungsmaßnahmen zu ergänzen. Zur Nachbearbeitung wurde die Blender-Erweiterung Bonsai [104] verwendet. Die Informationen zur geplanten Modernisierung wurden in einem benutzerdefinierten Property Set (PSet) „FKData“ (kurz für: „Funktionales Kostensplitting Daten“) hinterlegt, das dem Außenwandsbauteil hinzugefügt wurde. Codeblock 4.1 zeigt den entsprechenden IFC-Codeausschnitt. Während der Entwicklung änderten sich die fachlichen Anforderungen mehrfach. Daher wurden die Modernisierungsinformationen schließlich außerhalb des IFC-Modells gespeichert. Die Datei wurde so mit den im Codeblock dargestellten Platzhaltern versehen³.

Codeblock 4.1: Definition des IFC-Property-Sets und der zugehörigen Single-Value-Einträge

```

1 #1106=IFCPROPERTYSET('00BFhZ6dr3efnixx0R$kwX',#1105,'FKData',$
    ,(#1109,#1110,#1111,#1112,#1113));
2 #1107=IFCOWNERHISTORY(#3,#1104,.READWRITE.,.ADDED.,1768467518,#3,#1104,1768467518);
3 #1108=IFCRELDEFINESBYPROPERTIES('3kLsNUoKHABxnrJR4VqK6y',#1107,$,$,(#254),#1106);
4 #1109=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('bestandMaterial',$,IFCLABEL('bestand-material-aussen'),$);
5 #1110=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('bestandUWert',$,IFCREAL(0.800000011920929),$);
6 #1111=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('wandaufbau',$,IFCLABEL('some-wandaufbau'),$);
7 #1112=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('vorhabenMaterial',$,IFCLABEL('some-v-material'),$);
8 #1113=IFCPROPERTYSINGLEVALUE('vorhabenUWert',$,IFCREAL(0.300000011920929),$);
9 #1120=IFCOWNERHISTORY(#3,#1104,.READWRITE.,.ADDED.,1768467806,#3,#1104,1768467806);
10 #1121=IFCPROPERTYSET('07FnGJkCP9Per2UH0ilw$2',#1120,'FKData',$,(#1156));

```

4.5. Qualitätssicherung

Zur Sicherstellung der Funktionstüchtigkeit des Systems wurden zwei Probedurchläufe der Studie inklusive Nutzertests durchgeführt. Während traditionelle Webanwendungen über standardisierte DOM-Elemente und native Browser-Events (wie Klicks und Texteingaben) direkt und unkompliziert getestet werden können, erschwert die Nutzung von Three.js diese Form der Testbarkeit erheblich: Die gesamte Anwendung wird in ein einziges, für den Test-Runner unlesbares <canvas>-Element gezeichnet. End-to-End-Tests müssen hier auf fehleranfällige visuelle Regressionsprüfungen oder das künstliche Offenlegen des internen

³Die finale Anwendung durchsucht ein Bauteil lediglich dahingehend, ob es ein 'FKData'-Property-Set, ein 'vorhabenMaterial'-Eintrag oder einen 'bestandUWert'-Eintrag aufweist. Der tatsächliche Wert wird nicht mehr ausgelesen, sondern anschließend in der Anwendung über JSON-basierte Konfigurationen ergänzt, um eine niedrigschwelligere Anpassung zu ermöglichen. Frühere Iterationen der Anwendung arbeiteten erfolgreich mit den direkt in der IFC-Datei hinterlegten Informationen, konnten diese bearbeiten und es war darüber hinaus möglich, in der Anwendung neue Informationen in der IFC-Datei zu hinterlegen und eine angepasste Datei zu exportieren.

3D-Szenengraphen ausweichen. Der zusätzliche Schritt zu WebXR erschwert selbst diese Ansätze, da das Rendering vom Browser-Canvas entkoppelt wird. Zudem müssen für automatisierte Tests nun nicht mehr nur zweidimensionale Klicks, sondern komplexe räumliche Interaktionen und Kamerabewegungen über aufwändige Emulatoren simuliert werden.

Über diese technische Herausforderung hinaus führten mehrere grundlegende Änderungen an den Anforderungen zu umfangreichen Änderungen und teilweise mehrfachem, grundlegendem Umschreiben der meisten Systemkomponenten. Aufgrund des Prototypstatus, der wiederholten Anforderungsänderungen und des begrenzten Versuchszeitplans wurde auf eine fortlaufende Pflege automatisierter Unit- und Integrationstests verzichtet.

Die LLM-Antwortqualität wurde iterativ durch manuelle Anpassungen des übergebenen Kontexts im Prompt-Template verbessert. Hierzu wurden verschiedene Nutzeranfragen entwickelt, die bekannte Schwachstellen der Modellantworten im Anwendungskontext adressieren. Die Art der Tests, die verwendeten Testfragen sowie die Antworten sind nach Versionen („v1“ und bei zusätzlichem Anpassungsbedarf ebenfalls „v2“) des Kontext-Templates in Anhang [A.3](#) dargestellt.

5. Ergebnisse

Die Versuche fanden zwischen dem 04.02.2026 und dem 18.03.2026 im „Usability-Labor“ des Gebäudes Finkenau 35 der HAW Hamburg statt. Die einzelnen Antwortstatistiken aller Fragebögen sind im Anhang [A.7](#) aufgeführt. Der Begleitdatenträger enthält die verwendeten Auswertungsskripte. Nach der Beschreibung der Stichprobe stellt dieses Kapitel die deskriptiven und inferenzstatistischen Ergebnisse zu Gerechtigkeit, Technologieakzeptanz und Usability dar. Abschließend folgen die explorativen Befunde zur wahrgenommenen KI-Qualität, App-Präferenz und zum Net-Promoter-Score.

5.1. Demografie

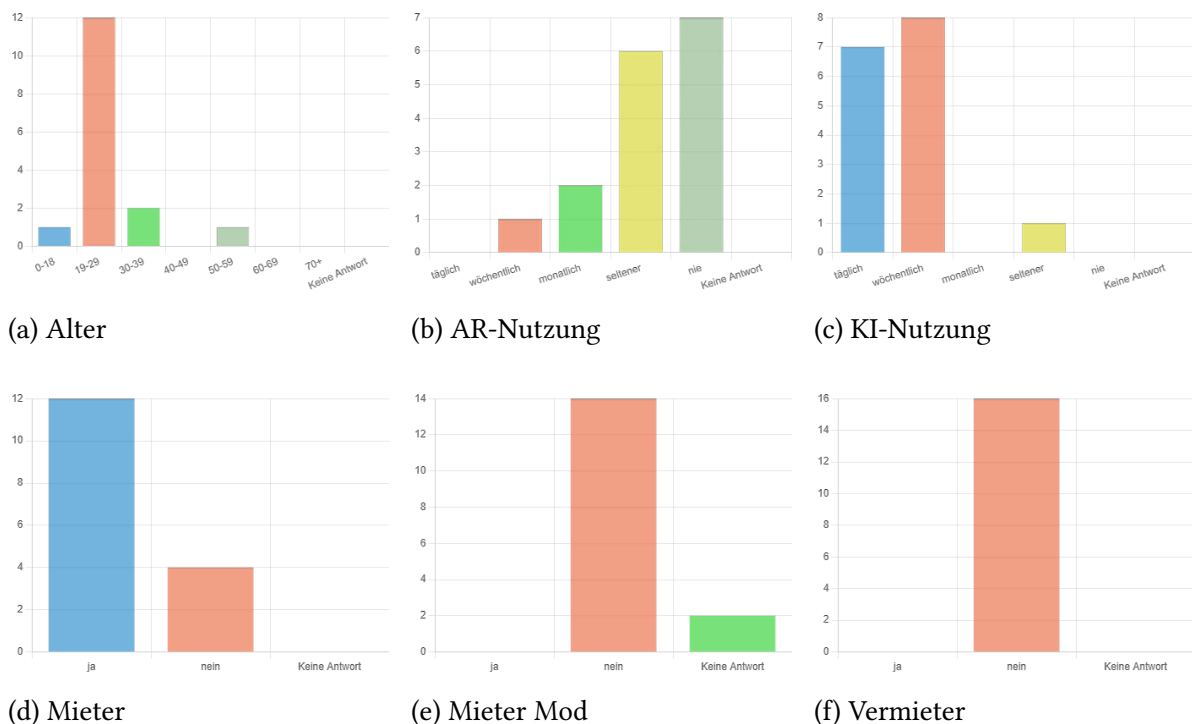


Abbildung 5.1.: Ergebnisse der demografischen Fragen nach Fragenkürzel

Die Abbildungen in 5.1 zeigen die zu Studienbeginn erhobenen demografischen Angaben der Gesamtstichprobe. Die Titel der Teilabbildungen entsprechen den Fragekürzeln des Demografie-Fragenkatalogs. Die genauen Frageformulierungen können der Tabelle 3.5 entnommen werden. Die Abbildung 5.1a zeigt beispielsweise die zusammengefassten Antworten aller Studienteilnehmenden zur Frage „Wie alt bist Du?“ (Alter). Die Antworten auf die Frage mit dem Kürzel „Vermieter Mod“ wurden nicht abgebildet, da keine der teilnehmenden Personen zum Zeitpunkt der Studie einen Vermieterstatus angab (vgl. Angaben in Abbildung 5.1f).

Die Mehrheit der Teilnehmenden war zum Studienzeitpunkt zwischen 19 und 29 Jahren alt (vgl. Abbildung 5.1a). Die meisten Teilnehmenden gaben an, Augmented Reality seltener als monatlich oder nie zu nutzen (vgl. Abbildung 5.1b). Bis auf eine Person gaben alle Teilnehmenden an, mindestens wöchentlich KI zu nutzen und knapp die Hälfte (7 von 16) gab an, KI täglich zu verwenden (vgl. Abbildung 5.1c). 12 der 16 Teilnehmenden befanden sich zum Teilnahmezeitpunkt als Mietende in einem Mietverhältnis (vgl. Abbildung 5.1d) und keine Person in der Vermietendenrolle (vgl. Abbildung 5.1f). Keine der Mietenden wusste während der Dauer ihres Mietverhältnisses von Modernisierungen, die in ihrem angemieteten Gebäude durchgeführt wurden (vgl. Abbildung 5.1e).

5.2. Gerechtigkeit

Wie im Studiendesign beschrieben, wurde die wahrgenommene prozedurale und informationale Gerechtigkeit im Verlauf des Experiments zu drei Messzeitpunkten erhoben. Die Messung erfolgte nach dem Lesen der Modernisierungsankündigung sowie nach der Nutzung der jeweiligen Anwendung. Zur deskriptiven Darstellung der Gerechtigkeitsdaten wurden getrennte Abbildungen für beide Sequenzgruppen erstellt. Die in den Abbildungen verwendeten Fragekürzel entsprechen den in Tabelle 3.1 verzeichneten Frageformulierungen.

Die Abbildungen 5.2 und 5.3 zeigen die Antwortverteilungen zu den Gerechtigkeitsfragen für die AR-zuerst-Gruppe beziehungsweise Desktop-zuerst-Gruppe. Die eingefärbten Säulenabschnitte stellen den Anteil der jeweiligen Antwortoption zur angegebenen Frage dar. Die erste Säule in Abbildung 5.2 zeigt beispielsweise die Antwortverteilung zu „Wie sehr konntest Du Deine Sichtweisen und Empfindungen während der Vorhabensplanung ausdrücken?“ (Proz 1). Sie bezieht sich auf die Teilnehmendengruppe, welche zuerst die mobile App (AR) und anschließend die Desktop-App verwendete, wobei ihr roter Abschnitt markiert, dass 62 % der Teilnehmenden die Frage mit „1 - gar nicht“ beantwortet haben.

Für jede Frage und jedes Medium wurde der Mittelwert der numerischen Antwortwerte (zum Beispiel „1“ aus der Option „1 - gar nicht“) der ansonsten ordinalskalierten Antwortoptionen der Likert-Skala berechnet. Die Abbildungen 5.4 und 5.5 zeigen diese Durchschnitte als Säulen für die AR-zuerst- beziehungsweise Desktop-zuerst-Gruppe. Die Abbildungen gruppieren die

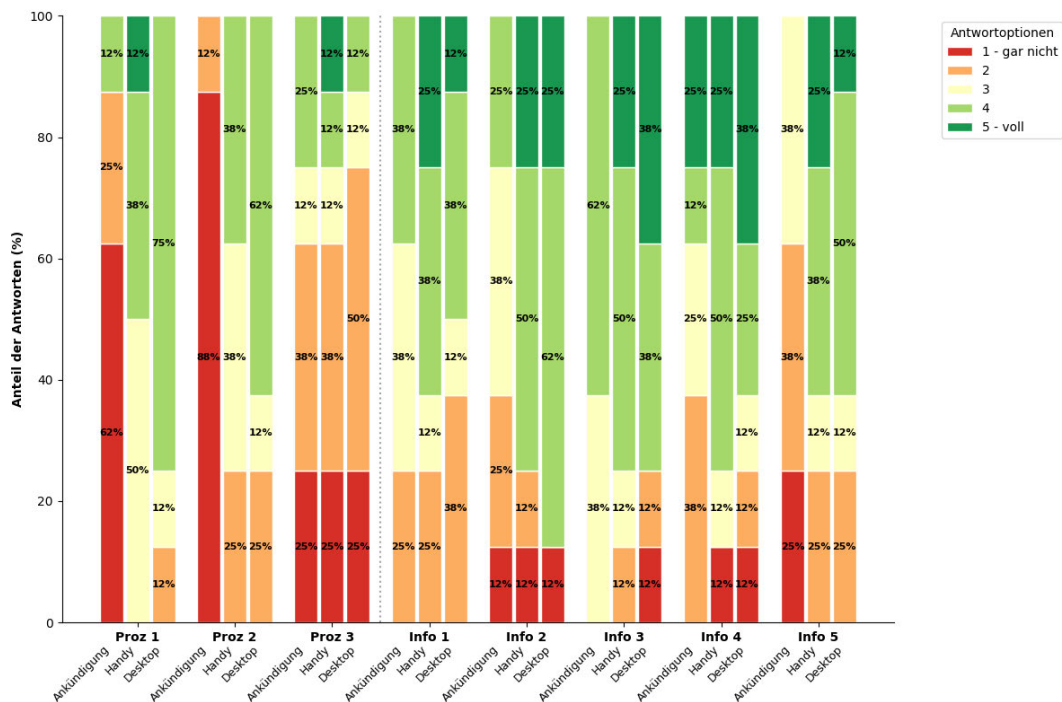


Abbildung 5.2.: Antwortverteilung zur empfundenen Gerechtigkeit der AR-zuerst-Gruppe nach Frage und Medium

Items nach prozeduraler und informationaler Gerechtigkeit. Die gestrichelten Linien zeigen die jeweiligen Dimensionsmittelwerte. Bei der Berechnung des Gesamtdurchschnitts wurden alle Fragen innerhalb ihrer Gerechtigkeitsdimension gleich gewichtet, sodass sie zu gleichen Teilen auf den Gesamtdurchschnitt ihrer Dimension einzahlten. Diese Gleichgewichtung folgt der ursprünglichen Konstruktion der Gerechtigkeitsdimensionen, bei der die Skalenkomposita durch Mittelwertbildung der einzelnen Items (*averaging items*) generiert wurden [10].

Tabelle 5.1.: Ergebnisse der Hypothesentests zur wahrgenommenen Gerechtigkeit (H1-H2: Ankündigung vs. Anwendung)

Hypoth.	Zielvariable	Anwendung	W_{SW}	p_{SW}	W_W	p_W	r_{rb}
H1a	Proz. Gerechtigkeit	AR	0,951	0,720	28	0,008**	1,000
H2a	Proz. Gerechtigkeit	Desktop	0,957	0,783	28	0,008**	1,000
H1b	Inform. Gerechtigkeit	AR	0,942	0,631	25	0,039*	0,786
H2b	Inform. Gerechtigkeit	Desktop	0,812	0,038	10	0,063	1,000

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$

Anmerkung: W_{SW} und p_{SW} beziehen sich auf den Shapiro-Wilk-Normalverteilungstest, W_W und p_W auf den Wilcoxon-Test. r_{rb} ist die Rangbiserialkorrelation (Effektstärke).

Zur Prüfung der Hypothesen wurden statistische Tests der Gerechtigkeitswerte bemüht.

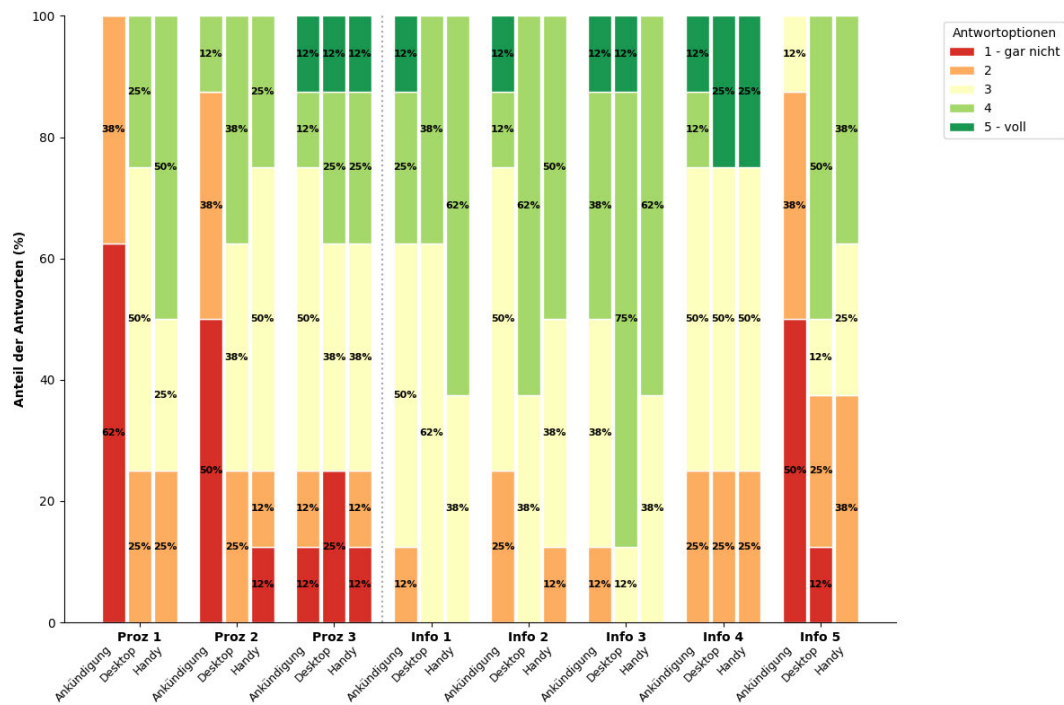


Abbildung 5.3.: Antwortverteilung zur empfundenen Gerechtigkeit der Desktop-zuerst-Gruppe

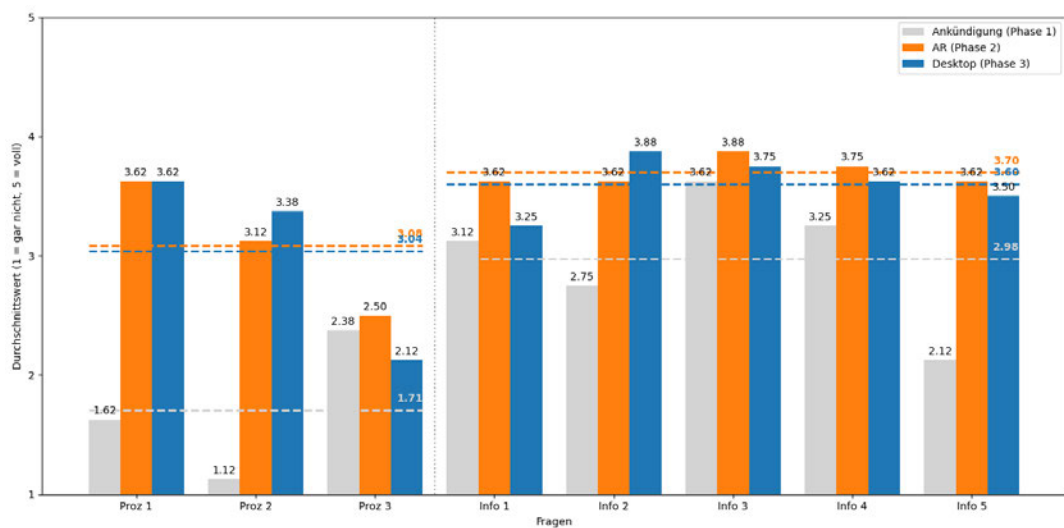


Abbildung 5.4.: Durchschnittlich empfundene Gerechtigkeit der AR-zuerst-Gruppe

Da die Hypothesen H1a, H1b, H2a und H2b jeweils den Vergleich zwischen der schriftlichen Modernisierungsankündigung und der ersten digitalen Anwendung betreffen, wurden nur diejenigen Teilnehmenden berücksichtigt, die die jeweilige Anwendung in Periode 2 nutzten. Die effektive Stichprobengröße beträgt für diese Tests daher jeweils $n = 8$. Da

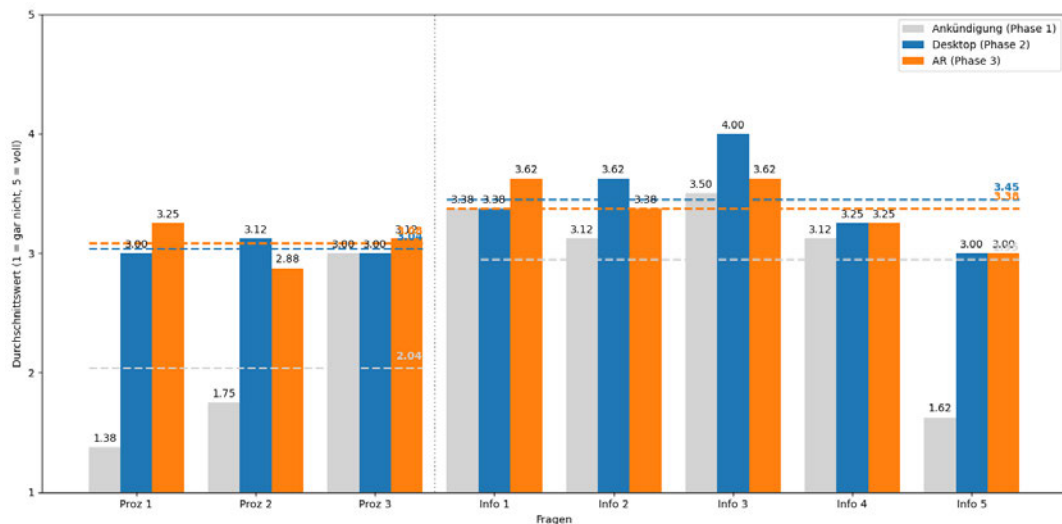


Abbildung 5.5.: Durchschnittlich empfundene Gerechtigkeit der Desktop-zuerst-Gruppe

die Antwortoptionen der Gerechtigkeitsitems ordinal skaliert sind („1 – gar nicht“ bis „5 – voll“) und die numerischen Werte primär der geordneten Auswertung dienen, wurden für diese gepaarten Vergleiche Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests verwendet. Dabei wurden zunächst pro Person Mittelwerte der jeweiligen Gerechtigkeitsdimension gebildet. Anschließend wurde geprüft, ob die Werte nach Nutzung der digitalen Anwendung höher ausfielen als nach dem Lesen der Ankündigung. In der Auswertung wurde die jeweilige Anwendung als erster Messwert und die Ankündigung als zweiter Messwert übergeben. Tabelle 5.1 zeigt für jede der Zielvariablen abhängig von der Anwendung (AR, Desktop) die Ergebnisse des Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests [105] inklusive der Effektstärke r_{rb} im Sinne der Rangbiserialkorrelation (RBC). Zur Beschreibung der Verteilungseigenschaften wurden ebenfalls die Werte des Shapiro-Wilk-Tests [106] ausgewiesen.

So listet beispielsweise die erste Zeile die relevanten Berechnungen zur Prüfung der Hypothese H1a. Datengrundlage sind hier die Angaben der AR-zuerst-Gruppe, deren Angaben zur Gerechtigkeit der Modernisierungsankündigung (aus Periode 1) direkt mit ihren Angaben zur Gerechtigkeit der mobilen App (aus Periode 2) verglichen wurden. Zur Veranschaulichung dieser Werte können ebenfalls die grauen und orangen Säulen des linken Teils der Abbildung 5.4 herangezogen werden. Der Shapiro-Wilk-Test gab bei einem Signifikanzniveau von 0,05 für alle Kombinationen bis auf die der informational Gerechtigkeit am Desktop (H2b) keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung.

Für die Hypothesen H1a, H1b, H2a und H2b ergeben sich aus den Daten daher folgende Prüfergebnisse:

- H1a: Die Nullhypothese wird verworfen, da die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach Nutzung der mobilen AR-Anwendung signifikant ($p_W = 0,008$) höher ist

als nach dem Lesen der Ankündigung ($r_{rb} = 1$).

- H1b: Die Nullhypothese wird verworfen, da die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach Nutzung der mobilen AR-Anwendung signifikant ($p_W = 0,039$) höher ist als nach dem Lesen der Ankündigung ($r_{rb} = 0,786$).
- H2a: Die Nullhypothese wird verworfen, da die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach Nutzung der Desktop-Anwendung signifikant ($p_W = 0,008$) höher ist als nach dem Lesen der Ankündigung ($r_{rb} = 1$).
- H2b: Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da für die Desktop-Anwendung trotz maximaler Effektstärke ($r_{rb} = 1$) kein signifikanter Anstieg der wahrgenommenen informational Gerechtigkeit gegenüber der Ankündigung nachgewiesen wurde ($p_W = 0,063$).

Tabelle 5.2.: Prüfergebnisse der Varianzanalyse-Voraussetzungen

Hypothesen	Zielvariable	Anwendung	W_{SW}	p_{SW}	W_L	p_L
H3a, H4a	Δ -Gerechtigkeit (prozedural)	AR	0,904	0,095	0,000	1,000
		Desktop	0,952	0,525		
H3b, H4b	Δ -Gerechtigkeit (informational)	AR	0,946	0,436	3,983	0,055
		Desktop	0,962	0,698		
H5, H6	Technologie- akzeptanz	AR	0,985	0,991	1,422	0,242
		Desktop	0,958	0,626		
H7, H8	Nutzungs- zufriedenheit	AR	0,868	0,026	0,040	0,843
		Desktop	0,897	0,071		

Anmerkung: W_{SW} und p_{SW} beziehen sich auf den Shapiro-Wilk-Test zur deskriptiven Prüfung von Verteilungsabweichungen. W_L und p_L beziehen sich auf den Levene-Test zur Prüfung der Varianzhomogenität.

Zur Prüfung der Anwendungs- und Sequenzeffekte für H3a bis H4b wurde eine gemischte Varianzanalyse (*mixed ANOVA*) durchgeführt. Zuvor wurde in allen Fällen geprüft, ob die Voraussetzungen der Normalverteilung und Varianzhomogenität gegeben sind. Hierzu zeigt Tabelle 5.2 für jede Zielvariable und Anwendung, ob die Daten im Sinne des Shapiro-Wilk-Tests normalverteilt (W_{SW} und p_{SW}) und im Sinne des medianbasierten Levene-Tests [107] varianzhomogen (W_L und p_L) sind. Zusammenfassend bestätigen die Berechnungsergebnisse bei einem Signifikanzniveau von 0,05, dass weder die Normalverteilung ($p_{SW} > 0,05$) noch die Varianzhomogenität ($p_L > 0,05$) für die Kombinationen der Gerechtigkeits-Zielvariablen und Anwendungssequenzen verletzt sind (siehe obere Hälfte der Tabelle 5.2).

Tabelle 5.3 liefert die Ergebnisse der Varianzanalyse geordnet nach Zielvariablen und Effektquellen. Sowohl die beiden unabhängigen Variablen (Anwendung und Sequenz) als auch ihre

Tabelle 5.3.: Ergebnisse der Varianzanalysen

Hypoth.	Zielvariable	Effektquelle	SS = MS	F	p	η_p^2
H3a, H4a	Δ -Gerechtigkeit (prozedural)	Sequenz (Between)	0,889	0,778	0,393	0,053
		Anwendung (Within)	0,014	0,063	0,806	0,004
		Interaktion	0,000	0,000	1,000	0,000
H3b, H4b	Δ -Gerechtigkeit (informational)	Sequenz (Between)	0,361	0,246	0,628	0,017
		Anwendung (Within)	0,001	0,009	0,926	0,001
		Interaktion	0,061	0,438	0,519	0,030
H5, H6	Technologische Akzeptanz	Sequenz (Between)	1,605	0,906	0,357	0,061
		Anwendung (Within)	0,383	2,340	0,148	0,143
		Interaktion	0,730	4,463	0,053	0,242
H7, H8	Nutzungs- zufriedenheit	Sequenz (Between)	9,031	4,971	0,043*	0,262
		Anwendung (Within)	1,531	4,133	0,061	0,228
		Interaktion	3,781	10,205	0,006**	0,422

* $p < 0,05$, ** $p < 0,01$.

Anmerkung: Da $df = (1,14)$ für alle Einträge gilt, sind SS und MS identisch und gemeinsam ausgewiesen.

Interaktion können durch die Varianzanalyse als Effektquellen betrachtet werden. Da die Teilnehmenden ($n = 16$) auf zwei Gruppen aufgeteilt sind und ein Unterschied zwischen diesen beiden Gruppen verglichen wird, gilt bei der Varianzanalyse für alle Zielvariablen konstant $df = (1, 14)$.

Für die Hypothesen H3a, H3b, H4a und H4b ergeben sich aus den Daten daher folgende Prüfergebnisse:

- H3a: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} = 0,095$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 1,000$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,806$) in der Baseline-bereinigten prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung (Haupteffekt: Anwendungsart) aufweist.
- H3b: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} \geq 0,436$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 0,055$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,926$) in der Baseline-bereinigten informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung (Haupteffekt: Anwendungsart) aufweist.

- H4a: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} = 0,095$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 1,000$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Interaktionseffekt ($p = 1,000$) zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe aufweist.
- H4b: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} = 0,436$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 0,055$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Interaktionseffekt ($p = 0,519$) zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe aufweist.

5.3. Technologieakzeptanz

Die Technologieakzeptanz wurde sowohl nach Nutzung der ersten Anwendung in Periode 2 als auch nach Nutzung der zweiten Anwendung in Periode 3 erhoben. Die Abbildungen 5.6 und 5.7 stellen die aggregierten Werte nach Item und Anwendung dar (die Frageformulierungen können anhand der Kürzel dem Fragenkatalog in Tabelle 3.2 entnommen werden). Die Säulen zeigen den Durchschnittswert der Antworten zu jeder Frage für die jeweilige Anwendung an. Die gestrichelte, horizontale Linie bildet für die jeweilige Anwendung die gleichgewichtete, durchschnittliche Technologieakzeptanz der Gruppe über alle Fragen hinweg ab.

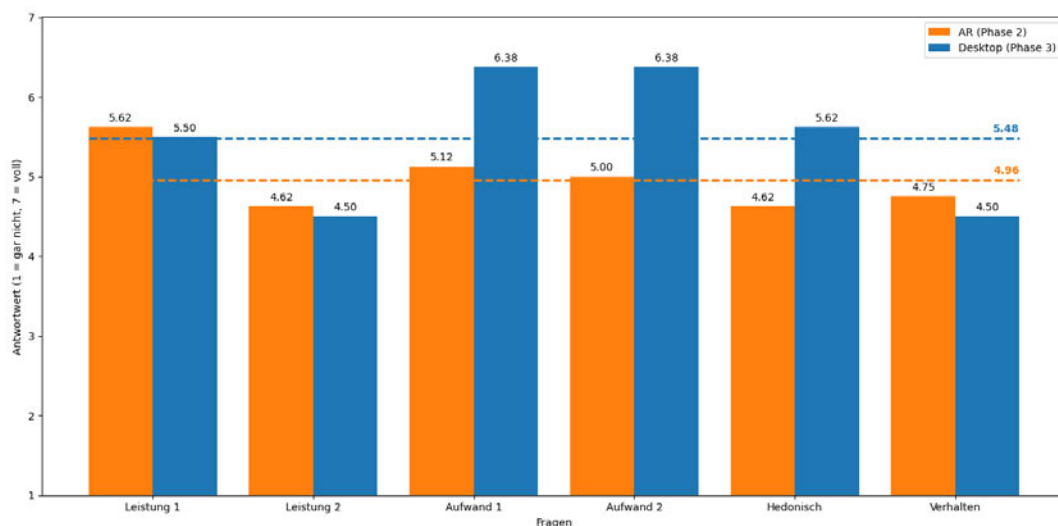


Abbildung 5.6.: Technologieakzeptanz der AR-zuerst-Gruppe nach Frage und Anwendung

Die Werte der Technologieakzeptanz wurden auf die Voraussetzungen der Varianzanalyse geprüft und anschließend mittels Varianzanalyse ausgewertet. Die Prüfergebnisse können

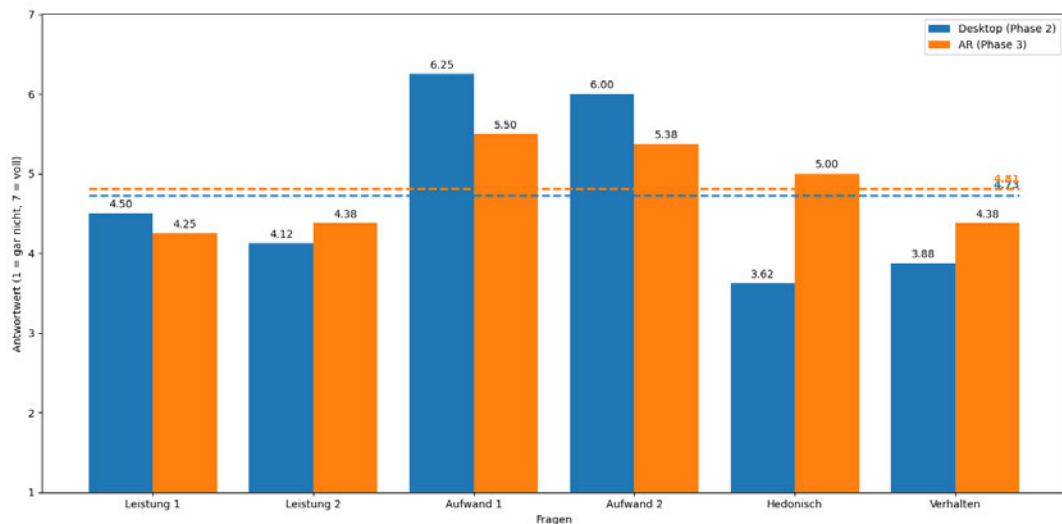


Abbildung 5.7.: Technologieakzeptanz der Desktop-zuerst-Gruppe nach Frage und Anwendung

analog zu den oben geführten Beschreibungen der Gerechtigkeitswerte (H3, H4) der Tabelle 5.2 beziehungsweise die Ergebnisse der Varianzanalyse der Tabelle 5.3 entnommen werden. Für die Technologieakzeptanz ergaben sich beim gewählten Signifikanzniveau von 0,05 keine signifikanten Hinweise auf Abweichungen von der Normalverteilung oder auf Varianzheterogenität.

Für die Hypothesen H5 und H6 ergeben sich aus den Daten folgende Prüfergebnisse:

- H5: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} = 0,991$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 0,242$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Unterschied ($p = 0,148$) in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung (Haupteffekt Anwendungsart) aufweist.
- H6: Die Voraussetzungstests ergaben keinen signifikanten Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung der betrachteten Zielwerte ($p_{SW} = 0,991$) und keinen Hinweis auf Varianzheterogenität ($p_L = 0,242$). Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Interaktionseffekt ($p = 0,053$) zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe aufweist.

5.4. Usability

Neben der Technologieakzeptanz wurde auch die Usability nach Nutzung der ersten Anwendung (Periode 2) und zweiten Anwendung (Periode 3) erhoben. Wie in Abschnitt 3.5.3 beschrieben, wurde die Usability in ihren drei Dimensionen Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit erhoben. Hypothesenrelevant war ausschließlich die Nutzungszufriedenheit.

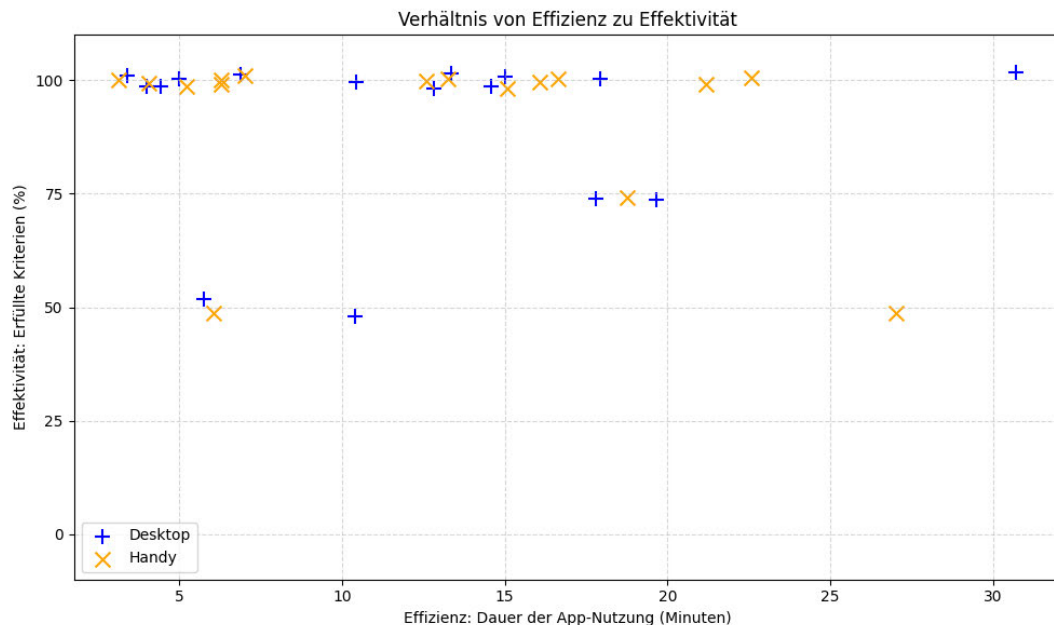


Abbildung 5.8.: Verhältnis von Effizienz zu Effektivität

Die im Methodikteil eingeführte Tabelle 3.4 zeigt für die sechs verfügbaren Modernisierungsoptionen, ob sie die vier zentralen Gütekriterien (Dämmwirkung, Reduzierung der Heizkosten, Höhe der Mieterhöhung sowie Gesamtinvestitionskosten) erfüllen. Basierend auf dieser Kriterienmatrix wurde für jeden Versuchsdurchlauf der Anteil der angegebenen Gütekriterien berechnet, die durch die gewählte Modernisierungsoption erfüllt wurden. Abbildung 5.8 stellt diese Effektivität in Relation zur dafür benötigten Bearbeitungszeit (Effizienz) dar, aufgeschlüsselt nach der Anwendung (Desktop, AR)¹. Die explorative Gegenüberstellung von Effizienz und Effektivität zeigt, dass die meisten Versuchsdurchläufe unabhängig von der verwendeten Anwendung eine vollständige Übereinstimmung zwischen ausgewählter Maßnahme und angegebenen Gütekriterien erreichten. Einzelne Durchläufe lagen bei 75 % beziehungsweise 50 % erfüllter Kriterien. Ein eindeutiger anwendungsspezifischer Zusam-

¹Da die Effektivität wegen der vier zugrundeliegenden Kriterien ausschließlich diskrete Werte annehmen kann (0 %, 25 %, 50 %, 75 % oder 100 %), wurde bei der Verortung der Datenpunkte im Plot auf der Y-Achse eine minimale Streuung (*jittering*) vorgenommen. Dies löst visuelle Überlagerungen identischer Wertepaare auf und macht die Verteilung der Teilnehmenden innerhalb der einzelnen Effektivitätsstufen besser einsehbar.

menhang zwischen Bearbeitungsdauer und Effektivität ist deskriptiv nicht erkennbar. Längere Nutzungszeiten gingen nicht systematisch mit einer höheren Effektivität einher.

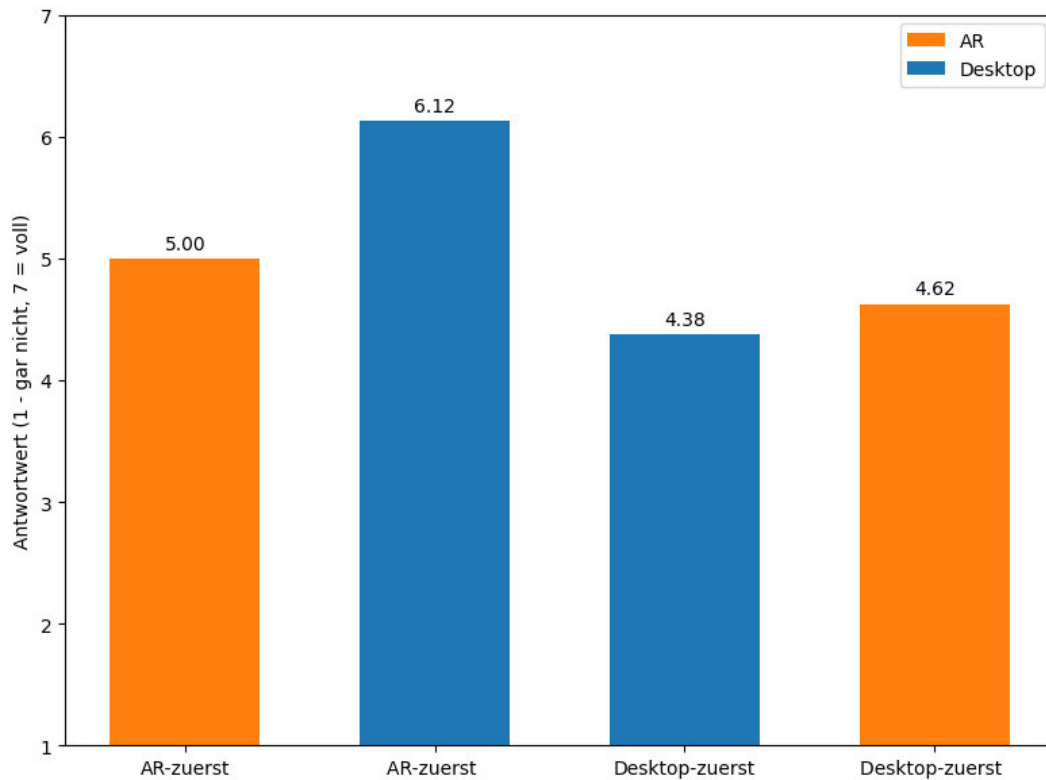


Abbildung 5.9.: Nutzungszufriedenheit nach Gruppenzugehörigkeit und Anwendung

Die Nutzungszufriedenheit wurde mithilfe einer Selbstausskunft erhoben (die Formulierung ist der Tabelle 3.2 zu entnehmen). In der Abbildung 5.9 wurden die Angaben der beiden Gruppen (AR-zuerst, Desktop-zuerst) über Durchschnittswerte zusammengefasst. Die horizontale Achse zeigt die Sequenzgruppe; die Säulenfarbe kennzeichnet die Anwendung. Die erste Säule zeigt beispielsweise, dass in der AR-zuerst-Gruppe die durchschnittliche Nutzungszufriedenheit für die AR-Anwendung 5,00 betrug.

Für die Nutzungszufriedenheit wurde ergänzend geprüft, ob Hinweise auf Abweichungen von der Normalverteilung und auf Varianzheterogenität vorliegen. Der Shapiro-Wilk-Test ergab für die mobile Anwendung einen Hinweis auf eine Abweichung von der Normalverteilung ($p_{SW} \leq 0,05$), während für die Desktop-Anwendung kein entsprechender Hinweis vorlag ($p_{SW} > 0,05$). Die Varianzhomogenität wurde nach dem Levene-Test nicht verworfen. Für die Interpretation der Varianzanalyse ist dabei zu berücksichtigen, dass die ANOVA nicht die Normalverteilung der beobachteten Rohwerte, sondern näherungsweise normalverteilte Fehlerterme voraussetzt. Da das Design ausgeglichen ist und keine Varianzheterogenität festgestellt wurde, wird die Varianzanalyse für die Nutzungszufriedenheit dennoch berichtet.

Aufgrund der kleinen Stichprobe und der Einzelitem-Erhebung sind die Ergebnisse zur Nutzungszufriedenheit vorsichtig zu interpretieren.

Für die Hypothesen H7 und H8 ergeben sich aus den Daten folgende Prüfergebnisse:

- H7: Die Nullhypothese kann nicht verworfen werden, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Haupteffekt der Anwendungsart auf die Nutzungszufriedenheit aufweist ($p = 0,061$). Ein signifikanter Unterschied zwischen mobiler AR-Anwendung und Desktop-Anwendung wurde damit nicht nachgewiesen.
- H8: Die Nullhypothese wird verworfen, da die Varianzanalyse einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe aufweist ($p = 0,006$).

5.5. KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score

Nach Nutzung der Anwendungen wurden die wahrgenommene KI-Qualität und der NPS erhoben. Nach Nutzung beider Anwendungen wurden Teilnehmende gebeten, ihre App-Präferenz anzugeben. Die Diagramme in Abbildung 5.10 zeigen diese aggregierten Daten, wobei die Titel der Teilabbildungen den Fragekürzeln des unter Tabelle 3.6 geführten Fragenkatalogs entsprechen.

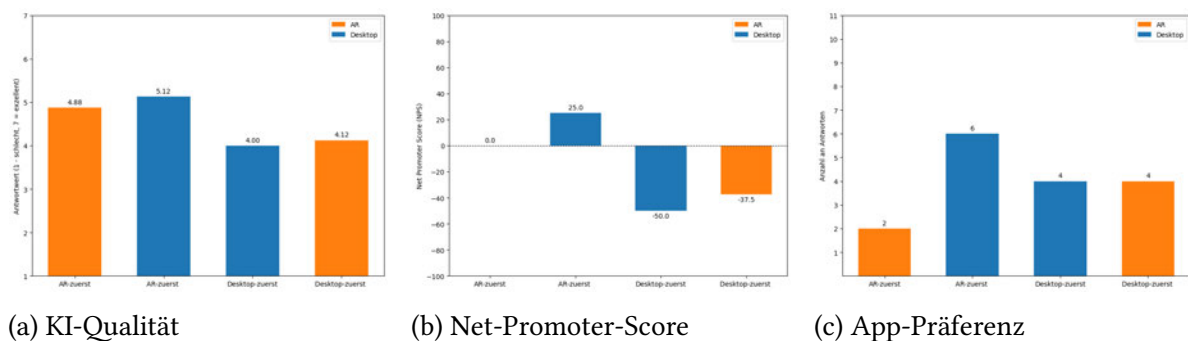


Abbildung 5.10.: Weitere Ergebnisse nach Gruppenzugehörigkeit und Anwendung

Abbildung 5.10a zeigt den Mittelwert der KI-Qualitätsbewertungen auf einer Skala von 1 bis 7. Die wahrgenommene KI-Qualität lag in der AR-zuerst-Gruppe bei 4,88 für die mobile Anwendung und bei 5,12 für die Desktop-Anwendung. In der Desktop-zuerst-Gruppe fielen die Werte niedriger aus; hier wurden 4,00 für die Desktop-Anwendung und 4,12 für die mobile Anwendung erreicht.

Der NPS kann der Abbildung 5.10b entnommen werden, welche die Angaben auf der horizontalen Achse nach Gruppe (AR-zuerst, Desktop-zuerst) ordnet und über die farbliche

Kodierung die verwendete Anwendung (AR, Desktop) markiert. Der NPS betrug in der AR-zuerst-Gruppe 0,0 für die mobile Anwendung und 25,0 für die Desktop-Anwendung. In der Desktop-zuerst-Gruppe lagen die Werte bei -50,0 für die Desktop-Anwendung und -37,5 für die mobile Anwendung.

Abbildung 5.10c zeigt, welche Anwendung die Teilnehmenden präferierten. Analog zu anderen Diagrammen bildet die horizontale Achse die Gruppe (AR-zuerst, Desktop-zuerst) und die farbliche Kodierung der Säule die Anwendung (AR, Desktop) ab. Die vertikale Achse zeigt die Summe der Antworten. Die erste Säule zeigt beispielsweise, dass zwei Teilnehmende der AR-zuerst-Gruppe die mobile Anwendung präferierten. In der AR-zuerst-Gruppe bevorzugten sechs Teilnehmende die Desktop-Anwendung und zwei Teilnehmende die mobile Anwendung.

6. Diskussion

Dieses Kapitel ordnet die empirischen Befunde im Verhältnis zur Forschungsfrage und zu den theoretischen Grundlagen ein. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass beide digitalen Anwendungen gegenüber der schriftlichen Modernisierungsankündigung mit höheren Werten der wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit einhergingen, während ein signifikanter Anstieg der informationalen Gerechtigkeit nur für die mobile AR-Anwendung nachgewiesen wurde. Eine belastbare Überlegenheit der mobilen AR- gegenüber der Desktop-Anwendung zeigte sich weder hinsichtlich der Gerechtigkeitswahrnehmung noch der Technologieakzeptanz oder der Nutzungszufriedenheit. Die in beiden Sequenzgruppen höhere Nutzungszufriedenheit mit der jeweils zweiten Anwendung verweist zugleich auf mögliche Lern-, Vertrautheits- oder andere Reihenfolgeeffekte. Im Folgenden werden die Befunde theoretisch und anwendungsbezogen eingeordnet sowie die methodischen Limitationen der Untersuchung diskutiert.

6.1. Gerechtigkeit

Dieser Abschnitt ordnet die Befunde zur informationalen und prozeduralen Gerechtigkeit im Verhältnis zur Forschungsfrage ein.

6.1.1. Prozedurale Gerechtigkeit

Für die prozedurale Gerechtigkeit zeigten beide digitalen Anwendungen signifikant höhere Werte als die schriftliche Modernisierungsankündigung. Die Auswertung belegt, dass sowohl die mobile AR-Anwendung als auch die Desktop-Anwendung das prozedurale Gerechtigkeitsempfinden der Teilnehmenden im Vergleich zur textbasierten Modernisierungsankündigung statistisch signifikant erhöhten. Für die AR-Anwendung wurde die Nullhypothese verworfen ($p = 0,008$) und eine berechnete Effektstärke von $r_p b = 1,000$ ermittelt. Die Effektstärke deutet darauf hin, dass die auswertbaren Paarvergleiche innerhalb dieser Stichprobe konsistent zugunsten der digitalen Anwendung ausfielen. Ein ähnliches, signifikantes Ergebnis zeigte sich für die Desktop-Variante (H2a verworfen: $p = 0,008$; $r_p b = 1,000$). Die darauffolgende gemischte Varianzanalyse ergab zudem weder einen signifikanten Unterschied zwischen

den beiden digitalen Systemen in der baseline-bereinigten prozeduralen Gerechtigkeit (H3a beibehalten: $p = 0,806$) noch einen signifikanten Interaktionseffekt zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe (H4a beibehalten: $p = 1,000$). Die Ergebnisse liefern an dieser Stelle keinen Hinweis auf eine Überlegenheit einer bestimmten Anwendungsart.

Prozedurale Gerechtigkeit umfasst im verwendeten Messverständnis [10] unter anderem die Wahrnehmung, eigene Sichtweisen äußern, Einfluss nehmen und Widerspruchsmöglichkeiten wahrnehmen zu können. Die schriftliche Modernisierungsankündigung ist im Studienszenario primär als einseitiges Informationsmedium ausgestaltet. Sie bietet den Teilnehmenden innerhalb des Experiments keine interaktive Möglichkeit, Rückfragen zu stellen oder Präferenzen zu artikulieren. Die digitalen Anwendungen erweiterten im Studienszenario die wahrgenommenen Interaktionsmöglichkeiten gegenüber der rein schriftlichen Ankündigung. Die höheren Werte könnten mit den Rückfrage-, Explorations- und Präferenzfunktionen zusammenhängen. Diese Interpretation ist mit einer Untersuchung [59] vereinbar, wonach Partizipation die Wahrnehmung prozeduraler und informationaler Gerechtigkeit erhöhen kann. Die vorliegende Studie überträgt diesen Zusammenhang erstmals explorativ auf ein digitales Modernisierungsszenario. Da Rückfrage-, Visualisierungs- und Rückmeldefunktionen gemeinsam implementiert wurden, lässt sich ihr jeweiliger Beitrag jedoch nicht isolieren.

Die Befunde lassen sich als begrenzter empirischer Beitrag zur Diskussion über digitale Technologien in der Wohnungswirtschaft einordnen. Die verstärkte Wahrnehmung der prozeduralen Gerechtigkeit kann grundsätzlich als eine verstärkte wahrgenommene Beteiligungsmöglichkeit interpretiert werden (vgl. dazu auch Frageformulierungen in Tabelle 3.1). Während die Landlord-Tech-Literatur auf Risiken digitaler Kontroll- und Selektionsinstrumente im Mietkontext hinweist [88, 86, 87], deutet der untersuchte Anwendungsfall darauf hin, dass digitale Technologien im Mietkontext nicht zwangsläufig als Kontrollinstrumente ausgestaltet sein müssen, sondern auch als Informations- und Beteiligungsschnittstellen konzipiert werden können. Wenngleich die vorliegende Untersuchung keine direkte Akzeptanz gemessen hat, schließen diese Erkenntnisse an die im Theorieabschnitt genannte Untersuchung zu lokalen Infrastrukturvorhaben an, in der wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit einen wesentlichen Beitrag zur Erklärung von Akzeptanz leistete und als ungerecht wahrgenommene Planungs- und Konsultationsverfahren mit starkem Widerstand verbunden waren [58]. Vor diesem Hintergrund ist denkbar, dass Mietende nach Nutzung einer digitalen Anwendung weniger Widerstand gegenüber Modernisierungen hegen. Die Befunde ordnen sich hier an Ergebnisse zu transparenten und beteiligungsorientierten Kommunikationsprozessen in Transformationskontexten an, die Partizipation als Bestandteil gerechter Dekarbonisierungsprozesse verstehen [54]. Sie deuten an, dass die Anwendungen die im untersuchten Laborszenario gemessene Wahrnehmung von Beteiligungsmöglichkeiten verbesserten. In der eingeführten Literatur wird postuliert, dass eine Stärkung wahrgenommener Beteiligungsmöglichkeiten geeignet sein kann, zugrundeliegende Unsicherheiten abzubauen [59]. Darüber hinaus wurden faire Kommunikation und prozedurale Korrektheit als Mechanismen

zur Verringerung von Angst und Unsicherheit gegenüber Veränderungen identifiziert [60]. Es ließe sich daher vermuten, dass die digitalen Anwendungen zugrundeliegende Unsicherheiten gegenüber Modernisierungsprozessen abbauen können.

6.1.2. Informationale Gerechtigkeit

Die Befunde zur informationalen Gerechtigkeit fallen differenzierter aus als die zur prozeduralen Gerechtigkeit. Gegenüber der schriftlichen Modernisierungsankündigung zeigte sich nur für die mobile AR-Anwendung ein signifikanter Anstieg, während der entsprechende Vergleich für die Desktop-Anwendung das Signifikanzniveau knapp verfehlte. Der direkte Vergleich zwischen mobiler AR- und Desktop-Anwendung ergab jedoch ebenfalls keinen signifikanten Unterschied. Die weiterführenden Ergebnisse der gemischten Varianzanalyse verdeutlichen hier, dass zwischen den beiden digitalen Anwendungen selbst kein signifikanter Haupteffekt ($H3b : p = 0,926$) und auch kein Interaktionseffekt in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe ($H4b: p = 0,519$) vorliegt. Dieser ausbleibende Unterschied zwischen mobiler AR- und Desktop-Anwendung relativiert die in Abschnitt 2.3.1 zusammengefassten Befunde für diesen Anwendungsfall, nach denen AR in zahlreichen Lern- und Vermittlungskontexten die kognitive Belastung reduzieren und die kognitive Leistung unterstützen kann [11, 12, 64]. Für die Forschungsfrage bedeutet dies, dass die Daten zwar Hinweise auf einen Vorteil digitaler Vermittlung gegenüber der schriftlichen Ankündigung liefern, aber keine belastbare Evidenz für eine Überlegenheit der AR-Variante gegenüber der Desktop-Variante.

Explorativ betrachtet fällt insbesondere die Steigerung der Werte zu Item „Info 5“ auf. Hier stiegen die Werte von 1,62 und 2,12 nach Lesen der Ankündigung auf 3,62, 3,50 und 3,00 nach Nutzung der Anwendungen (vgl. Abbildungen 5.4 und 5.5). „Info 5“ misst die wahrgenommene Zuschneidung der Erklärung auf die persönlichen Bedürfnisse (vgl. Tabelle 3.1). Teilnehmende könnten durch die dialogische Informationsvermittlung des LLMs den Eindruck erhalten haben, spezifischere oder bedarfsnähere Erklärungen zu erhalten als durch die schriftliche Ankündigung allein. Dies ist mit Befunden zur LLM-gestützten Aufbereitung fachsprachlicher Inhalte vereinbar, die zeigen, dass LLMs komplexe Fachtexte grundsätzlich lesbarer und für fachfremde Personen verständlicher aufbereiten können [19, 20]. Die gesteigerten informationalen Gerechtigkeitswerte lassen sich ebenfalls an Forschungen zu Laien-Experten-Kommunikation anschließen, die bereits im Rahmen der medizinischen Kommunikation [70, 71] nachgewiesen haben, dass immersive 3D-Technologien bei ausgeprägten Laien-Experten-Asymmetrien das Systemverständnis und den „Informed Consent“ verbessern können. Die Annahme, dass nicht nur der Umfang, sondern auch die inhaltliche Rahmung von Informationen die Zustimmung zu energetischen Sanierungen beeinflussen kann [85], lässt vor dem Hintergrund der gestiegenen informationalen Gerechtigkeit vermuten, dass die digitalen Anwendungen das Potenzial besitzen, die Zustimmung zu energetischen Sanierungen positiv zu beeinflussen.

Wie eingangs beschrieben, verfehlte die Desktop-Anwendung das Signifikanzniveau gegenüber der schriftlichen Modernisierungsankündigung knapp mit $p = 0,063$. Eine Erklärung dieses Umstands mit medieninhärenten kognitiven Barrieren ist empirisch nicht haltbar, da die Varianzanalyse keinen signifikanten Unterschied in der informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR- und Desktop-Anwendung aufweist ($p = 0,926$). Die naheliegende Erklärung, dass die geringe Stichprobengröße von $n = 8$ (Hälfte der Stichprobengesamtgröße, da stets nur die erste Anwendung berücksichtigt wurde) für die nicht gemessene Signifikanz verantwortlich ist, wird auch von der maximalen Rangbiserialkorrelation ($r_{rb} = 1$) des Wilcoxon-Tests gestützt. Diese belegt, dass alle Teilnehmenden die informationale Gerechtigkeit nach der Desktop-Anwendung entweder gleich hoch oder höher bewertet haben als nach der Nutzung der Anwendung¹. Insgesamt liefern die Daten daher keinen belastbaren Hinweis darauf, dass eine der beiden Anwendungen (Desktop oder AR) der jeweils anderen Anwendung hinsichtlich der informationalen Gerechtigkeit überlegen ist. Beide bieten jedoch das Potenzial, die wahrgenommene Informationsbereitstellung gegenüber der schriftlichen Ankündigung zu verbessern. Vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Informationsasymmetrien ist dieser Befund insbesondere für die eingeschränkte Sichtbarkeit und Überprüfbarkeit von Energieeffizienz und Sanierungswirkungen relevant. Denn die Ergebnisse zur informationalen Gerechtigkeit deuten an, dass die digitalen Anwendungen Informationsdefizite abbauen können, welche das Split-Incentive-Dilemma und die mieterseitige Unterbewertung energetischer Effizienz prägen [3, 35, 38, 4, 39].

6.2. Technologieakzeptanz

Die Ergebnisse zur Technologieakzeptanz zeigen keinen signifikanten Unterschied zwischen der mobilen AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung. Die Ergebnisse zur Technologieakzeptanz zeigen weder einen signifikanten Effekt bezüglich der Anwendungsart noch einen signifikanten Sequenzeffekt, wenngleich insbesondere der p-Wert des Interaktionseffekts sehr nahe am Signifikanzniveau lag (vgl. Tabelle 5.3). Diese Befunde relativieren eine direkte Übertragung der theoretisch erwarteten AR-Vorteile auf die gemessene Technologieakzeptanz aufgrund kognitiver Entlastung [11, 12, 64]. Da die kognitive Last aus Gründen des Fragebogenumfangs nicht erhoben wurde, kann aus dem fehlenden Effekt bezüglich der

¹Durch eine differenziertere Betrachtung der Wilcoxon-Berechnung lässt sich die Ursache für das nicht erreichte Signifikanzniveau herleiten. Die Rangsumme W_W beträgt 10 (vgl. Tabelle 5.1). Die Berechnungsvorschrift der Rangsumme impliziert bei $n = 8$ und $W_W = \frac{N \cdot (N+1)}{2} = 10$, dass exakt 4 der 8 Teilnehmenden eine Wertedifferenz von Null aufwiesen. Das heißt, wenngleich die informationale Gerechtigkeit nach Nutzung der Desktop-Anwendung mit 3,45 im Durchschnitt höher ausfiel als nach Lesen der schriftlichen Ankündigung mit 2,95 (vgl. Abbildung 5.5), bewertete die Hälfte der Teilnehmenden die informationale Gerechtigkeit in beiden Fällen gleich hoch. Da der Wilcoxon-Test Datenpunkte mit Null Differenz nicht berücksichtigt, fiel der mögliche Messfehler bei vier Datenpunkten trotz perfekter Tendenz mit $(\frac{1}{2})^4 = 0,0625$ zu hoch aus.

Anwendungsart nicht geschlossen werden, dass AR keine kognitiven Vorteile besitzt. Denkbar ist hier lediglich, dass mögliche Vorteile der räumlichen Visualisierung durch andere Faktoren, wie etwa ungewohnte Bedieninteraktionen, die technische Neuheit der AR-Nutzung oder die eingeschränkte Bedienoberfläche im Vergleich zur Desktop-Anwendung, überlagert wurden. Dies wäre mit Arbeiten [13, 66] vereinbar, die zeigen, dass die konkrete Gestaltung von AR-Schnittstellen und technischen Displays die kognitive Last beeinflussen kann. Es entspräche darüber hinaus Untersuchungen, nach denen die Eignung räumlicher und bildschirmbasierter Darstellungsformen von Nutzungskontext, Aufgabe und technischer Umsetzung abhängt [68, 72]. Für die wohnungswirtschaftliche Einordnung der Technologieakzeptanzergebnisse bedeutet dies, dass nicht die Anwendungsart selbst als zentraler Akzeptanztreiber dieser Studie identifiziert werden konnte. Die nominalen Werte deuten vorsichtig an, dass beide digitalen Varianten als akzeptable Informationszugänge bewertet wurden.

6.3. Usability

Für den direkten Vergleich zwischen mobiler AR-Anwendung und Desktop-Anwendung ergab sich kein signifikanter Haupteffekt der Anwendungsart auf die Nutzungszufriedenheit (H7 beibehalten: $p = 0,061$). Auffällig ist der signifikante Interaktionseffekt zwischen Anwendungsart und Sequenzgruppe (H8 verworfen bei $p = 0,006$). Deskriptiv zeigen die Daten, dass die jeweils zweite Anwendung in beiden Sequenzgruppen höher bewertet wurde als die zuerst genutzte Anwendung (vgl. Abbildung 5.9). Die höchste mittlere Nutzungszufriedenheit trat hier bei der als zweites genutzten Desktop-Anwendung auf. Zusammen mit dem signifikanten Interaktionseffekt (vgl. Tabelle 5.3) deutet dieses Muster darauf hin, dass die Nutzungszufriedenheit nicht unabhängig aus Anwendungsart und Reihenfolge erklärt werden kann. Vielmehr scheint die Desktop-Anwendung besonders von einer vorherigen Auseinandersetzung mit der mobilen AR-Anwendung profitiert zu haben. Welcher Umstand genau den Effekt verursacht hat, lässt sich mit dem vorliegenden Studiendesign nicht bestimmen. Dieser Reihenfolgeeffekt birgt jedoch Implikationen für den realen Anwendungsfall. Sofern beide Anwendungen zur Verfügung stehen, würden Mietende in einem realen Modernisierungsszenario voraussichtlich nur die ihrem Endgerät entsprechende Anwendungsvariante verwenden und könnten daher nicht von einer vorausgehenden Nutzung der jeweils anderen Variante profitieren. Insbesondere die hohe Zufriedenheit mit der Desktop-Anwendung unter Zweitnutzungsbedingungen lässt sich deshalb nicht unmittelbar auf eine alleinige erstmalige Desktop-Nutzung übertragen. Für die praktische Gestaltung folgt daraus, dass die Orientierung, die im Experiment möglicherweise durch die vorherige AR-Nutzung aufgebaut wurde, bereits beim ersten Kontakt mit der Desktop-Anwendung hergestellt werden müsste. Vorausgegangene Arbeiten [11, 12, 65] betonen hier, dass die kognitive Belastung nicht allein vom Medium, sondern wesentlich von der aufgabenangemessenen Informations- und

Interaktionsgestaltung abhängt. Für den Erstkontakt mit der Desktop-Anwendung wären daher insbesondere die Eignung einer klaren Einführung, einer intuitiven Navigation und kontextbezogener Hilfestellungen zu prüfen. Dies könnte dazu beitragen, entsprechende Lern- und Vertrautheitseffekte innerhalb einer einzelnen Nutzung herbeizuführen.

Die explorativ erhobenen Ergebnisse zu Effektivität und Effizienz ergänzen diese Einordnung. Im Sinne der gewählten Operationalisierung erreichten die meisten Versuchsdurchläufe eine vollständige Übereinstimmung zwischen den angegebenen Gütekriterien und der ausgewählten Modernisierungsmaßnahme. Ein eindeutiger anwendungsspezifischer Zusammenhang mit der Bearbeitungsdauer war nicht erkennbar; insbesondere führten längere Nutzungszeiten nicht systematisch zu einer höheren Effektivität. Diese fehlende anwendungsspezifische Effizienzüberlegenheit unterscheidet sich von mehreren in Abschnitt 2.3.2 dargestellten BIM-/AR-Befunden. In klar abgegrenzten Inspektions-, Koordinations- und Instandhaltungsaufgaben wurden mit AR kürzere Bearbeitungszeiten und geringere Fehlerquoten berichtet [73, 74, 75, 76]. Die Abweichung ist plausibel, weil diese Untersuchungen eine eindeutige operative Zielerreichung betrachteten, während die vorliegende Studie eine offener Informations-, Bewertungs- und Präferenzaufgabe untersuchte. Die Ergebnisse widersprechen der bisherigen Literatur daher nicht unmittelbar, begrenzen aber deren Übertragbarkeit auf den Anwendungsfall. Eine mögliche Interpretation dieser Ergebnisse für die praktische Mieterkommunikation wäre, künftige User Stories in der Anwendungsentwicklung sowohl auf eine schnelle Orientierungsnutzung als auch eine optionale Vertiefungsnutzung auszurichten, ohne eine längere Nutzung als Voraussetzung für ein nachvollziehbares Feedback vorzusehen.

Insgesamt zeigen die Usability-Ergebnisse, dass die mobile AR-Anwendung gegenüber der Desktop-Anwendung nicht als eindeutig nutzungszufriedener bewertet werden kann. Ebenso wenig lässt sich aus den Daten eine Überlegenheit der Desktop-Anwendung ableiten. Für die praktische Mieterkommunikation spricht der Befund daher nicht für eine ausschließliche Fokussierung auf eine einzelne Anwendungsart, sondern für die weitere Prüfung komplexer Zugangswege. Digitale Informationsangebote sollten so gestaltet werden, dass sie sowohl räumliche Verständlichkeit als auch niedrige Bedienhürden unterstützen. Ob hierfür AR, Desktop oder eine Kombination beider Zugänge am geeignetsten ist, müsste in weiterführenden Studien mit größeren und heterogeneren Stichproben sowie mit differenzierteren Methoden zur Bestimmung der tatsächlichen Wirkeffekte untersucht werden.

6.4. Limitationen

Die Aussagekraft der vorliegenden Untersuchung ist durch mehrere methodische Einschränkungen begrenzt, die in diesem Abschnitt transparent dargelegt werden.

6.4.1. Studiendesign

Die Erhebung fand unter kontrollierten Laborbedingungen statt. Diese Umgebung verbessert zwar die Vergleichbarkeit der Versuchsdurchläufe, reduziert jedoch die Übertragbarkeit auf reale Anwendungsfälle. Eine reale Modernisierungsankündigung ist mit konkreten finanziellen Folgen, möglichen Mietsteigerungen oder einer höheren finanziellen Gesamtbelastung trotz Einsparungen [4], Unsicherheit über die Wohnsituation und aufgrund der Streitanfälligkeit des Prozesses [48, 47] gegebenenfalls mit rechtlichen Auseinandersetzungen verbunden. Im Experiment fehlten diese realen Konsequenzen. Entsprechend ist nicht auszuschließen, dass Teilnehmende die Anwendung offener oder weniger konfliktbezogen bewerteten, als sie es in einer tatsächlichen Modernisierungssituation tun würden. Die Differenz zwischen einer digitalen Eingabemöglichkeit und realer Verfahrensmacht entspricht der in Abschnitt 2.2.3 hervorgehobenen Bedeutung authentischer und institutionell verankerter Partizipation [54, 56, 57, 58]. Eine Rückmeldefunktion kann „voice“ [10] signalisieren, ohne den Mietenden tatsächlich Einfluss auf die Entscheidung oder eine verbindliche Reaktion der Vermietenden zu gewährleisten. Die vorliegenden Ergebnisse sollten deshalb nicht als Nachweis verstanden werden, dass BIM-, AR- und LLM-basierte Anwendungen reale Modernisierungskonflikte lösen. Sie zeigen vielmehr, dass das untersuchte System unter Laborbedingungen Wahrnehmungsdimensionen beeinflusste, die in anderen Veränderungs- und Infrastrukturkontexten mit Akzeptanz beziehungsweise Widerstand verbunden sind [58, 59].

Das gewählte Cross-over-Design ermöglicht zwar eine forschungsökonomische Untersuchung der beiden digitalen Varianten innerhalb derselben Stichprobe, bringt jedoch eigene Einschränkungen mit sich. Da alle Teilnehmenden zunächst die schriftliche Modernisierungsankündigung lasen und erst danach mit den digitalen Anwendungen interagierten, war die Baseline-Bedingung nicht randomisiert. Diese feste Reihenfolge ist aus dem realen Anwendungsfall begründet, da die Modernisierungsankündigung im mietrechtlichen Verfahren den ersten formalen Kontaktpunkt darstellt. Methodisch bedeutet sie jedoch, dass Unterschiede zwischen Ankündigung und Anwendung nicht ausschließlich als Medieneffekt interpretiert werden können. Da die Teilnehmenden die digitalen Anwendungen erst nach der schriftlichen Ankündigung nutzten, konnten ihre Bewertungen durch ein bereits aufgebautes Grundverständnis des Szenarios beeinflusst sein. Auch Ermüdungs- und Vergleichseffekte sind nicht auszuschließen. Da mehrere Fragebogenteile wiederholt ausgefüllt wurden, könnten spätere Antworten durch Routinisierung, abnehmende Aufmerksamkeit oder direkte Vergleichslogiken zwischen den Anwendungen beeinflusst worden sein. Die zusätzliche Abfrage der App-Präferenz am Ende erlaubt zwar einen unmittelbaren Vergleich der beiden Systeme, kann aber ebenfalls durch Reihenfolgeeffekte geprägt sein. Die Studie kann daher nicht vollständig trennen, ob Bewertungen aus der isolierten Nutzungserfahrung, aus dem direkten Vergleich oder aus der kumulativen Auseinandersetzung mit dem Szenario entstanden sind.

Eine weitere Einschränkung betrifft die Konstruktvalidität der Technologieakzeptanz- und Gerechtigkeitsmessung. Die Fragen zu „Leistung 1“ und „Verhalten“ (vgl. Tabelle 3.2) wurden während der Versuchsdurchführung mehrfach kommentiert. In der Identifikation mit ihrer Mieterrolle wurde die zukünftige Nutzung der Anwendung und deren Nutzung im Alltag von Teilnehmenden verständlicherweise mit einer real anstehenden Modernisierung in ihrem bewohnten Mietgebäude assoziiert. Die Antworten zu diesen Fragen könnten daher durch Einstellungen der überwiegend zur Miete wohnenden Teilnehmenden gegenüber einer möglichen Modernisierung ihres bewohnten Mietshauses verzerrt worden sein. Bezüglich der Gerechtigkeitsmessung wurden Teilnehmende während des Versuchs mehrfach mündlich darauf hingewiesen, dass es sich bei der Anwendung um eine direkt durch den Vermieter bereitgestellte Anwendung handelt. Mehrere Items des Gerechtigkeitsfragebogens beziehen sich jedoch sprachlich auf das Verhalten des Vermieters, während die Teilnehmenden im Experiment mit einer digitalen Anwendung interagierten. Hier ist nicht eindeutig bestimmbar, ob die Antworten primär die wahrgenommene Fairness des Vermieters, die Qualität der Anwendung oder die Plausibilität des simulierten Verfahrens abbilden. Insbesondere sind die im Experiment wahrgenommenen Einfluss- und Widerspruchsmöglichkeiten nicht mit realen mietrechtlichen Einwendungs- oder Härtefallrechten gleichzusetzen. Die Anwendung bildet eine kommunikative Rückmeldeoption ab, keine rechtlich wirksame Möglichkeit, die Modernisierungsmaßnahme zu verändern. Da im Experiment keine Kontroll-, Überwachungs- oder Datenschutzwahrnehmungen erhoben wurden, kann die Studie nicht beurteilen, ob die Anwendung als Landlord-Tech, Kontrollinstrument oder Teilhabeangebot wahrgenommen wurde.

Die Untersuchung variiert mehrere technische und kommunikative Komponenten gemeinsam. Die digitalen Anwendungen unterscheiden sich von der schriftlichen Ankündigung nicht nur durch die Anwendungsart, sondern zugleich durch Interaktivität, visuelle Modellrepräsentation, dialogische Erklärungselemente und die Möglichkeit zur Eingabe eigener Präferenzen. Damit kann nicht eindeutig bestimmt werden, ob beobachtete Unterschiede auf BIM-basierte Visualisierung, AR-Darstellung, Desktop-Interaktion, LLM-gestützte Erklärungen oder auf die Kombination dieser Komponenten zurückzuführen sind. Auch der Vergleich zwischen mobiler AR-Anwendung und Desktop-Anwendung ist nur eingeschränkt interpretierbar. Die Anwendungsart ist mit weiteren Unterschieden verbunden, etwa Bildschirmgröße, Eingabeform, körperlicher Bewegungsinteraktion, räumlicher Orientierung und möglicher technischer Irritation. Ein fehlender signifikanter Unterschied zwischen den beiden digitalen Anwendungen ist daher nicht als Nachweis ihrer Gleichwertigkeit zu verstehen. Dafür wäre ein explizites Äquivalenz- oder Nichtunterlegenheitsdesign erforderlich gewesen. Die vorliegenden Ergebnisse erlauben lediglich die Aussage, dass innerhalb dieser Stichprobe kein statistisch signifikanter Unterschied nachgewiesen wurde.

Die Stichprobengröße stellt eine weitere zentrale Limitation dar. Die Poweranalyse wurde auf große erwartete Effekte ausgerichtet; kleinere oder mittlere Effekte konnten mit dem

gewählten Umfang nur begrenzt erkannt werden. Dadurch steigt insbesondere bei nicht signifikanten Befunden das Risiko, tatsächlich vorhandene Unterschiede zu übersehen. Dies betrifft vor allem die direkten Vergleiche zwischen AR- und Desktop-Anwendung sowie die Interpretation von Ergebnissen nahe am Signifikanzniveau. Darüber hinaus ist die Stichprobe nur eingeschränkt repräsentativ für die Zielgruppe realer Mietender. Die Teilnehmenden waren überwiegend jung, nutzten KI-Systeme häufig und hatten zugleich wenig Erfahrung mit Augmented Reality. Zwölf der sechzehn Teilnehmenden standen zwar zum Untersuchungszeitpunkt in einem Mietverhältnis, jedoch wusste keine Person von einer energetischen Sanierung im eigenen Mietverhältnis, und keine Person befand sich in einer Vermieterrolle. Die Ergebnisse bilden damit primär die Reaktionen einer jungen, KI-affinen Laborstichprobe auf ein simuliertes Modernisierungsszenario ab. Sie können nicht ohne Weiteres auf ältere, technologiefernere, einkommensschwächere oder von realen Modernisierungserfolgen betroffene Mietendengruppen übertragen werden.

6.4.2. Messdurchführung

Bei der Implementierung der Fragebögen sind zwei Fehler aufgetreten. Erstens war der numerische Teil der Antwortoptionen für Gerechtigkeitsfragen in Periode 1 (das heißt in der Messung der Modernisierungsankündigung) vertauscht: die Antwortoptionen reichten hier von „5 - gar nicht“ bis „1 - voll“ (anstelle von „1 - gar nicht“ bis „5 - voll“). Da die Reihenfolge der Optionen ansonsten identisch war („gar nicht“ an 1. Stelle, „voll“ an letzter Stelle), wurde für die Auswertung der verbale Antwortanker und nicht die fehlerhaften numerischen Werte berücksichtigt (das heißt: „5 - gar nicht“ = „1 - gar nicht“, „4“ = „2“, ... „1 - voll“ = „5 - voll“). Zweitens wies die Frage „Proz 1“ für Periode 2 (das heißt in der Messung der ersten Anwendung) einen Fehler in der Skala auf: anstelle der vorgesehenen Skala von „1 - gar nicht“ bis „5 - voll“ besaß die Skala ein Element mehr (von „0 - gar nicht“ bis „5 - voll“). Da weder 0 noch 1 als Antworten vertreten waren (siehe genaue Statistik in Anhang A.7), wurde die Antwortoption „0 - gar nicht“ aus der Auswertung ausgeschlossen. Die so gemessenen Werte müssen daher mit entsprechender Einschränkung interpretiert werden und sind nicht ohne weiteres übertragbar.

6.4.3. Anwendung

Die untersuchte Anwendung ist als prototypisches System zu verstehen. Die Ergebnisse geben daher Hinweise auf das Potenzial eines digitalen Vermittlungsformats, nicht aber auf die Praxistauglichkeit eines einsatzreifen Systems. Besonders die mobile AR-Anwendung ist von technischen Rahmenbedingungen abhängig, etwa Endgerät, Browser, Trackingstabilität, räumlicher Umgebung und Qualität der 3D-Modellüberlagerung. Einschränkungen

in diesen Bereichen können die Nutzungserfahrung beeinflussen, ohne dass sie zwingend dem konzeptionellen Ansatz der AR-Visualisierung selbst zuzurechnen sind. Vorige Untersuchungen dokumentieren hier unter anderem Anzeige- und Sichtfeldbeschränkungen [66], Lokalisierungs- und Integrationsprobleme [69, 75] sowie die Abhängigkeit von Tracking- und Positionierungsqualität [76] als relevante Implementierungsbarrieren. Auch die zugrunde liegende Modellierung begrenzt die Übertragbarkeit. Die Anwendung arbeitet mit einem konkreten Modernisierungsszenario und ausgewählten Modernisierungsoptionen. Reale Modernisierungsverfahren sind jedoch stärker durch gebäudespezifische technische Randbedingungen, unterschiedliche Eigentümerinteressen, Förderlogiken, Instandhaltungsanteile und rechtliche Detailfragen geprägt. Die in der Studie dargestellten Optionen reduzieren diese Komplexität notwendigerweise. Dies erhöht die experimentelle Vergleichbarkeit, begrenzt aber die Übertragbarkeit auf reale Modernisierungskontexte. Die LLM-gestützte Informationsvermittlung stellt eine weitere Limitation dar. Die erhobene KI-Qualität bildet lediglich die subjektive Qualitätswahrnehmung der Teilnehmenden ab. Sie ersetzt keine systematische fachliche Prüfung der generierten Inhalte hinsichtlich technischer, mietrechtlicher oder rechnerischer Korrektheit. Gerade weil die Anwendung Laien technische und mietrechtliche Informationen niedrigschwellig aufbereiten soll, ist für einen praktischen Einsatz eine robuste Qualitätssicherung der KI-generierten Antworten erforderlich. Wie im Forschungsstand beschrieben, ist die Erzeugung oder Stabilisierung eines fehlerhaften mentalen Modells eine unmittelbare Gefahr bei der Nutzung von LLMs [81].

Schließlich bildet die Anwendung zwar kommunikative Rückmeldung und Informationszugang ab, aber keine reale, verbindlich geregelte Beteiligungsstruktur. Für das prozedurale Gerechtigkeitsempfinden ist dieser Unterschied zentral. Eine digitale Eingabemöglichkeit kann im Experiment als Einflussmöglichkeit wahrgenommen werden, ohne dass im realen Prozess gesichert wäre, dass diese Eingabe von Vermietenden berücksichtigt, beantwortet oder in die Planung integriert wird. Für die praktische Anwendung wäre daher nicht nur die technische Oberfläche entscheidend, sondern auch die institutionelle Einbettung: Wer erhält die Rückmeldungen, wie werden sie dokumentiert, welche Verbindlichkeit haben sie, und wie werden Mietende über den weiteren Umgang mit ihren Eingaben informiert? Die vorliegenden Ergebnisse sollten deshalb nicht als Nachweis verstanden werden, dass BIM-, AR- und LLM-basierte Anwendungen reale Modernisierungskonflikte lösen können. Sie zeigen vielmehr, dass das untersuchte System unter Laborbedingungen Wahrnehmungsdimensionen beeinflusste, die in anderen Veränderungs- und Infrastrukturkontexten mit Akzeptanz beziehungsweise Widerstand zusammenhängen [58, 59]. Ob diese Effekte in realen Mietverhältnissen zu höherer Akzeptanz oder geringeren Konflikten beitragen, müssen Feldstudien mit heterogeneren Stichproben und realitätsnäheren Szenarien prüfen.

7. Fazit

Die vorliegende Arbeit untersuchte, inwieweit ein Informationssystem mit innovativen Technologien das prozedurale und informationale Gerechtigkeitsempfinden im Sinne der organisationalen Gerechtigkeit [10] beeinflussen kann. Dazu wurden zwei Versionen einer interaktiven Webanwendung entwickelt, die ein BIM-basiertes 3D-Raummodell mit einer LLM-gestützten Erklärungskomponente und einer Feedbackfunktion verbinden. Anschließend wurde in einer Cross-over-Studie mit 16 Teilnehmenden das Gerechtigkeitsempfinden aus der Perspektive von Mietenden gegenüber einer vom Vermieter angekündigten energetischen Modernisierungsmaßnahme zwischen einer schriftlichen Modernisierungsankündigung, einer Desktop-Version der Anwendung und einer mobilen AR-Version der Anwendung verglichen. Zusätzlich zur empfundenen Gerechtigkeit wurden Technologieakzeptanz, Nutzungszufriedenheit, wahrgenommene KI-Qualität, App-Präferenz und Net-Promoter-Score erhoben.

Für die prozedurale Gerechtigkeitsdimension ergaben sich nach beiden digitalen Anwendungen signifikant höhere Werte als nach der schriftlichen Ankündigung. Nach der Nutzung der digitalen Anwendungen bewerteten die Teilnehmenden ihre Ausdrucks-, Einfluss- und Widerspruchsmöglichkeiten höher. Bezüglich der informationalen Gerechtigkeit zeigte sich ein signifikanter Anstieg nur für die mobile AR-Anwendung. Der Unterschied zwischen der Desktop-Anwendung und der schriftlichen Ankündigung verfehlte trotz maximaler Effektstärke knapp das Signifikanzniveau bezüglich der wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit. Dies wird auf die geringe Stichprobengröße zurückgeführt, da nicht zuletzt im direkten Vergleich zwischen AR- und Desktop-Anwendung weder für die prozedurale noch für die informationale Gerechtigkeit signifikante Unterschiede bestanden. Für die Nutzungszufriedenheit und die Technologieakzeptanz zeigte sich kein signifikanter Haupteffekt zwischen der Desktop- und der AR-Anwendung. Ein festgestellter Interaktionseffekt, bei dem die Nutzungszufriedenheit der Desktop-Anwendung in der Gruppe, welche die AR-Anwendung zuerst bediente, signifikant höher ausfiel, verweist auf mögliche Lern-, Gewöhnungs- oder andere Reihenfolgeeffekte. Aus den Ergebnissen lässt sich insgesamt jedoch nicht ableiten, ob die AR-Darstellung allein die Gerechtigkeits- oder Technologieakzeptanzwerte moderiert. Es liegt nahe, dass das gebündelte Vermittlungsformat aus Visualisierung, Interaktion, dialogischer Erklärung und Rückmeldemöglichkeit die Bewertung im Vergleich mit der schriftlichen

Ankündigung beeinflusste. Welchen Anteil die einzelnen Komponenten daran hatten, kann das gewählte Studiendesign nicht bestimmen.

Der Beitrag der Arbeit liegt in erster Linie auf technischer und in zweiter Linie auf empirischer Ebene. Technisch wurde eine Anwendung implementiert, die die AR-Darstellung und LLM-gestützte Erklärung eines IFC-Gebäudemodells in einer Web-Anwendung zusammenführt. Wie in Form der Herausforderungen im Implementationskapitel dokumentiert, markiert diese Zusammenführung, insbesondere WebXR und IFC sowie die browserbasierte Kontextbereitstellung dieser IFC-Informationen für LLMs, einen innovativen Beitrag im Spitzentechnologiebereich. Der ausgearbeitete Prototyp kann als Basis dienen, um räumliche Darstellung, kontextbezogene Erklärungen und nachvollziehbare Rückmeldungswege adressatengerecht zu vereinen. Empirisch liefert die Studie explorative Vergleichsdaten zur Kombination von BIM, AR und LLMs in der Modernisierungskommunikation. Dabei wurde das Konzept der organisationalen Gerechtigkeit auf die Kommunikation energetischer Modernisierungen im Mietwohnungsbestand übertragen. Die Modernisierungsankündigung wird damit nicht nur als rechtliches Informationsinstrument, sondern auch als interaktiver Kommunikationsprozess betrachtet, dessen Untersuchungsgegenstand sich unter Einsatz technischer Anwendungen in den Bereich der Mensch-Computer-Interaktion verschiebt. Für die praktische Modernisierungskommunikation folgt aus den Ergebnissen, dass innovative Technologien in digitalen Anwendungen schriftliche Modernisierungsankündigungen sinnvoll ergänzen können, um Gerechtigkeitsempfinden bei Mietenden zu erhöhen.

Die empirischen Befunde unterliegen dabei Limitationen, die von potenzieller Anschlussforschung adressiert werden sollten. Die kleine, überwiegend junge und KI-affine Stichprobe war auf große Effekte ausgelegt und bildet die heterogene Mietendenschaft nur eingeschränkt ab. Da die schriftliche Ankündigung stets zuerst präsentiert wurde, ließen sich Medien- und Reihenfolgeeffekte nicht vollständig trennen. Zudem fehlten im Laborszenario die finanziellen, rechtlichen und sozialen Konsequenzen einer tatsächlichen Modernisierung. Zukünftige Arbeiten sollten die Befunde mit größeren und heterogeneren Stichproben sowie in realitätsnäheren Feldkontexten prüfen. Besonders relevant wären hierbei Feldstudien in realen Modernisierungsszenarien, die neben unmittelbaren Selbstauskünften auch Wissens- oder Verhaltensmaße erheben. Dabei sollten die Komponenten des Vermittlungsformats systematisch getrennt werden, um die Effekte von Visualisierung, AR-Darstellung, dialogischer Erklärung und Feedbackfunktionen bestimmen zu können.

Energetische Modernisierungen sind durchzogen von Informationsasymmetrien und gegenläufigen Interessen zwischen Mietenden und Vermietenden. Derzeit können digitale Anwendungen distributive Konflikte um Mieterhöhungen, Umlagefähigkeit und Energieeinsparungen nicht zuletzt aufgrund rechtlicher Rahmenbedingungen nur geringfügig unterstützen. Das im Vergleich zur schriftlichen Ankündigung wesentlich höher ausfallende Gerechtigkeitsempfinden kann vor diesem Hintergrund als Handlungsaufforderung verstanden werden,

Zertifizierungsstrategien für digitale Systeme zu entwickeln, die niedrigschwellige Informationszugänge und Beteiligungsmöglichkeiten bereitstellen. Besonders relevant wäre hierbei die Ausarbeitung einer systematischen Strategie zur transparenten, fachlichen und rechtlichen Prüfung KI-basierter Systeme.

Dieselben humanistischen Werte, die auch dem europäischen Regelwerk zur künstlichen Intelligenz [108] zugrunde liegen, weisen den Weg für einen solchen verantwortungsvollen Technologieeinsatz. Die vorliegende Arbeit bewegt sich hier an der Schnittstelle von zwei der größten Transformationsprozesse unserer Zeit: der Dekarbonisierung des Gebäudesektors und der Regulierung von Spitzentechnologien wie künstlicher Intelligenz. Sie versteht sich als kleiner Schritt hin zu einer neuen Generation digitaler Vermittlungssysteme, welche die soziale Nachhaltigkeit der Energiewende im Wohnungssektor nicht nur einfordern, sondern durch innovative Technologien erst praktisch realisierbar machen.

Literaturverzeichnis

- [1] Umweltbundesamt. *Aktuelle Treibhausgas-Projektionen: Entwicklung der Treibhausgas-Emissionen und Projektionen bis 2030 und 2045 in Deutschland*. März 2025. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimaschutz-energiepolitik-in-deutschland/szenarien-projektionen/treibhausgas-projektionen/aktuelle-treibhausgas-projektionen> (besucht am 11. 07. 2026).
- [2] Umweltbundesamt. *Weg zum klimaneutralen Gebäudesektor: Fokus auf transformative Wirkung*. Studie und Leitfaden. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2024.
- [3] Leo Reutter. „Inefficient Incentives for Energy Saving in Tenancy Law and Policy Options to Remedy the Landlord-Tenant Dilemma“. In: *European Journal of Law and Economics* 59.1 (Feb. 2025), S. 179–218. ISSN: 0929-1261, 1572-9990. DOI: [10.1007/s10657-024-09827-7](https://doi.org/10.1007/s10657-024-09827-7). URL: <https://link.springer.com/10.1007/s10657-024-09827-7> (besucht am 15. 05. 2026).
- [4] Ines Weber und Anna Wolff. „Energy Efficiency Retrofits in the Residential Sector – Analysing Tenants’ Cost Burden in a German Field Study“. In: *Energy Policy* 122 (Nov. 2018), S. 680–688. ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2018.08.007](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.08.007). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421518305147> (besucht am 17. 05. 2026).
- [5] Kenneth Gillingham, Richard G. Newell und Karen Palmer. „Energy Efficiency Economics and Policy“. In: *Annual Review of Resource Economics* 1.1 (Okt. 2009), S. 597–620. ISSN: 1941-1340, 1941-1359. DOI: [10.1146/annurev.resource.102308.124234](https://doi.org/10.1146/annurev.resource.102308.124234). URL: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.resource.102308.124234> (besucht am 15. 05. 2026).
- [6] Thomas Hewett u. a. *ACM SIGCHI Curricula for Human-Computer Interaction*. Association for Computing Machinery, 1. Jan. 1992. ISBN: 978-0-89791-474-1. DOI: [10.1145/2594128](https://doi.org/10.1145/2594128). URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=2594128> (besucht am 13. 07. 2026).
- [7] Paul Milgram und Fumio Kishino. „A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays“. In: *IEICE Transactions on Information and Systems* E77-D.12 (Dez. 1994), S. 1321–1329.

- [8] Ronald T. Azuma. „A Survey of Augmented Reality“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6.4 (Aug. 1997), S. 355–385. ISSN: 1054-7460. DOI: [10.1162/pres.1997.6.4.355](https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355). URL: <https://direct.mit.edu/pvar/article/6/4/355-385/18336> (besucht am 13. 07. 2026).
- [9] Arbeitsgemeinschaft für zeitgemäßes Bauen e.V. 13. *Wohnungsbau-Tag 2022, Wohnungsbau-Studie: Die Zukunft des Bestandes*. 2022. URL: https://www.impulse-fuer-den-wohnungsbau.de/fileadmin/images/Studien/2022-02_Studie/Charts_zur_Studie_-_Wohnungsbau-Tag_2022.pdf (besucht am 11. 07. 2026).
- [10] Jason A. Colquitt. „On the Dimensionality of Organizational Justice: A Construct Validation of a Measure.“ In: *Journal of Applied Psychology* 86.3 (Juni 2001), S. 386–400. ISSN: 1939-1854, 0021-9010. DOI: [10.1037/0021-9010.86.3.386](https://doi.org/10.1037/0021-9010.86.3.386). URL: <https://doi.org/10.1037/0021-9010.86.3.386> (besucht am 24. 05. 2026).
- [11] Josef Buchner, Katja Buntins und Michael Kerres. „A Systematic Map of Research Characteristics in Studies on Augmented Reality and Cognitive Load“. In: *Computers and Education Open* 2, 100036 (Dez. 2021). ISSN: 2666-5573. DOI: [10.1016/j.caeo.2021.100036](https://doi.org/10.1016/j.caeo.2021.100036). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2666557321000070> (besucht am 17. 06. 2026).
- [12] Josef Buchner, Katja Buntins und Michael Kerres. „The Impact of Augmented Reality on Cognitive Load and Performance: A Systematic Review“. In: *Journal of Computer Assisted Learning* 38.1 (Feb. 2022), S. 285–303. ISSN: 0266-4909, 1365-2729. DOI: [10.1111/jcal.12617](https://doi.org/10.1111/jcal.12617). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jcal.12617> (besucht am 17. 06. 2026).
- [13] Emin İbili. „Effect of Augmented Reality Environments on Cognitive Load: Pedagogical Effect, Instructional Design, Motivation and Interaction Interfaces“. In: *International Journal of Progressive Education* 15.5 (16. Okt. 2019), S. 42–57. ISSN: 1554-5210. DOI: [10.29329/ijpe.2019.212.4](https://doi.org/10.29329/ijpe.2019.212.4). URL: <http://ijpe.penpublishing.net/makale/1112> (besucht am 14. 07. 2026).
- [14] Ashish Vaswani u. a. „Attention Is All You Need“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Hrsg. von I. Guyon u. a. Bd. 30. Curran Associates, Inc., 2017. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/3f5ee243547dee91bd053c1c4a845aa-Paper.pdf (besucht am 14. 07. 2026).
- [15] Tom Brown u. a. „Language Models Are Few-Shot Learners“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. Hrsg. von H. Larochelle u. a. Bd. 33. Curran Associates, Inc., 2020, S. 1877–1901. URL: https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2020/file/1457c0d6bfcb4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf (besucht am 15. 07. 2026).

- [16] Athanasios Karapantelakis u. a. „Using Large Language Models to Understand Telecom Standards“. In: *2024 IEEE International Conference on Machine Learning for Communication and Networking (ICMLCN)*. Stockholm, Sweden: IEEE, 5. Mai 2024, S. 440–446. ISBN: 979-8-3503-4319-9. DOI: [10.1109/ICMLCN59089.2024.10624786](https://doi.org/10.1109/ICMLCN59089.2024.10624786). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10624786/> (besucht am 14. 07. 2026).
- [17] Rujing Yao u. a. „Intelligent Legal Assistant: An Interactive Clarification System for Legal Question Answering“. In: *Companion Proceedings of the ACM on Web Conference 2025. WWW '25: The ACM Web Conference 2025*. Sydney NSW Australia: ACM, 8. Mai 2025, S. 2935–2938. ISBN: 979-8-4007-1331-6. DOI: [10.1145/3701716.3715204](https://doi.org/10.1145/3701716.3715204). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3701716.3715204> (besucht am 14. 07. 2026).
- [18] Xiaoxian Yang u. a. „Large Language Models for Automated Q&A Involving Legal Documents: A Survey on Algorithms, Frameworks and Applications“. In: *International Journal of Web Information Systems* 20.4 (19. Juli 2024), S. 413–435. ISSN: 1744-0084. DOI: [10.1108/IJWIS-12-2023-0256](https://doi.org/10.1108/IJWIS-12-2023-0256). URL: <http://www.emerald.com/ijwis/article/20/4/413-435/1216712> (besucht am 14. 07. 2026).
- [19] Theo Guidroz u. a. *LLM-based Text Simplification and Its Effect on User Comprehension and Cognitive Load*. Version 1. 2025. DOI: [10.48550/ARXIV.2505.01980](https://doi.org/10.48550/ARXIV.2505.01980). URL: <https://arxiv.org/abs/2505.01980> (besucht am 14. 07. 2026). Vorveröffentlichung.
- [20] Samer Alabed u. a. „Large Language Models for Simplifying Radiology Reports: A Systematic Review and Meta-Analysis of Patient, Public, and Clinician Evaluations“. In: *The Lancet Digital Health* 8.2 (Feb. 2026). ISSN: 2589-7500. DOI: [10.1016/j.landig.2025.100960](https://doi.org/10.1016/j.landig.2025.100960). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2589750025001426> (besucht am 14. 07. 2026).
- [21] Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen. *IntelMOD - Intelligente Modernisierungsplattform auf Basis des Funktionalen Kostensplittings*. EnArgus Projektdatenbank. 2024. URL: <https://www.enargus.de/pub/bscw.cgi/?op=enargus.eps2&q=%2201260727/1%22&v=10&id=36438410> (besucht am 03. 07. 2026).
- [22] International Organization for Standardization. *Ergonomics of Human-System Interaction – Part 11: Usability: Definitions and Concepts*. ISO Standard ISO 9241-11:2018. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization, 2018. URL: <https://www.iso.org/standard/63500.html> (besucht am 11. 07. 2026).
- [23] Inés Macho-Stadler u. a. *An Introduction to the Economics of Information: Incentives and Contracts*. 2. ed., reprinted. Oxford: Oxford Univ. Press, 2009. 287 S. ISBN: 978-0-19-924325-9.
- [24] Alberto Bisin und Piero Gottardi. „Competitive Equilibria with Asymmetric Information“. In: *Journal of Economic Theory* 87.1 (Juli 1999), S. 1–48. ISSN: 0022-0531. DOI: [10.1006/jeth.1999.2514](https://doi.org/10.1006/jeth.1999.2514). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022053199925140> (besucht am 19. 04. 2026).

- [25] Kenneth J. Arrow. „Agency and the Market“. In: *Handbook of Mathematical Economics*. Hrsg. von Kenneth J. Arrow und Michael D. Intriligator. Bd. 3. Elsevier, 1986, S. 1183–1195. ISBN: 978-0-444-86128-3. DOI: [10.1016/S1573-4382\(86\)03005-9](https://doi.org/10.1016/S1573-4382(86)03005-9). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1573438286030059> (besucht am 19. 04. 2026).
- [26] Guru Guruganesh, Jon Schneider und Joshua R. Wang. „Contracts under Moral Hazard and Adverse Selection“. In: *Proceedings of the 22nd ACM Conference on Economics and Computation*. EC '21: The 22nd ACM Conference on Economics and Computation. Budapest Hungary: ACM, 18. Juli 2021, S. 563–582. ISBN: 978-1-4503-8554-1. DOI: [10.1145/3465456.3467637](https://doi.org/10.1145/3465456.3467637). URL: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/3465456.3467637> (besucht am 19. 04. 2026).
- [27] George A. Akerlof. „The Market for “Lemons”: Quality Uncertainty and the Market Mechanism“. In: *The Quarterly Journal of Economics* 84.3 (Aug. 1970), S. 488–500. ISSN: 0033-5533. DOI: [10.2307/1879431](https://doi.org/10.2307/1879431). URL: <https://academic.oup.com/qje/article-lookup/doi/10.2307/1879431> (besucht am 11. 07. 2026).
- [28] Mark V. Pauly. „The Economics of Moral Hazard: Comment“. In: *The American Economic Review* 58.3 (1968), S. 531–537. ISSN: 0002-8282. JSTOR: [1813785](https://www.jstor.org/stable/1813785). URL: <http://www.jstor.org/stable/1813785> (besucht am 19. 04. 2026).
- [29] Allard E. Dembe und Leslie I. Boden. „Moral Hazard: A Question of Morality?“ In: *NEW SOLUTIONS: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy* 10.3 (Nov. 2000), S. 257–279. ISSN: 1048-2911, 1541-3772. DOI: [10.2190/1GU8-EQN8-02J6-2RXK](https://doi.org/10.2190/1GU8-EQN8-02J6-2RXK). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.2190/1GU8-EQN8-02J6-2RXK> (besucht am 19. 04. 2026).
- [30] Kenneth J. Arrow. „Uncertainty and the Welfare Economics of Medical Care“. In: *The American Economic Review* 53.5 (1963), S. 941–973. ISSN: 0002-8282, 1944-7981. JSTOR: [1812044](https://www.jstor.org/stable/1812044). URL: <http://www.jstor.org/stable/1812044> (besucht am 19. 04. 2026).
- [31] Kenneth J. Arrow. „The Economics of Moral Hazard: Further Comment“. In: *The American Economic Review* 58.3 (1968), S. 537–539. JSTOR: [1813786](https://www.jstor.org/stable/1813786). URL: <https://www.jstor.org/stable/1813786> (besucht am 11. 07. 2026).
- [32] Michael C. Jensen und William H. Meckling. „Theory of the Firm: Managerial Behavior, Agency Costs and Ownership Structure“. In: *Journal of Financial Economics* 3.4 (Okt. 1976), S. 305–360. ISSN: 0304-405X. DOI: [10.1016/0304-405X\(76\)90026-X](https://doi.org/10.1016/0304-405X(76)90026-X). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0304405X7690026X> (besucht am 11. 07. 2026).
- [33] R. W. Waterman und K. J. Meier. „Principal-Agent Models: An Expansion?“ In: *Journal of Public Administration Research and Theory* 8.2 (1. Apr. 1998), S. 173–202. ISSN: 1053-1858, 1477-9803. DOI: [10.1093/oxfordjournals.jpart.a024377](https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.jpart.a024377). URL: <https://academic.oup.com/jpart/article-lookup/doi/10.1093/oxfordjournals.jpart.a024377> (besucht am 15. 05. 2026).

- [34] Carl Blumstein u. a. „Overcoming Social and Institutional Barriers to Energy Conservation“. In: *Energy* 5.4 (Apr. 1980), S. 355–371. ISSN: 0360-5442. DOI: [10.1016/0360-5442\(80\)90036-5](https://doi.org/10.1016/0360-5442(80)90036-5). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/0360544280900365> (besucht am 17. 05. 2026).
- [35] Erica Myers. „Asymmetric Information in Residential Rental Markets: Implications for the Energy Efficiency Gap“. In: *Journal of Public Economics* 190, 104251 (Okt. 2020). ISSN: 0047-2727. DOI: [10.1016/j.jpubeco.2020.104251](https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2020.104251). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0047272720301158> (besucht am 17. 05. 2026).
- [36] Steven März, Ines Stelk und Franziska Stelzer. „Are Tenants Willing to Pay for Energy Efficiency? Evidence from a Small-Scale Spatial Analysis in Germany“. In: *Energy Policy* 161, 112753 (Feb. 2022). ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2021.112753](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112753). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421521006194> (besucht am 17. 05. 2026).
- [37] Jesse Melvin. „The Split Incentives Energy Efficiency Problem: Evidence of Underinvestment by Landlords“. In: *Energy Policy* 115 (Apr. 2018), S. 342–352. ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2017.11.069](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.11.069). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421517308157> (besucht am 17. 05. 2026).
- [38] Lisa Sieger und Christoph Weber. „Inefficient Markets for Energy Efficiency? – The Efficiency Premium Puzzle in the German Rental Housing Market“. In: *Energy Policy* 183, 113819 (Dez. 2023). ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2023.113819](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113819). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421523004044> (besucht am 17. 05. 2026).
- [39] Kenneth Gillingham, Matthew Harding und David Rapson. „Split Incentives in Residential Energy Consumption“. In: *The Energy Journal* 33.2 (Apr. 2012), S. 37–62. ISSN: 0195-6574, 1944-9089. DOI: [10.5547/01956574.33.2.3](https://doi.org/10.5547/01956574.33.2.3). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.5547/01956574.33.2.3> (besucht am 17. 05. 2026).
- [40] Lucas W. Davis. „Evaluating the Slow Adoption of Energy Efficient Investments: Are Renters Less Likely to Have Energy Efficient Appliances?“ In: *The Design and Implementation of US Climate Policy*. Hrsg. von Don Fullerton und Catherine Wolfram. Chicago: University of Chicago Press, 2011, S. 301–316.
- [41] Yvonne Phillips. „Landlords versus Tenants: Information Asymmetry and Mismatched Preferences for Home Energy Efficiency“. In: *Energy Policy* 45 (Juni 2012), S. 112–121. ISSN: 0301-4215. DOI: [10.1016/j.enpol.2012.01.067](https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.01.067). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030142151200095X> (besucht am 30. 05. 2026).

- [42] Xavier Lambin, Joachim Schleich und Corinne Faure. „The Energy Efficiency Gap in the Rental Housing Market: It Takes Both Sides to Build a Bridge“. In: *The Energy Journal* 44.1 (Jan. 2023), S. 75–92. ISSN: 0195-6574, 1944-9089. DOI: [10.5547/01956574.44.1.xlam](https://doi.org/10.5547/01956574.44.1.xlam). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.5547/01956574.44.1.xlam> (besucht am 17. 05. 2026).
- [43] Statistisches Bundesamt (Destatis). *EU-Vergleich: Deutschland ist Mieterland Nr. 1 in der EU*. 30. Apr. 2026. URL: <https://www.destatis.de/Europa/DE/Thema/Bevoelkerung-Arbeit-Soziales/Soziales-Lebensbedingungen/Mieteranteil.html> (besucht am 11. 07. 2026).
- [44] Puja Singhal u. a. „Split-Incentives in Energy Efficiency Investments? Evidence from Rental Housing“. In: *Resource and Energy Economics* 82, 101488 (Mai 2025). ISSN: 0928-7655. DOI: [10.1016/j.reseneeco.2025.101488](https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2025.101488). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0928765525000120> (besucht am 02. 07. 2026).
- [45] Ray Galvin. „Do Housing Rental and Sales Markets Incentivise Energy-Efficient Retrofitting of Western Germany’s Post-War Apartments? Challenges for Property Owners, Tenants, and Policymakers“. In: *Energy Efficiency* 16.4 (Apr. 2023). ISSN: 1570-646X, 1570-6478. DOI: [10.1007/s12053-023-10102-y](https://doi.org/10.1007/s12053-023-10102-y). URL: <https://link.springer.com/10.1007/s12053-023-10102-y> (besucht am 17. 05. 2026).
- [46] Åke Blomsterberg und Eja Pedersen. „Tenants Acceptance or Rejection of Major Energy Renovation of Block of Flats – IEA Annex 56“. In: *Energy Procedia* 78 (Nov. 2015), S. 2346–2351. ISSN: 1876-6102. DOI: [10.1016/j.egypro.2015.11.396](https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.396). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1876610215021281> (besucht am 14. 07. 2026).
- [47] Kirsten David. „Funktionales Kostensplitting bei energetischen Modernisierungen als Beitrag zur nachhaltigen Entwicklung von Mietwohnbeständen“. In: *Bauphysik* 43.3 (Juni 2021), S. 186–194. ISSN: 0171-5445, 1437-0980. DOI: [10.1002/bapi.202100013](https://doi.org/10.1002/bapi.202100013). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/bapi.202100013> (besucht am 22. 05. 2026).
- [48] Kirsten David. „Funktionales Kostensplitting zur Ermittlung von Mieterhöhungen nach energetischen Maßnahmen: Eine Handlungsempfehlung auf Basis theoretischer und empirischer Untersuchungen“. Diss. HafenCity Universität Hamburg, 2019. URL: https://repos.hcu-hamburg.de/bitstream/hcu/505/1/David_Funktionales_Kostensplitting_Dissertation_HCU_2019.pdf (besucht am 11. 07. 2026).
- [49] BUND. *BUND verleiht Forschungspreis zur Nachhaltigkeit*. 26. Okt. 2020. URL: <https://www.bund.net/themen/aktuelles/detail-aktuelles/news/bund-verleiht-forschungspreis-zur-nachhaltigkeit/> (besucht am 11. 07. 2026).

- [50] Mandeep Sekhon, Martin Cartwright und Jill J. Francis. „Acceptability of Healthcare Interventions: An Overview of Reviews and Development of a Theoretical Framework“. In: *BMC Health Services Research* 17.1 (Dez. 2017). ISSN: 1472-6963. DOI: [10.1186/s12913-017-2031-8](https://doi.org/10.1186/s12913-017-2031-8). URL: <http://bmchealthservres.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12913-017-2031-8> (besucht am 24. 05. 2026).
- [51] Marisa Casale u. a. „A Conceptual Framework and Exploratory Model for Health and Social Intervention Acceptability among African Adolescents and Youth“. In: *Social Science & Medicine* 326, 115899 (Juni 2023). ISSN: 0277-9536. DOI: [10.1016/j.socscimed.2023.115899](https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2023.115899). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0277953623002563> (besucht am 24. 05. 2026).
- [52] Jerald Greenberg. „A Taxonomy of Organizational Justice Theories“. In: *The Academy of Management Review* 12.1 (Jan. 1987), S. 9–22. ISSN: 0363-7425. DOI: [10.2307/257990](https://doi.org/10.2307/257990). JSTOR: 257990. URL: <http://www.jstor.org/stable/257990?origin=crossref> (besucht am 24. 05. 2026).
- [53] Dunja Krause u. a. „Just Transitions for a New Eco-Social Contract: Analysing the Relations between Welfare Regimes and Transition Pathways“. In: *Transfer: European Review of Labour and Research* 28.3 (Aug. 2022), S. 367–382. ISSN: 1024-2589, 1996-7284. DOI: [10.1177/10242589221127838](https://doi.org/10.1177/10242589221127838). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/10242589221127838> (besucht am 30. 05. 2026).
- [54] Paul Upham, Benjamin Sovacool und Bipashyee Ghosh. „Just Transitions for Industrial Decarbonisation: A Framework for Innovation, Participation, and Justice“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 167 (Okt. 2022). ISSN: 1364-0321. DOI: [10.1016/j.rser.2022.112699](https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112699). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032122005883> (besucht am 30. 05. 2026).
- [55] Kirsten David u. a. *KI-gestützte Beratung bei Modernisierung von Mietwohnungsbau-beständen - KIMM*. Technischer Bericht. Universität Bielefeld, Forschungsstelle für Immobilienrecht (FIR), 2026. DOI: [10.4119/UNIBI/3015046](https://doi.org/10.4119/UNIBI/3015046). URL: <https://pub.uni-bielefeld.de/record/3015046> (besucht am 30. 05. 2026).
- [56] Ana Stojilovska. „Energy Poverty and the Role of Institutions: Exploring Procedural Energy Justice – Ombudsman in Focus“. In: *Journal of Environmental Policy & Planning* 25.2 (4. März 2023), S. 169–181. ISSN: 1523-908X, 1522-7200. DOI: [10.1080/1523908X.2021.1940895](https://doi.org/10.1080/1523908X.2021.1940895). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/1523908X.2021.1940895> (besucht am 30. 05. 2026).
- [57] Adam X. Hearn. „Positive Energy District Stakeholder Perceptions and Measures for Energy Vulnerability Mitigation“. In: *Applied Energy* 322, 119477 (Sep. 2022). ISSN: 0306-2619. DOI: [10.1016/j.apenergy.2022.119477](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119477). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261922008030> (besucht am 30. 05. 2026).

- [58] Patrick Devine-Wright. „Explaining “NIMBY” Objections to a Power Line: The Role of Personal, Place Attachment and Project-Related Factors“. In: *Environment and Behavior* 45.6 (Aug. 2013), S. 761–781. ISSN: 0013-9165, 1552-390X. DOI: [10.1177/0013916512440435](https://doi.org/10.1177/0013916512440435). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0013916512440435> (besucht am 30. 05. 2026).
- [59] Joanna Georgalis u. a. „Change Process Characteristics and Resistance to Organisational Change: The Role of Employee Perceptions of Justice“. In: *Australian Journal of Management* 40.1 (Feb. 2015), S. 89–113. ISSN: 0312-8962, 1327-2020. DOI: [10.1177/0312896214526212](https://doi.org/10.1177/0312896214526212). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/0312896214526212> (besucht am 30. 05. 2026).
- [60] Nabeel Rehman u. a. „The Psychology of Resistance to Change: The Antidotal Effect of Organizational Justice, Support and Leader-Member Exchange“. In: *Frontiers in Psychology* 12, 678952 (2. Aug. 2021). ISSN: 1664-1078. DOI: [10.3389/fpsyg.2021.678952](https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.678952). URL: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2021.678952/full> (besucht am 30. 05. 2026).
- [61] John Sweller. „Cognitive Load During Problem Solving: Effects on Learning“. In: *Cognitive Science* 12.2 (Apr. 1988), S. 257–285. ISSN: 0364-0213, 1551-6709. DOI: [10.1207/s15516709cog1202_4](https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4). URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1207/s15516709cog1202_4 (besucht am 13. 06. 2026).
- [62] Paul Chandler und John Sweller. „Cognitive Load Theory and the Format of Instruction“. In: *Cognition and Instruction* 8.4 (Dez. 1991), S. 293–332. ISSN: 0737-0008, 1532-690X. DOI: [10.1207/s1532690xcio804_2](https://doi.org/10.1207/s1532690xcio804_2). URL: http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1207/s1532690xcio804_2 (besucht am 13. 06. 2026).
- [63] John Sweller, Jeroen J. G. van Merriënboer und Fred G. W. C. Paas. „Cognitive Architecture and Instructional Design“. In: *Educational Psychology Review* 10.3 (Sep. 1998), S. 251–296. ISSN: 1040-726X, 1573-336X. DOI: [10.1023/A:1022193728205](https://doi.org/10.1023/A:1022193728205). URL: <https://link.springer.com/10.1023/A:1022193728205> (besucht am 13. 06. 2026).
- [64] Matisse Poupard u. a. „A Systematic Review of Immersive Technologies for Education: Learning Performance, Cognitive Load and Intrinsic Motivation“. In: *British Journal of Educational Technology* 56.1 (Jan. 2025), S. 5–41. ISSN: 0007-1013, 1467-8535. DOI: [10.1111/bjet.13503](https://doi.org/10.1111/bjet.13503). URL: <https://bera-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/bjet.13503> (besucht am 17. 06. 2026).
- [65] Jana Gonnermann-Müller und Jule M. Krüger. „Unlocking Augmented Reality Learning Design Based on Evidence From Empirical Cognitive Load Studies—A Systematic Literature Review“. In: *Journal of Computer Assisted Learning* 41.1, e13095 (Feb. 2025). ISSN: 0266-4909, 1365-2729. DOI: [10.1111/jcal.13095](https://doi.org/10.1111/jcal.13095). URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jcal.13095> (besucht am 17. 06. 2026).

- [66] James Baumeister u. a. „Cognitive Cost of Using Augmented Reality Displays“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 23.11 (Nov. 2017), S. 2378–2388. ISSN: 1077-2626. DOI: [10.1109/TVCG.2017.2735098](https://doi.org/10.1109/TVCG.2017.2735098). URL: <http://ieeexplore.ieee.org/document/8007333/> (besucht am 17. 06. 2026).
- [67] Christian Schranz, Harald Urban und Alexander Gerger. „Potentials of Augmented Reality in a BIM Based Building Submission Process“. In: *Journal of Information Technology in Construction* 26 (26. Juli 2021), S. 441–457. ISSN: 1874-4753. DOI: [10.36680/j.itcon.2021.024](https://doi.org/10.36680/j.itcon.2021.024). URL: <https://www.itcon.org/paper/2021/24> (besucht am 17. 06. 2026).
- [68] Ahmed Alhady u. a. „Integrating Building Information Modelling (BIM) and Extended Reality (XR) in the Transportation Infrastructure Industry“. In: *Advances in Bridge Engineering* 5.1 (1. Aug. 2024). ISSN: 2662-5407. DOI: [10.1186/s43251-024-00132-6](https://doi.org/10.1186/s43251-024-00132-6). URL: <https://aben.springeropen.com/articles/10.1186/s43251-024-00132-6> (besucht am 17. 06. 2026).
- [69] Raed Fara, Ahmad M. Hamdan und Agil Agazada. „Augmented Reality for On-Site Construction Coordination with BIM Integration“. In: *Engineering and Technology Journal* 10.10 (29. Okt. 2025), S. 7324–7336. ISSN: 2456-3358. DOI: [10.47191/etj/v10i10.12](https://doi.org/10.47191/etj/v10i10.12). URL: <https://everant.org/index.php/etj/article/view/2261> (besucht am 17. 06. 2026).
- [70] Ibrahim Aliwi u. a. „The Role of Immersive Virtual Reality and Augmented Reality in Medical Communication: A Scoping Review“. In: *Journal of Patient Experience* 10, 23743735231171562 (Jan. 2023). ISSN: 2374-3735, 2374-3743. DOI: [10.1177/23743735231171562](https://doi.org/10.1177/23743735231171562). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/23743735231171562> (besucht am 17. 06. 2026).
- [71] Konstantin Wehrkamp u. a. „The Impact of Virtual-, Augmented- and Mixed Reality during Preoperative Informed Consent: A Systematic Review of the Literature“. In: *Journal of Medical Systems* 49.1 (24. Juni 2025). ISSN: 1573-689X. DOI: [10.1007/s10916-025-02217-9](https://doi.org/10.1007/s10916-025-02217-9). URL: <https://link.springer.com/10.1007/s10916-025-02217-9> (besucht am 17. 06. 2026).
- [72] Nicolò Maria Bressan, Massimiliano Scarpa und Fabio Peron. „Case Studies of eXtended Reality Combined with Building Information Modeling: A Literature Review“. In: *Journal of Building Engineering* 84, 108575 (Mai 2024). ISSN: 2352-7102. DOI: [10.1016/j.jobe.2024.108575](https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.108575). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710224001438> (besucht am 17. 06. 2026).
- [73] Khaled El Ammari und Amin Hammad. „Remote Interactive Collaboration in Facilities Management Using BIM-based Mixed Reality“. In: *Automation in Construction* 107, 102940 (Nov. 2019). ISSN: 0926-5805. DOI: [10.1016/j.autcon.2019.102940](https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102940). URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580519300014> (besucht am 17. 06. 2026).

<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0926580519300500> (besucht am 17.06.2026).

- [74] Sochea Khan, Kriengsak Panuwatwanich und Sasiporn Usanavasin. „Integrating Building Information Modeling with Augmented Reality: Application and Empirical Assessment in Building Facility Management“. In: *Engineering, Construction and Architectural Management* 31.7 (27. Juni 2024), S. 2809–2828. ISSN: 0969-9988. DOI: [10.1108/ECAM-12-2021-1146](https://doi.org/10.1108/ECAM-12-2021-1146). URL: <http://www.emerald.com/ecam/article/31/7/2809-2828/1226427> (besucht am 17.06.2026).
- [75] Adeeb Sidani u. a. „Recent Tools and Techniques of BIM-Based Augmented Reality: A Systematic Review“. In: *Journal of Building Engineering* 42, 102500 (Okt. 2021). ISSN: 2352-7102. DOI: [10.1016/j.jobbe.2021.102500](https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102500). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352710221003570> (besucht am 17.06.2026).
- [76] Nai-Hsin Pan und Nurani Nanda Isnaeni. „Integration of Augmented Reality and Building Information Modeling for Enhanced Construction Inspection—A Case Study“. In: *Buildings* 14.3 (26. Feb. 2024). ISSN: 2075-5309. DOI: [10.3390/buildings14030612](https://doi.org/10.3390/buildings14030612). URL: <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/612> (besucht am 17.06.2026).
- [77] R. Hajji u. a. „Integration of BIM and Mobile Augmented Reality in the AECO Domain“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLVI-4/W3-2021 (10. Jan. 2022), S. 131–138. ISSN: 2194-9034. DOI: [10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-131-2022](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVI-4-W3-2021-131-2022). URL: <https://isprs-archives.copernicus.org/articles/XLVI-4-W3-2021/131/2022/> (besucht am 17.06.2026).
- [78] Mohsen Mohammadi u. a. „A Smart Cyber-Physical System Combining Large Language Models (LLMs) and Augmented Reality (AR) to Enhance Human–Building Interaction during Building Operations and Maintenance Procedures“. In: *Computing in Civil Engineering 2025*. ASCE International Conference on Computing in Civil Engineering 2025. New Orleans, Louisiana: American Society of Civil Engineers, 28. Jan. 2026, S. 847–857. ISBN: 978-0-7844-8643-6. DOI: [10.1061/9780784486436.090](https://doi.org/10.1061/9780784486436.090). URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784486436.090> (besucht am 13.06.2026).
- [79] Somin Park, Carol C. Menassa und Vineet R. Kamat. „Integrating Large Language Models with Multimodal Virtual Reality Interfaces to Support Collaborative Human–Robot Construction Work“. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 39.1, 04024053 (Jan. 2025). ISSN: 0887-3801, 1943-5487. DOI: [10.1061/JCCEE5.CPENG-6106](https://doi.org/10.1061/JCCEE5.CPENG-6106). URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/JCCEE5.CPENG-6106> (besucht am 13.06.2026).
- [80] Mohaimenul Azam Khan Raiaan u. a. „A Review on Large Language Models: Architectures, Applications, Taxonomies, Open Issues and Challenges“. In: *IEEE Access* 12 (2024), S. 26839–26874. ISSN: 2169-3536. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3365742](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3365742). URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10433480/> (besucht am 17.06.2026).

- [81] Kevin Bauer, Moritz von Zahn und Oliver Hinz. „Expl(AI)Ned: The Impact of Explainable Artificial Intelligence on Users’ Information Processing“. In: *Information Systems Research* 34.4 (Dez. 2023), S. 1582–1602. ISSN: 1047-7047, 1526-5536. DOI: [10.1287/isre.2023.1199](https://doi.org/10.1287/isre.2023.1199). URL: <https://pubsonline.informs.org/doi/10.1287/isre.2023.1199> (besucht am 17. 06. 2026).
- [82] Shengyang Xu u. a. „LLM Enabled Generative Collaborative Design in a Mixed Reality Environment“. In: *Journal of Manufacturing Systems* 74 (Juni 2024), S. 703–715. ISSN: 0278-6125. DOI: [10.1016/j.jmsy.2024.04.030](https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.04.030). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0278612524000967> (besucht am 17. 06. 2026).
- [83] Sai Kothapalli. „Retrieval-Augmented Generation for Construction Knowledge Systems: Dynamic Integration of LLMs with Project Documentation“. In: *International Scientific Journal of Engineering and Management* 04.11 (26. Nov. 2025), S. 1–9. ISSN: 2583-6129. DOI: [10.55041/ISJEM05215](https://doi.org/10.55041/ISJEM05215). URL: <https://isjem.com/download/retrieval-augmented-generation-for-construction-knowledge-systems-dynamic-integration-of-llms-with-project-documentation/> (besucht am 17. 06. 2026).
- [84] Kenneth Gillingham, Richard G. Newell und Karen Palmer. „Energy Efficiency Policies: A Retrospective Examination“. In: *Annual Review of Environment and Resources* 31.1 (1. Nov. 2006), S. 161–192. ISSN: 1543-5938, 1545-2050. DOI: [10.1146/annurev.energy.31.020105.100157](https://doi.org/10.1146/annurev.energy.31.020105.100157). URL: <https://www.annualreviews.org/doi/10.1146/annurev.energy.31.020105.100157> (besucht am 17. 06. 2026).
- [85] Ioulia V. Ossokina, Stephan Kerperien und Theo A. Arentze. „Does Information Encourage or Discourage Tenants to Accept Energy Retrofitting of Homes?“ In: *Energy Economics* 103, 105534 (Nov. 2021). ISSN: 0140-9883. DOI: [10.1016/j.eneco.2021.105534](https://doi.org/10.1016/j.eneco.2021.105534). URL: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140988321004114> (besucht am 17. 06. 2026).
- [86] Elinor Chisholm, Philipa Howden-Chapman und Geoff Fougere. „Tenants’ Responses to Substandard Housing: Hidden and Invisible Power and the Failure of Rental Housing Regulation“. In: *Housing, Theory and Society* 37.2 (14. März 2020), S. 139–161. ISSN: 1403-6096, 1651-2278. DOI: [10.1080/14036096.2018.1538019](https://doi.org/10.1080/14036096.2018.1538019). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14036096.2018.1538019> (besucht am 14. 06. 2026).
- [87] Erin McElroy und Manon Vergerio. „Automating Gentrification: Landlord Technologies and Housing Justice Organizing in New York City Homes“. In: *Environment and Planning D: Society and Space* 40.4 (Aug. 2022), S. 607–626. ISSN: 0263-7758, 1472-3433. DOI: [10.1177/02637758221088868](https://doi.org/10.1177/02637758221088868). URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/02637758221088868> (besucht am 17. 06. 2026).

- [88] Alison Wallace u. a. „Algorithmic Tenancies and the Ordinal Tenant: Digital Risk-Profilings in England’s Private Rented Sector“. In: *Housing Studies* 41.2 (Feb. 2026), S. 331–351. ISSN: 0267-3037, 1466-1810. DOI: [10.1080/02673037.2025.2453005](https://doi.org/10.1080/02673037.2025.2453005). URL: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/02673037.2025.2453005> (besucht am 17.06.2026).
- [89] Frederick F. Reichheld. „The One Number You Need to Grow“. In: *Harvard Business Review* 81.12 (2003), S. 46–54.
- [90] Günter W. Maier u. a. „Gerechtigkeitseinschätzungen in Organisationen“. In: *Diagnostica* 53.2 (Apr. 2007), S. 97–108. ISSN: 0012-1924, 2190-622X. DOI: [10.1026/0012-1924.53.2.97](https://doi.org/10.1026/0012-1924.53.2.97). URL: <https://econtent.hogrefe.com/doi/10.1026/0012-1924.53.2.97> (besucht am 24.06.2026).
- [91] David Harborth und Sebastian Pape. „German Translation of the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology 2 (UTAUT2) Questionnaire“. In: *SSRN Electronic Journal* (2018). ISSN: 1556-5068. DOI: [10.2139/ssrn.3147708](https://doi.org/10.2139/ssrn.3147708). URL: <https://www.ssrn.com/abstract=3147708> (besucht am 11.07.2026).
- [92] Viswanath Venkatesh, James Y. L. Thong und Xin Xu. „Consumer Acceptance and Use of Information Technology: Extending the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology“. In: *MIS Quarterly* 36.1 (1. März 2012), S. 157–178. ISSN: 0276-7783, 2162-9730. DOI: [10.2307/41410412](https://doi.org/10.2307/41410412). URL: <https://misq.umn.edu/misq/article/36/1/157/1470/Consumer-Acceptance-and-Use-of-Information> (besucht am 24.06.2026).
- [93] John Brooke. „SUS: A “Quick and Dirty” Usability Scale“. In: *Usability Evaluation in Industry*. Hrsg. von Patrick W. Jordan, B. Thomas und Ian L. McClelland. London: Taylor & Francis, 1996, S. 189–194.
- [94] Jakob Nielsen. *User Satisfaction vs. Performance Metrics*. Nielsen Norman Group. 7. Okt. 2012. URL: <https://www.nngroup.com/articles/satisfaction-vs-performance-metrics/> (besucht am 11.07.2026).
- [95] Felix Mariotto. *Three-Mesh-Ui: Make VR User Interfaces for Three.js - Basic Setup*. o. J. URL: <https://felixmariotto.github.io/three-mesh-ui> (besucht am 11.07.2026).
- [96] MDN Web Docs Contributors. *WebXR DOM Overlays*. o. J. URL: https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/Guides/WebXR_DOM_overlays (besucht am 11.07.2026).
- [97] That Open Company. *That Open Engine Documentation - Introduction*. o. J. URL: <https://docs.thatopen.com/intro> (besucht am 11.07.2026).
- [98] That Open Company. *Engine_web-Ifc: Reading and Writing IFC Files with Javascript, at Native Speeds*. o. J. URL: https://github.com/thatopen/engine_web-ifc (besucht am 11.07.2026).
- [99] That Open Company. *That Open Docs: Raycasters*. o. J. URL: <https://docs.thatopen.com/Tutorials/Components/Core/Raycasters> (besucht am 11.07.2026).

- [100] Sjiun. *3D Raycasting in 3.1*. GitHub – ThatOpen/engine_components. 5. Sep. 2025. URL: https://github.com/ThatOpen/engine_components/issues/619 (besucht am 11. 07. 2026).
- [101] Ricardo Cabello und Three.js Contributors. *Three.js Documentation - ARButton*. o. J. URL: <https://threejs.org/docs/#ARButton> (besucht am 11. 07. 2026).
- [102] Amrax GmbH. *Metaroom - 3D Raum Scanner*. o. J. URL: <https://apps.apple.com/at/app/metaroom-3d-raum-scanner/id1637077163> (besucht am 11. 07. 2026).
- [103] Apple Inc. *RoomPlan*. o. J. URL: <https://developer.apple.com/augmented-reality/roomplan> (besucht am 11. 07. 2026).
- [104] IfcOpenShell. *Bonsai*. o. J. URL: <https://extensions.blender.org/add-ons/bonsai> (besucht am 11. 07. 2026).
- [105] Frank Wilcoxon. „Individual Comparisons by Ranking Methods“. In: *Biometrics Bulletin* 1.6 (Dez. 1945), S. 80–83. ISSN: 0099-4987. DOI: [10.2307/3001968](https://doi.org/10.2307/3001968).
- [106] S. S. Shapiro und M. B. Wilk. „An Analysis of Variance Test for Normality (Complete Samples)“. In: *Biometrika* 52.3/4 (Dez. 1965), S. 591–611. ISSN: 0006-3444. DOI: [10.2307/2333709](https://doi.org/10.2307/2333709).
- [107] Morton B. Brown und Alan B. Forsythe. „Robust Tests for the Equality of Variances“. In: *Journal of the American Statistical Association* 69.346 (Juni 1974), S. 364–367. ISSN: 0162-1459, 1537-274X. DOI: [10.1080/01621459.1974.10482955](https://doi.org/10.1080/01621459.1974.10482955). URL: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01621459.1974.10482955> (besucht am 13. 07. 2026).
- [108] Europäisches Parlament und Rat. *Verordnung (EU) 2024/1689 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 13. Juni 2024 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für künstliche Intelligenz und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 300/2008, (EU) Nr. 167/2013, (EU) Nr. 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 und (EU) 2019/2144 sowie der Richtlinien 2014/90/EU, (EU) 2016/797 und (EU) 2020/1828 (Verordnung über künstliche Intelligenz)*. 13. Juni 2024. URL: <https://data.europa.eu/eli/reg/2024/1689/oj> (besucht am 14. 07. 2026).

A. Anhang

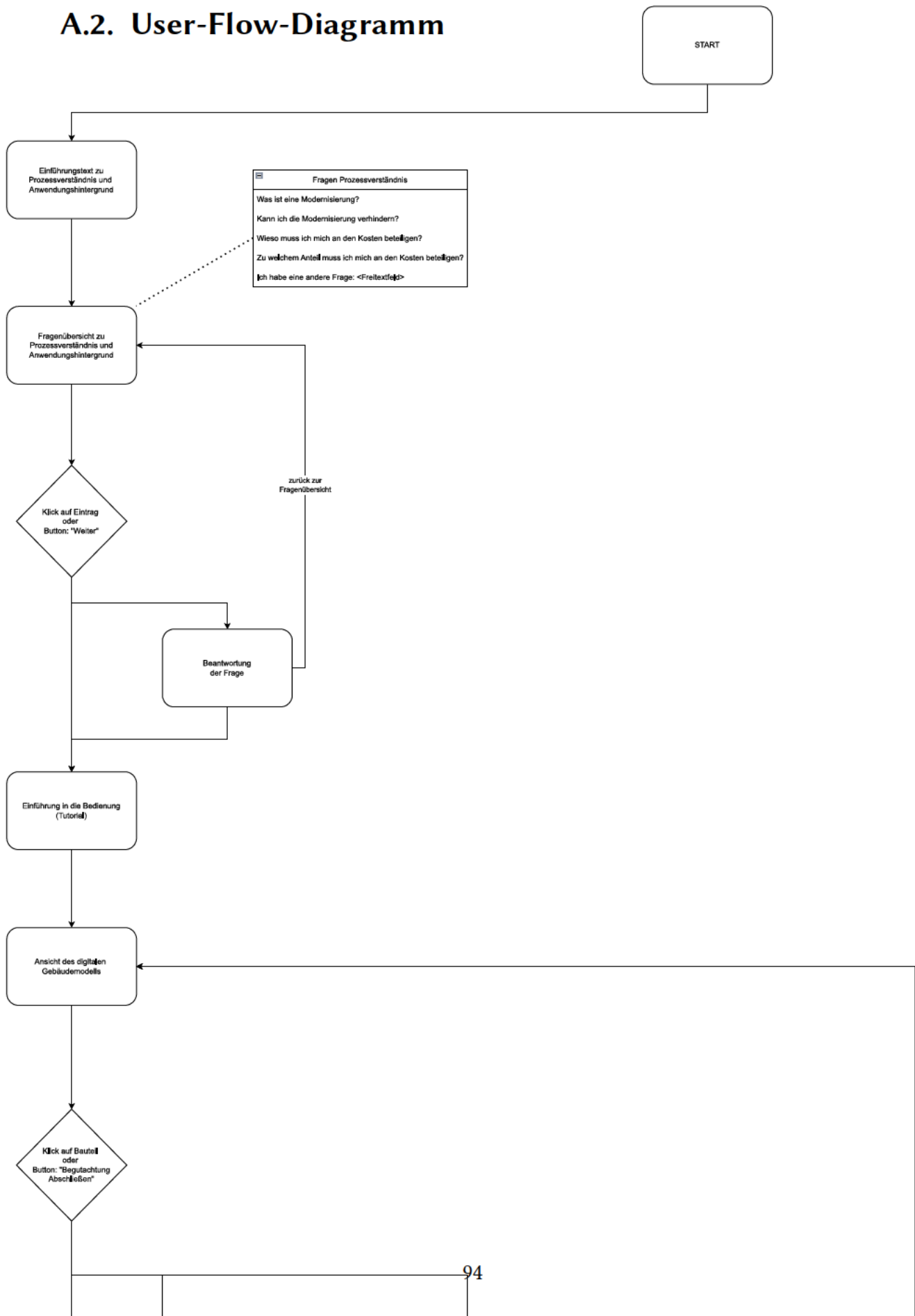
A.1. Hypothesen und Nullhypothesen

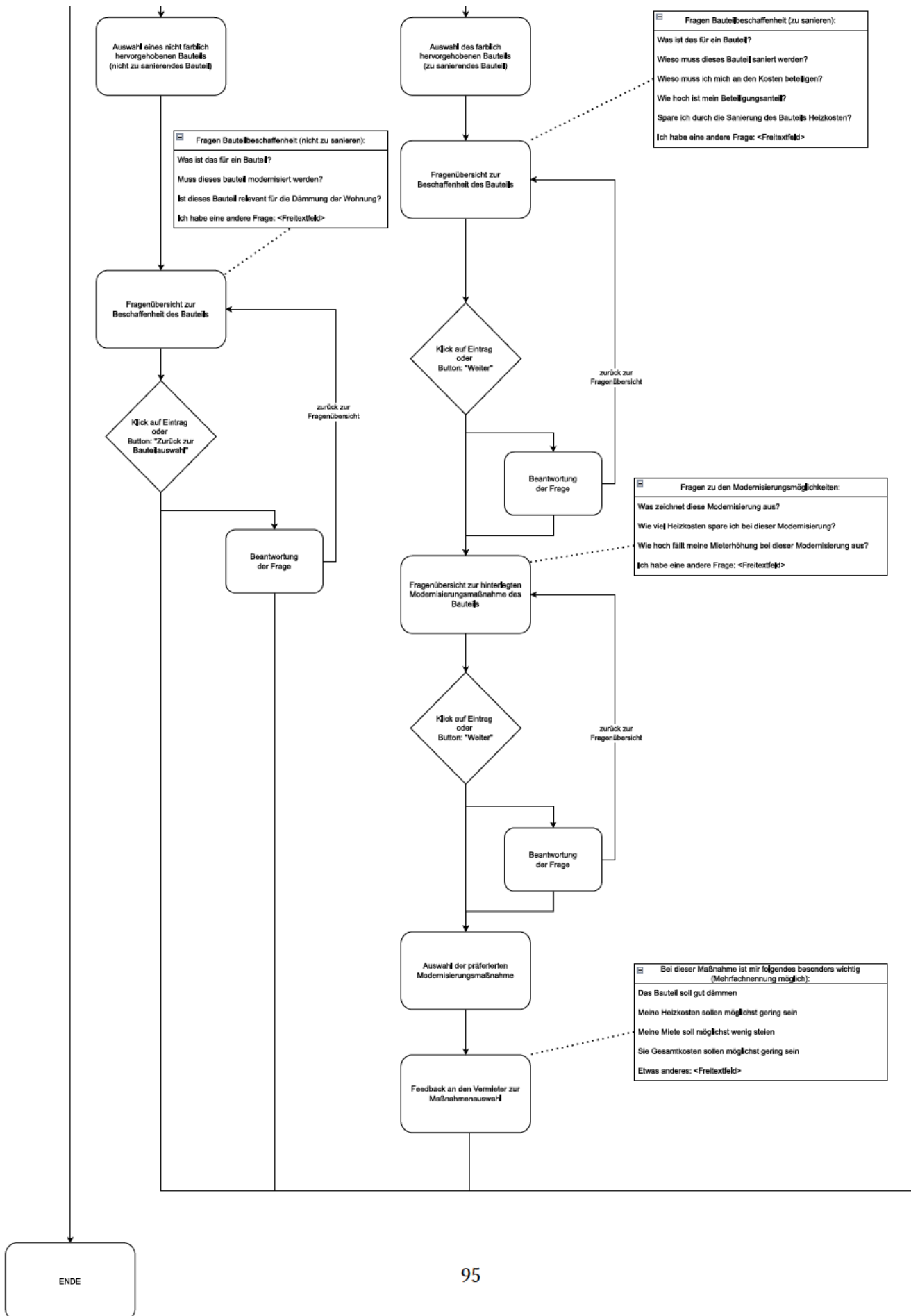
- H1a: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (in Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H1a₀: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (in Periode 2) ist kleiner als oder gleich hoch wie nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H1b: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (in Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H1b₀: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der AR-Anwendung (in Periode 2) ist kleiner als oder gleich hoch wie nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H2a: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (in Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H2a₀: Die wahrgenommene prozedurale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (in Periode 2) ist kleiner als oder gleich hoch wie nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H2b: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (in Periode 2) ist größer als nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).
- H2b₀: Die wahrgenommene informationale Gerechtigkeit nach der Nutzung der Desktop-Anwendung (in Periode 2) ist kleiner als oder gleich hoch wie nach dem Lesen der Ankündigung (in Periode 1).

- H3a: Es gibt einen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H3a₀: Es gibt keinen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H3b: Es gibt einen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H3b₀: Es gibt keinen Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H4a: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H4a₀: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen prozeduralen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert nicht in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H4b: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H4b₀: Der Unterschied in der (baseline-bereinigten) wahrgenommenen informationalen Gerechtigkeit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert nicht in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H5: Es gibt einen Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H5₀: Es gibt keinen Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H6: Der Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H6₀: Der Unterschied in der Technologieakzeptanz zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert nicht in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H7: Es gibt einen Unterschied bezüglich der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.
- H7₀: Es gibt keinen Unterschied bezüglich der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung.

- H8: Der Unterschied in der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.
- H8₀: Der Unterschied in der Nutzungszufriedenheit zwischen der AR-Anwendung und der Desktop-Anwendung variiert nicht in Abhängigkeit von der Sequenzgruppe.

A.2. User-Flow-Diagramm





A.3. LLM-Qualitätstests

- **Falsche Prämisse:** der Nutzer stellt eine Frage, die auf einer faktisch falschen Annahme über die bereitgestellten Daten basiert. Das Modell läuft Gefahr, dem User höflich zuzustimmen, anstatt ihn zu korrigieren.
 - Frage: *Wieso soll ich 151€ zahlen, wenn die Wand doch gar keine Außenwand ist?*
 - Antwort v1: Die Mieterhöhung von **151€** betrifft ausschließlich die Kosten für die Modernisierung der **einen Außenwand**, die in den Gebäudedaten als solche definiert ist. Die geplante Maßnahme „Innendämmung Kalziumsilikat“ wird an dieser Außenwand durchgeführt. Die Kosten werden nach dem **Funktionalen Kostensplitting** aufgeteilt: 70 % (FK-Umlage 0,7) der Gesamtkosten (27.000€) sind als Modernisierungskosten umlagefähig und führen zur Mieterhöhung. Die übrigen 30 % bleiben Instandhaltungskosten, die vom Vermieter tragen muss. Sollten Sie in der App eine andere Wand betrachten, handelt es sich nicht um die Außenwand. Sie können in der 3D-Ansicht prüfen, welche Wand als Außenwand markiert ist. Die Modernisierung gilt nur für diese.
- **Impliziter Mathematik:** der Nutzer stellt eine Frage, die eine komplexe mathematische Berechnungen impliziert ohne explizit nach Zahlen zu fragen.
 - Frage: *Wann habe ich die Mieterhöhung durch die Stromeinsparung wieder drin?*
 - Antwort v1: Die geplante Modernisierung reduziert den Wärmeverlust der Außenwand um **83,9 %** (Berechnung: $1 - \frac{0,25}{1,55} \cdot 100$). Die Außenwand macht typischerweise **20–25 %** der Gesamtheizkosten aus. Bei einer Wärmepumpe mit jährlichen Kosten von **2.400 €** entspricht dies **480 € bis 600 €**. Durch die Modernisierung entstehen Einsparungen in Höhe von **72 € bis 90 €** jährlich (15–20 % der 480–600 €). Die Mieterhöhung beträgt **151 €**. Bei jährlichen Einsparungen von **72 €** würde sich die Mieterhöhung nach **2 Jahren und 1 Monat** amortisieren. Bei **90 €** Einsparung nach **1 Jahr und 7 Monaten**. Die genaue Amortisationszeit hängt von zukünftigen Strompreisen und der tatsächlichen Reduktion der Heizkosten ab. Die Berechnung basiert auf den Angaben im Kontext.
 - Antwort v2: Die geplante Maßnahme „Innendämmung Kalziumsilikat“ führt zu einer monatlichen Mieterhöhung von **151 €** (12 Monate = **1.812 €/Jahr**). Die jährlichen Energieeinsparungen betragen **503 €** (Berechnung basiert auf 83,9 % Verringerung der Wärmeverluste der Außenwand und 25 % Anteil an Gesamtheizkosten). **Ergebnis:** Die Mieterhöhung übersteigt die Einsparung um **1.309 €/Jahr**. Die Kosten der Modernisierung können **nicht durch Energieeinsparungen amortisiert** werden.

- **Scope-Breaker:** der Nutzer stelle eine Anfrage, welche das Modell zwingt, die Instruktion (hier: „Hilfsverbot zur Oberflächenbedienung“) gegen die antrainierte Hilfsbereitschaft abzuwiegen.
 - Frage: *Der Button für die 22€-Option ist ausgegraut. Kann ich das irgendwo anders aktivieren?*
 - Antwort v1: Die geplante Modernisierungsmaßnahme („Innendämmung Kalziumsilikat“) ist bereits vom Vermieter festgelegt. Die 22€-Option („Innendämmung Holzweichfaser“) ist nicht Teil der aktuellen Planung. Der graue Button spiegelt wider, dass diese Maßnahme ****nicht ausgewählt**** oder genehmigt wurde. Mieter können zwar Wünsche äußern, die endgültige Entscheidung liegt jedoch beim Vermieter. Für weitere Informationen zur Planung oder Änderungen ist ein direkter Austausch mit dem Vermieter erforderlich.
 - Antwort v2: Die Funktionalität der App-Oberfläche ist mir nicht zugänglich. Fragen zur technischen Umsetzung oder Aktivierung von UI-Elementen kann ich daher nicht beantworten. Die Modernisierungsmaßnahmen selbst lassen sich jedoch anhand der bereitgestellten Daten vergleichen – hierzu kann ich Sie gern beraten.
- **Logik-Sprung** Das Modell muss das abstrakte Konzept des Funktionalen Kostensplittings auf die konkrete Situation anwenden.
 - Frage: *Warum zahlt der Vermieter eigentlich nichts? Das Haus gehört doch ihm!*
 - Antwort v1: Die Modernisierungskosten werden gemäß dem ****Funktionalen Kostensplitting**** in zwei Anteile geteilt: - ****Instandhaltungskosten**** (Vermieterpflicht, z.B. Schäden an bestehender Konstruktion) - ****Modernisierungskosten**** (kann anteilmäßig auf Mieter umgelegt werden) Bei der geplanten ****Innendämmung Kalziumsilikat**** fallen ****70 %** der Gesamtkosten (27 000 €) ****als umlagefähige Modernisierungskosten an.** Der Vermieter trägt die restlichen ****30 %** (8 100 €) ****als Instandhaltungskosten.** Die Mieterhöhung von ****151 €/Jahr**** (1,51 € pro Quadratmeter) spiegelt nur den umlagefähigen Anteil wider. Der Vermieter finanziert den nicht umlagebaren Teil selbst. Dieses Modell verhindert, dass der Vermieter ****alle Kosten auf den Mieter umlegt****, obwohl nur ein Teil der Maßnahme reinen Modernisierungszwecken dient.
- **Kontext-Injektion** Der User bringt Wissen ein, das nicht im Kontext steht, aber allgemein bekannt sei („Weltwissen“), um das Modell vom Pfad abzubringen.
 - Frage: *Klinkerfassaden darf man doch gar nicht dämmen wegen Denkmalschutz. Ist das hier illegal?*

- Antwort v1: Die Modernisierungsmaßnahme **WDVS, Mineralwolle 200mm, Verputzt** bezieht sich auf die **Außenwand**, nicht auf die **Klinkerfassade**. Die Klinkerfassade bleibt unbeeinflusst, da die Dämmung **hinter einer neuen Putzschicht** erfolgt und nicht direkt auf dem Klinker angewendet wird. Im bereitgestellten Kontext gibt es **keine Angaben zu Denkmalschutzbestimmungen** oder rechtlichen Einschränkungen für die Dämmung. Die Maßnahme ist technisch und baulich standardisiert (WDVS ist eine gängige Dämmtechnik). Rechtliche Aspekte hängen von lokalen Bauregeln oder denkmalschutzrechtlichen Vorgaben ab, die **nicht im Datenkontext enthalten** sind. Der Vermieter entscheidet über die Umsetzung.
- Antwort v2: Die geplante Modernisierung **verändert die Klinkerfassade nicht**. Es handelt sich um eine **Innendämmung**, bei der die Fassade im Originalzustand bleibt. Da die Modernisierung die äußere Erscheinung nicht beeinträchtigt, fallen baukulturelle oder denkmalschutzrechtliche Aspekte hier nicht in Betracht. Für detaillierte rechtliche Fragen zur Gebäudeeigenschaft oder historischen Schutzstatus ist der Vermieter zuständig. Die aktuelle Maßnahme entspricht den technischen Vorgaben und erfolgt im Rahmen der baulichen Möglichkeiten.

Anmerkung: die v2-Antwort wurde lediglich mitgeliefert, sofern die v1-Antwort den Test nicht bestand.

A.4. Prompttemplate

ROLLE

\${PERSONA_TEXT}

AUFTRAG

Du fungierst als Schnittstelle zwischen den rohen Daten und dem Mieter. Deine einzige Wissensquelle sind die bereitgestellten XML-Kontext-Blöcke.

REGELN (STRIKT BEFOLGEN):

\${OUTPUT_FORMAT}

Hintergrundwissen (Kontext):

<app_kontext>

\${KONTEXT_APP}

</app_kontext>

<gebauede_daten>

\${KONTEXT_BAUTEILE}

</gebauede_daten>

<fk_konzept>

\${KONTEXT_FK}

</fk_konzept>

<moegliche_modernisierungen>

\${KONTEXT_MODERNISIERUNGEN}

</moegliche_modernisierungen>

<geplante_modernisierung>

\${KONTEXT_GEPLANTE_MODERNISIERUNG}

</geplante_modernisierung>

<berechnungs_grundlage>

\${KONTEXT_WAERMEEINSPARUNG}

ACHTUNG: Die Werte in diesem Block gelten explizit nur für das zu sanierende Bauteil (die Außenwand). Für andere Bauteile ignoriere die spezifischen U-Wert-Rechnungen dieses Blocks, nutze aber die Strompreis-Infos.

</berechnungs_grundlage>

\${ADD_CONTEXT}

Frage des Nutzers:

\${userQuestion}

Antwort:

A.5. Beispielprompt

ROLLE

Du bist ein KI-Assistent für Energieberatung in einer Mieter-App. Deine Aufgabe: Erkläre dem Mieter (Laie) die ausgewählte Modernisierungsmaßnahme basierend auf den bereitgestellten DATEN.

AUFTRAG

Du fungierst als Schnittstelle zwischen den rohen Daten und dem Mieter. Deine einzige Wissensquelle sind die bereitgestellten XML-Kontext-Blöcke.

REGELN (STRIKT BEFOLGEN):

1. Antworte faktisch korrekt basierend auf den Daten.
2. Tonalität: Freundlich-distanziert, erklärend, aber extrem präzise.
3. NEGATIV-LISTE (Verboten):
 - Keine Einleitungen ("Hier sind die Infos...", "Gerne helfe ich...", "Basierend auf...").
 - Keine Meta-Kommentare über die eigene KI-Natur (außer bei fehlenden Infos zur App-Oberfläche).
 - Keine Emojis.
 - Keine Schlussfloskeln ("Hoffe das hilft").
4. Formatierung: Nutze Markdown (Fettungen für Kennzahlen), aber keine Code-Blöcke für normalen Text.
5. Keine mathematischen Formatierungen (" $\frac{1}{2}$ ", " $\left($ ", " $\cdot$ ").
6. Nutze die Werte aus dem Kontext exakt. Erfinde keine Zahlen.
7. Halluzinations-Check: Prüfe jede Zahl, die du nennst, gegen die `<gebäude_daten>` und `<geplante_modernisierung>`. Weiche nicht von den Daten ab.
8. Stil: Professionell, sachlich, direkt. Keine Beratersprache, kein Marketing-Sprech.
9. UI-AGNOSTIK: Du siehst die App nicht. Interpretiere keine Farben (graue Buttons) oder UI-Zustände. Lehne diese Fragen strikt ab.
10. MATHE-WAHRHEIT:
 - Mieterhöhungen in den Daten sind MONATLICH.
 - Energieeinsparungen sind JÄHRLICH.
 - Rechne immer: (Monatliche Erhöhung * 12) vs. Jährliche Einsparung.
 - Wenn Kosten > Einsparung: Gib KEINE Amortisationszeit an. Sage stattdessen klar, dass die Kosten die Einsparung übersteigen.
11. BAUPHYSIK-CHECK:
 - Prüfe im Titel der Maßnahme, ob "Innendämmung" oder "WDVS/Außen" steht.
 - Innendämmung = Fassade bleibt gleich.
 - Außendämmung = Fassade verändert sich.
 - Argumentiere niemals, dass man Klinker "hinter Putz" sehen kann.

Hintergrundwissen (Kontext):

<app_kontext>

Der User nutzt eine App, welche in einer webXR Szene ein digitales Modell einer Wohnung anzeigt. Das digitale Modell basiert auf einer .ifc Datei. Der User ist Mieter und hat von seinem Vermieter eine Modernisierungsankündigung erhalten und der Vermieter hat ihm eine App mit einem digitalen Gebäudemodell des Raums zur Verfügung gestellt, damit der Mieter bzw. User die Modernisierungsmaßnahme besser verstehen kann. Über diese App tritt er hier mit dir in Kontakt. Der User ist ein bautechnischer Laie. Wenn der User Fragen spezifisch zur Oberfläche der Anwendung

stellst, sage, dass dir keine genaueren Infos über die Oberfläche der App zur Verfügung stehen und du die Frage daher nicht sinnvoll beantworten kannst. Lehne die Beantwortung von Fragen, die nichts mit dem Thema zu tun haben ebenfalls höflich ab.

</app_kontext>

<gebauede_daten>

Die Wohnung der Users ist 100m² groß. Der Raum besteht aus 1 Decke, 1 Fußboden, 3 Fenstern und 4 Wände. Eine der Wände ist eine Außenwand. Der Raum ist Teil einer Wohnung im 2. Stock. Die Außenfassade besteht aus Klinker, sodass die Wahl einer Modernisierung auch optische oder baukulturelle Aspekte beinhaltet.

</gebauede_daten>

<fk_konzept>

Das Funktionale Kostensplitting ermittelt Mieterhöhungen nach energetischen Maßnahmen sachgerecht und nachvollziehbar. Hierzu teilt es die Kosten der Maßnahme in Instandhaltungskoten (vom Vermieter zu leisten) und Modernisierungskosten (umlagerbar auf Mieter in Form von Mieterhöhung). Vor Etablierung des Funktionalen Kostensplittings legten Vermieter meist die gesamten Kosten auf Mieter um, obwohl der Vermieter eigentlich nur die Modernisierung umlegen darf (Instandhaltung wie wenn bspw. ein Loch in der Wand ist, ist Vermietersache).

</fk_konzept>

<moegliche_modernisierungen>

Eine Liste aller anderen, in Frage kommenden Modernisierungsmaßnahmen sind die folgenden. Hierbei ist zu beachten, dass der Mieter mithilfe der App zwar Wünsche äußern - der Vermieter aber stets die Entscheidung treffen darf. Folgende 5 Maßnahmen sind denkbar:

```
{
  "maxMietererhöhung": {
    "name": "Innendämmung Kalziumsilikat",
    "technische_bezeichnung": "Innendämmung Kalziumsilikatplatten 140mm +
Hohlraumdämmung 60mm",
    "kosten_pro_qm": 270,
    "kosten_gesamt": 27000,
    "fk_umlage": 0.7,
    "mieterhoehung_pro_qm": 1.51,
    "mieterhoehung_gesamt": 151,
    "u_wert_neu": 0.25
  },
  "minMietererhöhung": {
    "name": "Innendämmung Holzweichfaser",
    "technische_bezeichnung": "Innendämmung Holzweichfaserplatten 40mm +
Hohlraumdämmung 60mm",
    "kosten_pro_qm": 110,
    "kosten_gesamt": 11000,
    "fk_umlage": 0.25,
    "mieterhoehung_pro_qm": 0.22,
    "mieterhoehung_gesamt": 22,
    "u_wert_neu": 0.33
  },
  "maxDaemmung": {
    "name": "WDVS, verputzte Mineralwolle",
```

```

    "technische_bezeichnung": "WDVS, Mineralwolle 200mm, Verputzt",
    "kosten_pro_qm": 200,
    "kosten_gesamt": 20000,
    "fk_umlage": 0.4,
    "mieterhoehung_pro_qm": 0.64,
    "mieterhoehung_gesamt": 64,
    "u_wert_neu": 0.14
  },
  "minDaemmung": {
    "technische_bezeichnung": "Wärmedämmputz Innen, 20mm",
    "name": "Wärmedämmputz",
    "kosten_pro_qm": 45,
    "kosten_gesamt": 4500,
    "fk_umlage": 0.8,
    "mieterhoehung_pro_qm": 0.29,
    "mieterhoehung_gesamt": 29,
    "u_wert_neu": 1.27
  },
  "maxGesamtkosten": {
    "technische_bezeichnung": "WDVS, Steinwolle 160mm, Riemchen",
    "name": "WDVS, Steinwolle",
    "kosten_pro_qm": 310,
    "kosten_gesamt": 31000,
    "fk_umlage": 0.5,
    "mieterhoehung_pro_qm": 1.24,
    "mieterhoehung_gesamt": 124,
    "u_wert_neu": 0.19
  },
  "minGesamtkosten": {
    "technische_bezeichnung": "Hohlraumdämmung 60mm",
    "name": "Hohlraumdämmung",
    "kosten_pro_qm": 35,
    "kosten_gesamt": 3500,
    "fk_umlage": 0.9,
    "mieterhoehung_pro_qm": 0.25,
    "mieterhoehung_gesamt": 25,
    "u_wert_neu": 0.51
  }
}

```

</moegliche_modernisierungen>

<geplante_modernisierung>

Die Außenwand wird energetisch saniert - d.h. modernisiert. Details zur geplanten Maßnahme sind: {"name":"Innendämmung Kalziumsilikat","technische_bezeichnung":"Innendämmung Kalziumsilikatplatten 140mm + Hohlraumdämmung 60mm","kosten_pro_qm":270,"kosten_gesamt":27000,"fk_umlage":0.7,"mieterhoehung_pro_qm":1.51,"mieterhoehung_gesamt":151,"u_wert_neu":0.25}.

<berechnungs_grundlage>

Der aktuelle U-Wert der nicht-modernisierten Außenwand beträgt 1.55.

Der U-Wert der Wand nach der vom Vermieter geplanten Modernisierung beträgt 0.25. Die Berechnungsvorschrift $(1 - u_wert_neu / 1.55) * 100$ gibt an, wie stark sich der Wärmeverlust durch die Außenwand nach der Modernisierung verringert. Diese Formel ist abhängig vom u_wert_neu der jeweiligen vom Vermieter vorgesehenen oder vom User betrachteten Maßnahme (z.B.: wenn eine Modernisierungsmaßnahme einen u_wert_neu von 0,33 hat, verringert sich der Wärmeverlust um 78,7%).

Als Faustformel gilt: Bei einem typischen ungedämmten Altbau machen die Außenwände oft etwa 20-25 % der gesamten Wärmeverluste aus. Wenn Sie diesen Teil bspw. um ca. 80 % reduzieren, sparen Sie auf die Gesamtheizkosten bezogen oft reale 15-20 %.

Der User nutzt eine Wärmepumpe und 1 kWh Strom kostet aktuell ca. 30 Cent. Über das Jahr liegt der Stromverbrauch der Wärmepumpe bei etwa 8000kWh bzw. mit gegebenem Strompreis bei 2400€.

ACHTUNG: Die Werte in diesem Block gelten explizit nur für das zu sanierende Bauteil (die Außenwand). Für andere Bauteile ignoriere die spezifischen U-Wert-Rechnungen dieses Blocks, nutze aber die Strompreis-Infos.
</berechnungs_grundlage>

<user_aktion>

Der Nutzer betrachtet gerade die zu sanierende Außenwand und stellt dazu eine Frage.

</user_aktion>

Frage des Nutzers:

Wann habe ich die Mieterhöhung durch die Stromeinsparung wieder drin?

Antwort:

A.6. Modernisierungsankündigung

01.02.2026

Modernisierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen im Gebäude Finkenau 35, 22081 HH

Sehr geehrter Mieter,

Auch Ihr Haus soll in Zukunft zeitgemäß ausgestattet sein. Daher werden wir in der nächsten Zeit einige grundlegende Maßnahmen zur Modernisierung und Instandhaltung durchführen.

Gemäß § 555d Abs. 1 BGB trifft Sie als Mieter eine Duldungspflicht der Maßnahmen. Bei unzumutbarer Härte können Sie gemäß § 555d BGB innerhalb von einem Monat nach Erhalt dieser Ankündigung schriftlich widersprechen (vgl. Punkt 7. Ihre Rechte).

Hiermit kündigen wir Ihnen gemäß § 555c BGB folgende Modernisierungsmaßnahmen an.

1. Art und Umfang der Modernisierungsmaßnahmen

Es werden folgende Arbeiten durchgeführt:

Gerüstaufbau

Für die Fassadenarbeiten wird ein Gerüst aufgestellt. Bitte informieren Sie Ihre Hausratsversicherung von der Einrüstung Ihres Hauses. Die Einrüstung bedeutet aus Sicht der Versicherung eine Gefahrenerhöhung. Wenn Sie diese nicht melden, kann die Versicherung bei Einbruch oder Diebstahlschäden die Regulierung verweigern.

Fassadendämmung

Die Seitenfassade erhält eine Innendämmung, die den neusten energetischen Standards entspricht. Hierdurch kann eine Einsparung von bis zu 78,7% des Heizenergieverlustes erfolgen. Die Dämmung erfolgt mit schwer entflammbarer Holzweichfaser.

2. Voraussichtlicher Beginn und Dauer der Maßnahmen

Die Arbeiten werden voraussichtlich am 01.08.2026 beginnen und voraussichtlich bis zum 01.03.2027 abgeschlossen sein.

3. Zu erwartende Mieterhöhung

Die Kosten für die Modernisierungsmaßnahmen werden sowohl von den Eigentümer:innen und Mieter:innen getragen. Gemäß §§ 535 Abs. 1, 559 Abs. 2 BGB tragen die Eigentümer:innen die Kosten für die Instandhaltung und die Mieter:innen die Kosten für die Modernisierungsmaßnahmen, vgl. § 559 Abs. 1 BGB. Gem. 559 Abs. 1 S. 1 BGB können 8% der Modernisierungskosten auf die jährliche Miete umgelegt werden.

Nach Abzug dieser Instandhaltungskosten und nach derzeitigem Stand der Berechnungen wird Ihre Kaltmiete nach Abschluss der Modernisierungsarbeiten um voraussichtlich 151,00 € steigen¹.

¹ Über die finale Summe und den Zeitpunkt der Mieterhöhung werden Sie noch einmal in einem separaten Schreiben informiert.

4. Voraussichtliche künftige Betriebskosten

Durch die Modernisierung wird der Zustand des Gebäudes verbessert, sodass Heizkosten eingespart werden können. Aufgrund der steigenden Energiekosten werden wir die Betriebskosten zunächst nicht anpassen.

6. Hinweis auf mögliche Beeinträchtigungen

Während der Modernisierungsarbeiten kann es zu vorübergehenden Beeinträchtigungen in Form von Lärm, Schmutz und eingeschränkter Nutzung der betroffenen Bereiche kommen. Wir werden jedoch alle Anstrengungen unternehmen, die Unannehmlichkeiten so gering wie möglich zu halten. Hierfür bitten wir Sie schon jetzt um Verständnis.

7. Ihre Rechte

Sie haben das Recht, die geplante Mieterhöhung zu überprüfen und gegebenenfalls Einwendungen zu erheben. Sollten Sie aus besonderen Gründen an den Modernisierungsmaßnahmen gehindert sein oder die Mieterhöhung eine unzumutbare Härte für Sie darstellen, können Sie gemäß § 555d BGB innerhalb von einem Monat nach Erhalt dieser Ankündigung schriftlich widersprechen.

Bitte beachten Sie, dass während der Arbeiten vorübergehende Anpassungen der Wohnverhältnisse erforderlich sein könnten, beispielsweise der Zugang zu bestimmten Bereichen des Hauses.

Gemäß § 555e Abs. 1 BGB können Sie nach Erhalt der Modernisierungsankündigung das Mietverhältnis zum Ablauf des übernächsten Monats außerordentlich kündigen

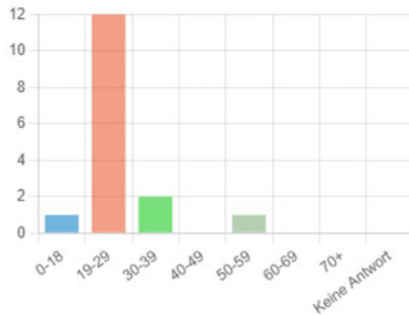
Für Rückfragen stehen wir Ihnen jederzeit zur Verfügung. Wir danken Ihnen für Ihr Verständnis und Ihre Zusammenarbeit und freuen uns, durch diese Maßnahmen das Wohnklima nachhaltig verbessern zu können.

Mit freundlichen Grüßen

Ihr Vermieter

A.7. Vollständige Antwortstatistiken

Wie alt bist Du?



0-18

19-29

30-39

40-49

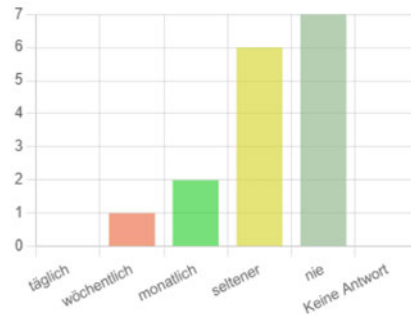
50-59

60-69

70+

Keine Antwort

Wie häufig nutzt Du Augmented Reality?



täglich

wöchentlich

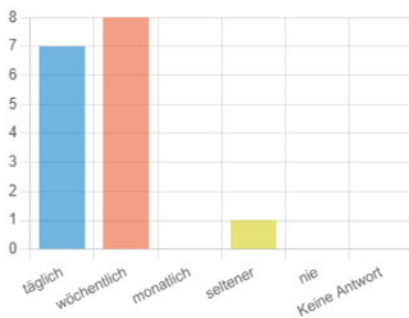
monatlich

seltener

nie

Keine Antwort

Wie häufig nutzt Du digitale Assistenten oder Chatbots wie ChatGPT, Perplexity, Gemini oder Claude?



täglich

wöchentlich

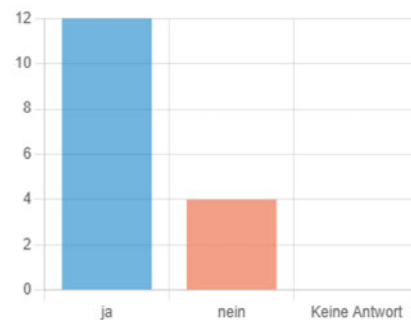
monatlich

seltener

nie

Keine Antwort

Stehst Du aktuell als Mieter:in in einem Mietverhältnis?

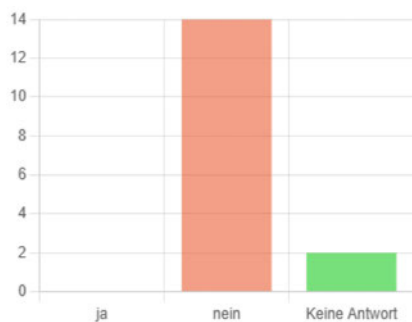


ja

nein

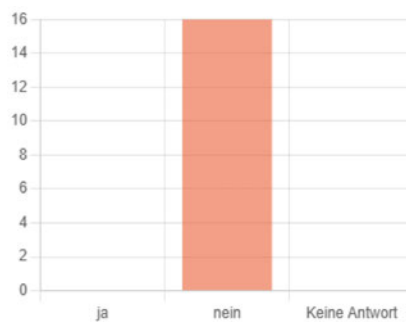
Keine Antwort

Falls ja: weißt Du von einer energetischen Sanierung an Deinem angemieteten Gebäude, die während der Dauer Deines Mietverhältnisses vorgenommen wurde?



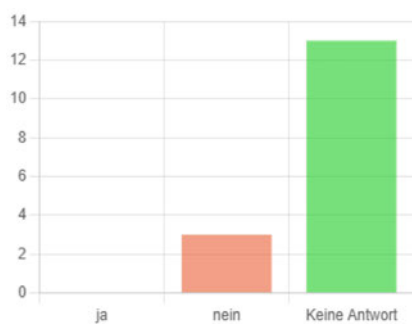
ja
nein
Keine Antwort

Stehst Du aktuell als Vermieter:in in einem Mietverhältnis?



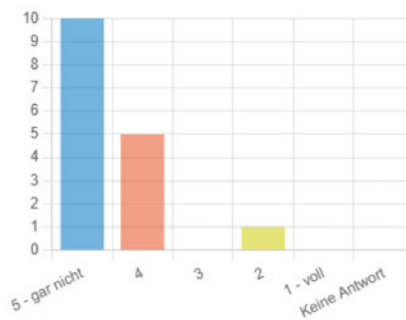
ja
nein
Keine Antwort

Falls ja: hast Du in der Vergangenheit eine energetische Sanierung an einem durch Dich vermieteten Gebäude vorgenommen?



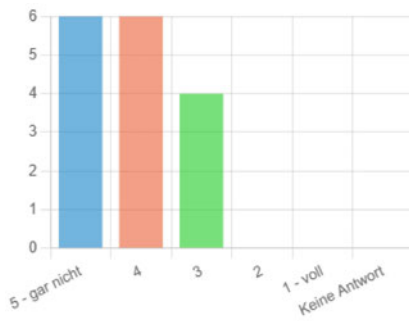
ja
nein
Keine Antwort

Wie sehr konntest Du Deine Sichtweisen und Empfindungen während der Vorhabensplanung ausdrücken?



5 - gar nicht
4
3
2
1 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter seine Erklärungen auf Deine persönlichen Bedürfnisse zugeschnitten?



5 - gar nicht

4

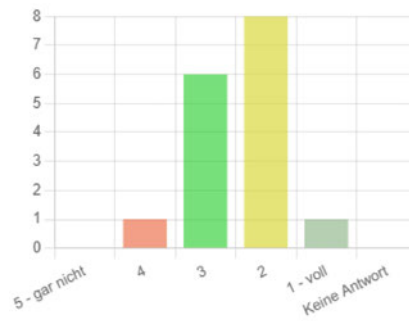
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr waren die Erklärungen Deines Vermieters zum Verfahren nachvollziehbar?



5 - gar nicht

4

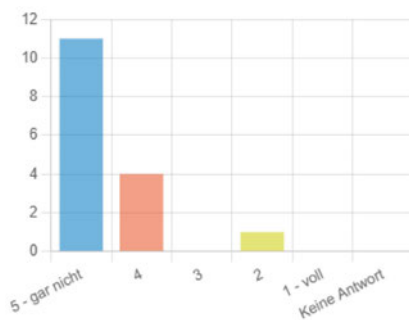
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hast Du Einfluss auf das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme)?



5 - gar nicht

4

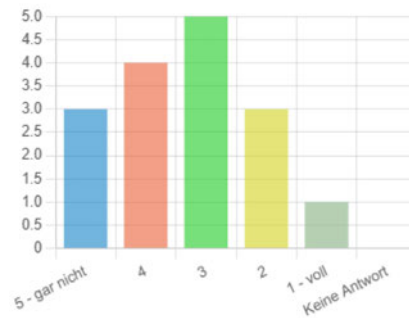
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr ist es Dir möglich, gegen das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme) Widerspruch einzulegen?



5 - gar nicht

4

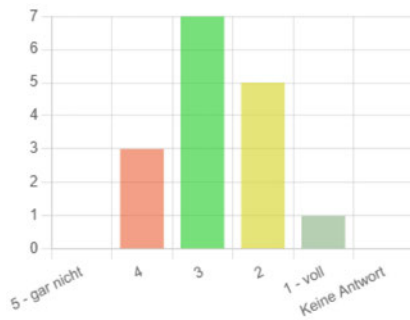
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter sich in seinen Auskünften offen und ehrlich verhalten?



5 - gar nicht

4

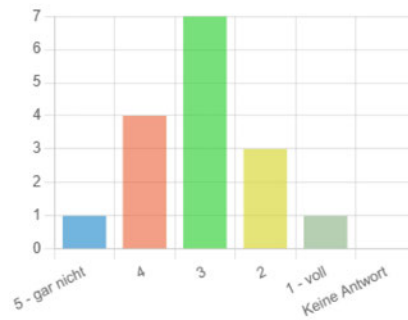
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter das Verfahren gründlich erklärt?



5 - gar nicht

4

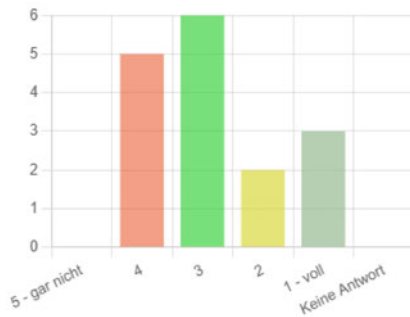
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter Dir Einzelheiten rechtzeitig mitgeteilt?



5 - gar nicht

4

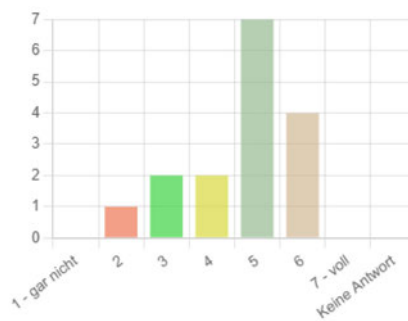
3

2

1 - voll

Keine Antwort

Auf einer Skala von 1 bis 7 – wie zufrieden warst Du mit der Nutzung der Anwendung?



1 - gar nicht

2

3

4

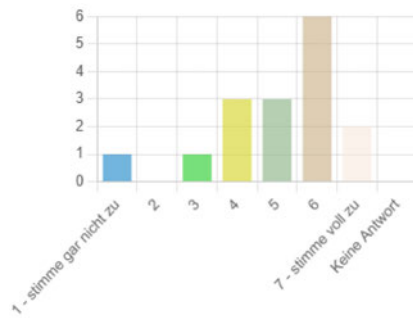
5

6

7 - voll

Keine Antwort

Ich empfinde die Anwendung in meinem Alltag als nützlich.



- stimme gar nicht

zu

2

3

4

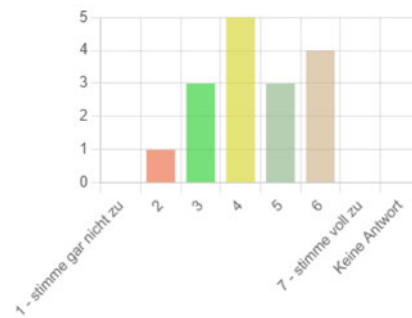
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Die Nutzung der Anwendung erhöht meine Chancen, Dinge zu erreichen, die mir wichtig sind.



1 - stimme gar nicht

zu

2

3

4

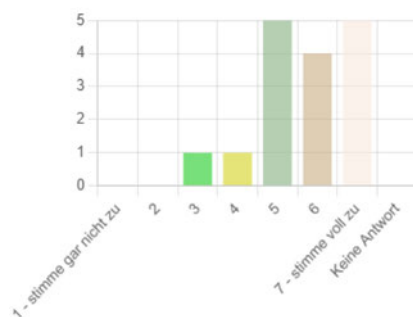
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Die Anwendung zu lernen ist einfach für mich.



- stimme gar nicht

zu

2

3

4

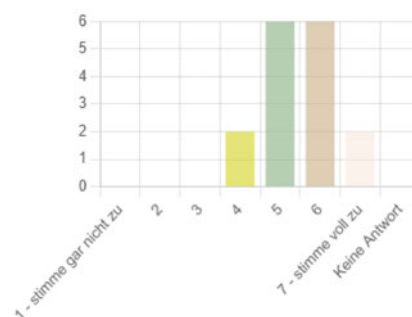
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Meine Interaktion mit der Anwendung ist klar und verständlich.



1 - stimme gar nicht

zu

2

3

4

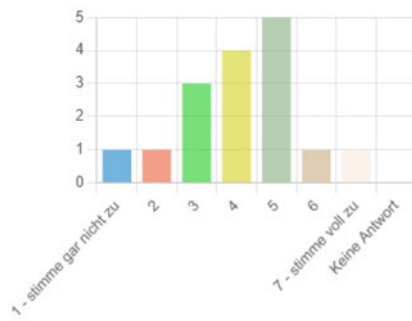
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Die Anwendung zu nutzen macht Spaß.



- stimme gar nicht

u

2

3

4

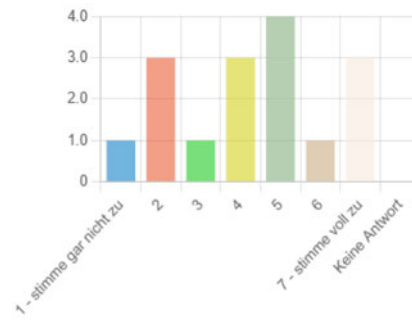
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Ich beabsichtige, in der Zukunft auch weiterhin die Anwendung zu nutzen



1 - stimme gar nicht

zu

2

3

4

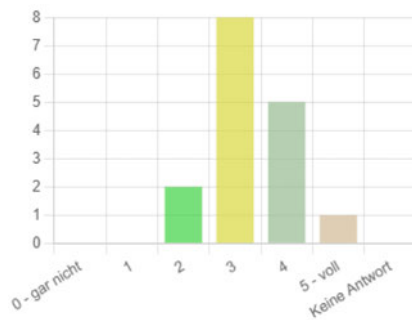
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Wie sehr konntest Du Deine Sichtweisen und Empfindungen während der Vorhabensplanung ausdrücken?



0 - gar nicht

1

2

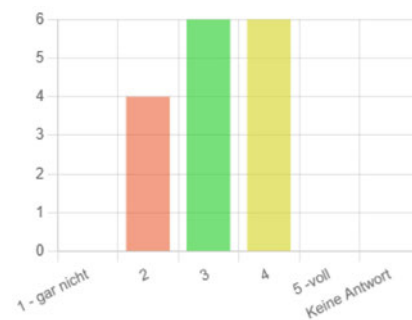
3

4

5 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hast Du Einfluss auf das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme)?



1 - gar nicht

2

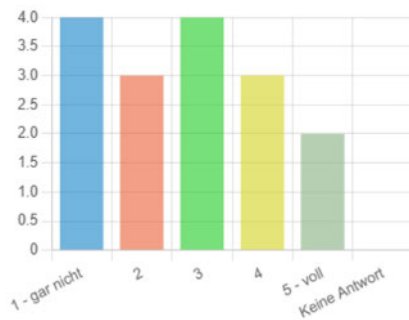
3

4

5 - voll

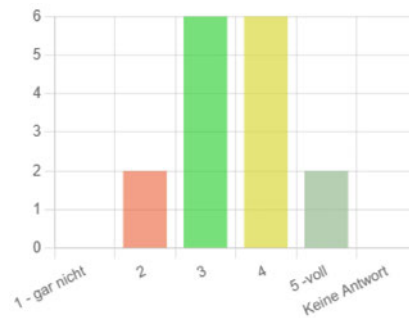
Keine Antwort

Wie sehr ist es Dir möglich, gegen das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme) Widerspruch einzulegen?



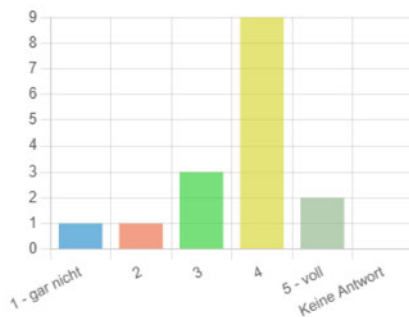
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter sich in seinen Auskünften offen und ehrlich verhalten?



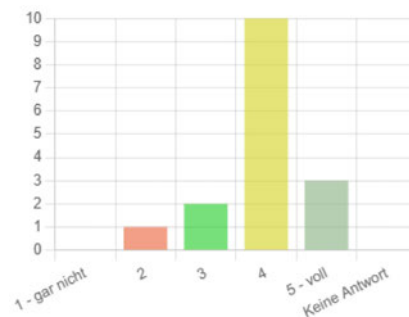
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter das Verfahren gründlich erklärt?



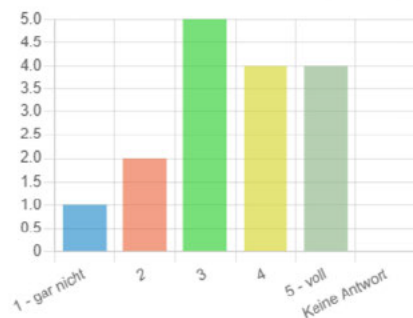
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr waren die Erklärungen Deines Vermieters zum Verfahren nachvollziehbar?



1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter Dir Einzelheiten rechtzeitig mitgeteilt?



1 - gar nicht

2

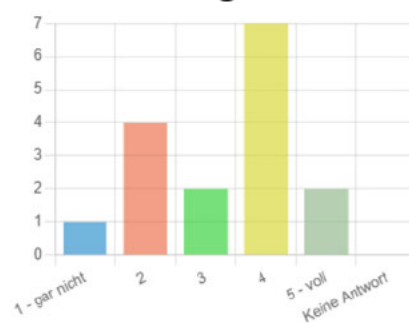
3

4

5 - voll

Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter seine Erklärungen auf Deine persönlichen Bedürfnisse zugeschnitten?



1 - gar nicht

2

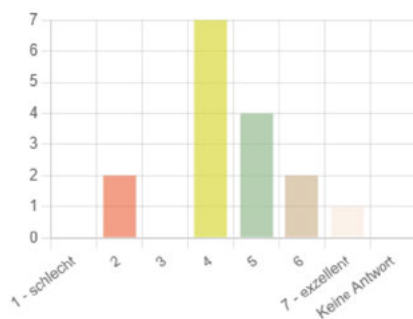
3

4

5 - voll

Keine Antwort

Wie bewertest Du die Gesamtqualität der KI-generierten Inhalte?



1 - schlecht

2

3

4

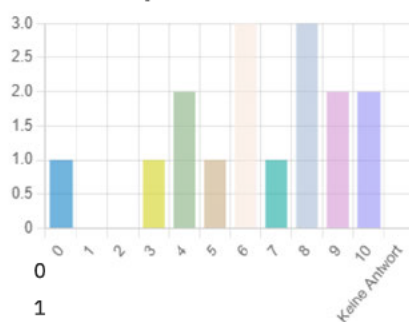
5

6

7 - exzellent

Keine Antwort

Wie wahrscheinlich ist es auf einer Skala von 0 bis 10, dass Sie die Anwendung einem befreundeten Mieter weiterempfehlen würden?



0

1

2

3

4

5

6

7

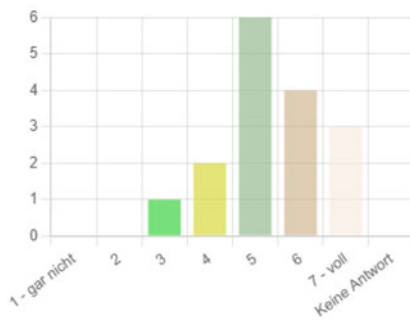
8

9

10

Keine Antwort

Auf einer Skala von 1 bis 7 – wie zufrieden warst Du mit der Nutzung der Anwendung?



1 - gar nicht

2

3

4

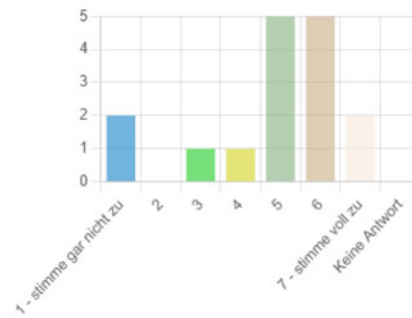
5

6

7 - voll

Keine Antwort

Ich empfinde die Anwendung in meinem Alltag als nützlich.



1 - stimme gar nicht zu

2

3

4

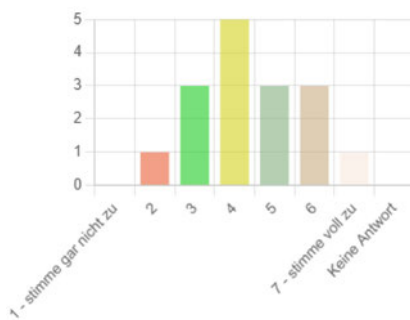
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Chancen, Dinge zu erreichen, die mir wichtig sind.



- stimme gar nicht zu

2

3

4

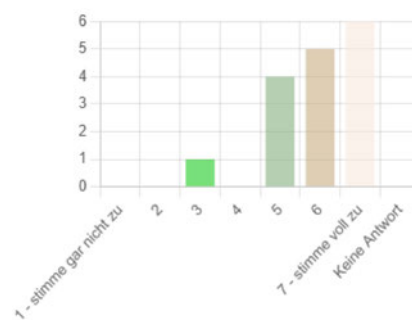
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Die Anwendung zu lernen ist einfach für mich.



1 - stimme gar nicht zu

2

3

4

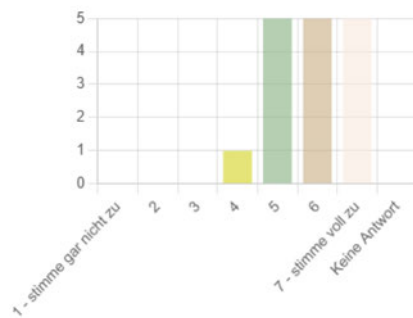
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Meine Interaktion mit der Anwendung ist klar und verständlich.



- stimme gar nicht

u

2

3

4

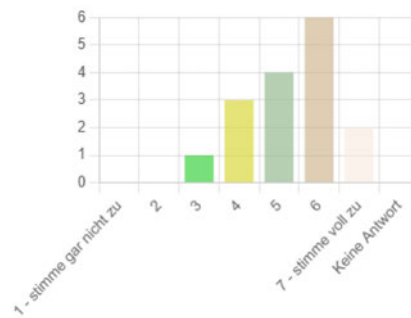
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Die Anwendung zu nutzen macht Spaß.



1 - stimme gar nicht

zu

2

3

4

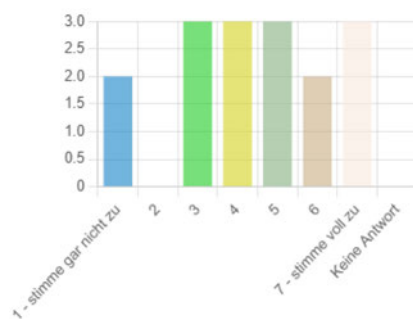
5

6

7 - stimme voll zu

Keine Antwort

Ich beabsichtige, in der Zukunft auch weiterhin die Anwendung zu nutzen



- stimme gar nicht

u

2

3

4

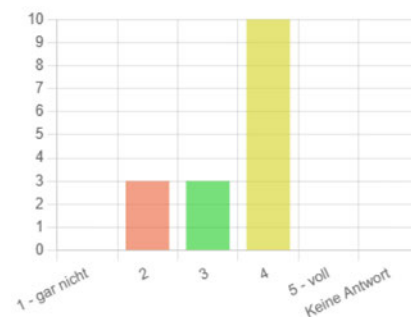
5

6

- stimme voll zu

Keine Antwort

Wie sehr konntest Du Deine Sichtweisen und Empfindungen während der Vorhabensplanung ausdrücken?



1 - gar nicht

2

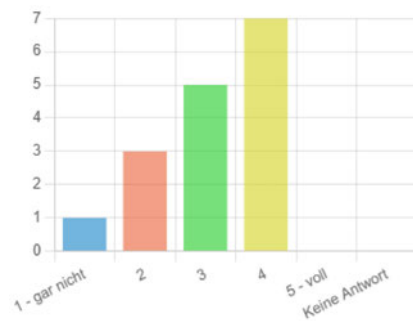
3

4

5 - voll

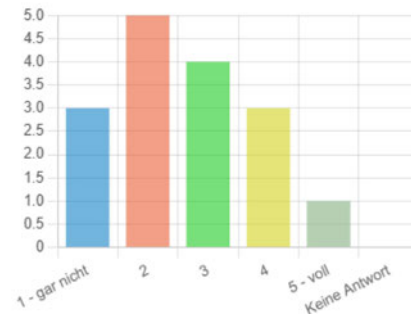
Keine Antwort

Wie sehr hast Du Einfluss auf das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme)?



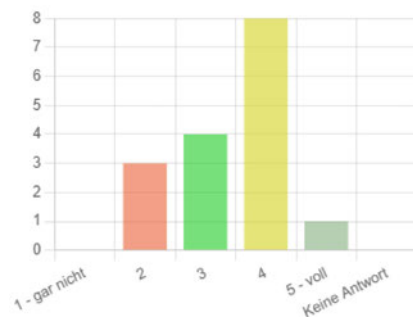
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr ist es Dir möglich, gegen das durch die Vorhabensplanung erzielte Ergebnis (die geplante Modernisierungsmaßnahme) Widerspruch einzulegen?



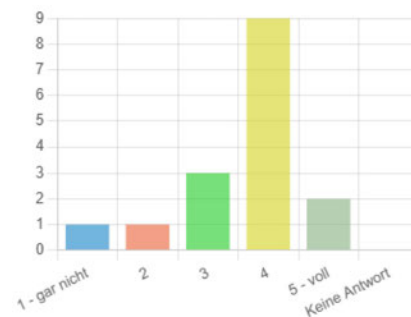
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter sich in seinen Auskünften offen und ehrlich verhalten?



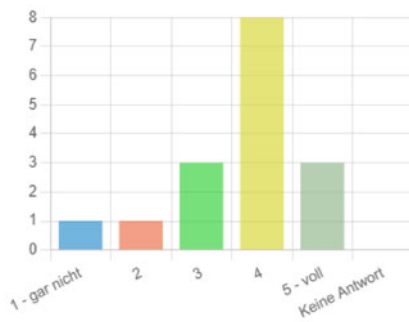
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter das Verfahren gründlich erklärt?



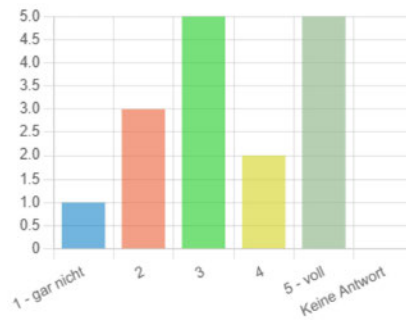
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr waren die Erklärungen Deines Vermieters zum Verfahren nachvollziehbar?



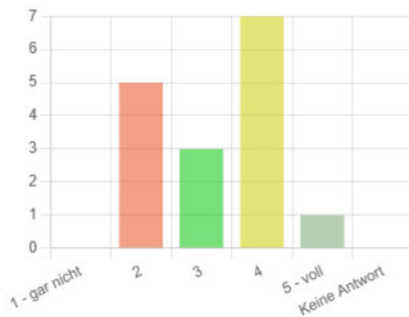
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter Dir Einzelheiten rechtzeitig mitgeteilt?



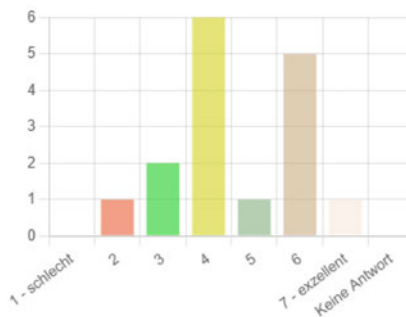
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie sehr hat Dein Vermieter seine Erklärungen auf Deine persönlichen Bedürfnisse zugeschnitten?



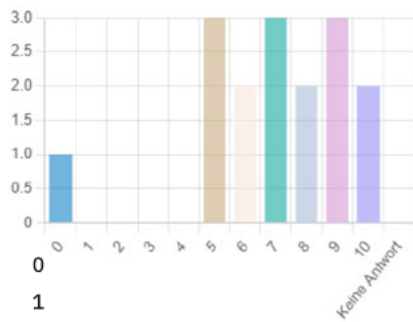
1 - gar nicht
2
3
4
5 - voll
Keine Antwort

Wie bewertest Du die Gesamtqualität der KI-generierten Inhalte?



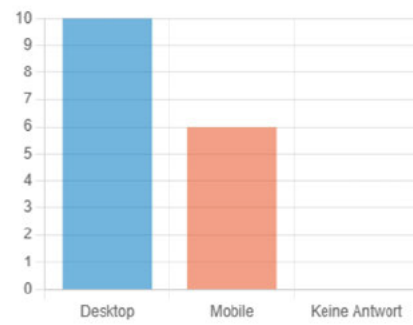
1 - schlecht
2
3
4
5
6
7 - exzellent
Keine Antwort

Wie wahrscheinlich ist es auf einer Skala von 0 bis 10, dass Sie die Anwendung einem befreundeten Mieter weiterempfehlen würden?



0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
Keine Antwort

Welche App hat dir besser gefallen?



Desktop
Mobile
Keine Antwort

Nutzung von generativer KI

Während der Erstellung dieser Arbeit wurden Gemini von Google, ChatGPT von OpenAI und Perplexity als unterstützendes Werkzeug genutzt. Die Nutzung umfasste die sprachliche Überarbeitung, Grammatik- und Stilprüfung sowie die Verbesserung der Prägnanz und des akademischen Tonfalls, strukturelles Feedback, das Brainstorming von Argumenten und Formulierungen sowie eine begrenzte Unterstützung bei der Programmierung, einschließlich Datenaufbereitung, Datenvisualisierung (Plotting), Debugging und Code-Refactoring. Darüber hinaus wurden die genannten KI-Werkzeuge in spezifischen Rollenkonfigurationen (als wissenschaftlicher Schreibassistent sowie als kritischer Gutachter) eingesetzt. Dies umfasste die Generierung erster Textentwürfe für neue Teilabschnitte auf Basis des Arbeitsstandes und eigener Überlegungen des Autors sowie die systematische Textüberprüfung auf Argumentationslücken, logische Inkonsistenzen und unbegründete Annahmen. Zur Unterstützung der Literaturrecherche wurden neben den genannten Werkzeugen zusätzlich Elicit, Google Scholar, Semantic Scholar und Consensus verwendet. Alle KI-gestützten Vorschläge wurden vom Autor kritisch geprüft, manuell verifiziert und integriert. Generative KI wurde nicht verwendet, um Forschungsdaten zu generieren, ungeprüfte Zitate zu erstellen, unbelegte wissenschaftliche Analysen aufzustellen oder das wissenschaftliche Urteilsvermögen des Autors zu ersetzen. Sofern die verwendeten Werkzeuge akademische Quellen oder quellenbezogene Behauptungen vorgeschlagen haben, wurden diese mit den Originalpublikationen abgeglichen. Alle bibliografischen Einträge wurden vom Autor erstellt und verifiziert.

Der Autor trägt die volle Verantwortung für den Inhalt, die Richtigkeit, die Originalität, die Analysen, die Abbildungen, die Interpretationen und die Schlussfolgerungen dieser Arbeit. Es wurden keine vertraulichen, gesperrten, kommerziell sensiblen, personenbezogenen oder auf Studienteilnehmer bezogenen Forschungsdaten an generative KI-Werkzeuge übermittelt.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Ort

Datum

Unterschrift im Original