

---

# Modellierung und Bewertung von Wohnräumen durch Smartphone-gestützte 3D-Geometrieerfassung und Maschinelles Lernen: Ein digitaler Beitrag zur Förderung des „Ageing in Place“ bei Mobilitätseinschränkungen

---

## Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Genehmigte Dissertation von Bastian Plaß aus Homberg (Efze)

Tag der Einreichung: 05. September 2023, Tag der Prüfung: 14. November 2023

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel
  2. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Thomas Klauer
- Darmstadt, Technische Universität Darmstadt



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Bau- und  
Umweltingenieurwissen-  
schaften

Institut für Numerische  
Methoden und Informatik im  
Bauwesen

Modellierung und Bewertung von Wohnräumen durch Smartphone-gestützte  
3D-Geometrieerfassung und Maschinelles Lernen: Ein digitaler Beitrag zur Förderung des „Ageing  
in Place“ bei Mobilitätseinschränkungen  
Dissertation

Genehmigte Dissertation von Bastian Plaß

Tag der Einreichung: 05. September 2023

Tag der Prüfung: 14. November 2023

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-263487

URL: <https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/26348>

Jahr der Veröffentlichung auf TUprints: 2023

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<https://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)

Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Nicht kommerziell – Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Für meine Familie, Freunde und die wissenschaftliche Gemeinschaft



---

# Vorwort

---

*“The people who are crazy enough to think they can change the world are the ones who do.”*  
– Steve Jobs

Die Entscheidung, eine akademische Karriere einzuschlagen, führt auf mein neugieriges und vielseitig interessiertes Sein zurück, welches ich durch mein Studium an der Hochschule Mainz kreativ und proaktiv weiterbilden konnte. Während meiner Zeit als Studierender und wissenschaftlicher Mitarbeiter durfte ich an unzähligen Projekten mitwirken, einen unbezahlbaren Schatz an Erfahrungen und ein umfangreiches Netzwerk aus inspirierenden Persönlichkeiten aufbauen, das mir in den unterschiedlichsten Stationen des wissenschaftlichen Alltags mit Rat und Tat zur Seite steht. Euch allen möchte ich an dieser Stelle danken – für die gemeinsame Arbeit an unseren großartigen Projekten, die belebenden Gespräche, erfrischenden Ideen und vor allem unsere gemeinsamen Erfolge über die letzten Jahre! Ich bin überzeugt davon, dass wir mit unserer Arbeit die Welt ein Stück verändern können. Ich möchte meinen Dank noch an besondere Menschen richten, die mit Ihrem Beitrag wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen haben.

Mein erster Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Uwe Rüppel für die motivierende Unterstützung und zielgerichtete Kanalisierung meiner Arbeit. Durch seine Betreuung und die Übernahme des Hauptreferates konnte ich mein Forschungsinteresse realisieren.

Einen großen Dank möchte ich Prof. Dr.-Ing. Thomas Klauer für die Schaffung kreativer Freiräume und sein Vertrauen in mich und mein Projekt aussprechen. Über all die Jahre hinweg hat er mit viel Geduld und Zuversicht meine Arbeit unterstützt.

Prof. Dr.-Ing. Karl-Albrecht Klinge danke ich zusätzlich für unzählige Erfahrungen aus unseren gemeinsamen Projekten und die Ebnung des Weges zu einer wissenschaftlichen Laufbahn in Mainz.

Weiterer Dank gebührt meinen Freunden Alexander Rolwes und Linda Rau für ihre hilfreichen Korrekturen und konstruktiven Änderungsvorschläge. Auch möchte ich mich bei allen Studierenden, deren Arbeiten ich betreuen durfte, sowie meinen Kolleginnen und Kollegen am Forschungsinstitut i3mainz für die familiäre Arbeitsatmosphäre und schöne Zeit bedanken. Als i3mainz-Alumni werde ich mich Euch auch in Zukunft weiterhin verbunden fühlen.

Für ihre bedingungslose Unterstützung und liebevolle Art, meine Arbeit zu begleiten und mir mit Mut durch schwierige Zeiten zu helfen, danke ich meiner Familie und ganz besonders Denise!

*Bastian Plaß*

---



---

# Zusammenfassung

---

Angesichts der steigenden Lebenserwartung und einem zunehmenden Anteil älterer Menschen in der Gesellschaft erfährt das *Ageing in Place* einen großen Stellenwert in der gesundheits- und sozialpolitischen Agenda. Der möglichst lange Verbleib in der eigenen Wohnung präsentiert sich als eine Strategie gegenüber den Herausforderungen des demografischen Wandels. Darüber hinaus entspricht diese Maxime grundsätzlich den persönlichen Wünschen der älteren Menschen, die auch bei Mobilitätseinschränkungen oder Pflegebedürftigkeit möglichst lange in ihrer vertrauten Umgebung leben möchten. Als problematisch stellt sich in diesem Zusammenhang dar, dass lediglich ein geringer Bruchteil der Wohnungen älterer Menschen barrierefrei und rollstuhlgerecht ausgestattet ist. Infolgedessen steigt der Bedarf nach altersgerechten Bestandswohnungen, denen die Identifikation und anschließend Umsetzung von sozialgesetzlich subventionierten, wohnumfeldverbessernden Maßnahmen vorausgeht. Die Identifikation entsprechender Maßnahmen erfolgt gegenwärtig entweder eigenständig und setzt dabei die Kenntnis der zu beachtenden Anforderungen voraus oder erfordert professionelle Unterstützung, z. B. von Wohnberatungen, welchen die personellen Kapazitäten für eine Deckung des Gesamtbedarfs fehlen.

Vor dem Hintergrund dieses vulnerablen Status Quo intendiert diese Arbeit ein Konzept, welches sich an den Bestrebungen der erst kürzlich veröffentlichten Digitalisierungsstrategie 2030 des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) orientiert. Unter dem Motto *Gemeinsam Digital* stellt diese langfristig ausgelegte Strategie den Menschen in den Mittelpunkt und forciert den bedarfsgerechten Einsatz digitaler Technologien und Anwendungen u. a. zur Verbesserung der Patientensicherheit, der Optimierung von Prozessen und der Förderung von Präventionsarbeit. Diese Indikatoren berücksichtigt auch der hier vorgestellte Beitrag, welcher durch die Inkorporation digitaler Technologien die situative und präventive Bewertung eines Wohnraumes hinsichtlich der altersgerechten Nutzbarkeit automatisiert vornimmt. Dieses vorgeschlagene Paradigma soll darüber hinaus dazu beitragen, die Abhängigkeit zu den externen Fachkräftenressourcen aufzuheben und gleichzeitig das aktive Selbstmanagement Betroffener für ihr *Ageing in Place* zu unterstützen.

Dazu wird ein dreiteiliger Prozess vorgeschlagen, welcher im Rahmen einer Demonstratoranwendung prototypisch implementiert wird und zu einem wesentlichen Bestandteil auf Verbraucherendgeräten wie dem Smartphone basiert. Allem voran geht die situative Erfassung des Wohnraumes. Als geeignete Plattform haben sich die mit LiDAR-Sensorik ausgerüstete Endgeräte von Apple Inc. (*iPhone Pro* und *iPad Pro*) qualifiziert. Das geht aus einer innerhalb dieser Arbeit durchgeführten, evaluativen Studie hervor, die unterschiedliche Verfahren zur 3D-Realitätserfassung (engl. Reality Capture) baulicher Anlagen untersucht. Darauf aufbauend ist eine iOS-App namens *Semantic Data Capture* entwickelt worden, mit welcher Wohnraum dreidimensional erfasst und simultan semantisch strukturiert

---

---

werden kann. Dieser symbiotische Prozess stellt einen neuartigen, durch Methoden der Künstlichen Intelligenz getriebenen Ansatz vor, welcher sich hinsichtlich der nachgelagerten Datenmodellierung im Rahmen dieser Arbeit als vorteilhaft erweist. Anschließend werden die akquirierten 3D-Daten durch eine zusätzliche *Modellierungs- und Prüfanwendung* raffiniert. Diese schließt eine spezifische Datenaufbereitung sowie Instanz Segmentierung ein und mündet in einem alphanumerischen Wohnrauminformationsmodell (WIM), welches sämtliche Ausstattungselemente einschließlich ihrer geometrischen Repräsentation, Semantik und räumlicher Topologie beinhaltet. Davon ausgehend erfolgt im letzten Schritt die regelbasierte Prüfung anhand geometrischer Bedingungen, welche in der DIN 18040-2 definiert sind. Aus dem Prozess resultiert eine diagnostische, multimodale Wohnraumbewertung, welche gleichzeitig auch als Handlungsempfehlung interpretiert werden kann, um wohnumfeldverbessernde Maßnahmen einzuleiten, die der Auszeichnung Altersgerechtigkeit und damit dem *Ageing in Place* bei Mobilitätseinschränkungen entgegenstehen.

Die Validierung der Demonstratoranwendung, welche in dieser Arbeit als *Progressive Home Care (PHC)* bezeichnet wird, erfolgt unter Berücksichtigung funktionaler Anforderungsmerkmale durch realitätsnahe Anwendungsbeispiele verschiedener Nutzungsarten von Wohnräumlichkeiten. Gemessen anhand gängiger Leistungsmetriken aus der klassifizierenden Machine Learning Domäne, erreicht der Demonstrator eine Vollständigkeit von 89% hinsichtlich der Wohnraummodellierung und eine 67% Trefferquote bei der regelbasierten Wohnraumbewertung, welche im Rahmen der prototypischen Entwicklungsarbeit mit einem positiven Nachweis der funktionalen Eigenschaften quittiert werden. Folglich trägt das Resultat dieser Arbeit einen wichtigen Baustein zur Umsetzung der Digitalisierungsstrategie des Gesundheitssystems und der Pflege anhand einer gesellschaftlich relevanten und ubiquitären Herausforderung bei – dem altersgerechten Wohnraum.

**Schlagwörter:** Ageing in Place; Mobilitätseinschränkungen; Altersgerechtes Wohnen; Digitalisierung; Softwareentwicklung; Maschinelles Lernen; Flash-LiDAR-Punktwolken; Instanz Segmentierung; Wohnraummodellierung

---



---

# Abstract

---

In light of rising life expectancy and a growing proportion of older people in society, the concept of *Ageing in Place* is becoming highly valued in the health and social political agenda. Remaining in one's private residence for as long as possible presents a feasible response to the socio-political challenges of demographic change. In addition, this principle corresponds to the desires of the elderly, who wish to live in their familiar surroundings on a long-term perspective, even if they suffer physical limitations or require professional care. In this context, it is challenging that only a small fraction of the elderly's residences is barrier-free and wheelchair-accessible. Consequently, there is an increasing demand for age-friendly residences, which requires prior identification and subsequent realization of socially subsidized improvements to the living environment. The identification of pertinent improvements is currently either carried out independently assuming detailed knowledge or requires professional support, e. g. from housing consultancies, lacking sufficient capacity to meet the overall demand.

Considering this vulnerable situation, this work intends to develop a concept that is inspired by the aspirations of the recently published digitization strategy 2030 of the German Federal Ministry of Health (BMG). Themed *Digital Together*, this long-term strategy centers on people and encourages the tailored use of digital technologies and applications in order to increase patient safety, optimize processes and enhance preventive work. Such indicators are also taken into account in the work presented here, which incorporates digital technologies to assess the living space in terms of its age-friendly usability in an automated way both, in-situ and preventively. The proposed paradigm should furthermore contribute to overcome the dependency on external professional resources and promote the active self-management of the elderly for their *Ageing in Place* concurrently.

To this end, we propose a three-step process that is implemented prototypically as an applicable demonstrator and is based mainly on consumer devices such as smartphones. The first step involves the in-situ capture of the living environment. Apple's consumer devices equipped with LiDAR technology, such as *iPhone Pro* or *iPad Pro*, have qualified as appropriate platforms. This finding bases on an evaluative study that examines different methods for 3D reality capture of structural assets. Consequently, an iOS app named *Semantic Data Capture* has been developed to digitize living space in the first perspective but also perform semantically enrichment of the acquired 3D data simultaneously. This concurrent acquisition process introduces a novel AI-based approach that proves beneficial in terms of downstream data modeling for living space assessment related to this work. Subsequently, the acquired 3D data is refined by an auxiliary *modeling and testing application*. This includes a specific data preparation as well as instance segmentation and result in an alphanumerical residential information model (WIM) containing any interior components including their geometric

---

---

representation, semantics and spatial topology. Arising from this, the final step entails rule-based assessment using geometric constraints defined in DIN 18040-2. The process results in a diagnostic and multimodal residence assessment, which can be seen as a recommendation in order to introduce living space improvements that counteract the age-friendly state and thus *Ageing in Place* considering physical restrictions.

The validation of the demonstrator, termed *Progressive Home Care (PHC)*, is carried out taking into consideration functional requirements due to several realistic use cases of different living space types. Using common performance metrics from machine learning classification tasks, the demonstrator achieves a completeness score of 89% with respect to modeling and a 67% hit rate in rule-based assessment, which thus credits the functional capability successfully. Consequently, the result of this work constitutes a key brick for the conversion of the digitalization strategy of health care system and care by referring to a socially relevant and ubiquitous challenge – the age-appropriate residences.

**Keywords:** Ageing in Place; Physical Limitations; Age-friendly Residences; Digitalization; Software Engineering; Machine Learning; Flash-LiDAR Point Clouds; Instance Segmentation; Residence Modeling

---

---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>VII</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung und Zielsetzung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Ansatz . . . . .	3
1.3 Methodik . . . . .	5
1.4 Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2 Digitale Entwicklung im Gesundheitssystem</b>	<b>11</b>
2.1 Historische Entwicklung . . . . .	11
2.2 Digitalisierungsstrategie für die Pflege im Gesundheitssystem . . . . .	12
2.2.1 Ambulanter Pflegenotstand . . . . .	13
2.2.2 Gesetzliche Rahmenbestimmungen . . . . .	14
2.2.3 Digitale Gesundheits- und Pflegeanwendungen . . . . .	17
2.2.4 Altersgerechte Assistenzsysteme . . . . .	19
2.2.5 Innerhäusliche Mobilität . . . . .	21
2.2.6 Technische Hilfen gegen innerhäusliche Mobilitätseinschränkungen . . . . .	22
2.3 Zwischenfazit . . . . .	28
<b>3 Konzept zur automatisierten Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell</b>	<b>31</b>
3.1 Geometrische Rahmenbedingungen an die barrierefreie Ausstattung von Wohnungen	31
3.2 Anforderungsanalyse für die Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen	35
3.2.1 Nutzeranforderungen . . . . .	35
3.2.2 Systemanforderungen . . . . .	39
3.3 As-Built Modellierung von Bestandsgebäuden . . . . .	50
3.4 Grenze des Konzepts . . . . .	53
3.5 Spezifikation eines Wohnrauminformationsmodells . . . . .	55
3.6 Zwischenfazit . . . . .	57

---

<b>4</b>	<b>Technologien zur digitalen 3D-Geometrieerfassung und automatisierten Datenverarbeitung</b>	<b>59</b>
4.1	Stand der Technik zur 3D-Erfassung innerhäuslicher Szenen . . . . .	59
4.1.1	Modalitäten zur Repräsentation von 3D-Daten . . . . .	60
4.1.2	Messtechnische Verfahren zur Erzeugung von 3D-Daten . . . . .	62
4.1.3	Selektive Bewertungsmerkmale an messtechnische Verfahren . . . . .	65
4.1.4	Ausstattung und Erfassung einer Testräumlichkeit . . . . .	67
4.1.5	Evaluation der messtechnischen Verfahren . . . . .	72
4.1.6	Digital Flash-LiDAR Technologie . . . . .	75
4.2	Stand der Technik zur Strukturierung von 3D-Daten innerhäuslicher Szenen . . . .	83
4.2.1	Szenenverständnis . . . . .	84
4.2.2	Verfahren zur semantischen Ergänzung . . . . .	87
4.2.3	Ansatz zur semantischen Echtzeit-Strukturierung . . . . .	90
4.3	Diskussion der Technologien zur Erfassung und Strukturierung eines Wohnraumes .	94
<b>5</b>	<b>Entwurf und Implementierung einer Demonstratoranwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell</b>	<b>97</b>
5.1	Demonstratoranwendung <i>Progressive Home Care</i> . . . . .	97
5.2	Strukturierte 3D-Geometrieerfassung mit <i>Semantic Data Capture</i> . . . . .	101
5.2.1	Benutzeroberfläche und Verwendungsmodi . . . . .	103
5.2.2	Implementierungsdetails . . . . .	105
5.3	<i>Modellierungs- und Prüfanwendung</i> zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen	109
5.3.1	Prozess und Implementierungsdetails . . . . .	109
5.3.2	Laufzeit . . . . .	119
5.4	Limitationen . . . . .	120
5.5	Perspektiven . . . . .	122
5.6	Zwischenfazit . . . . .	124
<b>6</b>	<b>Validierung der Demonstratoranwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell</b>	<b>125</b>
6.1	Modellierung und Bewertung unterschiedlicher Räumlichkeiten . . . . .	125
6.1.1	Validierungsprozess . . . . .	126
6.1.2	Anwendungsbeispiele . . . . .	127
6.1.3	Abschließende Evaluationsergebnisse . . . . .	134
6.2	Validierung der Qualitätsanforderungen . . . . .	137
6.3	Validierungsperspektiven . . . . .	139
6.4	Erfahrungswerte zur Smartphone-gestützten 3D-Geometrieerfassung . . . . .	140
6.5	Zwischenfazit . . . . .	142
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>143</b>
7.1	Zusammenfassung . . . . .	143
7.2	Abschließendes Fazit . . . . .	146
7.3	Weiterführende Überlegungen und Ausblick . . . . .	146

---

<b>Anhang</b>	<b>149</b>
A Darstellungen der 3D-Punktwolken einer Testräumlichkeit zur qualitativen Sensor-evaluation . . . . .	149
A.1 Trimble X7 . . . . .	150
A.2 Leica BLK2GO . . . . .	151
A.3 RealSense L515 . . . . .	152
A.4 Apple iPad Pro . . . . .	153
A.5 Nikon D3200 . . . . .	154
B Darstellungen der Flash-LiDAR-Punktwolken im Vergleich zur Referenzgeometrie zwecks Sensorspezifikation . . . . .	155
C Evaluationsergebnisse der Demonstratoranwendung zur Bewertung von Räumlichkei-ten auf altersgerechte Nutzbarkeit . . . . .	157
C.1 Räumlichkeiten der Nutzungsart Badezimmer . . . . .	157
C.2 Räumlichkeiten der Nutzungsart Schlafzimmer . . . . .	159
C.3 Räumlichkeiten der Nutzungsart Wohnzimmer . . . . .	161
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>163</b>



---

# Abbildungsverzeichnis

---

1.1	Information Systems Research Framework . . . . .	6
1.2	Methodische Strukturierung der Arbeit . . . . .	7
2.1	Chronologische Übersicht der zentralen Gesetzesinitiativen zur Pflege . . . . .	15
2.2	Übersicht der Versorgungslösungen bei innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen	29
3.1	Schemadarstellung der baulichen Barrierefreiheit im <i>B-Standard</i> und <i>R-Standard</i> .	32
3.2	<i>Use Case</i> Diagramm zu den funktionalen Nutzeranforderungen . . . . .	38
3.3	Prozessmodell der Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen . . . . .	44
3.4	Prozessmodell der strukturierten Geometrieerfassung eines Wohnraumes . . . . .	46
3.5	Prozessmodell der automatisierten Modellierung eines Wohnraumes . . . . .	47
3.6	Prozessmodell der regelbasierten Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit	48
3.7	Level of Development am Beispiel einer Tür . . . . .	52
3.8	BIM Maturity Model . . . . .	54
3.9	Klassendiagramm des Wohnrauminformationsmodells . . . . .	56
4.1	Beispiele unterschiedlicher Repräsentationen von 3D-Daten . . . . .	60
4.2	Messtechnische Verfahren für die 3D-Erfassung von Wohnräumlichkeiten . . . . .	63
4.3	Ausstattung der Testräumlichkeit . . . . .	68
4.4	Schematischer Ablauf des Registrierungsprozesses . . . . .	69
4.5	Prinzip der dToF-basierten Tiefenkartenerfassung . . . . .	76
4.6	Systemkomponenten des Apple Flash-LiDAR-Scanners . . . . .	77
4.7	Scanmuster des Apple Flash-LiDAR-Scanners . . . . .	78
4.8	Punktdichte und Spotgröße des Apple Flash-LiDAR-Scanners . . . . .	80
4.9	Genauigkeitsbereich des Apple Flash-LiDAR-Scanners . . . . .	81
4.10	Vergleich unterschiedlicher Punktwolken zur Referenzgeometrie . . . . .	82
4.11	Semantische Ergänzung am Beispiel einer Bildaufnahme und Punktwolke . . . . .	86
4.12	Prozess zur semantischen Echtzeit-Strukturierung eines Meshs . . . . .	93
5.1	Erweitertes Prozessmodell der Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen	98
5.2	Architektur von <i>Progressive Home Care</i> . . . . .	99
5.3	Klassendiagramm ausgewählter Klassen des Wohnrauminformationsmodells . . . . .	100
5.4	Prinzip zur innerhäuslichen 3D-Datenerfassung mit LiDAR-fähigem Smartphone . .	102
5.5	Benutzeroberfläche und Navigationsmöglichkeiten von <i>Semantic Data Capture</i> . . .	103
5.6	Aktivitätsdiagramm zum Datenerfassungsmodus . . . . .	106
5.7	Aktivitätsdiagramm zum Ansichtsmodus . . . . .	108

---

5.8	Aktivitätsdiagramm zur <i>Modellierungs- und Prüfanwendung</i> . . . . .	110
5.9	Zwischenergebnisse aus der Datenmodellierung . . . . .	112
5.10	Ergebnisse aus der Datenprüfung . . . . .	116
6.1	Prozessmodell der funktionalen Validierung von <i>Progressive Home Care</i> . . . . .	126
6.2	Grundrissdarstellung eines Badezimmers . . . . .	128
6.3	Instanzsegmentierte Punktwolke eines Badezimmers . . . . .	128
6.4	(Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke eines Badezimmers . . . . .	128
6.5	Wohnraum-Eignungsbericht eines Badezimmers . . . . .	128
6.6	Grundrissdarstellung eines Schlafzimmers . . . . .	131
6.7	Instanzsegmentierte Punktwolke eines Schlafzimmers . . . . .	131
6.8	(Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke eines Schlafzimmers . . . . .	131
6.9	Wohnraum-Eignungsbericht eines Schlafzimmers . . . . .	131
6.10	Grundrissdarstellung eines Wohnzimmers . . . . .	133
6.11	Instanzsegmentierte Punktwolke eines Wohnzimmers . . . . .	133
6.12	(Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke eines Wohnzimmers . . . . .	133
6.13	Wohnraum-Eignungsbericht eines Wohnzimmers . . . . .	133
6.14	Exemplarische Erfassungs- und Sichtfeldtrajektorie . . . . .	141
A.1	Darstellungen der Referenzpunktwolke vom <i>Trimble X7</i> . . . . .	150
A.2	Darstellungen der 3D-Punktwolke vom <i>Leica BLK2GO</i> . . . . .	151
A.3	Darstellungen der 3D-Punktwolke der <i>RealSense™ L515</i> . . . . .	152
A.4	Darstellungen der 3D-Punktwolke vom <i>Apple iPad Pro</i> . . . . .	153
A.5	Darstellungen der 3D-Punktwolke von der <i>Nikon D3200</i> . . . . .	154
B.1	Darstellungen der Flash-LiDAR-Punktwolken im Vergleich zur Referenzgeometrie .	156
C.1	Ergebnisse von <i>Progressive Home Care</i> am Beispiel der Nutzungsart Badezimmer . .	158
C.2	Ergebnisse von <i>Progressive Home Care</i> am Beispiel der Nutzungsart Schlafzimmer .	160
C.3	Ergebnisse von <i>Progressive Home Care</i> am Beispiel der Nutzungsart Wohnzimmer . .	162



---

# Tabellenverzeichnis

---

1.1	Design Science Research Contribution Types . . . . .	6
3.1	Gesamtheit der geometrischen Voraussetzungen an die innere Erschließung eines Gebäudes sowie dessen Bedienelemente und Wohnungen . . . . .	34
3.2	Systemische Qualitätsanforderungen an die zu implementierende Anwendung . . .	41
3.3	Semantische Klassen zur Erfassung, Modellierung und Prüfung eines Wohnraumes	49
3.4	Einordnung der semantischen Fachklassen in das Wohnrauminformationsmodell . .	56
4.1	Bewertungsmerkmale zur Evaluation geeigneter Techniken für die Datenerfassung .	65
4.2	Evaluation der messtechnischen Verfahren am Beispiel der Testräumlichkeit . . . .	73
4.3	Spezifikationen des Apple Flash-LiDAR-Scanners . . . . .	83
4.4	Gegenüberstellung der Klassen zur semantischen Strukturierung . . . . .	91
5.1	Regelbasierter Implementierungsstand für die Bewertung von Wohnräumen . . . .	118
5.2	Laufzeit der <i>Modellierungs- und Prüfanwendung</i> . . . . .	119
6.1	Identifizierte <i>räumlich-semantische Elemente</i> eines Badezimmers . . . . .	128
6.2	Komparative Bewertung eines Badezimmers . . . . .	129
6.3	Identifizierte <i>räumlich-semantische Elemente</i> eines Schlafzimmers . . . . .	131
6.4	Komparative Bewertung eines Schlafzimmers . . . . .	132
6.5	Identifizierte <i>räumlich-semantische Elemente</i> eines Wohnzimmers . . . . .	133
6.6	Komparative Bewertung eines Wohnzimmers . . . . .	134
6.7	Evaluationsergebnisse der identifizierten <i>räumlich-semantischen Elemente</i> . . . . .	135
6.8	Gruppierte Evaluationsergebnisse für verschiedene Anwendungsbeispiele . . . . .	136
6.9	Ergebnisübersicht der validierten Qualitätsanforderungen . . . . .	137
C.1	Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Badezimmer . . . . .	157
C.2	Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Schlafzimmer . . . . .	159
C.3	Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Wohnzimmer . . . . .	161



---

# Abkürzungen

---

AAL	Altersgerechtes Assistenzsystem, engl. Ambient Assisted Living
APrec	Average Precision
AR	Erweiterte Realität, engl. Augmented Reality
ARec	Average Recall
AT	Assistive Technologie
BfArM	Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte
BGG	Behindertengleichstellungsgesetz
BIM	Building Information Modeling
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMFSFJ	Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend
BMG	Bundesministerium für Gesundheit
CNN	Faltendes Neuronales Netz, engl. Convolutional Neural Network
DiGA	Digitale Gesundheitsanwendung
DiGAV	Digitale Gesundheitsanwendungen-Verordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DiPA	Digitale Pflegeanwendung
DiPAV	Digitale Pflegeanwendungen-Verordnung
DL	Mehrschichtiges Lernen, engl. Deep Learning
dToF	Direkte Laufzeit, engl. Direct Time-of-Flight
DVG	Digitale-Versorgungs-Gesetz
DVPMG	Digitale-Versorgung-und-Pflege-Modernisierungs-Gesetz

---

FOV . . . . .	Sichtfeld, engl. Field-of-View
GUI . . . . .	Grafische Benutzeroberfläche, engl. Graphical User-Interface
HMV . . . . .	Hilfsmittelverzeichnis
IEC . . . . .	Internationale Elektrotechnische Kommission
IFC . . . . .	Industry Foundation Class
IKT . . . . .	Informations- und Kommunikationstechnologie
ISO . . . . .	Internationale Organisation für Normung
IT . . . . .	Informationstechnik
KI . . . . .	Künstliche Intelligenz
KNN . . . . .	Künstliches Neuronales Netz
kNN-G . . . . .	<i>k</i> -Nearest-Neighbor Graph
LiDAR . . . . .	Light Detection and Ranging
LOD . . . . .	Level of Development
MAE . . . . .	Mittlerer Absoluter Fehler, engl. Mean Absolute Error
ML . . . . .	Maschinelles Lernen, engl. Machine Learning
OFF . . . . .	Oberfläche Fertigfußboden
OMG BPMN . . .	Object Management Group, Business Process Model and Notation
OMG UML . . . .	Object Management Group, Unified Modeling Language
PHC . . . . .	<i>Progressive Home Care</i>
RANSAC . . . . .	Random Sample Consensus
RSE . . . . .	Räumlich-semantisches Element
SfM . . . . .	Structure from Motion
SGB . . . . .	Sozialgesetzbuch
SPAD . . . . .	Single Photon Avalanche Diode
TCSPC . . . . .	Time Correlated Single Photon Counting

---

TLS . . . . . Terrestrisches Laserscanning  
ToF . . . . . Laufzeit, engl. Time-of-Flight  
  
VCSEL . . . . . Vertical Cavity Surface Emitting Laser  
VDI . . . . . Verein Deutscher Ingenieure e.V.  
VR . . . . . Virtuelle Realität, engl. Virtual Reality  
  
WIM . . . . . Wohnrauminformationsmodell



---

# Gender-Hinweis

---

Zur besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Die verwendeten Personenbezeichnungen gelten, sofern nicht anders kenntlich gemacht, für alle Geschlechter.

---





---

# 1 Einleitung und Zielsetzung

---

In den turbulenten Zeiten des 21. Jahrhunderts beschreiben konträre Wortkoalitionen die globalen Umwälzungen am umfänglichsten – unsere Welt und mit ihr alle Lebensbereiche unterliegen einem beständigen Wandel. Globalisierung, Klimawandel und digitale Transformation bilden den O-Ton der Medienlandschaft und bringen regelmäßig neue Kaskaden an Herausforderungen hervor. Als disruptiv getauft umschreibt diese Dynamik lediglich eine konstruktive Strömung, die dazu einlädt, Veränderungen proaktiv zu gestalten und als nachhaltigen Handlungsauftrag wahrzunehmen. Diesem Grundsatz verpflichtet sich die hier vorliegende Arbeit.

## 1.1 Motivation

Eine fundamentale Entwicklung, welche die disruptiven Veränderungen der Moderne steuert, ist der sich durch alle Industrienationen hinweg durchsetzende Trend zu einer zunehmend alternden Gesellschaft. Der demografische Wandel bezeichnet eine strukturelle Verschiebung der Bevölkerungsentwicklung hin zu einem wachsenden Anteil älterer Menschen bei einem gleichzeitig sinkenden Anteil der jungen Bevölkerungsgruppen. Die Europäische Union misst die Alterung mit Blick auf das Medianalter der Bevölkerung, welches im Zeitraum 2001 bis 2021 von 38 Jahren auf 44 Jahre gestiegen ist. Das Medianalter der deutschen Bevölkerung ist innerhalb der letzten 20 Jahre um 15% angewachsen, wodurch Deutschland im Vergleich zur gesamteuropäischen Verschiebung der Bevölkerungsstruktur einen der Spitzenränge einnimmt (Eurostat 2022).

Der demografische Wandel tritt in Deutschland seit den 1970er-Jahren in den Vordergrund, als erstmalig die Geburtenrate niedriger als die Sterberate ist. Seitdem schreitet die Altersrestrukturierung voran: die Bevölkerung in Deutschland wird beständig älter und schrumpft zugleich. Als Grund für diesen anhaltenden Trend werden zwei grundlegende gesellschaftliche Veränderungen angeführt, die stagnierende Geburtenentwicklung einerseits und eine gestiegene Lebenserwartung andererseits (Großbecker et al. 2021, S. 15 ff.). Die 15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung des Statistischen Bundesamtes gibt Auskunft über den zukünftigen Wandel der Altersstruktur angesichts gegenwärtig angelegter Strukturen und erkennbarer Veränderungen. Basierend auf verschiedenen Modellrechnungen wird ihr zufolge der demografische Wandel weiter voranschreiten. Besonders deutlich zeigt sich in allen Modellrechnungen die Tendenz, dass das Durchschnittsalter bis 2070 weiterhin ansteigt und ein großer Anteil davon der Bevölkerung über 67 Jahren zugeschrieben wird (Statistisches Bundesamt 2022a). Tews (1993, S. 17) bezeichnet diesen Akzent der demografischen

---

Entwicklung als *dreifaches Altern*, da neben dem relativen Anteil Älterer an der Gesamtbevölkerung insbesondere die absolute Anzahl älterer Menschen<sup>1</sup> und Hochaltriger ansteigen wird.

Nachweislich wird die Bevölkerung in Deutschland nicht nur immer älter, viele Menschen fühlen sich auch im hohen Alter gesundheitlich gut. Zu dieser Erkenntnis führt die Auswertung einer europaweit durchgeführten Statistik über Einkommen und Lebensbedingungen von privaten Haushalten (Statistisches Bundesamt 2020a). Während die Verlängerung der Lebenserwartung älterer Menschen ursächlich in Verbindung mit einer kontinuierlich gestiegenen Verbesserung der Volksgesundheit als Folge eines multifaktoriellen Einflussgefüges aus verbesserten Arbeitsbedingungen und Wohnsituationen, sowie fortschrittlichen medizinischen und hygienischen Versorgungsangeboten (Imhof 1994, S. 64 ff.) steht, darf nicht vernachlässigt werden, dass Altern ein degenerativer Prozess ist. Die gestiegene Lebenserwartung älterer Menschen steht zwangsläufig in Verbindung mit alterstypischen, chronischen und häufig multimorbiden Krankheiten. Ein solches Erkrankungsspektrum konzentriert sich insbesondere auf die dritte und vierte Lebensphase<sup>2</sup> und intensiviert den Bedarf an gesundheitlicher und pflegerischer Versorgung (SDK-Stiftung 2014, S. 5, Böhm 2010, S. 461 f.), weshalb im Rahmen dieser Arbeit das zunehmende Lebensalter in Verbindung mit einer steigenden Hilfe- und Pflegebedürftigkeit gesetzt wird. Angesichts dieser demografischen Implikation spielen vor dem Hintergrund einer Konzeption von Lösungsansätzen zur Bedarfsdeckung der Gesundheitspflege Älterer weitere korrespondierende Rahmenbedingungen eine entscheidende Rolle.

Die Ausprägungen der demografischen Altersentwicklung reflektieren sich deutlich in der Veränderung der deutschen Haushaltsstrukturen. Soziologisch-orientierte Statistiken stellen eine Verringerung der durchschnittlichen Haushaltsgröße fest, in welchen ein sich ausprägender Anteil älterer Menschen lebt. Dabei bewohnen im Jahr 2021 Menschen über 60 Jahre knapp ein Drittel der zusätzlich quantitativ anwachsenden Ein- und Zweipersonenhaushalte (Statistisches Bundesamt 2020b). Ergänzt wird dieser paarige Trend dadurch, dass Seniorenhaushalte ohne Kinder den dominierenden Haushaltstypus darstellen (Statistisches Bundesamt 2022e) und im Kontext erhöhter Scheidungsraten und Verwitwungsquoten der Anteil alleinstehender älterer Menschen in Einzelhaushalten weiter zunimmt. In Zusammenhang damit stellt sich das Fazit der Generali Altersstudie, dass 76% der Älteren ihre Wohnungsausstattung als nicht oder nur teilweise altersgerecht einschätzen und eine Erschwerung des Alltags durch innerhäusliche Barrieren empfinden (Köcher et al. 2017, S. 206), als prekär dar. Im Falle eines eintretenden Pflegefalls, welcher in einer nicht-altersgerechten Wohnung und bei steigendem Lebensalter durch nachlassende Sinnesleistungen und kognitive Fähigkeiten überproportional wahrscheinlich wird (Statistisches Bundesamt 2021), verschärft sich der gesundheitliche Unterstützungsbedarf und das Risiko eines Heimeinzuges steigt, da durch die Singularisierung der Seniorenhaushalte keine regelmäßige familiäre Unterstützung gewährleistet ist. Die Perspektive einer stationären Heimeinrichtung stellt aus unterschiedlichen Gründen eine Herausforderung dar. Zum einen steht sie nicht im Einklang mit der Vorstellung vieler Älterer, bis ins hohe Lebensalter individuell und selbstbestimmt in der eigenen Häuslichkeit zu leben (Stula 2012, S. 22, Georgieff 2009, S. 14, Harrefors et al. 2009, S. 355), zum anderen resultieren daraus gesund-

---

<sup>1</sup>Gemäß dem Europarat zählen zur Gruppe der Älteren alle Menschen, welche 65 Jahre und älter sind (Humanrights 2020). Deutschland und die UNO setzen die Grenze bei 60 Jahren an (Statistisches Bundesamt 2016, S. 10).

<sup>2</sup>Nach Schulz (2018) startet die dritte Phase im Alter zwischen 60 bis 67 Jahren, wohingegen eine abnehmende Selbstständigkeit kennzeichnend für die vierte und letzte Lebensphase ist.

---

heitsökonomische Belastungen, die der fiskalisch und personell massiv überforderte Sozialhaushalt nicht decken kann.

Diese demografisch-soziologische Analyse verdeutlicht den kausalen Zusammenhang zwischen einer alternden, zunehmend alleinstehenden Bevölkerungsgruppe und der Aussicht auf eine Überforderung des sozialen Gesundheitssystems, wenn Menschen nicht möglichst lange in der eigenen Wohnung leben können. Damit wird dem *Gesundheitsstandort Haushalt* (Fachinger et al. 2010), in welchem ältere Menschen die meiste Zeit verbringen (BMFSFJ 2016, S. 221), ein erheblicher Wert beigemessen, solange dieser die Voraussetzungen für die Selbstständigkeit der älteren Generationen erfüllt. Bereits angedeutet wurde, dass drei von vier Haushalten Älterer dem subjektiven Empfinden nach nicht oder nur eingeschränkt altersgerecht sind (Köcher et al. 2017, S. 206, E. Hoffmann et al. 2017, S. 4). Eine Repräsentativbefragung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) in Zusammenarbeit mit dem Kuratorium Deutsche Altershilfe führt diese Aussagen 2011 auf die überwiegend alte Bausubstanz durch sehr lange Miet- und Eigentumszeiträume zurück und nennt noch gravierendere Zahlen. Demnach sind nur rund 5% der Seniorenhaushalte barrierefrei oder –reduziert<sup>3</sup> (BMVBS 2011, S. 10). Bei aktuell 18,7 Millionen Einperson-Seniorenhaushalten (Statistisches Bundesamt 2022e) entspricht das einem massiven Anpassungsbedarf von 17,8 Millionen Haushalten. Auf Grundlage der geschilderten Situation in Seniorenhaushalten wiegt der Bedarf an eine altersgerechte Wohnraumanpassung sehr schwer. Erhebliche politische wie auch individuelle Anstrengungen ganzer Bevölkerungsgruppen sind notwendig, um die substantiellen Voraussetzungen für einen langen und selbstständigen Verbleib im privaten Haushalt herzustellen und damit zur Entlastung der Sozialsysteme als Folge einer Verzögerung des Heimeinzugs beizutragen (Evans et al. 2020, S. 2, Bieber 2010, S. 7). Dabei wird der altersgerechten Wohnraumausstattung eine Schlüsselrolle zugetragen, welche diese Arbeit als Handlungsauftrag annimmt und der Leitlinie folgt *„intelligente, smarte und menschliche Lösungen zu finden, um digitale und technische Chancen zu nutzen – zum Vorteil aller, aber vor allem der zu pflegenden Menschen“* (Elmer et al. 2019, S. XI).

## 1.2 Zielsetzung und Ansatz

Aufbauend auf dem Grundsatz, dass ein altersgerechter, *räumlicher* Haushalt (Hellgardt et al. 2013, S. 280) die integrale Basis für nachhaltige, sozialverträgliche und technisch-innovative Konzepte um einen *langen Verbleib in der eigenen Häuslichkeit* und das sogenannte *Ageing in Place* (Wiles et al. 2012) darstellt, werden seitens politischer Akteure Initiativen und Leitlinien geschaffen, einen solchen zu gestalten und zu fördern. Das Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (BMFSFJ) tritt dabei als zentrale Leitfigur in über 40 initiierten Modellprojekten seit 2011 auf (BMFSFJ 2021, BMFSFJ 2011). Diese Projekte vereint im Wesentlichen dieselbe Zielsetzung mit feinen Nuancen und verschiedenen Leistungsträgern. Daraus hervorgegangen sind u. a. die Projekte *Länger zuhause Leben* (BMFSFJ 2019) und *Leben wie gewohnt* (BMFSFJ 2020), welche die Aussage *„die Zahl vorhandener altersgerechter Wohnungen reicht nicht aus, um den Bedarf zu decken“*

---

<sup>3</sup>Barrieren innerhalb des Wohnraumes gelten als grundsätzliche Hindernisse für das alltägliche Leben der Bewohner mit körperlichen Einschränkungen. Als barrierefrei gelten bauliche Anlagen, wenn sie für *„Menschen [...] ohne besondere Erschwernis und grundsätzlich ohne fremde Hilfe [...] zugänglich und nutzbar sind“* (§ 4 Behindertengleichstellungsgesetz (BGG)).

---

(BMFSFJ 2019, S. 15) als Anlass für die Förderung baulich-investiver Projekte mit Vorbildfunktion interpretieren. Angesichts der historischen Entwicklung Älterer, die seit 30 Jahren und mehr in einem Haushalt leben (BMVBS 2011) und bekanntermaßen Schwierigkeiten mit Veränderungen haben (Hanrath 2011, S. 122), verfehlen diese zukünftig hochgradig relevanten Projekte den gegenwärtigen Status Quo. Auch sind aus den aufgezählten politischen Modellprojekten Anlaufstellen, Beratungszentren, Maßnahmenkataloge und altersgerechte Ausstattungstechnik hervorgegangen, welche den intrinsisch motivierten und unterstützungsbedürftigen Menschen mit einem umfangreichen Informations- und Konsumangebot versorgen. Gleichzeitig aber verpassen sie die Chance, die Verantwortung zur Bewertung des *Gesundheitsstandorts Haushalt* im Kontext der Alterstauglichkeit und Barrierefreiheit zu übernehmen und dabei zusätzlich der ressortübergreifenden deutschen Nachhaltigkeitspolitik (Agenda 2030) gerecht zu werden (Bundesregierung 2021). Da es unwahrscheinlich ist, dass sich der demografische Wandel umkehrt und damit die Anzahl älterer Menschen ab- bzw. die familiäre Unterstützung zunimmt, setzt sich diese Arbeit das Ziel, einen technologisch-geleiteten Beitrag zur Entlastung des Sozialhaushaltes zu leisten, indem die substantielle Wurzel der Ursache-Wirkungsbeziehung fokussiert wird – der Seniorenwohnraum.

Ein entscheidender Faktor für einen unvorhergesehenen und ungewollten Heimeinzug sind nach der Verschlechterung des Gesundheitszustands vor allem bauliche Hürden (Perrig-Chiello et al. 2012, S. 54). Solche anhand diverser Checklisten (vgl. BMFSFJ) zu identifizieren, obliegt in aller Regel den Betroffenen, deren Verwandtschaft oder geschultem Fachpersonal und erfordert neben Rechercheaufwand auch handwerkliches Messwerkzeug. In Ermangelung digitaler und automatisierter Lösungen setzt sich diese Arbeit zum Ziel, den Status Quo in das Digitalisierungszeitalter zu überführen und folgt dabei einem explorativen Forschungsdesign aus der *Design Science*. Sowohl die hohe Priorität als auch der massive Bedarf an altersgerechtem Wohnraum ohne Mobilitätseinschränkungen erfordern praktische Lösungen für ein soziales Problem, das sich in Einklang mit der kürzlich veröffentlichten Digitalisierungsstrategie 2023 des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) (BMG 2023) auf konzeptionelle Grundsätze wie die Automatisierung und Digitalisierung beruft. Unter Berücksichtigung solcher soll der Wohnraum zunächst situativ erfasst und anschließend als digitales Wohnrauminformationsmodell (WIM) abgebildet werden, um als alphanumerische sowie grafische Datenbasis für die automatisierte Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen aus innerhäuslichen Barrieren für einen altersgerechten, barrierefreien und rollstuhlgerechten Wohnraum abzuleiten. Anhand identifizierter Verbesserungsmaßnahmen lässt sich der Wohnraum schlussfolgernd im Kontext der Fragestellung, ob ein möglichst langer Verbleib darin möglich ist, bewerten. Das Hauptziel dieser Arbeit wird damit durch die folgenden Forschungsaspekte geleitet:

1. Entwicklung eines digitalen WIMs zur räumlich-semantischen Beschreibung von Wohnraum
2. Implementierung einer niederschwellig und für Mobilitätseingeschränkte nutzbaren Datenerfassungsanwendung auf Basis digitaler Technologien zur situativen Wohnraumdokumentation
3. Automatisierung der Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen aus innerhäuslichen Barrieren in einem digitalen WIM

Im Hinblick auf den herausgestellten Wohnraumanpassungsbedarf soll eine Anwendung entwickelt werden, die auf digitalen Technologien aufsetzt und den beschriebenen Prozess unter Wahrung der die Nutzergruppe betreffenden, situativen Anforderungen möglichst automatisiert abbildet. Darüber

---

hinaus soll diese sowohl präventiv als auch reaktiv einsetzbar sein und altersneutral funktionieren, zumal das Thema Barrierefreiheit nicht nur Ältere, sondern auch andere Altersgruppen mit Mobilitätseinschränkungen betrifft. Da aufgrund der demografischen Entwicklung der Anteil Älterer zunimmt und dieser das Gesundheitssystem überproportional stark belastet, stellt die Arbeit solche in das Zentrum der Argumentation. Als Grundlage für die Entwicklung eines WIMs zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen respektive Barrieren für einen altersgerechten Wohnraum dient eine Literaturrecherche und reflektierte Analyse der darin herausgestellten ubiquitären Herausforderungen. Von fundamentaler Bedeutung sind dabei die Arbeiten von Althammer (2019), Joo (2018), Köcher et al. (2017), S. Hoffmann (2016), Perrig-Chiello et al. (2012), Fachinger et al. (2010) sowie des Statistischen Bundesamts, BMFSFJ und BMG. Ein bedeutsamer Pfeiler hinsichtlich der Konzeptionierung einer entsprechenden Anwendung bildet die Komponente zur situativen dreidimensionalen Erfassung des Wohnungsbestandes, welche der zur Lösung des Hauptziels erforderlichen Genauigkeit und Auflösung Rechnung tragen muss. Eine übergeordnete Konzeptvorstellung spannt den Potenzialrahmen auf, innerhalb dessen die begrifflich an Dahm-Griess (2013) orientierte Demonstratoranwendung *Progressive Home Care (PHC)* prototypisch entwickelt und validiert wird.

## 1.3 Methodik

Gemäß der Zielsetzung dieser Arbeit soll eine Digitalisierungslösung entwickelt werden, die wohnraumbezogene Verbesserungsmaßnahmen automatisiert identifiziert und sich infolgedessen sowohl flexibler als auch nachhaltiger gegenüber dem Status Quo gestaltet. Das bereits ausgeführte Hauptproblem ist in drei Teilaspekte zerlegbar, welche die Forschungsaspekte der hier vorliegenden Arbeit prägen und wissenschaftlich-technisch gelöst werden sollen. Zur Realisierung dieser Forschungsaspekte wird eine Design-orientierte Methodik aus dem Bereich der Informationssysteme (engl. Information Systems (IS)) verfolgt, die darauf abzielt, durch ein kontextbasiertes Problemverständnis und innovative Software-Artefakte eine Problemstellung effektiv zu lösen bzw. identifizierte Grenzen innerhalb eines Problembereichs zu erweitern (vgl. Hevner et al. 2004, S. 75). Der dieser Aussage entsprechende Forschungsansatz führt auf das *Design Science in Information Systems Research (DSISR) Framework* von Hevner et al. (2004) zurück und wird folglich dieser Arbeit zugrunde gelegt.

In Abbildung 1.1 ist das konzeptionelle Framework dargestellt, welches aus drei miteinander in Beziehungen stehenden Bereichen besteht. Nach Hevner et al. (2004, S. 81) unterstützt diese Aufteilung insbesondere darin, ein Problem zu adressieren, welches für einen bestimmten Kontext eine hohe Relevanz hat und unter Berücksichtigung einer vorhandenen Wissensbasis die wissenschaftlich fundierte Erarbeitung einer innovativen Lösung ermöglicht. Der **Kontext** (engl. Environment) definiert in Abhängigkeit zu involvierten Akteuren sowie strukturellen und technologischen Aspekten den Problemraum, innerhalb dessen die forschungsbezogenen Fragestellungen verortet sind. Aus diesem Bereich leiten sich relevante Ziele bzw. Problemstellungen (engl. Business Needs) ab, die von der Forschungsarbeit angesprochen werden. Dem Kontext gegenüber steht die **Wissensbasis** (engl. Knowledge Base), welche als Quasi-Lösungsraum die adaptierbaren, methodischen Grundlagen (engl. Applicable Knowledge) liefert, auf dem die Forschungsarbeit aufbaut bzw. mit dessen Hilfe sie geleitet wird. Angesichts einer artikulierten Problemstellung und in Zusammenhang mit einer anwendbaren Wissensbasis werden die **Forschungsaktivitäten** (engl. IS Research) selbst in zwei

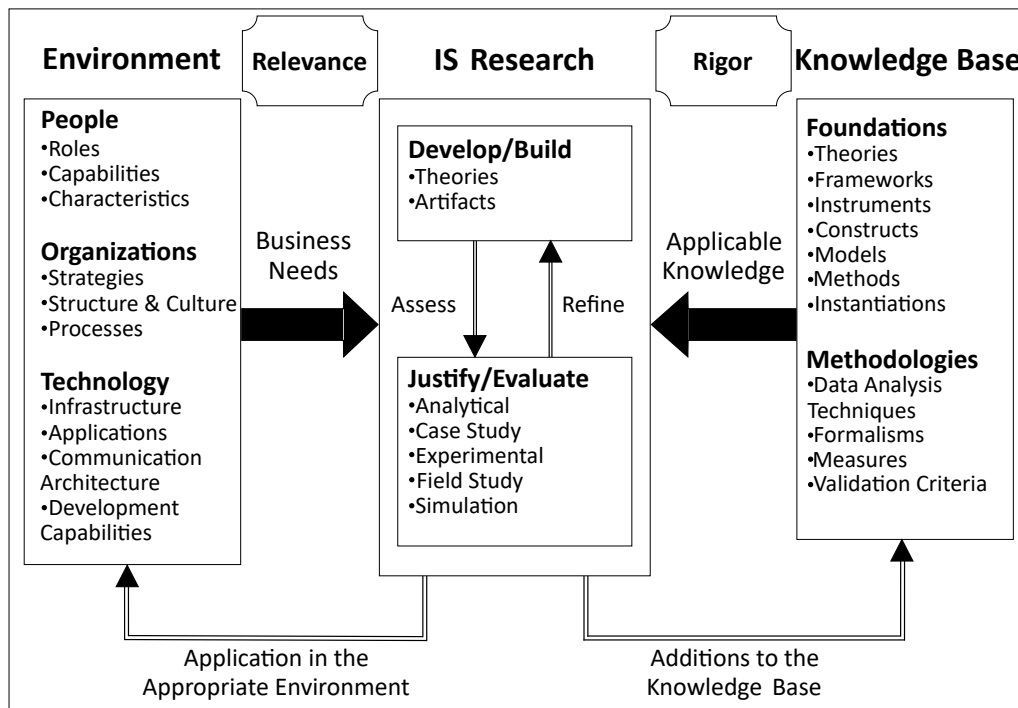


Abbildung 1.1: Information Systems Research Framework nach Hevner et al. 2004, S. 80

komplementären Phasen durchgeführt. Im Zentrum steht hierbei das Software-Artefakt, welches im Rahmen eines sogenannten *Design-Cycle* entworfen, implementiert und evaluiert wird, um die definierte Problemstellung hinsichtlich der Kontextbedingungen effektiv zu lösen. Die Anwendung des *DSISR* folgt einem iterativen Prozess und erarbeitet aus dem kontextbezogenem Problemraum und dem wissensbasierten Lösungsraum ein Gestaltungswissen (engl. Design Knowledge) (vom Brocke et al. 2020, S. 10), in der Regel als Software-Artefakt. Dieses Gestaltungswissen dient einerseits und in primärer Hinsicht zur Lösung der Problemstellung im Rahmen eines spezifizierten Kontexts (engl. Application Benefit). Andererseits können erarbeitete Grundlagen auch der Wissensbasis zufließen und diese entsprechend erweitern (engl. Research Contribution). Diesbezüglich schlagen Gregor et al. (2013) eine Kategorisierung in drei unterschiedliche Artefakt-Level vor, welche sich in ihrer Abstraktion und dem Reifegrad unterscheiden.

Tabelle 1.1: Design Science Research Contribution Types nach Gregor et al. (2013, S. 342)

	Contribution Types	Example Artifacts
More abstract, complete, and mature knowledge	Level 3. Well-developed design theory about embedded phenomena	Design theories (mid-range and grand theories)
↕   ↕   ↕   ↕	Level 2. Nascent design theory — knowledge as operational principles/architecture	Constructs, methods, models, design principles, technological rules.
More specific, limited, and less mature knowledge	Level 1. Situated implementation of artifact	Instantiations (software products or implemented processes)

Gemäß dieser in Tabelle 1.1 dargelegten Kategorisierung kann die Entwicklung eines Design-Konzepts bzw. Gestaltungswissens *bottom-up* erfolgen, beginnend mit einem neuen und gleichzeitig spezifischen Artefakt (Level 1), über eine aufkommende Design-Theorie (Level 2) bis hin zu einer umfassend entwickelten Design-Theorie mit einem höheren Grad an Abstraktion und Adaptierbarkeit (Level 3) (vgl. Gregor et al. 2013, S. 341 ff.). Da die vorliegende Arbeit das Ziel verfolgt, eine Automatisierungslösung zu entwickeln (vgl. Forschungsaspekte 1–3), werden im Rahmen einer abschließenden Zusammenfassung der Forschungsergebnisse diese Levels zur Klassifizierung der resultierenden Software-Artefakte herangezogen.

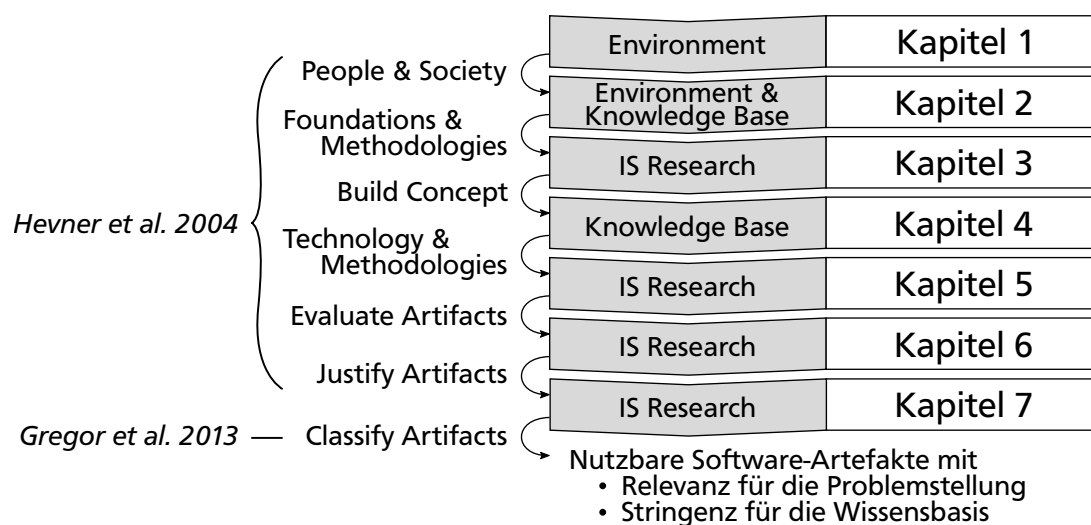


Abbildung 1.2: Methodische Strukturierung der Arbeit, geleitet durch Hevner et al. (2004) und erweitert nach Gregor et al. (2013)

Die methodische Strukturierung der Arbeit ist in Abbildung 1.2 illustriert und orientiert sich an der zuvor erläuterten Forschungsmethodik nach Hevner et al. (2004). Des Weiteren findet eine Erweiterung nach dem Beispiel von Gregor et al. (2013) statt. Dazu wird in Kapitel eins der Kontext betrachtet und eine spezifische Problemstellung artikuliert. Die Relevanz dieser Problemstellung verstärkt sich im Rahmen einer tiefergehenden Analyse innerhalb des zweiten Kapitels, welches darüber hinaus eine erste thematische Wissensbasis zur Strukturierung der Forschungsaktivität schafft. Auf dieser kontextbezogenen Basis wird mit dem dritten Kapitel die konzeptionelle Phase des forschungsbezogenen *Design-Cycle* eingeleitet und durch das vierte Kapitel mit wesentlichen methodischen sowie technologischen Grundsätzen verankert. Der damit vorliegende Lösungsraum kanalisiert die prototypische Entwicklung und Evaluation der durch die Forschungsaspekte avisierten Software-Artefakte und repräsentiert ein Gestaltungswissen, welches im fünften und sechsten Kapitel dokumentiert wird. Die Bedeutung der Forschungsergebnisse für die übergeordnete Problemstellung wird im siebten und letzten Kapitel behandelt. Darüber hinaus wird dort auch die Klassifizierung der erreichten Artefakt-Level nach Gregor et al. (2013) vorgenommen, um die Rückführung der gewonnenen Erkenntnisse sowohl auf kontextbezogener als auch wissensbasierter Ebene vorzunehmen (vgl. Tabelle 1.1). Über die strukturelle Bedeutung der Kapitel hinaus erläutert der folgende Abschnitt auch den inhaltlichen Aufbau.

---

## 1.4 Aufbau der Arbeit

Kapitel zwei befasst sich mit der digitalen Entwicklung im Gesundheitssystem vor dem Konzept eines möglichst langen zeitlichen Verbleibes im privaten Wohnraum. Angesichts dessen werden auch korrespondierende Herausforderungen wie der Pflegenotstand beschrieben und gesetzliche Bemühungen zur Abhilfe durch technische und soziale Innovationen ausgeführt. Die Einführung von digitalen Gesundheits- und Pflegeanwendungen stellt ein Novum des deutschen Gesundheitsrechts dar und bietet im Zusammenspiel mit weiteren assistiven Technologien unterstützungsbedürftigen, primär älteren Menschen altersgerechte Assistenzsysteme zur Unterstützung bei alltäglichen Tätigkeiten. Das sich permanent erweiternde Angebot wird bezüglich der innerhäuslichen Mobilität selektiv beleuchtet und abschließend kritisch bewertet. Daraus geht hervor, dass Hilfsangebote, welche das Wohnumfeld adressieren, bislang nicht von dem digitalen Wertschöpfungsprozess profitieren. Angesichts dieser Lücke zielt der hier beschriebene Forschungsbeitrag darauf ab, eine digitale Lösung zur Bewertung von altersgerechtem Wohnraum zu konzipieren und prototypisch umzusetzen.

Basierend auf dem kritisch bewerteten, thematischen Stand der Technik im häuslichen Versorgungsumfeld erarbeitet das dritte Kapitel ein technisches Konzept, welches von den Forschungsaspekten dieser Arbeit geleitet wird. Darin werden zunächst die standardisierten, geometrischen Rahmenbedingungen an einen altersgerechten Wohnraum herausgearbeitet und normierte Qualitätsanforderungen an die zu entwickelnde Anwendung definiert. Aus der Anforderungsanalyse resultiert ein dreifaltiges Prozessmodell, welches die Geometrie des Wohnraumes zunächst strukturiert erfasst, daraus ein WIM ableitet und auf Grundlage dessen die Bewertung anhand eines geometrischen Regelkatalogs vornimmt. Das Prozessmodul zur strukturierten Geometrieerfassung spielt dabei nicht nur hinsichtlich der Informationsmodellierung eine große Rolle, sondern beschreibt darüber hinaus einen neuheitlichen Ansatz zur Bereitstellung strukturierter, maschinell verarbeitbarer 3D-Daten ohne nachgelagerten Verarbeitungsprozess. Darüber hinaus stellt das in diesem Kapitel spezifizierte WIM eine multimodale Datenbasis für die Speicherung wohnraumbezogener Elemente dar, welche in Zusammenspiel mit den herausgearbeiteten geometrischen Anforderungen als Grundlage für eine automatisierte Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen, denen die Detektion innerhäuslicher Barrieren vorausgeht, erforderlich sind.

Das vierte Kapitel widmet sich der Untersuchung geeigneter Verfahren hinsichtlich der Bereitstellung strukturierter 3D-Daten für das spezifizierte WIM unter Berücksichtigung mehrschichtiger Anforderungsdefinitionen. Dafür werden zunächst messtechnische State-of-the-Art Verfahren für bauliche Rekonstruktionsanwendungen im Rahmen einer anwendungsnahen Evaluationsstudie intensiv begutachtet und abschließend im Kontext selektiver Merkmale bewertet. Angesichts der im Rahmen dieser Studie definierten Bewertungsmerkmale wird die Nutzung eines mobilen Verbraucherendgerätes beschlossen. Darauf aufbauend werden Verfahren des maschinellen Lernens (ML) zur Strukturierung von 3D-Daten identifiziert und im Zusammenhang mit der Echtzeitfähigkeit und Plattformkompatibilität beurteilt. Die kapitelumfassende Untersuchung mündet in der Vorstellung eines zweistufigen Ansatzes zur semantischen Echtzeit-Strukturierung für Smartphones von Apple Inc. mit LiDAR-Sensorik.

Details zur Implementierung des unter dem Akronym *PHC* betitelten Demonstrators werden in Kapitel fünf ausgeführt. Gemäß dem Konzeptentwurf existiert dieser als bimodulare Anwendung,



---

wobei der initiale, datengenerierende Teil durch eine iOS-App namens *Semantic Data Capture* und die daran anschließende Raffinerie und Prüfung des strukturierten und die Wohnräumlichkeit digital repräsentierenden 3D-Datensatzes von einer *Modellierungs- und Prüfanwendung* prototypisch umgesetzt wird. Im Rahmen der Kapitelabschnitte, welche beide Anwendungsmodulare getrennt behandeln, werden sämtliche Implementierungsdetails beschrieben und in Form von standardisierten Aktivitätsdiagrammen nach OMG UML grafisch modelliert. Darüber hinaus werden Limitationen und Perspektiven des konzipierten Ansatzes ausgeführt.

Kapitel sechs validiert die im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Demonstratoranwendung unter Berücksichtigung einzelner, priorisierter Anforderungsmerkmale. Aus einer Reihe von Anwendungsbeispielen resultieren Leistungsmetriken, anhand derer die funktionale Eignung des neuartigen und vollständig digitalen Ansatzes nachgewiesen wird. Über den funktionalen Erprobungsnachweis hinaus werden Perspektiven für weiterführende Validierungsmethoden beschrieben und abschließend mit einer Zusammenstellung der während der Arbeit gesammelten Erfahrungen bezüglich der Smartphone-gestützten 3D-Datenerfassung aufgeführt.

In dem siebten Kapitel werden die Inhalte dieser Arbeit abschließend und in Bezug mit der einleitend geschilderten und als Motivation betrachteten Ausgangssituation zusammengefasst. Darüber hinaus werden im Kontext der übergeordneten Forschungsmethodik der anwendungsbezogene Nutzen (engl. Application Benefit) sowie wissenschaftliche Mehrwert (engl. Research Contribution) dieses Beitrags hervorgehoben und ein Blick auf weiterführende Überlegungen und mögliche zukünftige Forschungsthemen innerhalb dieses Bereichs geworfen.



---

## 2 Digitale Entwicklung im Gesundheitssystem

---

Gegenstand des zweiten Kapitels ist eine auf die Pflege im Gesundheitssystem reduzierte Darstellung gegenwärtiger Herausforderungen, innovativer digitaler Entwicklungsstrategien und technischer Assistenzsysteme. Das Kapitel leitet mit einem Vorwort zur historisch gewachsenen deutschen Sozialversicherungslandschaft im Kontext der demografischen Verwerfungen ein und beschreibt anschließend die Herausforderungen des ambulanten Versorgungsbereichs, worauf Sozial- und Wirtschaftspolitik mit einer Vielzahl von Gesetzesinitiativen zur Forcierung der digitalen Transformation reagiert haben. Ein Überblick über die politisch orientierten Gesetzesleitlinien schließt an diesen Abschnitt an und führt Begriffe wie digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA) und digitale Pflegeanwendungen (DiPA) ein, die ausführlich dargestellt und von weiteren technischen und gleichzeitig altersgerechten Assistenzsystemen abgegrenzt werden. Im Kontext der digitalen Unterstützung bei innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen werden Lösungen aus den verschiedenen Anwendungsbereichen technischer Assistenzsysteme recherchiert, vorgestellt und abschließend kritisch gegenüber den multiplen Herausforderungen des Gesundheitssystems und der Pflege sowie einer sich verändernden Haushaltsstruktur bewertet.

### 2.1 Historische Entwicklung

Die Versorgung von älteren bzw. hilfe- und pflegebedürftigen Angehörigen zählte über Jahrhunderte hinweg zu den selbstverständlichen Verpflichtungen der Familie. Als Folge vielschichtiger gesellschaftlicher Veränderungen, gepaart mit einer stetigen Qualifizierung von Fachpersonal, etablierte sich zunehmend eine Institutionalisierung des Konzepts *Pflege durch Fremde* (Elmer et al. 2019, S. 28), dessen Anfänge bis in das 19. Jahrhundert zurückreichen (vgl. C. E. Rosenberg 1987) und auf christlich-orientierten, karitativen Wertvorstellungen basieren. Aus der anfänglich noch provinziellen Versorgung Bedürftiger in Armenhäusern (Rexroth 2005, S. 6 f.) ist über die Jahrzehnte eine politisch motivierte Form der strukturierten und solidarischen Sozialhilfe herangereift, die unter Reichskanzler Otto von Bismarck 1883 einen Höhepunkt als weltweit erste staatliche Sozialversicherung erreicht. Seitdem richten viele Staaten ihre „Aktivitäten auf die Schaffung sozialer Rechte zur Sicherung gegen soziale Risiken im Rahmen einer kapitalistischen Marktwirtschaft“ (Nullmeier 2021, S. 836) aus. In diesem Zusammenhang stehen die Begriffe Wohlfahrts- und Sozialstaat, die nach Nullmeier (2021, S. 836 f.) synonym verwendet werden. In Deutschland hat sich der Terminus *Sozialstaat* festgesetzt, welcher die Gesamtheit sozialpolitischer Maßnahmen beschreibt, um ein „menschenwürdiges Existenzminimum für jeden Bürger zu realisieren, soziale Ungleichheiten abzubauen und soziale Sicherheit im Hinblick auf die Wechselfälle des Lebens zu schaffen“ (Baus 2006, S. 9). Gemäß Art. 20 Abs. 1 des

---

Grundgesetzes (GG) ist die „Bundesrepublik Deutschland [...] ein [...] sozialer Bundesstaat“, der das Sozialstaatsprinzip nicht nur als verfassungsrechtlichen Auftrag beschreibt, sondern dieses auch durch die sogenannte *Ewigkeitsklausel* (Art. 79 Abs. 3 GG) zukünftig vor Änderungen schützt. Die Wichtigkeit zur Erbringung staatlicher Leistungen für soziale Sicherheit und Gerechtigkeit entfaltet damit eine maximale Bindungswirkung für den gesamten legislativen Verwaltungsapparat aus der Sozial- und Wirtschaftspolitik.

Die deutsche Sozialversicherungslandschaft führt in ihren Grundzügen auf das Modell von Bismarck zurück, welches in Zeiten der Industrialisierung die sozialen Probleme der Arbeitnehmer eindämmen und der Gefahr einer Revolution entgegenwirken sollte (Kaltenborn 1998, S. 770 f.). Über die Jahre hinweg wurde das System mehrfach reformiert und erweitert, vor allem mit dem Zweck, eine über die ursprüngliche politische Intention hinausgehende soziale Mindestsicherung für alle Bürger anzubieten. Ein wesentliches Erfolgskriterium der damalig fortschrittlichen Idee eines beitragsfinanzierten Umlagesystems war das Verhältnis zwischen Beitragszahlern und Leistungsempfängern. Angesichts der demografischen Veränderungen werden nun immer mehr Leistungsempfänger von immer weniger Beitragszahlern finanziert (Bundesministerium der Finanzen 2019, S. 35), sodass der Erhalt der sozialpolitischen Maxime zur Quadratur des Kreises zu werden droht. Wie einleitend beleuchtet, treffen hierbei die steigenden Leistungsbedarfe einer alternden Bevölkerung auf ein von Ressourcenknappheit gebeuteltes Sozialsystem und werfen die Frage einer nachhaltigen Finanzierbarkeit auf (vgl. Hillesheim et al. 2021). Das Gesundheitswesen als klassische soziale Institution gerät dabei zunehmend in den Fokus gesundheitspolitischer Diskussionen. Als oberste behördliche Instanz ist das Bundesministerium für Gesundheit (BMG) für ein funktionierendes Gesundheitswesen in Deutschland verantwortlich. Zur Behebung der durch den Megatrend *demografischer Wandel* (Esche et al. 2019, S. 16 ff.) herbeigeführten strukturellen Defizite und die Einführung eines nachhaltig finanzierbaren und resilienten Gesundheitssystems setzt das BMG auf einen weiteren Megatrend: die Digitalisierung (BMG 2023, Esche et al. 2019, S. 20 f., Möller et al. 2019, S. 551).

Im folgenden Abschnitt werden die in etlichen Gesetzesinitiativen gemündeten Bemühungen des BMG, die notwendigen Rahmenbedingungen und Voraussetzung für eine erfolgreiche Umsetzung des digitalen Transformationsprozesses auf allen Ebenen des Gesundheitswesens zu schaffen (BMG 2022a), ausgeführt. Dabei beschränkt sich die hier vorliegende Arbeit, gemäß der in Abschnitt 1.2 genannten Zielsetzung, auf den Bereich der Pflege, welche nach Aussage der Präsidentin des Deutschen Berufsverbands für Pflegeberufe (DBfK) aufgrund der hohen Beschäftigungszahlen „*Rückgrat und tragende Säule des Gesundheitssystems*“ (Bienstein 2019) darstellt.

## **2.2 Digitalisierungsstrategie für die Pflege im Gesundheitssystem**

Die Kodifikation des sozialen Gesundheitswesens ist in Deutschland über die Sozialgesetzbücher (SGB) definiert. Dazu zählen die fünf Zweige der Sozialversicherung: Krankenversicherung (SGB V), Rentenversicherung (SGB VI), Unfallversicherung (SGB VII), Arbeitslosenversicherung (SGB III) und die Pflegeversicherung (SGB XI). Letztere ist seit ihrer Einführung 1995 als eigenständiger Zweig der Sozialversicherung begründet. Die Kranken- und Pflegeversicherung bieten dabei in Koexistenz allen Bürgern einen umfassenden Versicherungsschutz. Mit Begründung der SGB wurde vor über

---

20 Jahren auch der Grundsatz der Ambulantisierung (*ambulant vor stationär*) festgelegt, welcher sich in verschiedenen Kapiteln der SGB widerspiegelt. Danach hat der ambulante Sektor hinsichtlich der Erbringung gesundheitlicher und pflegerischer Leistungen Vorrang vor (teil-)stationären Leistungen (vgl. § 39 Abs. 1 Satz 2 SGB V und § 3 SGB XI). Die Bedeutsamkeit dieses Rechtsgrundsatzes ermisst sich vor dem Hintergrund der demografischen Veränderungen der Altersstruktur, wonach „neue und kostengünstigere Standorte für die Leistungserbringung erschlossen werden müssen“ (Dahm-Griess 2013, S. 218) und im dritten Gesundheitsstandort<sup>4</sup> gefunden werden, in welchen sich eine stetige Verlagerung der häuslichen Versorgung abzeichnet. Die Entwicklung digitaler Angebote für den dritten Gesundheitsstandort treibt diese Verlagerung voran, welche durch ein Paket neuer Gesetzesentwürfe forciert und als Paradigmenwechsel bezeichnet wird (vgl. Grinblat 2022, S. 17).

## 2.2.1 Ambulanter Pflegenotstand

Nach aktuellen Zahlen des Statistischen Bundesamts sind zum Jahresende 2021 4,96 Millionen Menschen im Sinne des SGB XI pflegebedürftig (Statistisches Bundesamt 2022b). 80% der Pflegebedürftigen waren 65 Jahre und älter, wobei Pflegebedürftigkeit grundsätzlich in allen Lebensabschnitten auftreten kann. Nach der Definition des Pflegeversicherungsgesetzes (SGB XI) gelten Personen als pflegebedürftig, die über eine Dauer von mindestens sechs Monaten „*gesundheitlich bedingte Beeinträchtigungen der Selbstständigkeit oder der Fähigkeiten aufweisen und deshalb der Hilfe durch andere bedürfen*“ (BMG 2022d, S. 40). Diese Bedürftigkeit festzustellen und darüberhinausgehend den Anspruch auf die vielfältigen Leistungen der Pflegeversicherung zu bedienen, obliegt den rund 1,26 Millionen Beschäftigten der Pflegekassen (Statistisches Bundesamt 2022d). Dabei beruhen die leistungsrechtlichen Ansprüche auf dem individuellen Umfang der Pflegebedürftigkeit, die seit 2017 gutachterlich mithilfe eines pflegfachlich begründeten Begutachtungsinstruments erfolgt und in Form von fünf Pflegegraden bemessen wird.

Für viele Menschen zeichnet die eigene Wohnung den zentralen Lebensmittelpunkt, der mit persönlichen Erinnerungen sowie einem Gefühl von Beständigkeit und Sicherheit verbunden ist. Laut Flade (2020, S. 20) ist das vertraute Wohnumfeld vor allem hinsichtlich der Bewahrung der Lebenskontinuität wichtig. Gemessen an dieser psychologischen Betrachtungsweise stellt sich der hohe Versorgungsanteil von 84% der Pflegebedürftigen, die 2021 zu Hause versorgt wurden, nicht als ungewöhnlich dar (Statistisches Bundesamt 2022b). Den 4,17 Millionen Pflegebedürftigen stehen laut der aktuellen Pflegestatistik (Statistisches Bundesamt 2022d) rund 443.000 ambulante Pflegefachkräfte gegenüber, von denen nur knapp ein Drittel vollzeitbeschäftigtes Personal ist. Alarmierend ist darüber hinaus der Trend eines weiteren Anstiegs der Pflegebedürftigen, u. a. aufgrund des demografischen Wandels, der dem des Pflegefachpersonals um 25% überlegen ist.

Zu den Leistungsarten der Pflegeversicherung zählt gemäß § 28 Abs. 1 SGB XI ein weitreichender Leistungskatalog, welcher von Pflegegeldzahlungen über Pflegesach- und Kombinationsleistungen bis hin zu Pflegeaufwendungen reicht, die je nach Pflegegrad unterschiedlichen Umfang einnehmen (vgl. BMG 2022d, S. 146 ff.). Erbracht werden die Leistungen je nach Bedarf mehrmals wöchentlich oder

---

<sup>4</sup>Als dritter Gesundheitsstandort gilt der private Haushalt. Der erste und zweite Gesundheitsstandort werden nach klassischer Definition dem ambulanten und dem stationären Sektor zugeordnet (vgl. Dahm-Griess 2013, S. 221, Heinze et al. 2010, S. 118).

---

gar täglich in Form einer medizinischen, pflegerischen und hauswirtschaftlichen Versorgung durch die Pflegefachkräfte der rund 15.400 ambulanten Pflegedienste (Statistisches Bundesamt 2022c). Zusätzlich prägen Beratungs- und Qualitätsbesuche nach § 37 SGB XI den ambulant-pflegerischen Alltag, welcher von einer überwältigenden Mehrheit hilfe- und pflegebedürftiger Menschen, deren persönlichen Bedürfnissen sowie einem sozialgesetzlich definierten Pflegeleistungsgrundsatz, den Pflegebedürftigen „trotz ihres Hilfebedarfs ein möglichst selbständiges und selbstbestimmtes Leben [zu ermöglichen], das der Würde des Menschen entspricht“ (§ 2 Abs. 1 SGB XI) eingerahmt ist. Darüber hinaus spielt sich dieser seit Jahren in einem personell überlasteten System ab und sucht nach ganzheitlicher Verwirklichung all dieser bereits isoliert betrachtet ambitionierten Zielsetzungen (vgl. Tackenberg et al. 2009). Sowohl medial als auch berufspolitisch wird dieser Zustand als *Pflegenotstand* (Hans Böckler Stiftung 2022, Careloop 2020) beschrieben. Dabei betrifft dieser Notstand nicht ausschließlich die ambulante Pflege, sondern auch die medizinische und pflegerische Versorgung in den stationären Häusern des ersten Gesundheitsstandortes (Hans Böckler Stiftung 2022, Careloop 2020). Angesichts des einleitend dargestellten Zusammenhangs zwischen einer alternden, zunehmend alleinstehenden sowie pflegebedürftigen Bevölkerungsgruppe und der Aussicht auf einen *Gesundheitskollaps* (Strube 2022), sehen Experten aus Sozial- und Wirtschaftspolitik eine nachhaltig-partizipative Lösung darin, zum einen die Situation der Pflegefachkräfte zu verbessern (vgl. Jacobs et al. 2019, Rademaker 2021, Woratschka 2021) und zum anderen die Versorgung im stationären sowie ambulanten Bereich digital zu unterstützen (vgl. BMG 2022b, BMFSFJ 2022, Daum 2022, Stutzer et al. 2020, Evans et al. 2020). Der ambulant-häuslichen Versorgung wird dabei zukünftig eine tragende Rolle hinsichtlich des eigenständigen und unabhängigen Gesundheitsmanagements zugesprochen (Dahm-Griess 2013, S. 221, BMG 2013, S. 8, Fachinger et al. 2010, S. 9). Zur Realisierung dieser Ziele setzt die Politik auf Prävention sowie technische und soziale Innovationen (Rademaker 2021).

## 2.2.2 Gesetzliche Rahmenbestimmungen

Als Reaktion auf die prekäre Pflegesituation hat die Politik eine Reihe von Gesetzesinitiativen erlassen. Seit 2002 sind über 20 verschiedene Gesetze aus dem Pflegerecht in Kraft getreten, mit teils verschiedener Ausrichtung zur Adressierung der im oberen Abschnitt 2.2.1 genannten Lösungsansätze, darunter die drei Pflegestärkungsgesetze (PSG), das Pflegepersonal-Stärkungsgesetz (PpSG), das Gesetz für sichere digitale Kommunikation und Anwendungen im Gesundheitswesen sowie zur Änderung weiterer Gesetze (E-Health-Gesetz), das Digitale-Versorgungs-Gesetz (DVG) und Digitale-Versorgung-und-Pflege-Modernisierungs-Gesetz (DVPMG). In Abbildung 2.1 sind diese neben weiteren chronologisch dargestellt. Dabei sind die grau hinterlegten Gesetze solche, die in direktem Bezug zur Digitalisierung des ambulanten Pflegewesens stehen und nachfolgend inhaltlich zusammengefasst werden. Somit beleuchten die Folgeabschnitte nur einen auf die ambulante Pflege bezogenen Schlagschatten der Gesetzesinhalte und lassen Aspekte um die elektronische Patientenakte (ePA) sowie vertragsärztliche Verordnungen in elektronischer Form (E-Rezept) unberücksichtigt.

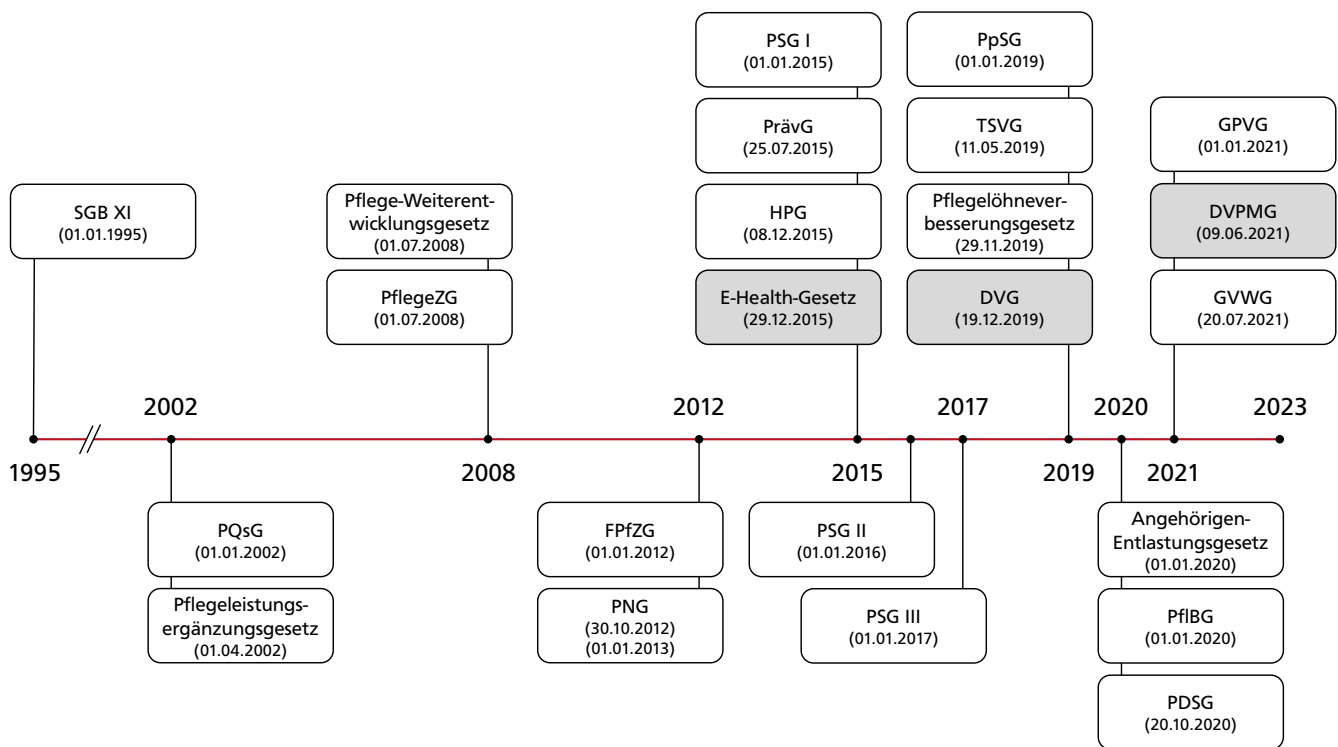


Abbildung 2.1: Chronologische Übersicht der zentralen Gesetzesinitiativen zur Pflege im Zeitraum von 2002 bis 2023, in Grau hervorgehoben sind Gesetze mit direktem Bezug zum ambulanten Pflegebereich

## E-Health-Gesetz

Der Deutsche Bundestag hat mit dem *Gesetz für sichere digitale Kommunikation und Anwendungen im Gesundheitswesen sowie zur Änderung weiterer Gesetze* (E-Health-Gesetz) 2015 die Grundlage für den Aufbau einer sicheren digitalen Infrastruktur im deutschen Gesundheitswesen geschaffen – die sogenannte Gesundheitstelematik-Infrastruktur. Faktisch bewirkt das am 29.12.2015 in Kraft getretene Gesetz die flächendeckende Vernetzung verschiedener Akteure des Gesundheitswesens sowie eine Optimierung der Patientenversorgung durch die schrittweise Ablösung papierbasierter Prozesse und die Einführung auf modernen Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) basierende, medizinische Anwendungen (Deutscher Bundestag 2015). Das E-Health-Gesetz ist darüber hinaus auch heute noch maßgeblich für die weitere Ausgestaltung und Progression der Digitalisierungslandschaft verantwortlich. Der Begriff *E-Health* (engl. Electronic Health) fasst dabei in einem international verständlichen Terminus sämtliche Anwendungen zusammen, die einer patientenorientierten, medizinischen Versorgung dienen und instrumentalisiert zugleich terminologisch die digitalen Transformationsprozesse im Gesundheitswesen (vgl. World Health Organization o. J., European Commission 2019, BMG 2022c). E-Health tritt folglich auch als Sammelbegriff für *Telemedizin* und *Telehealth* in Erscheinung. Zwecks Konsolidierung und Abgrenzung wird an dieser Stelle auf die anschauliche Untersuchung der Technischen Universität Dresden zur Schaffung von Begriffsklarheit in der E-Health-Domäne verwiesen (Stark 2018).

---

## **Gesetz für eine bessere Versorgung durch Digitalisierung und Innovation (DVG)**

Im Jahr 2019 hat das BMG den Referentenentwurf des *Gesetzes für eine bessere Versorgung durch Digitalisierung und Innovation* (DVG) vorgelegt, welches intern zunächst als E-Health-Gesetz II firmierte (von Grätz 2019). Mit dem Gesetz sollen Prozesse und „*Strukturen im Gesundheitssystem an die Dynamik der digitalen Transformation und der Geschwindigkeit von Innovationsprozessen angepasst werden*“ (Jorzig et al. 2020, S. 41). In der Gesetzgebung werden dafür explizit DiGA erwähnt, welche in den Leistungskatalog der gesetzlichen Krankenversicherung aufgenommen wurden. Dieser Schritt stellt ein gesundheitsrechtliches Novum dar, welches Versicherten seit 19.12.2019 einen Anspruch auf die „*Versorgung von [digitalen] Medizinprodukten niedriger Risikoklasse*“ (§ 33a SGB V) garantiert. DiGA sollen dabei vor allem bei der gesundheitsförderlichen Prävention Einsatz finden sowie bei Diagnostik und Therapie von Krankheiten unterstützen. Darüber hinaus bindet das Gesetz, welches im fünften Buch des SGB geregelt ist, weitere Leistungserbringer an die Gesundheitstelematik-Infrastruktur an und schafft verpflichtende Standards aus der Informationstechnik (IT) (vgl. Deutscher Bundestag 2019).

## **Gesetz zur digitalen Modernisierung von Versorgung und Pflege (DVPMG)**

Mit dem *Gesetz zur digitalen Modernisierung von Versorgung und Pflege* (DVPMG) passt der Gesetzgeber 2021 die rechtlichen Standards an den aktuellen Stand der technischen Möglichkeiten im Gesundheitswesen an. Ziel des am 09.06.2021 in Kraft getretenen Gesetzes sind insbesondere DiPA, welche auf Kosten der sozialen Pflegeversicherung eingeführt werden (§ 40b SGB XI). DiPA stellen eine Weiterentwicklung von DiGA explizit für den pflegerischen Bereich dar. Pflegebedürftigen wird dabei die Möglichkeit geboten, den eigenen Gesundheitszustand durch digitale Angebote zu verbessern und die „*häusliche Versorgungssituation zu stabilisieren*“ (§ 40a Abs. 1a SGB XI). Des Weiteren sollen digitale Anwendungen den Austausch mit Angehörigen sowie die Beratung durch Pflegefachkräfte vereinfachen. Insgesamt baut das DVPMG die E-Health-Landschaft durch eine Erweiterung von Einsatzmöglichkeiten in der IT und die Förderung der digitalen Vernetzung aus. Die Änderungen durch die Gesetzesinitiative betreffen sowohl das fünfte als auch elfte SGB (vgl. Deutscher Bundestag 2021b).

Die digitale Entwicklung im Gesundheitssystem ist anhand der Ballung neuer Gesetzesverabschiedungen seit 2015 messbar. Danach greift die Bundespolitik die Hilferufe aus dem medizinisch-pflegerischen Sektor auf und zeigt verstärkt Reformbereitschaft. Im Zentrum der aktuellen Digitalisierungsgesetze im Gesundheitswesen steht in erster Linie die Erweiterung der Gesundheitstelematik-Infrastruktur. Gleichzeitig erkennt der Gesetzgeber die Vorteile digitaler Technologien an (vgl. dazu auch Art. 3 Abs. 2b Gesundheitsversorgungs- und Pflegeverbesserungsgesetz (GPVG)) und schafft Rahmenbedingungen zur Nutzung von DiGA und DiPA, die als Förderer eines selbstständigeren Gesundheitsmanagements erstmalig den Weg in den Alltag Pflegebedürftiger finden und zu einem „*längeren Verbleib [...] in ihrer eigenen Häuslichkeit*“ (Deutscher Bundestag 2021a, S. 164) beitragen sollen. Durch die Forcierung digitaler Versorgungsangebote soll darüberhinausgehend auch die „*pflegerische Betreuung durch professionelle Pflegefachkräfte und pflegende Angehörige erleichtert*“ (Deutscher Bundestag 2021a, S. 164) und neue personelle Kapazitäten freigegeben werden. Die



---

Pflege mittels DiPA von außen zu unterstützen, ist ein neuer Ansatz, dessen Erfolg sich erst in den nächsten Jahren bemessen wird. Deshalb ist es ebenfalls notwendig, den nach Empfindung vieler Älterer nicht altersgerechten Wohnungsbestand (Köcher et al. 2017, S. 206, E. Hoffmann et al. 2017, S. 4) zu verbessern. Bereits angedeutet wurde, dass der Grundsatz *ambulant vor stationär* durch Festschreibung in verschiedenen Büchern des SGB gilt. Im Rahmen des ersten Pflegestärkungsgesetzes (PSG) wurden dazu die in § 40 Abs. 4 SGB XI definierten finanziellen Zuschüsse für „*Maßnahmen zur Verbesserung des individuellen Wohnumfeldes des Pflegebedürftigen [erhöht], wenn dadurch im Einzelfall die häusliche Pflege ermöglicht oder erheblich erleichtert oder eine möglichst selbständige Lebensführung des Pflegebedürftigen wiederhergestellt wird*“. Das Konzept eines möglichst langen Verbleibs in der eigenen Wohnung steht resümierend noch nicht sehr lange im Vordergrund der Alten- und Pflegepolitik. Seit 2019 ist die Digitalisierung jedoch auf dem Weg das Gesundheitswesen zu reformieren und misst dabei dem dritten Gesundheitsstandort eine große Bedeutung zu. Mit Hilfe von IKT werden demnach neue Chancen für pflegebedürftige Menschen entstehen, möglichst selbstbestimmt, lange und sicher in der häuslichen Umgebung zu leben. Dahm-Griess (2013, S. 219) bezeichnet diese Strategie als *Home Care*.

### 2.2.3 Digitale Gesundheits- und Pflegeanwendungen

Durch das DVG wurden im Dezember 2019 DiGA in den Leistungskatalog der gesetzlichen Krankenversicherung aufgenommen. In Analogie dazu folgte 18 Monate später die durch das DVPMG eingeführten DiPA. Beide Anwendungen sind in die SGB integriert und unterscheiden sich hinsichtlich des Anwendungsbereiches sowie deren Zielgruppe.

#### Digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA)

DiGA sind laut § 33a Abs. 1 SGB V „*Medizinprodukte niedriger Risikoklasse, deren Hauptfunktion wesentlich auf **digitalen Technologien** beruht und die dazu bestimmt sind, bei den **Versicherten** oder [...] durch **Leistungserbringer** die Erkennung, Überwachung, Behandlung oder Linderung von Krankheiten oder [...] Verletzungen oder Behinderungen zu unterstützen*“ (Hervorhebungen durch Autor). Damit stellen sich Versicherte (Patienten) sowie Leistungserbringer (medizinische Fachkräfte) als Zielgruppe dar. Einen Rückschluss auf die technologische Implementierung von DiGA lässt die Gesetzesdefinition nicht zu. Allerdings finden sich in ärztlichen Zeitschriften inzwischen eine Reihe von Beiträgen zur Bewertung der Evidenz von Gesundheitsanwendungen. Darin werden solche als *mHealth* (engl. Mobile Health) Anwendungen kategorisiert (Angelescu et al. 2019, S. 1057). Die Weltgesundheitsorganisation (WHO) definiert *mHealth* als „*medical and public health practice supported by mobile devices, such as mobile phones, patient monitoring devices, personal digital assistants (PDAs), and other wireless devices*“ (Bradway et al. 2017, S. 1). Insofern können DiGA als App<sup>5</sup> oder webbasierte Anwendung über sämtliche elektronische Endgeräte bereitgestellt werden (vgl. BfArM 2023). Der Anwendungsbereich von DiGA beläuft sich laut Gesetzestext auf die Diagnose, das Monitoring und die Kuration von Krankheiten und kann als selbstständige Gesundheitsüberwachung

---

<sup>5</sup>Abk. Applikation (engl. Application), die als Anwendungssoftware vor allem auf Smartphones und Tablet-PCs heruntergeladen und genutzt werden kann (Duden o. J.(a)).

---

zusammengefasst werden. Die Primärprävention zur Verhinderung der Entstehung von Krankheiten wird dabei explizit nicht adressiert (BfArM 2022a, S. 19). Zur Erfüllung der Zweckdienlichkeit der „digitalen Helfer in der Hand der Patienten“ (BfArM 2022a, S. 12) können neben der Software auch weitere Geräte, Sensoren oder andere Hardware eingefasst werden, solange die Hauptfunktionalität überwiegend digitaler Natur ist (BfArM 2022a, S. 13). Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) führt auf Grundlage des § 139e SGB V ein Verzeichnis für digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA-Verzeichnis). Für eine Listung im DiGA-Verzeichnis ist es seitens der Entwickler erforderlich, eine Bandbreite thematischer Anforderungen sowie den Nachweis positiver Versorgungseffekte der Anwendung zu erbringen. Dafür wurden vom BMG und BfArM die *Digitale Gesundheitsanwendungen-Verordnung (DiGAV)* sowie der DiGA-Leitfaden *Fast-Track-Verfahren für digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA) nach § 139e SGB V* erarbeitet (Bundesministerium der Justiz 2020, BfArM 2022a). Mit beiden Papieren konkretisiert sich die Definition der an die DiGA zu stellenden Anforderungen hinsichtlich der Aspekte Sicherheit, Qualität, Datenschutz und Datensicherheit. Für den leistungsrechtlichen Anspruch auf eine DiGA ist eine medizinische Indikation nach § 33a Abs. 1 SGB V nachzuweisen.

### **Digitale Pflegeanwendungen (DiPA)**

DiPA können im Wesentlichen als für den pflegerischen Gesundheitssektor entwickeltes Pendant zu DiGA bezeichnet werden. Nach § 40a Abs. 1 SGB XI sollen DiPA „genutzt werden, um Beeinträchtigungen der Selbständigkeit oder der Fähigkeiten des Pflegebedürftigen zu mindern oder einer Verschlimmerung der Pflegebedürftigkeit entgegenzuwirken“. Sofern der gesundheitliche Zustand des Pflegebedürftigen nicht durch Leistungsträger gemäß SGB V zu behandeln ist, stellen DiPA auch solche Anwendungen dar, „die pflegende Angehörige [...] bei der Haushaltsführung unterstützen und die häusliche Versorgungssituation des Pflegebedürftigen stabilisieren“ (§ 40a Abs. 1a SGB XI). Sie gelten ebenfalls als „Medizinprodukt mit niedriger Risikoklasse“ (§ 40a Abs. 1b SGB XI), die auf „eigenen, mobilen Endgeräten oder als browserbasierte Webanwendung“ (Deutscher Bundestag 2021a, S. 143) bereitgestellt werden und Pflegebedürftige, deren Angehörigen sowie ambulante Pflegefachkräfte als Nutzergruppe auffassen. Als primäres Ziel gilt demnach eine verbesserte Vorsorge der Pflegebedürftigen, wobei auch der Aspekt der Kommunikation mit Angehörigen und Pflegefachkräften eine tragende Rolle im Konzept spielt. Im Sinne des § 6 Abs. 2 SGB XI sind Pflegebedürftige zur Eigenverantwortlichkeit und Vermeidung der Pflegebedürftigkeit durch aktive Mitwirkung und vorbeugendes Handeln angehalten, sodass DiPA im Gegensatz zu den DiGA an die Primärprävention anknüpfen können. Explizit klammert die Gesetzgebung jedoch Anwendungen aus, deren „Zweck dem allgemeinen Lebensbedarf oder der allgemeinen Lebensführung dient“ (§ 40a Abs. 1a SGB XI). Der Wortlaut dieser Klausel lässt sich zurückführen auf altersgerechte Assistenzsysteme (engl. Ambient Assisted Living (AAL)), eine Bezeichnung, der es bislang an einer gesetzlichen Definition mangelt, jedoch allgemeingültig für Konzepte steht, die auf IKT basierend das alltägliche Leben Älterer mit dem Zweck, selbstbestimmt in der eigenen Wohnung leben zu können, situativ und unaufdringlich unterstützen soll (vgl. Wendel 2020, Elmer et al. 2019, S. 13, Braun et al. 2016, S. 204, Lehr 2013, S. 153, Zimmermann et al. 2012, S. 213, Wichert et al. 2010, S. 2, Sun et al. 2009, S. 1201, BMBF 2008, S. 1). AAL-Systeme zeichnen sich in der Regel durch eine stark heterogene Nutzergruppe aus, weisen zudem keinen geprüften medizinisch-pflegerischen Nutzen nach und dienen laut einem

---

Blogbeitrag zum Teil der „Selbsterfüllung der Entwickler“ (Bornholdt et al. o. J.), die versucht haben, aus den „Prototypen marktreife Produkte zu machen“ (Braun et al. 2016, S. 208). Vor diesem Hintergrund ergibt die konsequente Haltung des Gesetzgebers Sinn, erschwert jedoch gleichzeitig eine intuitive Zuordnung, die den Anforderungen und Einschränkungen nach § 40a Abs. 1-1a SGB XI Rechnung trägt. Für einen erstattungsfähigen Nutzungsanspruch bei den Pflegekassen muss die DiPA im Verzeichnis für digitale Pflegeanwendungen nach § 78a Abs. 3 SGB XI gelistet sein und ein Pflegegrad vorliegen. Die Aufnahme in das DiPA-Verzeichnis regelt die Digitale Pflegeanwendungen-Verordnung (DiPAV) nach SGB XI und stellt Anforderungen wie Sicherheit, Funktionstauglichkeit, Qualität, Datenschutz und -sicherheit sowie den Nachweis des pflegerischen Nutzens in den Vordergrund der Aufnahmeprüfung (vgl. Bundesministerium der Justiz 2022, BfArM 2022b).

Mit Stand Februar 2023 listet das DiGA-Verzeichnis 47 Anwendungen aus elf unterschiedlichen Krankheitskategorien, angefangen bei Atemwegen über das Nervensystem bis hin zur Verdauung (BfArM 2023). Demgegenüber wird nach Verlautbarung des BfArMs das DiPA-Verzeichnis mit den ersten aufgenommenen Pflegeanwendungen in der ersten Jahreshälfte 2023 online gehen (BfArM 2022c)<sup>6</sup>. Stutzer et al. (2020, S. 8) sowie das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM 2022b, S. 14) würdigen dafür bereits u. a. das Ergebnis der Forschungsarbeit *Komo3D* (Hochschule Pforzheim 2021), das den Prototypen eines intelligenten, vor Stolperfallen warnenden Rollators hervorgebracht hat. Anwendungen, die den Alltag älterer Menschen mit dem Ziel, möglichst lange und selbstständig in der eigenen Wohnung zu leben, unterstützen und dabei digitale Systeme zur körperlichen sowie kognitiven Entlastung, dem Monitoring oder für Dokumentations- und Kommunikationszwecke nutzen und nicht den nach DiGAV bzw. DiPAV reglementierten Anforderungen entsprechen, gelten als AAL-Systeme und werden im nachfolgenden Abschnitt vorgestellt.

## 2.2.4 Altersgerechte Assistenzsysteme

Das Konzept AAL, gelegentlich auch als *Active Assisted Living* bezeichnet, ist durch die Motivation getrieben, die Autonomie und Lebensqualität der Menschen durch nutzerzentrierte digitale Techniken situationsabhängig und möglichst lange zu erhalten, insbesondere bei im Alter zunehmenden physischen und psychischen Funktionsverlusten (Braun et al. 2016, S. 204, Blackman et al. 2016, S. 55, Zimmermann et al. 2012, S. 213). Hinsichtlich dessen stehen primär ältere Menschen im Mittelpunkt von AAL-Systemen, schließen jedoch keinesfalls jüngere Generationen aus, wie die Arbeiten von Braun et al. (2016, S. 209) sowie Theussig (2012, S. 45 ff.) zum *Universal Design* ausführen.

Der Ausdruck AAL ist auf ein europäisches Forschungsrahmenprogramm 2004 zurückzuführen und hat sich innerhalb der letzten Jahre als innovativer Ansatz zur Bewältigung der Folgen des demografischen Wandels hinsichtlich gesundheitlicher Gesichtspunkte erwiesen (Blackman et al. 2016, S. 55). Häufig im Rahmen der Gerontologie<sup>7</sup> verwendet, stellen AAL-Systeme eine Entwicklungsstufe

<sup>6</sup>Im Mai 2023 sind noch keine Einträge abzurufen.

<sup>7</sup>Die Gerontologie (lat. Lehre vom Greis) stellt das wissenschaftliche Fachgebiet dar, in welchem die Alterungsvorgänge des Menschen unter biologischen, medizinischen, psychologischen und sozialen Gesichtspunkten erforscht werden (Duden o. J.(c)).

---

von assistiven Technologien (AT) dar, welche als Sammelbegriff sämtliche Technologien erfassen, die Menschen zur Ausführung spezifischer Aufgaben verwenden. AT umfassen dahingehend sowohl Low-Tech- als auch High-Tech-Geräte, die sich nach dem Grad ihrer technologischen Komplexität unterscheiden. Darunter fallen sowohl Brillen oder Gehhilfen als auch vielschichtigere Hard- und Software-Lösungen, einschließlich Sensor-Peripherie (Joo 2018, S. 92, Blackman et al. 2016, S. 57). AAL kann folglich als Ergebnis der Progression AT betrachtet werden, die inzwischen weit über die Unterstützung einer spezifischen Aufgabe hinausgeht. Das Attribut *ambient* versucht dahingehend die Tragweite der Technologien zu unterstreichen, indem es AT als allumfassende und vernetzte sowie unauffällig in die Aufgaben des Alltags eingebettete Lösung charakterisiert (Braun et al. 2016, S. 204, Blackman et al. 2016, S. 57). Innerhalb des deutschen Sprachgebrauchs beschreibt die wörtliche Übersetzung *altersgerechte Assistenzsysteme für ein gesundes und unabhängiges Leben* (BMBF 2008, S. 1) den Anglizismus AAL am präzisesten.

Eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung der AAL-Systeme spielt neben der IKT vor allem die Partizipation führender Hard- und Softwarehersteller, welche AAL in ihre *Smart Home*<sup>8</sup> Lösungen integrieren, mit weiteren Produkten wie dem Smartphone, Tablet und Wearable<sup>9</sup> kombinieren und damit einen neuen, profitablen Absatzmarkt insbesondere bei den über 65-Jährigen erwarten (Hartl 2021). Entsprechend den Autoren Sixsmith et al. (2013) sowie Doughty et al. (1996) werden drei Generationen von AAL-Systemen unterschieden. Während die erste Generation als persönliches Notrufsystem betrachtet werden kann, bei welchem der Nutzer den Notruf aktiv auslöst, integrieren die Systeme der zweiten Generation bereits Kamerasensorik, um Verhaltensweisen zu monitoren, Notfallsituationen zu erkennen und diese ohne manuellen Trigger automatisch zu melden. Die jüngste Generation von AAL-Systemen geht über die Erkennung und automatische Fernmeldung eines Notfalls hinaus, indem es den Anspruch erhebt, Probleme zu verhindern, bevor sie entstehen. Dazu werden Daten aus verschiedenen Quellen miteinander verknüpft, welche neben der häuslichen Umgebung auch den Nutzer selbst beobachten, um anomalistisches Verhalten frühzeitig in Zusammenhang bringen und warnen zu können. Als Sensorik werden dafür über Kameras hinausgehend u. a. Wearables in den Alltag integriert, deren synchronisierter Dienst im Sinne des AAL als „*ambient intelligent*“ (Aarts 2004, S. 12) bezeichnet wird (vgl. Sixsmith et al. 2013, S. 217, Doughty et al. 1996, S. 71 ff.). Neben AAL existieren weitere Einsatzbereiche von *Ambient Intelligence*, die hier nicht weiter betrachtet werden. Für einen Ausblick auf solche wird an dieser Stelle auf den Beitrag von Hansen et al. (2007) verwiesen.

Der demografische Wandel in Verbindung mit dem zunächst abwartenden Verhalten der Politik hat ein vielfältiges Angebot an digitalen, soziotechnischen AAL-Systemen hervorgebracht, welches schwer zu überschauen und unmöglich vollständig abzubilden ist. Althammer (2019, S. 103) beschreibt daher folgerichtig die Begrenzung der Diversität von AAL-Systemen als eine Herausforderung innerhalb der Digitalisierung im Gesundheitswesen. Der übergeordneten Zielebene, dem allein lebenden, älteren Individuum durch technische Unterstützung möglichst lange ein selbstbestimmtes

---

<sup>8</sup>Unter *Smart Home* wird die technische Vernetzung und Automation einzelner Haustechnikkomponenten bezeichnet, welche mittels Smartphone steuerbar sind und zum Ziel haben, die Lebensqualität, Sicherheit und Energieeffizienz zu erhöhen (Definition erweitert nach Duden o. J.(d)).

<sup>9</sup>Wearables sind kleine und vernetzte Computersysteme, welche direkt am Körper getragen werden, um auf den Nutzer oder dessen Umwelt bezogene Daten zu registrieren und zu verarbeiten (Duden o. J.(e)). Zu solchen Computersystemen zählen derzeit digitale Armbanduhren (Smartwatches) oder Datenbrillen (Smartglasses).

---

Leben in der gewohnten Umgebung zu ermöglichen, ordnen sich weitere Unterziele zu, welche je nach Studie unterschiedlich granular definiert werden. Hansen et al. (2007, S. 203) definiert den *Komfort*, die *Sicherheit* und die *Gesundheit* als grundlegende Zielmenge, während Georgieff (2008, S. 32) die Einsatzbereiche *Gesundheit und (ambulante) Pflege, Haushalt und Versorgung, Sicherheit und Privatsphäre* sowie *Kommunikation und soziales Umfeld* definiert. Joo (2018, S. 96) ergänzt die Bereiche von Georgieff (2008) zusätzlich um den Aspekt der *Mobilität*, welcher für seine Forschungsarbeit in unmittelbarem Bezug zu dem Konzept *Ageing in Place* steht. Dieser Annahme folgt die vorliegende Arbeit unter der Prämisse einer innerhäuslichen Mobilität im Kontext des altersgerechten, barrierefreien Wohnraumes (vgl. Forschungsaspekte 1–3).

### 2.2.5 Innerhäusliche Mobilität

Mobilität stellt für die meisten Menschen ein zentrales Bedürfnis dar, welches als Voraussetzung für ihre Handlungsfähigkeit und damit auch Selbstständigkeit gilt (Kaiser 2012, S. 513). Dabei gilt die innerhäusliche Mobilität als Mindestvoraussetzung, einen eigenen Haushalt zu führen und selbstbestimmt zu leben (Joo 2018, S. 97). Der Rückgang von Muskelmasse und -funktion im Alter wird medizinisch als Sarkopenie bezeichnet und geht mit Gebrechlichkeit, Schwäche und Balancestörungen einher. Die Folgen des physiologischen Umbaus manifestieren sich häufig durch Probleme bei alltäglichen Routinen und selbst kleineren Hürden, denen bisher als selbstverständlich und problemlos begegnet werden konnte, mit der Folge, dass Handlungskompetenzen und damit die Selbstständigkeit der betroffenen Menschen stark beeinträchtigt werden. Häufig erleben Ältere darüber hinaus den Verlust des Selbstvertrauens, wodurch sich den physiologischen Beschwerden auch psychologische Leiden anschließen. Eine eingeschränkte innerhäusliche Mobilität steht angesichts dessen in Zusammenhang mit einer abnehmenden Wahrscheinlichkeit, dass selbstständiges Wohnen bewältigt werden kann. Der Maxime, die Mobilität als Grundsatz einer selbstständigen Lebensführung so lange aufrecht zu halten wie möglich, kommt damit nicht nur hinsichtlich individueller Bedürfnisse, sondern auch angesichts volkswirtschaftlicher Effekte eine besondere Bedeutung zu (Strupeit et al. 2013, S. 748, Klie 2009, S. 293).

Zur Bewahrung und Förderung der innerhäuslichen Mobilität gilt es, Mobilitätseinschränkungen abzubauen und somit gleichzeitig Unfallprävention zu betreiben, da nach Angaben des Robert-Koch-Instituts (RKI) fast ein Drittel der über 65-Jährigen und jeder Zweite der über 80-Jährigen mindestens einmal jährlich im Haushalt stürzt (Rommel et al. 2019, S. 3, Menning et al. 2009, S. 65). Die Schaffung eines Angebots für Maßnahmen, die Mobilitätsbarrieren und Sturzgefahren beseitigen, sind folglich insbesondere für Ältere, deren eigene Häuslichkeit zunehmend zum Lebensmittelpunkt wird, sinnvoll und zugleich sozialökonomisch von großer Wichtigkeit. Darüber hinaus schafft ein barrierefreier bzw. -reduzierter Wohnraum die räumlich-dimensionierten Voraussetzungen für pflegerische Arbeiten bei der ambulanten Versorgung und Pflege von Hilfebedürftigen. Vor diesen Ausführungen lässt sich festhalten, dass die Ausgestaltung des Wohnraumes ein zentraler Baustein mit multidimensionalen Effekten zur Verbesserung der Selbstständigkeit sowie Bedürftigenversorgung und Entlastung der Pflegetätigkeit darstellt.

Der folgende Abschnitt beleuchtet das Feld um technische Assistenzsysteme und digitale Anwendungen zur Unterstützung Älterer bei Mobilitätseinschränkungen für den dritten Gesundheitsstandort.

---

Zwecks Vollständigkeit wird dafür zu Beginn auch ein Blick auf klassische Hilfsmittel gemäß § 139 SGB V geworfen. Eine Literatur- und Internetrecherche zur Identifikation bisher nicht systematisch gelisteter AAL-Systeme und DiPA ergänzt die Ausführungen.

## 2.2.6 Technische Hilfen gegen innerhäusliche Mobilitätseinschränkungen

Das Altern prägt sich zunächst als körperlicher Umbau und Weiterentwicklung der Persönlichkeit in höchst individuellem Maße aus. Mit zunehmendem Alter steigt das Risiko einer Verletzung in Folge physiologischer bzw. psychischer Einschränkungen. Der *Sturz im Alter* wird dabei als gesondertes, altersspezifisches Problem mit hoher Eintrittswahrscheinlichkeit hervorgehoben (vgl. Rommel et al. 2019, S. 3, Menning et al. 2009, S. 65). Dabei stellt der Sturz, welcher in Wechselwirkung mit der gegebenen Umwelt ausgelöst wird, nur das Symptom für ein Defizit dar, das auf verschiedene medizinische Ursachen zurückzuführen ist. Die Wechselwirkung zwischen Umwelt und alterndem Individuum spielt eine zentrale Rolle innerhalb der ökologischen Gerontologie und wird als *Person-Umwelt-Beziehung* bezeichnet. Vor diesem Hintergrund ist die bedarfsgerechte Unterstützung sowie ein an die sich verändernden Fähigkeiten der älteren Menschen angepasster Wohnraum bei der Erarbeitung von Lösungsansätzen gegen den Pflegenotstand ein maßgeblicher Aspekt.

Nach § 40 SGB XI dienen zwei Maßnahmen zum Abbau von Mobilitätsbarrieren und der Reduzierung von Unfallgefahren sowie der Förderung und Unterstützung eines möglichst langen und selbstständigen Lebens in der vertrauten Umgebung: der Einsatz von Pflegehilfsmitteln und bauliche Maßnahmen zur Wohnumfeldverbesserung.

### Pflegehilfsmittel

Als Pflegehilfsmittel bezeichnet das SGB solche, die zur „*Erleichterung der Pflege oder zur Linderung der Beschwerden des Pflegebedürftigen beitragen oder ihm eine selbständigere Lebensführung ermöglichen*“ (§ 40 Abs. 1 SGB XI). Als mobile Gegenstände sind sie nicht mit der Bausubstanz des Hauses verbunden (Kamps 2009, S. 31). Der Gesetzgeber unterscheidet zwischen technischen Pflegehilfsmitteln (Geräten) und Verbrauchsprodukten (Sachmittel). Letztere werden bei den weiteren Ausführungen ausgeschlossen. *Technisches Pflegehilfsmittel* ist im deutschen Sprachgebrauch ein gängiger Begriff, dem allerdings keine sozialversicherungsrechtliche Definition zugrunde liegt. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher das technische Pflegehilfsmittel als Teil von AT verwendet, worunter gemäß Abschnitt 2.2.4 auch AAL-Systeme fallen. Klassische, technische Hilfsmittel basieren primär auf mechanischen Prinzipien mit eindimensionaler Funktionalität und werden strukturiert im Hilfsmittelverzeichnis (HMV) nach § 139 SGB V gelistet, welches vom Spitzenverband Bund der Krankenkassen geführt wird. Im Vergleich zu AAL-Systemen, bei welchen es sich vor allem um vernetzte Technologiekomponenten handelt, werden klassische Hilfsmittel durch die Kranken- oder Pflegekasse finanziert. Eine eindeutige Abgrenzung beider Gruppen fällt aufgrund der großen Bandbreite an Nutzen und Komplexität schwer. Dennoch kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass klassische Pflegehilfsmittel nach § 139 SGB V in Relation zu AAL-Systemen durchaus als Low-Tech-Geräte bezeichnet werden können. Mit dem Inkrafttreten des DVPMG werden zukünftig auch DiPA zu den hochtechnologisierten AT zählen.

---

**Klassische Pflegehilfsmittel** aus dem HMV sind in 42 Produktgruppen eingeteilt, wovon vier speziell dem Pflegebereich vorbehalten sind (vgl. GKV-Spitzenverband o. J.). Ein Versorgungsanspruch auf die qualitätsgeprüften Hilfsmittel besteht nur dann, wenn eine ärztliche Verordnung oder ein anerkannter Pflegegrad vorliegt (vgl. § 40 Abs. 6 Satz 4 SGB XI). Mit Bezug zur Unterstützung bei innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen können sieben Produktgruppen identifiziert werden, darunter fallen *Adaptionshilfen* (Gruppe 02), *Bade- und Duschhilfen* (Gruppe 04), *Gehhilfen* (Gruppe 10), *Kranken-/ Behindertenfahrzeuge* (Gruppe 18), *Mobilitätshilfen* (Gruppe 22), *Toilettenhilfen* (Gruppe 33) und *Pflegehilfsmittel zur selbständigeren Lebensführung/Mobilität* (Gruppe 52). Mit über 40 mobilitätsrelevanten Hilfsmitteln aus den genannten Produktgruppen ist das Leistungsangebot sehr groß und weitläufig, beginnend bei einfachen Hilfsmitteln wie dem Hand-/Gehstock (Produktgruppe 10) über elektrische Produkte wie dem Lifter (Produktgruppe 22) bis hin zu technischen Systemen im Sinne eines Hausnotrufgeräts (Produktgruppe 52). Statistiken über die Häufigkeit der Verordnung einzelner Hilfsmittel existieren nicht. Daher reduzieren sich die folgenden Ausführungen auf weit verbreitete Hilfsmittel, um Mobilitätseinschränkungen bei Betroffenen auszugleichen. Rollatoren und Rollstühle sorgen im innerhäuslichen Bereich für Mobilität, sofern einige Voraussetzungen erfüllt sind. In den Vordergrund treten hierbei ausreichend breite Wohnungs- und Raumzugänge, hinreichend große Bewegungsflächen und Freiräume sowie Überbrückungslösungen für Treppen und Stufen. In aller Regel steigt mit dem Einsatz von Rollatoren und Rollstühlen auch der Bedarf nach weiteren Systemen, um innerhäusliche Mobilitätsbarrieren zu überwinden. Sogenannte Lifter können dabei Umsetzungsaufgaben übernehmen und u. a. in den Nasszellen eines Haushalts zur Anwendung kommen, wenn z. B. die Dusche oder Badewanne nicht barrierefrei ist. Fallen Bewegungen im Allgemeinen schwer, steigt damit grundsätzlich auch das Risiko zu stürzen. So ist über Mobilitätshilfen hinaus auch der Einsatz eines Hausnotrufgeräts sinnvoll, welches am Handgelenk der Person getragen und ausgelöst werden kann, wenn ein gesundheitlicher Notfall, beispielsweise ein Sturz, auftritt. Das Hausnotrufgerät als AAL-System der ersten Generation ist dabei in aller Regel an eine Zentrale angeschlossen, die Hilfe direkt auf den Weg bringen kann.

Im 5. Fortschreibungsbericht des GKV-Spitzenverbandes wird regelmäßig über Erweiterungen und innovative Produkte aus dem HMV berichtet. Innerhalb des Berichtszeitraumes 03.2021 bis 02.2022 wurden Produktneuheiten in das Verzeichnis aufgenommen, darunter ein umhängbarer Deckenlifter, der durch ein an der Decke montiertes Schienensystem Personen ohne Unterbrechung zwischen Räumen transportieren kann (Seliger 2022, S. 6). Darüber hinaus wurde ein Rollstuhl mit einem selbstbalancierenden Fahrprinzip gelistet, der in der Produktgruppe 18 des HMV zu finden ist. Über die Selbstbalancierung hinaus verfügt dieser über eine Raupenfunktion, um Treppen zu überwinden (Seliger 2022, S. 6). Die Produktneuheiten gehen auch über die innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen hinaus und streben immer stärker in Richtung eines AAL-Systems, wie der in das HMV aufgenommene, halbautomatisierte Speiseroboter *Obi* zeigt (vgl. Hilfsmittelnummer: 02.40.08.0001 im HMV des GKV-Spitzenverband o. J.). Eine zentrale Erkenntnis der Recherche des HMV mit Blick auf den Technologiegrad ist, dass bereits eine Reihe technischer Hilfsmittel existieren, die den Alltag bei Mobilitätseinschränkungen unterstützen. Dabei sind diese fast ausschließlich Bestandteil der Leistungen der Krankenversicherung. Im angeschlossenen Pflegehilfsmittelkatalog finden sich mit Ausnahme von Pflegebetten und Hausnotrufsystemen kaum technische Hilfsmittel wieder. Diese Erkenntnis deckt sich mit solcher aus dem Abschlussbericht zur Studie *Unterstützung Pflegebedürftiger durch technische Assistenzsysteme* von 2013 (vgl. BMG 2013, S. 32). Damit kann zusammengefasst

---

werden, dass der technologische Fortschritt und somit Digitalisierungsgrad nicht alle Bereiche des Gesundheitssystems gleichermaßen adressiert und die Pflege bislang in diesem Punkt zurücksteht.

**AAL-Systeme** werden nicht in einem strukturierten Verzeichnis gleich dem der klassischen Pflegehilfsmittel gelistet, weshalb zunächst über eine breit angelegte Recherche mögliche Quellen für solche identifiziert werden. Einen herstellerneutralen Überblick über AAL-Systeme stellt das Forschungszentrum Informatik am Karlsruher Institut für Technologie (FZI) über das Portal *Wegweiser Smart Health* zur Verfügung (Forschungszentrum Informatik o. J.). Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) informiert über national geförderte, interaktive Technologieprojekte aus verschiedenen Themenbereichen, darunter *Digitale Gesundheit und innovative Pflege*, im Rahmen einer eigenen Webpräsenz (BMBF). Europäische AAL Joint Programme mit deutscher Beteiligung aus vielfältigen Anwendungsbereichen zählt *AAL-Europe* (AAL Programme o. J.). Allgemeine Informationen finden sich darüber hinaus auf Internetseiten wie *AAL-Deutschland* (S. Hoffmann 2016), *Pflegegrad.info* (Paassen 2018), *Home & Smart* (Wendel 2020), *nullbarriere.de* (Hopf o. J.) und *Das-Haus* (Günder 2022). Dabei erhebt das Ergebnis trotz sorgfältiger Recherchearbeit keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Eine Selektion der AAL-Systeme aus den genannten Quellen hinsichtlich der Unterstützung bei und Beseitigung von innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen dünnt die breite Vielfalt von über 200 Produkten und Dienstleistungen sowie mehr als 500 national und international geförderten Forschungsprojekten stark aus. Übrig geblieben sind Systeme, die sich technologisch von den klassischen Pflegehilfsmitteln abgrenzen. Eine Auswahl davon mit innovativem Charakter wird nachfolgend vorgestellt. Dabei gilt zu beachten, dass diesen AAL-Systemen keine reglementierte Bedingung zum Erwerb und der Nutzung obliegt, wie es bei den im HMV gelisteten Hilfsmitteln oder den zukünftig im DiPA-Verzeichnis geführten Anwendungen der Fall ist. Gleichzeitig ist keine gesellschaftlich getragene Förderung über Zuschüsse aus Kranken- oder Pflegekasse möglich.

Für eine barrierefreie Wohnumgebung stehen im Business-to-Consumer-Bereich eine Reihe von marktreifen Produkten zur Auswahl, welchen Personen mit Mobilitätseinschränkungen den Alltag erleichtern können. Mittels Spracherkennung kann die Belichtung gesteuert und damit Sturzprävention betrieben werden. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, durch eine Reihe von Sensoren im Sinne der ferngesteuerten Hausautomation Fenster und Türen kontaktlos öffnen und schließen zu lassen. Insbesondere für Rollstuhlfahrer stellen diese Tätigkeiten meist eine Herausforderung dar. Eine marktreife Lösung für selbigen Zweck und gleichzeitig zur Erkennung von Stürzen bieten näherungssensitive Bodenbeläge. Systeme wie *SensFloor* können Bewegungen von Personen im Wohnraum erkennen und einer kritischen Situation oder Handlungsempfehlung zuordnen. In Kombination mit einem zentralgesteuerten Hausnotrufsystem kann ein Alarm ausgelöst werden, wenn eine Person stürzt und sich dadurch auffällig lange nicht bewegt. Je nach Bewegung innerhalb der Wohnung können entsprechend automatische Türen geöffnet oder die Beleuchtung gesteuert werden. Während die beschriebenen Systeme in die Kategorie Standalone-Lösung fallen, hat der schnell wachsende und vielversprechende Zukunftsmarkt auch integrierte Gesamtkonzepte hervorgebracht, wie das Systemhaus ProLiving® Systems AG mit ihrer *SmartManager* Plattform für ein dezentrales Management der altersgerechten Wohnung zeigt. Unter anderem bietet dieses eine vollautomatische 3D-Sturzerkennung, ohne dass Geräte am Körper getragen oder betätigt werden müssen, wie es bei AAL-Systemen der ersten Generation noch üblich ist.



---

Das BMBF hat seit 2008 316 Forschungsprojekte aus dem Themenbereich *Digitale Gesundheit und innovative Pflege* gefördert. Sieben davon stehen in direktem Zusammenhang mit der Unterstützung bei innerhäuslichen Barrieren. Die Projekte *ModESt* (Budermann et al. 2020) und *MAID* (Guhl 2015) bauen dabei auf dem Rollator als Hilfsmittelinstanz auf und erweitern diese durch zusätzliche Sensoren. Durch die Echtzeitdaten können etwaige Risiken durch Haltungsfehler, Umfeldinformationen oder physiologische Vitalparameter identifiziert werden. Der Rollator entwickelt sich damit zum multisensoralen Mobilitätsassistenten. Die Robotik spielt auch bei AAL eine immer größere Rolle. In *ArNe* (BMBF 2020e) und *BeMobil* (Kraft et al. 2017) wurden prototypische robotische Assistenzsysteme in Verbindung mit IKT auf ihren praktischen Nutzen im häuslichen Alltag untersucht. Als intelligente Prothese, Orthese oder allgemein adaptives Hilfsmittel können Roboter die Bewegungsfreiheit zu Hause wieder ermöglichen. Das Ziel eines individuell anpassbaren Systems ist auch bei den letzten drei Projekten von großer Bedeutung. So ist aus *sens@home* (Steiner et al. 2013) eine mobile Sensorbox hervorgegangen, die, in jedes Zimmer der Wohnung integriert, Stürze zuverlässig erkennen und automatisiert Hilfe rufen kann. Das Verbundprojekt *PATRONUS* (Pfister et al. 2016) geht noch einen Schritt weiter, indem es eine adaptive Systemplattform zur Aktivitäts- und Sturzerkennung in ein personalisiertes Versorgungsnetzwerk einbindet, in welchem persönliche Anforderungen als Bedarfsanalysator Unterstützungs- und Hilfeleistungsstrukturen definieren. In *KARE* (BMBF 2022) wird ein multimodales und auf Künstlicher Intelligenz (KI) basierendes Interaktionssystem entwickelt, das mittels optischer und akustischer Sensordaten Aktivitäten von Pflegebedürftigen anhand eines Ablaufplanes überwachen und im Bedarfsfall aktiv zu solchen motivieren kann.

Dass KI und Robotik eine zentrale Säule bei AAL darstellt, zeigt die Anzahl weiterer Forschungsprojekte, die in indirektem Zusammenhang mit einem barrierefreien Leben im dritten Gesundheitsstandort stehen. Neun weitere Projekte untersuchen den medizinischen Nutzen und zukünftigen Aufgabenschwerpunkt robotischer Systeme in ambulanten Einsatzszenarien. Dabei geht es um logistische Aufgaben (*Teleskoop* (BMBF 2021b), *PeTRA* (BMBF 2020b) und *RoMi* (BMBF 2020e)), die körperliche Entlastung des Pflegefachpersonals (*AdaMekoR* (BMBF 2020a) und *PfleKoRo* (BMBF 2020c)) sowie die Unterstützung einzelner Funktionsbedürfnisse im Alltag (*PlexoMotion* (BMBF 2022d), *RimA* (BMBF 2021a) und *KoBo34* (BMBF 2018)). Eine Priorität räumt das BMBF auch der Entwicklung einfacher, intuitiver und niederschwelliger Mensch-Maschine-Interaktionen ein, wie die jüngsten Projekte *WINK* (BMBF 2020g), *TECH4AGE* (BMBF 2014) und *Plug-In* (BMBF 2020d) zeigen. Die Erkennung und Prävention von Stürzen sowie die Minimierung von Folgeschäden steht im Fokus der KI getriebenen Projekte *KIP-SDM* (BMBF 2022b) und *PFLIP* (BMBF 2022c), welche Daten aus dem ambulanten und stationären Bereich sammeln und Präventionsmodelle trainieren wollen.

Der Forschungsbereich um AAL-Systeme ist weitläufig und technisch unterschiedlich komplex. Einzelne Forschungsergebnisse haben bereits den Weg in den Verbrauchermarkt gefunden (vgl. Projekt *sens@home*), bei anderen wird es noch einige Zeit brauchen, insbesondere durch die Vorbehalte gegenüber robotischen Systemen (Rösler et al. 2018, S. 55 f.). Darüber hinaus ist die Frage des pflegerischen Nutzens häufig ein strittiger Punkt in Studien, da es letztlich von individuellen Bedarfen abhängig ist, ob ein AAL-System aus Komfortgründen eingesetzt wird oder als Ausgleich physiologischer Einschränkungen dient (BMG 2013, S. 38).

**Digitale Pflegeanwendungen** existieren derweilen ausschließlich als AAL-Systeme mit der Intention, zukünftig in das DiPA-Verzeichnis aufgenommen zu werden. Prinzipiell können DiPA als native App,

---

Desktop- oder Browseranwendung angeboten werden und weitere Hardware, wie in der häuslichen Umgebung platzierte Sensoren, einbinden (BfArM 2022b, S. 13). Die Auszeichnung eines AAL-Systems als DiPA ist gegeben, wenn der pflegerische Nutzen für die häusliche Versorgungssituation der Pflegebedürftigen explizit nachgewiesen ist, das System im Wesentlichen auf digitalen Technologien beruht und nicht der Unterstützung der allgemeinen Lebensführung dient (BfArM 2022b, S. 12 f.). Die ausschließlich für den häuslichen Kontext entwickelten und das Prüfverfahren des BfArM erfolgreich durchlaufene Anwendungen werden im DiPA-Verzeichnis gelistet und stehen damit pflegebedürftigen Personen zur Verfügung, sofern der Nutzungsanspruch durch einen Pflegegrad gegeben ist. Darüber hinaus sollen DiPA pflegenden Angehörigen und ambulanten Pflegeeinrichtungen als Versorgungsinstrument unterstützen. Für die Aufnahme in das zum Stichtag Mai 2023 noch inhaltslose DiPA-Verzeichnis qualifizieren sich nach Beschreibung des *DiPA-Leitfadens* (BfArM 2022b) und M. Rosenberg (2023) bereits einige digitale Anwendungen, darunter der intelligente Rollator aus dem Forschungsprojekt *Komo3D*, die Virtual Reality (VR) App *Granny Vision*, die Anwendungen *DigiPrevention* und *DigiCare* von *DigiRehab* sowie die *Lindera SturzApp*.

Als Unterstützungsleistung bei innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen kann das Forschungsergebnis aus *Komo3D* sowie die *Lindera-App* zur Sturzprophylaxe dienen. Ziel des 2019 abgeschlossenen Verbundprojektes *Komo3D* war die Entwicklung eines innovativen, mobilen und kontextsensitiven 3D-Multisensorsystems, welches in Kombination mit einem Rollator als Gehhilfe nicht nur Halt gibt, sondern darüber hinaus auch vor Stolperfallen warnt und somit Stürze vermeidet. Die vorausschauende Orientierung wurde dabei in Echtzeit durch Kamerasensorik und KI-gestützte on-Board-Signalverarbeitung gelöst (Hochschule Pforzheim 2021). Während bei *Komo3D* der Rollator als klassisches Pflegehilfsmittel-Vehikel eine Funktionalitätssteigerung erfährt, ermittelt *Lindera*s Mobilitätsanalyse, kurz *SturzApp*, das individuelle Sturzrisiko einer Person anhand einer Gangbildanalyse und weiteren Risikofaktoren via Smartphone- oder Tablet-App. Dazu wird die Bewegung aus einer 30-sekündigen Videosequenz analysiert und mit einer Fragebogenauswertung kombiniert. Als Ergebnis stellt die App nach einem Zahlungseingang das individuelle Sturzrisiko in Form einer Wahrscheinlichkeitsskala dar und gibt darüber hinaus personalisierte Empfehlungen zur Sturzprävention. Die *SturzApp* wird bereits in den gängigen AppStores angeboten.

## **Wohnumfeldverbessernde Maßnahmen**

Während Pflegehilfsmittel laut Kamps (2009) mobile Gegenstände sind, die der häuslichen Pflege assistieren, solche erleichtern und damit zu einer selbstständigeren Lebensführung Pflegebedürftiger beitragen, sieht das SGB XI auch wohnumfeldverbessernde Maßnahmen vor, um Unfallgefahren zu reduzieren und die Lebensqualität Pflegebedürftiger bei möglichst langem Verbleib in der eigenen Häuslichkeit zu erhöhen. Mit diesem Begriff werden technische und bauliche Umbaumaßnahmen sowie fest verbaute technische Hilfsmittel zur Wohnungsanpassung assoziiert, welche auf die individuellen Bedürfnisse der funktional eingeschränkten Bewohner ausgerichtet sind. Die Pflegekasse sieht dafür finanzielle Zuschüsse vor, die im § 40 Abs. 4 Satz 2 SGB XI rechtlich festgeschrieben sind. Anspruchsberechtigt sind danach Pflegebedürftige mit anerkanntem Pflegegrad. Einen finanziellen Zuschuss durch die Pflegekasse erhalten Antragsteller für Maßnahmen, die mit beträchtlichen Eingriffen in die Bausubstanz der Wohnung verbunden sind, einen pflegerechten Umbau des Badezimmers vorsehen sowie durch Ein- und Umbau von Mobiliar bzw. fest verbauten technischen Hilfen

---

die Pflegesituation unterstützen. Dabei kann der Zuschuss zur Wohnungsanpassung in besonderen Situationen auch ein zweites Mal gewährt werden (BMG 2022e, GKV-Spitzenverband 2021, S. 3 ff.). Die Feststellung der Pflegebedürftigkeit sowie die Aussprache der Empfehlung zur Versorgung mit technischen Pflegehilfsmitteln oder baulichen Maßnahmen zur Anpassung des Wohnumfeldes obliegt dem medizinischen Dienst oder von der Pflegekasse beauftragten Gutachtern (GKV-Spitzenverband 2021, S. 5). Der Spitzenverband Bund der Krankenkassen führt das Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen nach § 78 Abs. 2a SGB XI (GKV-Spitzenverband 2023). Darin enthalten sind eine Reihe von Maßnahmen für bestimmte Wohnbereiche wie dem Eingangsbereich, dem gesamten Wohnbereich oder speziellen Bereichen, darunter das Bad, die Küche oder das Schlafzimmer, mit dem Ziel, die Versorgung gemäß § 40 Abs. 4 SGB XI sicherzustellen. Das 72 maßnahmenstarke Verzeichnis reicht dabei von der Installation von Rampen, Treppenliften, Aufzügen und Handläufen über Anpassungsmaßnahmen zur Wohnungsaufteilung und zur Schaffung von Bewegungsflächen, der Beseitigung von Rutsch- und Sturzgefahren, zum Abbau von Schwellen und weiteren Absenkungsarbeiten bis hin zur Anpassung von Tür- und Schließungsanlagen sowie Montage von speziellen Einstiegshilfen und unterfahrbarer KÜcheneinrichtung. 80% der Maßnahmen referenzieren laut Maßnahmenbeschreibung auf Hinweise zur Barrierefreiheit nach Definition der DIN 18040-2:2011-9 (DIN 2011) und heben damit die Wichtigkeit dieser wohnraumbezogenen Anforderung hervor.

Die Wohnungsanpassung wird gemäß dem BMFSFJ unterschieden in strukturelle und individuelle Anpassungsmaßnahmen. Im Unterschied zur individuellen Wohnungsanpassung werden bei strukturellen Maßnahmen die Wohnungen eines oder mehrerer Wohngebäude innerhalb eines Quartiers in Zusammenhang angepasst, um geeignete Rahmenbedingungen für ein Leben mit Beeinträchtigungen bis ins hohe Alter zu schaffen. In Deutschland überwiegt aufgrund des hohen Anteils an privatem Eigenheim- und Mietwohnungsbestand die individuelle Wohnungsanpassung (BMFSFJ 2002, S. 110). Dabei werden Barrieren und Mängel abgebaut und so die Wohnsituation im Hinblick auf die Anpassungserfordernisse der älteren Person durch bauliche Veränderungen optimiert (BMFSFJ 2002, S. 110). Die baulich-technischen Maßnahmen liegen dabei „*unterhalb der Schwelle einer strukturellen Maßnahme*“ (BMFSFJ 2008, S. 9 f.) und betreffen häufig das Badezimmer, wie auch die Ausführungen des BMG hinsichtlich finanzieller Zuschüsse zu wohnumfeldverbessernden Maßnahmen zeigen (vgl. BMG 2022e, GKV-Spitzenverband 2021, S. 3 ff.). Darüber hinaus sind alle Maßnahmen, die das „*Überwinden von Stufen und Schwellen erleichtern*“ (BMFSFJ 2008, S. 9 f.), von besonderer Bedeutung. Bei der individuellen Wohnraumanpassung, welche im Rahmen dieser Arbeit von Relevanz ist, kann präventiv oder reaktiv verfahren werden. Nach BMFSFJ dominiert in Deutschland die reaktive Form der Wohnungsanpassung, wobei auf den Abbau von Fähigkeiten eines älteren Menschen oder bei Unzulänglichkeit eines Wohnungsausstattungselements reagiert wird, um den Bewohnern ein erhöhtes Sicherheitsgefühl innerhalb des häuslichen Umfeldes zu geben. Allerdings kann durch präventive Anpassungsmaßnahmen das Gefahrenpotential frühzeitig reduziert und damit der Wohnkomfort älterer Menschen sowie jener der pflegenden Angehörigen nachhaltig erhöht werden. Ein vorausschauend angepasster Wohnraum ermöglicht dadurch einen Vorteil in mehrfacher Hinsicht. Die pflegebedürftige Person erhält so ein nachhaltiges Sicherheitsgefühl, was das Selbstvertrauen stärkt und letztlich die Selbstständigkeit erhöht. Darüber hinaus kann durch präventive Maßnahmen der Wohnraum sukzessive mitaltern und damit auch die ambulante Versorgungssituation bereits von Beginn an einen beidseitigen Effektivitätsgewinn erfahren. Nicht zuletzt wirkt eine vorausschauende Anpassung positiv auf das Verantwortungsgefühl der Angehörigen.

---

## 2.3 Zwischenfazit

Unstrittig ist, dass aufgrund des demografischen Wandels in den kommenden Jahrzehnten die Zahl älterer Menschen mit gesundheitlichem Unterstützungsbedarf stetig ansteigen wird. Gleichzeitig steht bereits heute fest, dass nicht genügend Pflegefachkräfte zur Verfügung stehen werden, um diese massiven Leistungsbedarfe zu bewältigen. Die Gesundheitspolitik sieht eine digitalisierte *Home Care* Gesundheitsversorgung als Ausweg aus dieser prekären Lage. Der Einsatz von AT wird seit Kurzem durch verschiedene Digitalisierungsbemühungen im Gesundheitswesen gefördert, mit der Zielsetzung, die Mobilität und Selbstständigkeit älterer Menschen mit physiologischen Einschränkungen beim *Ageing in Place* zu unterstützen. Beispiele dafür sind digitale AAL-Systeme und kürzlich auch kassenärztlich bezuschusste DiPA, deren pflegerischer Nutzung durch ein zertifiziertes Prüfverfahren vom BfArM nachgewiesen ist. Viele digitale Anwendungen und altersgerechte Hilfsmittel für die pflegerische Versorgung befinden sich aktuell noch in der Entwicklungs- und Testphase und bringen sozialvertragliche Schwierigkeiten auf den Weg, solche von reinen lebenskomfortsteigernden Produkten zu unterscheiden. Damit wird die Auswirkung des digitalen Pflegekonzepts erst in der Zukunft messbar.

Das häusliche Umfeld, welches ältere Menschen meist seit 30 Jahren und länger bewohnen (vgl. BMVBS 2011), hinkt in aller Regel dem heutigen bautechnischen Standard nach Barrierefreiheit hinterher. Viele Wohnungen sind nicht altersgerecht ausgestattet und weisen ein hohes Unfallgefahrenpotential auf, nicht zuletzt durch Mobilitätsbarrieren als eine der häufigsten Problemfelder. Der *Sturz im Alter* stellt dabei mit allen medizinischen Folgen den häufigsten Notfall im Haushalt dar. Um solchen zu vermeiden, existieren verschiedene Hilfsangebote, die mit Bezug zu den vorangegangenen Abschnitten in Abbildung 2.2, gruppiert in personen- und wohnumfeldzentriert, visualisiert werden. Neben der familiären und professionellen Unterstützung bieten altersgerechte Hilfsmittel und digitale Technologien ein Sammelsurium an personenzentrierten Lösungen für die individualisierten Formen physiologischer Einschränkungen, Wohnsituationen und baulicher Mobilitätseinschränkungen. Sie sind darauf ausgelegt vor Stolperfallen zu schützen, Schwellen, Stufen und Treppen zu überwinden oder allgemein durch Automation sowohl den Wahrnehmungsbereich zu optimieren als auch den Mobilitätsfluss aufrechtzuerhalten.

Im Allgemeinen helfen sie der mobilitätseingeschränkten Person situativ durch den Alltag oder reagieren eigenständig, wenn eine Notfallsituation eingetreten ist, aus der sich die Person selbst nicht befreien kann. Während diese Form der mobilen Unterstützung situativ und reaktiv ist, bieten wohnumfeldzentrierte Hilfsangebote die Möglichkeit, dem substantiellen Grund des Problems präventiv gegenüberzutreten und Gefahren durch bauliche Veränderungen zu beseitigen, bevor sie ein Problem im Alltag darstellen. Dabei stellt sich die Frage nach einer altersgerechten Wohnung meist erst dann, wenn eine unüberwindbare Barriere den Alltag belastet. Eine Antwort auf die Frage „*Ist meine Wohnung altersgerecht?*“ erhalten dabei Hilfsbedürftige oder deren Angehörige nur durch eine eigenständige und manuelle, meist messtechnische Prüfung aller Kriterien aus einem der verfügbaren Checklisten zur altersgerechten und damit barrierefreien Wohnung. Dabei finden sich im Netz paradoxerweise primär nicht-barrierefreie Checklisten zur Prüfung der Wohnungsausstattung, welche darüber hinaus den Anforderungskatalog der DIN 18040-2:2011-09 nicht umfassend abbilden (vgl. BMFSFJ, Baumann et al. o. J., Casando o. J., Müntinga 2021, Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen 2008, S. 38 ff.). An dieser Stelle soll auch

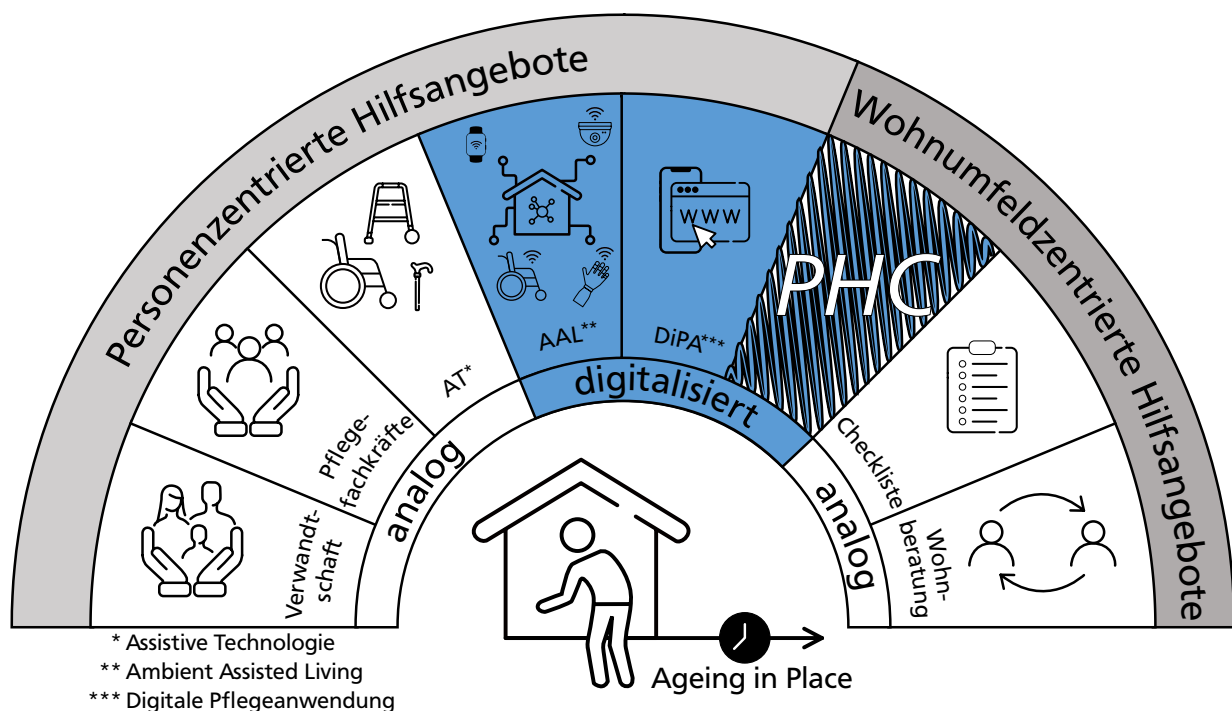


Abbildung 2.2: Übersicht der Versorgungslösungen bei innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen, gruppiert in personen- und wohnraumzentrierte Hilfsangebote, mit Schraffur zur Kennzeichnung der identifizierten Forschungslücke und dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Beitrag zur digitalen Transformation der Pflege im Gesundheitswesen: *Progressive Home Care (PHC)*

die Funktion der Wohnberatung nicht unerwähnt bleiben, welche sich als Koordinationsstelle zwischen privaten Ratsuchenden und relevanten öffentlichen Akteuren mit der Frage auseinandersetzt, welche individuellen Maßnahmen für einen langen Verbleib in der eigenen Wohnung getroffen und finanziert werden können (Niepel 2004, S. 1173 ff.). Ein Antrag auf Zuschüsse zur Finanzierung der wohnumfeldverbessernden Maßnahme kann nur bei anerkanntem Pflegegrad erfolgen. Darüber hinaus binden medizinische Gutachten, die für Leistungsentscheidungen notwendig sein können, die personellen Kapazitäten der Pflegekassen und damit des Gesundheitswesens (vgl. Ministerium für Arbeit, Soziales, Transformation und Digitalisierung o. J.). Während, wie in Abbildung 2.2 dargestellt, zwei Fünftel der *personenzentrierten Angebote* bereits unter dem Einfluss der Digitalisierung stehen, lässt sich festhalten, dass solcher auf das präventiv einsetzbare Vehikel der förderbaren Wohnungsanpassung bislang nicht zur Geltung gekommen ist und somit die pflegebedürftige Person auf die Unterstützung Dritter angewiesen ist (vgl. Gruppe *wohnumfeldzentrierte Hilfsangebote* in Abbildung 2.2). Folglich kann dieser Status quo als Forschungslücke identifiziert werden, die auch der GKV-Spitzenverband erkannt und daher eine „Empfehlung zu wohnumfeldverbessernden Maßnahmen unter besonderer Berücksichtigung digitaler Technologien beschlossen“ (GKV-Spitzenverband 2021, S. 3) hat. In der Literatur existieren mit Ausnahme einer studentisch entwickelten, webbasierten Plattform für barrierefreie Systeme (vgl. Mahourvand et al. 2014) keine digitalen Lösungen, um bei der altersgerechten Wohnraumanpassung zu unterstützen. An diesem Punkt setzt die hier

---

vorliegende Arbeit an und sieht die Entwicklung einer digitalen Anwendung zur automatisierten Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen vor, die in interoperablen Schulterschluss mit den altersgerechten Angeboten um DiPA tritt, um einer gesamtheitlichen, digitalen Unterstützungslandschaft für den *Gesundheitsstandort Haushalt* zuträglich zu sein. Dafür soll der Wohnraum samt seiner existierenden Ausstattung und Einrichtung vollständig digital erfasst (Forschungsaspekt 2) und anschließend in ein Wohnrauminformationsmodell (WIM) überführt werden (Forschungsaspekt 1), um darin den Wohnraum schlussendlich auf Altersgerechtigkeit zu bewerten. Die Wohnraumbewertung schließt dafür sowohl die regelbasierte Identifikation von Barrieren als auch nach Möglichkeit daraus automatisiert abgeleitete Handlungsempfehlungen für eine altersgerechte Wohnraumausstattung im Kontext individueller Anpassungsmaßnahmen ein, damit ein möglichst langer Verbleib in der eigenen Häuslichkeit vor dem Hintergrund des Sicherheitsaspekts der mobilitätseingeschränkten Personen erfolgen kann (Forschungsaspekt 3). Im weiteren Verlauf dieser Arbeit steht die Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen zwangsläufig in Verbindung mit der vorangegangenen Detektion innerhäuslicher Barrieren. Zur Realisierung dieser gesellschaftlich orientierten Fragestellung entwirft das anschließende Kapitel ein technisches Konzept.

---

## 3 Konzept zur automatisierten Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell

---

Die Entwicklung eines Konzepts zur automatisierten Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen im Wohnumfeld steht im Mittelpunkt dieses Kapitels und schließt damit in stringenter Weise an die gewonnene Erkenntnis des vorangegangenen Abschnitts an, wonach digitale Anwendungen und altersgerechte Hilfsmittel innerhäusliche Mobilitätsbarrieren lediglich reaktiv adressieren, dabei die substantielle Ursache jedoch gänzlich außer Acht lassen. Die Implementierung einer prototypischen Anwendung zur Bewertung der altersgerechten Nutzbarkeit durch die präventive Identifikation von und folglich Empfehlung zu wohnumfeldverbessernden Maßnahmen, welche digitale Technologien in besonderer Weise berücksichtigt, bezieht sich auf die Barrierefreiheit und Rollstuhlgerichtigkeit baulicher Anlagen nach § 4 BGG. Dazu wird mit Beginn des Kapitels die im Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen referenzierte DIN-Norm vorgestellt. Neben diesen geometrischen Rahmenbedingungen definiert das Kapitel weitere Anforderungen, die aus dem Zusammenhang des zweiten Kapitels geschlussfolgert werden und im Zusammenschluss mit potenziellen Hardware-Plattformen ein Spannungsfeld bilden, innerhalb dessen die Entwicklungsarbeit stattfindet. Ein Paradigma zur Modellierung von Bestandsgebäuden wird in diesem Kapitel ebenfalls thematisiert, wobei es aufgrund verschiedener Konflikte zu den definierten Anforderungen den Konzeptumfang begrenzt. Das Kapitel schließt mit einer implementierungsunabhängigen Spezifikation des Wohnrauminformationsmodells (WIMs), welches als erstes Software-Artefakt aus dieser Arbeit hervorgeht.

### 3.1 Geometrische Rahmenbedingungen an die barrierefreie Ausstattung von Wohnungen

Maßgeblich für die Konkretisierung baulicher Anforderungen im Sinne der Barrierefreiheit ist die DIN-Norm 18040. Diese positioniert sich vor dem Recht der Gleichheit nach Art. 3 Abs. 3 GG, nachdem „*niemand [...] wegen seiner Behinderung benachteiligt werden [darf]*“ sowie der Zielsetzung, dass „*bauliche Anlagen [...] für Menschen mit Behinderungen in der allgemein üblichen Weise und grundsätzlich ohne fremde Hilfe zugänglich und nutzbar sind*“ gemäß § 4 BGG. Die Norm stellt dar, unter welchen technischen Voraussetzungen bauliche Anlagen barrierefrei sind. Dabei ist sie

in drei Teile<sup>10</sup> gegliedert, wonach jeder Teil auf einen spezifischen Lebensraum beschränkt ist. Durch den Schwerpunkt dieser Studie auf innerhäusliche Mobilitätseinschränkungen steht die Norm DIN 18040 Teil 2: *Wohnungen* im Zentrum des Interesses, welche mit der Veröffentlichung im September 2011 (DIN 18040-2:2011-09) die bislang gültigen Normen DIN 18025-1 und -2 ersetzt und damit neue bautechnische Standards für den barrierefreien Wohnungsbau definiert. Sie beschreibt infrastrukturelle und einrichtungstechnische Mindestanforderungen für Neu- und Bestandsbauten mit barrierefreien Wohnungen im Sinne der § 50 Abs. 1 Musterbauordnung (MBO), wobei im Folgenden Neubauten ausgeklammert werden und lediglich die Bestandswohnungen aufgrund ihrer besonderen Bedeutung für ältere Menschen Gegenstand weiterer Ausführungen sind (vgl. Abschnitt 2.2.5).

Hinsichtlich der Ausstattung von Wohnungen definiert die DIN 18040-2:2011-09 technische Mindeststandards in Form geometrischer Flächen- und Raumanforderungen sowie Ausstattungsdetails, Sanitärausstattungen und weiteren technischen Qualitäten, wie z. B. automatisierte Öffnungs- und Schließsysteme, die den alltäglichen Bedürfnissen von Menschen mit sensorischen und motorischen Einschränkungen<sup>11</sup> gerecht werden. Zu Letzteren zählt damit faktisch auch der Personenkreis, der Mobilitätshilfen wie den Rollator oder Rollstuhl nutzt (DIN 2011, S. 3). Die Rahmenbedingungen an die Wohnungsausstattung nach DIN 18040-2:2011-09 berücksichtigen danach grundsätzlich auch die uneingeschränkte Nutzung mit dem Rollstuhl, wonach unterschieden wird zwischen *barrierefrei nutzbaren Wohnungen* (B-Standard) und *barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnungen* (R-Standard) (DIN 2011, S. 4, Selge 2017, S. 5).

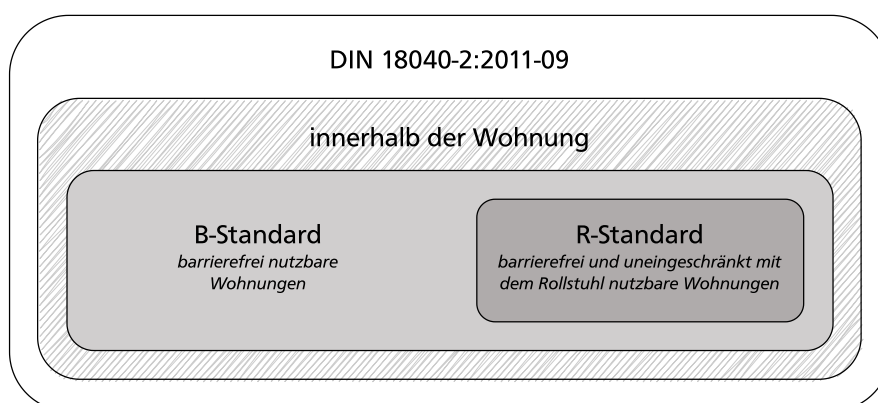


Abbildung 3.1: Schemadarstellung der baulichen Barrierefreiheit im *B-Standard* und *R-Standard* nach DIN 18040-2:2011-09

Die zwei bauordnungsrechtlich definierten Ausstattungsstandards führen häufig zu Missverständnissen und lassen Auslegungsspielräume zu, weil *barrierefrei* und *rollstuhlgerecht* im alltäglichen Sprachgebrauch synonym verwendet werden (BMVBS 2011, S. 25). Im Rahmen der DIN 18040-2:2011-09 werden diese Begrifflichkeiten weder gleichgesetzt, noch präziser ausdifferenziert. Vielmehr wird versucht, einen generisch-sinnvollen Mindeststandard zu beschreiben, der es ermöglicht,

<sup>10</sup>Teil 1: *Öffentlich zugängliche Gebäude*, Teil 2: *Wohnungen* und Teil 3: *Öffentlicher Verkehrs- und Freiraum*.

<sup>11</sup>Als sensorische Einschränkung bezeichnet die DIN 18040-2:2011-09 Einschränkungen des Hör- und Sehsinnes, während zu den motorischen Einschränkungen fehlendes Bewegungsvermögen, insbesondere der Arme, Beine und Hände, gehört (vgl. DIN 2011, S. 6).



---

den individualisierten Bedürfnissen eingeschränkter Menschen durch sich im Leben verändernde Wohnansprüche möglichst multifunktional gerecht zu werden (Selge 2017, S. 5). Eine Wohnung mit der Auszeichnung *R-Standard* vereint demnach höhere geometrische Bedingungen an den Wohnraum als eine konventionell geschnittene und ausgestattete Wohnung nach *B-Standard*. Demnach geht der bautechnische Ausstattungsstandard *rollstuhlgerechte Wohnung* über den der *barrierefreien Wohnung* hinaus (vgl. Abbildung 3.1). Im Wesentlichen unterscheiden sich beide Standards in den jeweiligen Anforderungen an die Bewegungsfläche und Ausstattungsgegenstände. Auf konkrete Beispiele bezüglich der Unterschiede wird an dieser Stelle verzichtet und lediglich der *R-Standard* als eine geometrisch-funktionale Rahmenbedingung zur automatisierten Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen im Wohnraum verwendet, da dieser aufgrund seiner Spezifität den *B-Standard* substituiert.

Die DIN 18040-2:2011-09 ist wie jede DIN-Norm nicht unmittelbar verpflichtend, sondern hat bis zur Aufnahme in die Listen der Technischen Baubestimmungen (TB) Empfehlungscharakter. Erst mit der Listung wird die Norm geltende Landesbauordnung mit verbindlicher Beachtung durch die behördliche Bauaufsicht. Die DIN 18040-2:2011-09 ist mit Stand Dezember 2022 in die TB aller Bundesländer aufgenommen (vgl. Buß 2022). Neben der DIN-Norm existieren weitere Richtlinienwerke zur Definition von Anforderungen an barrierefreie Lebensräume. Der Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) bietet in der Richtlinienreihe VDI 6008 *Barrierefreie Lebensräume* ebenfalls konkrete Planungshinweise, differenziert die nutzungsspezifischen Anforderungen für Anpassungen im privaten Wohnungsbau stärker und greift das normative Definitionsdefizit der DIN 18040-2:2011-09 auf (vgl. VDI 2012). Da keine Informationen über den Stand der Einführung der VDI 6008 in die TB der Bundesländer vorliegen, referenzieren die ersten Rahmenbedingungen dieser Arbeit auf die geometrischen Anforderungen zur *inneren Erschließung des Gebäudes* (DIN 18040-2:2011-09, Abschnitt 4.3), deren *Bedien- [...] und Ausstattungselemente* (DIN 18040-2:2011-09, Abschnitt 4.5) sowie den *Räumen in Wohnungen* (DIN 18040-2:2011-09, Abschnitt 5) nach dem *R-Standard*, wie sie auch im Maßnahmenkatalog des GKV-Spitzenverbands aufgegriffen werden (vgl. dazu Abschnitt 2.2.6 und das Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen (§ 78 Abs. 2a SGB XI) des GKV-Spitzenverbandes).

Die Abschnitte 4.3, 4.5 und 5 der DIN 18040-2:2011-09 definieren auf über 20 Seiten in verbaler und illustrierter Form wesentliche bautechnische und untereinander verweisende Voraussetzungen für Wohnungen sowie deren Ausstattungselemente, um mobilitätseingeschränkten Menschen alltägliche Prozesse, wie z. B. die Zugänglichkeit zu Räumlichkeiten oder Erreichbarkeit von Bedienelementen, zu ermöglichen. Dabei werden eine Reihe von Voraussetzungen sehr ausführlich und konkret behandelt, wie die Häufigkeit der Nennung *Bewegungsfläche* sowie der Umfang des Abschnitts 5.5 *Sanitärräume* zeigt. Gleichzeitig werden einzelne Aspekte lediglich oberflächlich beschrieben und gewährleisten demnach Interpretationsspielraum hinsichtlich geometrischer Bedingungen. Um die Komplexität der kreuzverweisenden Anforderungen aus den genannten Abschnitten zu reduzieren, werden im Rahmen dieser Arbeit sämtliche konkret beschriebenen Bedingungen gemäß der DIN-Norm gesammelt und kategorisiert. Die daraus resultierenden Gruppen *Allgemeine Grundsätze*, *Bewegungs- und Freiflächen*, *Türen*, *Sanitärbereich* und *Sonstiges* fassen die Gesamtheit der geometrischen Rahmenbedingungen in aggregierter Form zusammen (vgl. Tabelle 3.1). Dabei entfällt der Abschnitt 5.6 *Freisitz* ebenso wie der Abschnitt 4.3.7 *Rampen* aufgrund seiner fehlenden Beziehung zur Innerhäuslichkeit. Ferner werden Spezifikationen hinsichtlich *Stützvorrichtungen* im

Sanitärbereich (Teilabschnitt 5.5.4) ausgeschlossen, da diese mit einer Reihe von kausalen Bedingungen verbunden und damit nicht eindeutig zu identifizieren sind. Der Zusammenhang zwischen diversen Raumarten und den *Bewegungsflächen* (vgl. Abschnitte 4.3.3.4, 4.3.7, 4.3.8, 4.5.2, 5.2, 5.4 und 5.5.2) wird aufgelöst und im Gesamtkontext des innerhäuslichen Wohnbereichs betrachtet. Die Spezifikationen zu Bedienelementen schließen im Folgenden auch die Interaktion mit nicht-technischer Wohnausstattung wie z. B. Möbelstücke ein. Aus der Tabelle 3.1 gehen demnach fünf Kategorien mit 19 geometrischen Anforderungen hervor, welche den prüfbareren Bedingungsrahmen an die zu entwickelnde Anwendung aufspannen. Teilmengen dieser Anforderungen finden sich in früheren Publikationen wieder (Pläß; Prudhomme et al. 2021, S. 211, Pläß; Emrich et al. 2021, S. 4).

Tabelle 3.1: Gesamtheit der aus den geometrischen Voraussetzungen an die innere Erschließung eines Gebäudes sowie dessen Bedienelemente und Wohnungen nach den Abschnitten 4.3, 4.4 und 5 der DIN 18040-2:2011-09 abgeleiteten Rahmenbedingungen in aggregierter und kategorisierter Darstellung

Kategorie		
R-Nr.	Beschreibung nach DIN 18040-2	Geometrische Anforderung
Allgemeine Grundsätze		
1.1	Stufen- und schwellenlose Zugänglichkeit	Türanschläge, Schwellen $\leq 2$ cm
1.2	Längsneigung von Flurflächen	$\leq 3\%$
1.3	Abstellfläche für Rollstuhl	$\geq 180$ cm $\times$ 150 cm
Bewegungs- und Freiflächen		
2.1	im gesamten innerhäuslichen Wohnbereich	$\geq 150$ cm $\times$ 150 cm*
2.2	bei seitlicher Anfahrt an Bedienelemente	$\geq 150$ cm $\times$ 120 cm
2.3	vor Rollstuhlabbstellplatz	$\geq 150$ cm $\times$ 150 cm**
Türen		
3.1	Lichte Breite	$\geq 90$ cm
3.2	Lichte Höhe über Oberfläche Fertigfußboden (OFF)	$\geq 205$ cm
3.3	Höhe Türspion über OFF	120 cm
Sanitärbereich		
4.1	Niveaugleicher Duschplatz	keine Schwelle oder Steigung
4.2	Höhe WC Becken über OFF	$46$ cm $\leq \chi_{4.2} \leq 48$ cm
4.3	Freifläche neben WC Becken (Zugangseite)	$\geq 90$ cm $\times$ 70 cm
4.4	Höhe Waschplatzvorderkante über OFF	maximal 80 cm
4.5	Unterfahrbarkeit von Waschtischvorrichtungen	$\geq 55$ cm
4.6	Nachrüstmöglichkeit von Duschsitz	$46$ cm $\leq \chi_{4.6} \leq 48$ cm Sitzhöhe
Sonstiges		
5.1	Greifhöhe von Fenstern und Türen über OFF	$85$ cm $\leq \chi_{5.1} \leq 105$ cm
5.2	Öffnungsrichtung von Fenstern und Türen	innenräumlich
5.3	Höhe von Bedienelementen über OFF	85 cm
5.4	Unterfahrbarkeit von Ausstattungselementen	$\geq 15$ cm

\* Flächenüberlagerung zulässig, \*\* — unzulässig

---

## 3.2 Anforderungsanalyse für die Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen

Mit dem Ziel dieser Arbeit, mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen in ausgestatteten und belebten Wohnräumen automatisch zu identifizieren und daraus resultierend individuelle Handlungsempfehlungen auszusprechen, sind eine Reihe von Anforderungen aus unterschiedlichen Perspektiven verbunden. Die geometrischen Rahmenbedingungen, abgeleitet aus der DIN 18040-2:2011-09, liefert Abschnitt 3.1. Diese gelten als verbindliches geometrisches Regelwerk für das Vokabular einer altersgerecht, barrierefrei und rollstuhlgerecht ausgestatteten Wohnung, in welcher auch mit motorischen Einschränkungen selbstständig, gefahrenfrei und möglichst lang verblieben werden kann. Darüber hinaus ist es von Bedeutung, die Anforderungen aus Sicht der potenziellen Nutzer und an das prototypisch zu entwickelnde System selbst zu spezifizieren, wobei an dieser Stelle darauf hingewiesen wird, dass die Nutzeranforderungen nicht aus Fachgesprächen resultieren, sondern eigeninitiativ geschlussfolgert und partiell durch telefonische Fachgespräche belegt werden. Die Aufgabe der Anforderungsanalyse nehmen sich die nachfolgenden Abschnitte an, indem sie solche definieren und in standardisierter Notation nach OMG Unified Modeling Language (OMG UML)<sup>12</sup> bzw. OMG Business Process Model and Notation (OMG BPMN)<sup>13</sup> abbilden.

### 3.2.1 Nutzeranforderungen

Dieser Abschnitt der Anforderungsanalyse beschränkt sich auf die Anforderungen und Funktionalitäten aus Sicht der potenziellen Nutzer. Aus der Analyse des thematischen Status Quo (vgl. Abschnitt 2.3) gehen drei Nutzergruppen hervor, die einen qualitativen Mehrwert durch die Entwicklung einer auf digitalen Technologien basierenden Anwendung zur automatisierten Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen erfahren. Zur Zielgruppe gehören demnach vorrangig die motorisch eingeschränkten Älteren, Hilfe- und Pflegebedürftige sowie Menschen mit körperlichen Behinderungen. Darüber hinaus zählen hierzu deren pflegende Angehörige sowie sämtliche an einer vorbeugenden Wohnraumverbesserungsmaßnahme interessierte Personen. Diese Nutzer werden gesamtheitlich als **Klient** bezeichnet. Darüber hinaus steht der Akteur **Wohnberatung** im Zusammenhang mit der barrierefreien und altersgerechten Wohnanpassung, sowie der medizinische Dienst bzw. externe Gutachter des Akteurs **Pflegekasse**, welche die Gutachten für Leistungsentscheidungen gemäß dem Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen (§ 78 Abs. 2a SGB XI) anfertigen. Ambulante Pflegefachkräfte profitieren ebenfalls von einer altersgerecht ausgestatteten Wohnung, indem die körperliche Belastung bei pflegerischen Tätigkeiten reduziert und so die Qualität der Versorgung verbessert wird. Dabei stehen sie in indirektem Bezug zu innerhäuslichen Verbesserungsmaßnahmen und werden folglich nicht als Nutzer gewertet.

---

<sup>12</sup>Die Object Management Group (OMG) spezifiziert mit der UML (Version 2) eine grafische und einheitliche Modellierungssprache für die Analyse, den Entwurf und die Implementierung softwarebasierter Systeme und Prozesse, die seit 2012 im ISO/IEC 19505 Standard aufgegangen ist (OMG 2017).

<sup>13</sup>Die BPMN (Version 2) ist eine von der OMG eingeführte, grafische Spezifikationssprache, welche seit 2013 als ISO/IEC 19510 geführt wird und damit als de-facto Standard zur visuellen Prozessmodellierung gilt (OMG 2013).

---

## Klient

Der Klient ist durch eine stark heterogene Menge an Menschen aus den verschiedensten sozialen Schichten und Altersgruppen ausgezeichnet, wobei der prozentuale Anteil an Älteren dabei statistisch gesehen überwiegt (vgl. BMVBS 2011, S. 24). Aufgrund des sehr breiten und versatilen Bevölkerungsquerschnitts ist es nicht möglich, eine belastbare Aussage zu relevanten Kenntnissen und Kompetenzfeldern zu treffen, wie z. B. über die allgemeine Kenntnis hinsichtlich des Angebots von Wohnberatungen, die korrekte sprachliche Interpretation der überwiegend in deutscher Sprache vorliegenden Checklisten, die technisch angemessene Umsetzung der Prüfregelein im Wohnraum oder die bürokratischen Tätigkeiten zur Leistungsbeantragung bei den Pflegekassen. Bezüglich des Aspekts der digitalen Kompetenz hingegen spielt laut einer Studie der Universität Siegen das Alter keine Rolle. Danach haben jüngere Generationen „*nicht per se eine deutlich höhere digitale Kompetenz als ältere Menschen*“ (Schuhen 2020), obgleich Nutzer über 50 Jahren bei technischen Problemen häufiger fremde Hilfe benötigen (Göbl et al. 2022, S. 39). Die Akzeptanz und Aufgeschlossenheit moderner Technik in der Pflege stellt auch Rösler et al. (2018) fest, wodurch die Technikaffinität generationenübergreifend als kleinstes gemeinsames Vielfaches betrachtet werden kann. Angesichts dessen stellen sich die Anforderungen der Nutzergruppe **Klient** wie nachfolgend als *User Story*<sup>14</sup> formuliert dar, wobei der Begriff *Barriere* mit *innerhäuslichen Mobilitätseinschränkungen* gleichgesetzt ist.

Als **Klient** möchte ich ...

- meine Wohnung zeiteffizient digitalisieren, um sie auf Altersgerechtigkeit<sup>15</sup> zu prüfen.
- digitale Anwendungen nutzen, um Barrieren niederschwellig zu identifizieren.
- sämtliche Barrieren automatisiert und ohne Kenntnis geometrischer Prüfregelein identifizieren, um nicht auf Fachkräfte angewiesen zu sein.
- eine verständliche Zusammenfassung (Eignungsbericht) sämtlicher identifizierter Barrieren erhalten, um Anpassungen selbstständig tätigen zu können.
- den Barriereidentifikationsvorgang beliebig oft wiederholen, um getroffene Anpassungsmaßnahmen direkt verifizieren zu können.
- die identifizierten Barrieren visualisieren und den Eignungsbericht exportieren, um sie zur Beantragung von Leistungen der Pflegekasse verwenden zu können.

## Wohnberatung

Die Wohnberatung gilt als ein neuer Akteur innerhalb des komplexen Marktgefüges zur Förderung eines langen Verbleibs in der eigenen Häuslichkeit. Die vorangegangenen Kapitel veranschaulichen die Vielschichtigkeit und Komplexität von altersgerechten Hilfsmitteln, digitalen Anwendungen und individuellen Wohnungsanpassungsmaßnahmen, weshalb den Akteuren der Wohnberatung

---

<sup>14</sup>*User Stories* (Anwendererzählungen) beschreiben informell und im allgemeinen Sprachgebrauch Anforderungen an Software aus Sicht einer spezifischen Endnutzergruppe (vgl. Cohn 2004, S. 4).

<sup>15</sup>Altersgerechtigkeit schließt dabei barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbare Wohnungen ein.

---

eine wichtige Rolle zugesprochen wird. Das Aufgabengebiet umfasst dabei den gesamten Prozess der Wohnungsanpassung, angefangen bei der Klärung individueller Bedarfe über „produktneutrale Beratungen“ (Joo 2018, S. 111) bis hin zur Unterstützung bei der Auswahl und Finanzierung wirkungsvoller Maßnahmen, die im sozialpolitischen Einklang mit dem Konzept *Ageing in Place* stehen. Hinter dem Aufgabenfeld des Wohnberaters steht in Deutschland keine Berufsausbildung, sondern eine zertifizierte Fort- und Weiterbildung, die an Menschen aus unterschiedlichsten Professionen, darunter Kommunalmitarbeiter, Architekten, Bauingenieure, Sozialarbeiter sowie Freiberufler, gerichtet ist (vgl. Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungsanpassung e.V. o. J.(b)). Nach Listung der Bundesarbeitsgemeinschaft (BAG) Wohnungsanpassung haben sich deutschlandweit über 250 Wohnberatungsstellen zusammengeschlossen (Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungsanpassung e.V. o. J.(a)), dessen Personal bei der klientenzentrierten Bedarfsanalyse ebenfalls von einer digitalen Anwendung zur automatisierten Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen profitieren kann. Die folgenden Anforderungen seitens des Akteurs der **Wohnberatung** sind durch Rücksprache mit der Landesberatungsstelle *Barrierefrei Bauen und Wohnen*<sup>16</sup> verifiziert worden.

Als **Wohnberatung** möchte ich ...

- technische Unterstützung erhalten, um den Wohnraumanpassungsbedarf zu bewältigen.
- digitale Anwendungen nutzen, um einheitliche Qualitätsstandards zu garantieren.
- Normen und Gesetze zur Barrierefreiheit digital abrufen können, um im Rahmen von Wohnraumbewertungen über den aktuellen Stand der geometrischen Anforderungen zu verfügen.
- eine qualitätsgesicherte Beratung durchführen, ohne die Wohnung des Klienten zu betreten.
- eine digitalisierte Wohnung des Klienten vorhalten, um diesen auch hinsichtlich einer späteren Erweiterung der Anpassungsmaßnahme zu beraten.

## **Pflegekasse**

Die Sicht des letzten Nutzers wird durch die Pflegekasse definiert. Ihr obliegt die Prüfung von Leistungsforderungen für wohnumfeldverbessernde Maßnahmen. Für eine finanzielle Bezuschussung von Wohnraumanpassungsmaßnahmen aus dem Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen nach § 78 Abs. 2a SGB XI müssen Kriterien erfüllt sein, die im § 40 SGB XI festgelegt sind. Grundvoraussetzung ist dabei ein durch die Pflegekasse anerkannter Pflegegrad. Darüber hinaus müssen die entsprechenden Maßnahmen entweder (a) die häusliche Pflege grundsätzlich ermöglichen, (b) die häusliche Pflege erheblich erleichtern und somit die Belastung für Pflegebedürftige bzw. das Pflegefachpersonal verringern oder (c) eine selbstständigere Lebensführung ermöglichen. Sobald eine der drei Voraussetzungen als erfüllt gilt, steht dem Leistungsempfänger eine finanzielle Unterstützung zu. Die Prüfung der Kriterien steht folglich in Zusammenhang mit der beantragten Maßnahme, welche wiederum die Ortsbegehung erforderlich machen kann (vgl. Maßnahme *Abbau von Türschwellen*,

---

<sup>16</sup>Die Landesberatungsstelle *Barrierefrei Bauen und Wohnen* berät seit 1995 in ganz Rheinland-Pfalz zu den Themen des barrierefreien Bauens und Wohnens sowie zur Wohnraumverbesserung durch Umbau und Modernisierung. Dabei wird die Beratungsstelle mit Sitz in Mainz von der Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz e. V. getragen und vom rheinland-pfälzischen Ministerium für Arbeit, Soziales, Transformation und Digitalisierung (MASTD) gefördert (Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz o. J.).

Maßnahmennummer 01.05.011 im Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen nach § 78 Abs. 2a SGB XI (GKV-Spitzenverband 2023)). Anlässlich vorkommender in-situ Prüfungen kann eine digitale Anwendung zur Identifikation von Barrieren laut der DIN 18040-2:2011-09 personelle Kapazitäten entbinden und so zu einer nominalen Arbeitserleichterung beitragen.

Als **Pflegekasse** möchte ich ...

- automatisierte Empfehlungen zur Prüfung eines Leistungsantrags erhalten, um den Bearbeitungsvorgang zu beschleunigen.
- auf eine digitalisierte Wohnung zurückgreifen, um die Prüfung von Leistungsanträgen zu verifizieren.
- digitale Unterstützung erfahren, um Leistungsansprüche vor Ort zu prüfen.

Die Sichten der potenziellen Nutzergruppen spezifizieren die verschiedenartigen, funktionalen Anforderungen an die zu entwickelnde Anwendung. Aufbauend auf den formulierten *User Stories* wird das *Use Case Diagramm*<sup>17</sup> abgeleitet und in standardisierter Notation visualisiert.

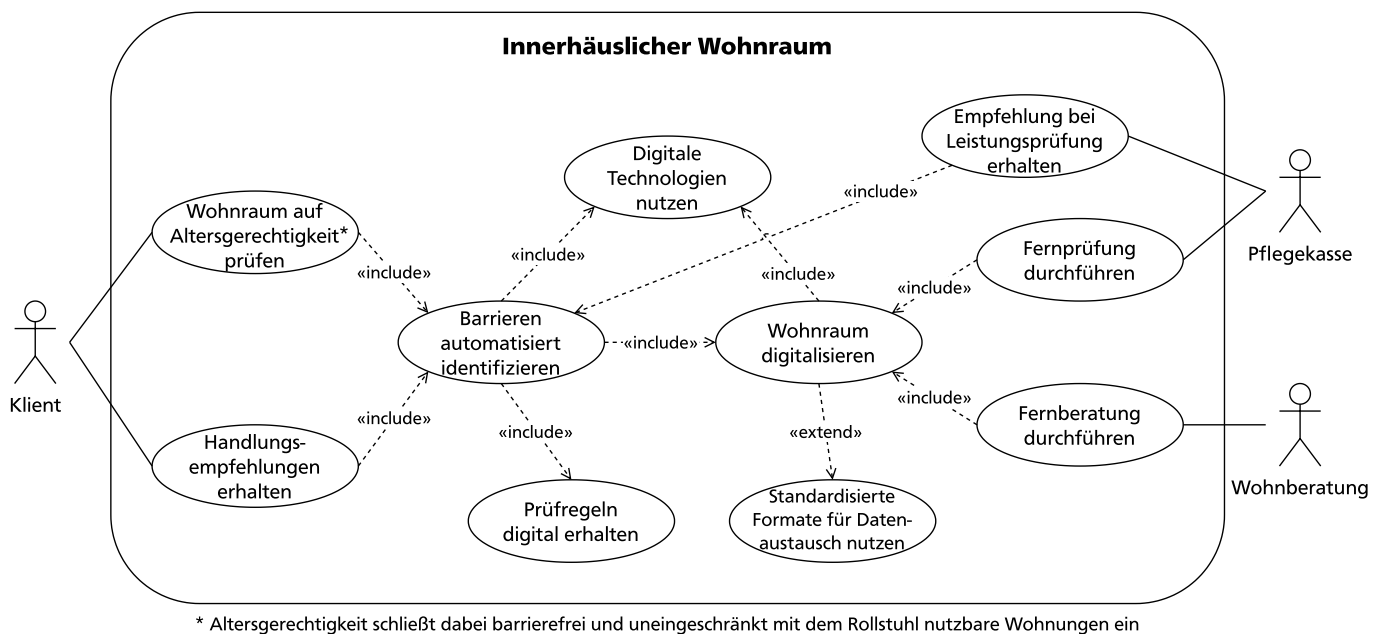


Abbildung 3.2: Use Case Diagramm zu den funktionalen Nutzeranforderungen, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

In Abbildung 3.2 werden die Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Nutzeranforderungen veranschaulicht. Diesbezüglich stehen die *Digitalisierung des Wohnraums* und die *automatisierte Identifikation von Barrieren* in wechselseitiger und geschlossener Beziehung zueinander

<sup>17</sup>Das Use Case Diagramm (Anwendungsfalldiagramm) ist ein grafischer Diagrammtypus, welche die Abhängigkeiten und Beziehungen zwischen Use Cases und Akteuren in standardisierter Form nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML darstellt.

---

sowie im Zentrum der nutzerseitigen Anforderungen. Gleichzeitig referenzieren die Nutzeranforderungen *Prüfung der Altersgerechtigkeit des Wohnraums*, sowie *Fernberatung* und *-prüfung* auf diese organische Einheit. Die Prüfung auf Altersgerechtigkeit erfolgt dabei im Kontext des *R-Standards* und schließt dabei barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbare Wohnungen ein. Mit der Anforderung, Barrieren automatisch zu identifizieren, klientseitige Handlungsempfehlungen zu geben oder selbige bei der Prüfung eines Leistungsantrags auszusprechen, geht auch die Implementierung sämtlicher geometrischer Prüfregele (vgl. Tabelle 3.1) einher, welche die prototypische Anwendung leisten muss. Darüber hinaus sind standardisierte Datenformate für den zweckmäßigen Austausch des digitalisierten und geprüften Wohnraumes zur Erfüllung einer Teilmenge der zwischen einander korrespondierend aufgeführten Nutzeranforderungen erforderlich.

Über die spezifischen Anforderungen hinaus können den identifizierten Nutzergruppen unterschiedlich hohe technische Kompetenzen eingeräumt werden, welche wiederum eine Auswirkung auf die Bedienbarkeit der prototypisch zu entwickelnden Anwendung haben. Folglich lassen sich diesen Gruppen drei allgemeine Nutzungsszenarien zuordnen, auf welche im späteren Verlauf dieser Arbeit kontextbezogen referenziert wird. Nutzungsszenario 1 adressiert dabei technisch nicht ausgebildete Anwender und erfordert damit einen maximalen Grad an Automatisierung. Im Vergleich dazu geht Nutzungsszenario 2 von technisch versierten Anwendern mit einer höheren Digitalkompetenz aus, während Nutzungsszenario 3 noch darüber hinausgeht und die im Folgenden vorgestellte Anwendung als Dienstleistungen anbietet oder in übergeordnete und akteursunabhängige, digitale Wertschöpfungsketten, z. B. im Kontext von Ambient Assisted Living (AAL)-Systemen, Digitalen Gesundheits- (DiGA) oder Digitalen Pflegeanwendungen (DiPA), integriert.

### 3.2.2 Systemanforderungen

Über die funktionalen Nutzeranforderungen hinaus existieren qualitative Systemanforderungen, welche die nicht-funktionalen Eigenschaften der prototypisch zu entwickelnden Anwendung beschreiben. Die Spezifikation von qualitativen Anforderungen an das prototypische System kann als Erweiterung der Nutzeranforderungen (vgl. Abschnitt 3.2.1) betrachtet werden. Systemanforderungen dienen dabei als Ausgangspunkt für das spätere Systemdesign. Wie eingangs erwähnt, folgt diese Arbeit einem explorativen Forschungsdesign, mit der Konsequenz, dass keine Stakeholder<sup>18</sup>-Anforderungen im Sinne eines klassischen Lastenheftes vorliegen. Aus diesem Grund werden andere Quellen zur Definition von Systemanforderungen herangezogen.

Die Normenreihe ISO/IEC 25000, auch bekannt als *System and Software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE)*, definiert einen fünfteiligen Rahmen für die Bewertung der Qualität von Softwareprodukten. Das Qualitätsmodell (*Software Product Quality*) stellt einen Eckpfeiler von *SQuaRE* dar und umfasst gemäß der ISO/IEC 25010 acht Qualitätsmerkmale (ISO 2011). Anhand dieser wird beurteilt, ob die funktionale Eignung der Anwendung unter Berücksichtigung nicht-funktionaler Eigenschaften gegeben ist. Die ISO/IEC 25010 bemisst den Grad der Systemqualität, um die angegebenen und implizierten Bedürfnisse der Nutzergruppen gerecht zu werden, anhand der folgenden Qualitätsmerkmale: *Funktionale Eignung*, *Leistungsfähigkeit*, *Kompatibilität*, *Gebrauchstauglichkeit*,

---

<sup>18</sup>Gemäß der Qualitätsmanagementnorm ISO 10006 sind Stakeholder eines Projekts alle Personen, die mit dem Projekt unmittelbar in Beziehung stehen.

---

*Zuverlässigkeit, Sicherheit, Wartbarkeit und Portabilität.* Für diese Arbeit relevant sind darüber hinaus weitere Qualitätsanforderungen aus dem thematischen Fachbereich von Gesundheits- und Pflegeanwendungen. Hierzu werden die im Abschnitt 2.2.3 aufgelisteten Anforderungen an DiGA und DiPA zusammen mit der Bewertungsmatrix nach Marckmann (2016) als Leitmotiv verwendet, um möglichst vollständige und thematisch geleitete Schlüsselanforderungen für die prototypische Entwicklung einer Anwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen zu definieren. Da keine geregelte Anforderungsstruktur für AAL-Systeme vorliegt, bleiben diese hierbei unerwähnt. Entsprechende Anforderungen gehen in den acht Qualitätsmerkmalen der ISO/IEC 25010 auf.

Mit dem Ziel, das Gefahrenpotenzial in privaten Haushalten nachhaltig zu reduzieren, geht die präventive Identifikation von Barrieren im innerhäuslichen Wohnumfeld einher. Durch eine digitale Anwendung soll diese bislang manuell ausgeführte Tätigkeit automatisiert werden. Gleichzeitig soll aufgezeigt werden, wie ein technischer geleiteter Ansatz aussehen kann, um diesen Automatismus in die gesellschaftliche Breite zu streuen und damit in letzter Konsequenz sowohl die Möglichkeit zum längeren Verbleib in der eigenen Häuslichkeit zu maximieren, als auch Effizienzgewinne und Einsparpotenziale für das Gesundheitssystem zu erwirken. Die anschließend beschriebenen, qualitativen Schlüsselanforderungen gehen aus den im oberen Absatz ausgeführten Quellen hervor und definieren für die Arbeit weitere wichtige Randbedingungen, welche kanalisierenden Einfluss auf die technischen Entwicklungsschritte der nachfolgenden Kapitel nehmen. Angesichts der Intention, eine prototypische Anwendung als technischen Realisierungsnachweis der beschriebenen Zielsetzung zu entwerfen, erfahren die ersten beiden Anforderungsmerkmale eine Priorisierung, welche sich auch bei der Validierung widerspiegelt.

**Funktionale Eignung:** Dieses Anforderungsmerkmal definiert den Grad systemisch bereitgestellten Funktionalitäten, welche die nutzerseitig implizierten Anforderungen unter bestimmten Nutzungsbedingungen erfüllen. Unterschieden werden die funktionalen Teilmerkmalskomponenten *Vollständigkeit, Korrektheit* und *Angemessenheit* (vgl. ISO 2011). Dabei zielt die *Vollständigkeit* auf den Umfang der nutzerdefinierten Funktionalitäten ab, die *Korrektheit* auf die Richtigkeit der Ergebnisse im Kontext der erforderlichen Genauigkeiten und die *Angemessenheit* auf den Grad, in dem die Funktionen die Erfüllung bestimmter Aufgaben erleichtern. Im Rahmen der prototypischen Entwicklung einer Anwendung, die innerhäusliche Barrieren identifiziert, gilt es, einen qualitativ vollständigen und quantitativ hinreichend spezifizierten Regelkatalog aufzustellen, welcher sich vor der Gesamtheit der Nutzeranforderungen positioniert (vgl. Abbildung 3.2). Technische Mindestanforderungen an die grundsätzliche Ausstattung von Wohnungen, die barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbar sind, definiert das Standardwerk der DIN 18040-2:2011-09 und wirkt damit auf die nutzerseitigen Anforderungen, welche ihre Wohnraumausstattung bzw. Unterstützungsleistungen daran ausrichten. Die geometrischen Rahmenbedingungen dieser Norm sind in Tabelle 3.1 zusammengefasst und adressieren folglich die Teilmerkmale der funktionalen *Vollständigkeit* und *Korrektheit*. Ein Anwendungsprototyp ist demnach funktional geeignet, wenn er diesen Regelkatalog vollständig implementiert sowie sicherstellt, dass dessen Ergebnisse im Rahmen der erforderlichen Genauigkeiten auswertbar sind. Darüber hinaus ist es notwendig, die Regelprüfung zu automatisieren und die Ergebnisse angemessen aufzubereiten.

**Leistungsfähigkeit:** Dieses Merkmal stellt den Leistungsbedarf der unter den angegebenen Nutzungsbedingungen verwendeten Ressourcen hinsichtlich zeitlicher und technischer Aspekte dar. Die



Tabelle 3.2: Liste der an den Prototypen zur automatisierten Identifikation von Wohnraumverbesserungsmaßnahmen gestellten systemischen Qualitätsanforderungen nach ISO/IEC 25010

QA-Nr.	Anforderungsmerkmal	Beschreibung des Anforderungsmerkmals
1	Funktionale Eignung	Eine funktionale Eignung ist gegeben, wenn die Anwendung einen standardisierten Regelkatalog implementiert und die Richtigkeit der Ergebnisse sicherstellt.
2	Leistungsfähigkeit	Die Leistungsfähigkeit ist gegeben, wenn die Anwendung Verbesserungsmaßnahmen in der Größenordnung eines durchschnittlichen Haushalts möglichst unmittelbar identifiziert.
3	Kompatibilität	Die Anwendung ist mit digitalen Technologien kompatibel und inkorporiert standardisierte Datenformate zwecks Datenaustausch.
4	Gebrauchstauglichkeit	Die Gebrauchstauglichkeit ist gegeben, wenn die Anwendung schnell erlernbar ist und eine bezüglich der Nutzergruppe angepasste, fehlerverbeugende Interaktionsfähigkeit besitzt.
5	Zuverlässigkeit	Die Zuverlässigkeit der Prototyp-Anwendung ist auf den Nachweis der Funktionalitäten beschränkt.
6	Sicherheit	Die Anwendung berücksichtigt den Aspekt des besonderen Schutzbedarfs personenbezogener Daten.
7	Wartbarkeit	Die Entwicklungsarbeit erfolgt unter Berücksichtigung der Grundsätze der Modularität und Modifizierbarkeit.
8	Portabilität	Die Portabilität ist gegeben, wenn die Anwendung agnostisch installier- und ausführbar ist.

*Leistungsfähigkeit* beschreibt, wie effizient das System in Relation zu dessen Ressourcenverbrauch arbeitet und ob es zur Erreichung der funktionalen Zielsetzung Ressourcen schont. Während der ressourcenbetreffende Duktus aufgrund des prototypischen Entwicklungszwecks eine untergeordnete Rolle spielt, stellt sich die Auswahl technischer Komponenten, sowohl für die digitale Datenerfassung als auch automatisierte -verarbeitung, als relevant dar. Insbesondere, da die zu entwickelnde Anwendung darauf abzielt, innerhäusliche Barrieren im Sinne einer individuellen Wohnraumanpassung und anhand eines standardisierten Regelkatalogs automatisiert zu identifizieren. Wenngleich die Regeln im Allgemeinen auf eine einzelne Räumlichkeit, wie z. B. das Bade-, Schlaf- oder Wohnzimmer referenzieren, sollen Hard- und Softwarekomponenten der Anwendung in der Lage sein, Daten vom Umfang eines durchschnittlich großen Haushalts in-situ zu erfassen und Barrieren möglichst als unmittelbares Ergebnis zu identifizieren, um danach den Wohnraum zu bewerten.

**Kompatibilität:** Ein System, welches Informationen mit anderen Systemen austauschen kann oder in einer geteilten Hard- und Softwareumgebung seine Funktionen adäquat ausführen kann, wird im Sinne der ISO/IEC 25010 als *kompatibel* bezeichnet. Das Merkmal der *Kompatibilität* differenziert zwischen Anwendungen, die ihre Funktionen effizient ausführen können, während sie eine gemeinsame Plattform teilen (*Koexistenz*) und Anwendungen, die Informationen untereinander austauschen

---

können (*Interoperabilität*). Beide Teilmerkmale sind im Kontext der hier vorgestellten Arbeit und Zielsetzung hinsichtlich des geforderten Einsatzes digitaler Technologien relevant, da die zu entwickelnde Anwendung zweierlei Aufgaben erfüllen muss: die Datenerfassung zur Digitalisierung des Wohnraumes und die Identifikation von Barrieren innerhalb dessen (vgl. Abbildung 3.2). Folglich kann die prototypische Anwendung auch aus zwei getrennten Systemen bestehen, solange diese im Sinne der Kompatibilität das definierte Ziel lösen (vgl. Forschungsaspekte 2–3). Damit geht auch die Verwendung standardisierter und folglich interoperabel nutzbarer Austauschformate einher, welche es ermöglichen, die gewonnenen Informationen anderen Systemen oder Akteuren zugänglich zu machen. Diese *Interoperabilität*, welche auch im § 7 Digitale Pflegeanwendungen-Verordnung (DiPAV) thematisiert und seitens des *Sachverständigenrats zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen* gefordert wird, soll damit einer ganzheitlichen digitalen Vernetzung des Gesundheitsmarktes zuträglich sein, eine Verbesserung der Versorgungsqualität und die Erhöhung der Patientensicherheit herbeiführen (vgl. Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen 2021, S. 334, Groß et al. 2018, S. 349). Demzufolge steht die übergeordnete Zielsetzung dieser Arbeit in enger Verbindung mit einer technisch kompatiblen und interoperabel nutzbaren, digitalen Anwendung.

**Gebrauchstauglichkeit:** Das Anforderungsmerkmal der *Gebrauchstauglichkeit* bemisst den Grad, in dem ein System von einer bestimmten Nutzergruppe verwendet werden kann, um implizierte Zielsetzungen mit Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit zu erreichen. Dabei eingeschlossen ist die *Erlernbarkeit*, *Bedienbarkeit*, *Ästhetik der Benutzeroberfläche*, *Zugänglichkeit* und *Zweckdienlichkeit* sowie der *Schutz vor Benutzerfehlern*. Dieser Merkmalskatalog ist bedeutsam für die Implementierung einer Anwendung mit sehr breit gefasster Nutzergruppe, welche zum großen Teil aus Älteren besteht, die bei technischen Problemen häufiger fremde Hilfe benötigten (Göbl et al. 2022, S. 39). Das im Zusammenhang mit der digitalen Entwicklung im Gesundheitswesen und damit auch dem Prototypen stehende sozialpolitische Ziel, das Gesundheitssystem zu entlasten, indem Ältere länger selbstbestimmt und gefahrenfrei in der eigenen Häuslichkeit leben, geht einher mit einer großen Nutzungsdichte, die maßgeblich mit der Akzeptanz der Zielgruppe zur digitalen Anwendung zusammenhängt. Somit muss eine weitestgehend automatisierte Anwendung nicht nur durch eine angepasste Ästhetik der Benutzeroberfläche eine zufriedenstellende und fehlervorbeugende Interaktionsfähigkeit bieten, sondern auch schnell erlernbar sein und Anforderungen zur Nutzung durch Personen ohne pflegerische oder technischen Fachkenntnisse berücksichtigen (vgl. Nr. 42 *Laiennutzung* Anlage 1 Fragebogen gemäß § 3 Abs. 2 DiPAV). Damit digitale Angebote von möglichst vielen Menschen genutzt werden können, existieren einheitliche, inklusive Anforderungen an deren Gestaltung. Das Prinzip des *Universal Designs*, welches bereits im Kapitel zwei genannt wurde, stellt dabei international anerkannte Prinzipien und Standards an die Entwicklung und Ausgestaltung digitaler Apps dar. Im Rahmen dieser Arbeit soll damit einhergehend eine prototypische Implementierung erfolgen, die Informationen zu einer barrierefrei und altersgerechten Wohnraumausstattung liefert, indem der gängige Industriestandard eingehalten und folglich eine praktikable Anwendung bereitgestellt wird. Dabei werden die Teilmerkmale der schnellen *Erlernbarkeit* und intuitiven *Bedienbarkeit* als besonders berücksichtigungswert betrachtet. Die *Zugänglichkeit* unter dem Gesichtspunkt der Technologie wird an dieser Stelle nicht mit einer Limitation besetzt, da die Zielsetzung der Anwendung technologisches Neuland ist und keine vergleichbaren Studien zu Realisierung selbiger vorliegen. Der Prototyp ist demzufolge als benutzerfreundlich zu beschreiben, wenn er u. a. durch

---

einen hohen Automatisierungsgrad von der avisierten Nutzergruppe schnell erlernbar und danach selbstständig bedienbar ist.

**Zuverlässigkeit:** Eine Anwendung gilt im Sinne der ISO/IEC 25010 als zuverlässig, wenn Funktionalitäten unter Beachtung der Teilmerkmale *Reifegrad*, *Verfügbarkeit*, *Fehlertoleranz* und *Wiederherstellbarkeit* für einen zeitlich definierten Rahmen ausführbar sind. Dabei zielt die Verfügbarkeit nicht auf technologische Anwendungskomponenten ab, sondern auf die Betriebszeit und Zugänglichkeit der systemischen Funktionalitäten. Wie bereits beschrieben, setzt sich diese Arbeit das Ziel, eine prototypische Anwendung zu entwickeln, sodass weite Teile dieses Anforderungsmerkmals als nicht umsetzungsrelevant eingeordnet werden. Als erfolgreiches Ergebnis aus dieser Arbeit steht folglich im Sinne des *Reifegrads* eine prototypische Anwendung, welche aufzeigt, wie eine automatisierte Identifikation von innerhäuslichen Barrieren mit digitalen Technologien aussehen kann.

**Sicherheit:** Der Schutz von Informationen und Daten vor unbefugtem Zugriff verbirgt sich hinter dem Qualitätsmerkmal *Sicherheit*. Dieses setzt sich aus weiteren Subaspekten, wie der *Vertraulichkeit*, *Integrität*, *Unbestreitbarkeit*, *Rechenschaftspflicht* und *Authentizität*, zusammen. Die während der Digitalisierung von privatem Wohnraum erhobenen Daten sind unter dem Aspekt der Datensicherheit als personenbezogen und damit besonders schützenswert einzustufen. Diese Erkenntnis erschließt sich ebenfalls aus dem § 5 DiPAV, welche Datenschutz und -sicherheit unter besondere Berücksichtigung stellt. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Entwicklungsarbeit anhand des Datensicherheitsaspekts zu kanalisieren, wenngleich eine prototypische Implementierung keinen Anspruch auf vollständige *Integrität*, *Unbestreitbarkeit*, *Rechenschaftspflicht* und *Authentizität* erheben kann. Die *Vertraulichkeit* der wohnraum- und damit personenbezogenen Daten ist durch technische Maßnahmen sicherzustellen. Dabei treten solche insbesondere hinsichtlich der Verwaltung der erhobenen Daten sowie der zur Identifikation von Barrieren notwendigen Prozessschritte in den Vordergrund. Eine technische Lösung, welche sowohl die Datenerfassung als auch -analyse vollständig digital im Sinne des *Edge Computings*<sup>19</sup> vornimmt, wird damit dem Anforderungskatalog der Entwicklungsarbeit zugrunde gelegt.

**Wartbarkeit:** Dieses Anforderungsmerkmal repräsentiert den Grad der Effektivität und Effizienz, mit dem ein System modifiziert werden kann. Gemäß der ISO/IEC 25010 gliedern sich darunter die Themen *Modularität*, *Wiederverwendbarkeit*, *Analysierbarkeit*, *Modifizierbarkeit* und *Testbarkeit*. Die Entwicklungsarbeit findet unter diesen Vorzeichen statt, wobei an dieser Stelle die *Modularität* und *Wiederverwendbarkeit* einen höherwertigen Stellenwert einnehmen als beispielsweise die *Testbarkeit* und *Analysierbarkeit*. Letztere werden im Kontext einer prototypischen Implementierung ausgeklammert, wohingegen die *Modifizierbarkeit* im Kontext möglicher normungsinstitutioneller Anpassungen an die geometrischen Mindestanforderungen der DIN 18040-2:2011-09 (vgl. Tabelle 3.1) vorausschauend umzusetzen ist. Folglich gilt der Prototyp als wartbar, wenn dessen Quellcode modular strukturiert und im Sinne der Effektivität und Effizienz modifiziert werden kann, ohne korrespondierende Funktionalitäten und damit die gesamtheitliche Systemqualität zu verschlechtern.

**Portabilität:** Dieses Merkmal beschreibt den Umfang, mit der ein System von einer Nutzungsumgebung in eine andere übertragen werden kann und adressiert dabei insbesondere die Aspekte der

---

<sup>19</sup>Im Gegensatz zum zentralisierten *Cloud Computing* findet die Verarbeitung der Daten beim *Edge Computing* auf dem Gerät statt, von welchem aus sie generiert werden.

*Anpassungsfähigkeit, Installierbarkeit und Ersetzbarkeit.* Das Anforderungsmerkmal der *Anpassungsfähigkeit* besitzt im Kontext der situativen Wohnraumerfassung und -bewertung zusammen mit der Kompatibilität und Gebrauchstauglichkeit einen integralen Stellenwert. Folglich soll die technische Konzeption einer prototypischen Anwendung möglichst geräte- und damit betriebssystemagnostisch sein und auf die unterschiedlichen Ausstattungsgegebenheiten eines Wohnraumes anpassungsfähig reagieren, um die Skalierbarkeit der Anwendung zu erhöhen und damit dem weitreichenden Wohnraumanpassungsbedarf robust entgegenzutreten.

Angesichts der acht ausgeführten Qualitätskriterien wird resümiert, dass das Ziel der Arbeit darin besteht, die Mobilität hilfe- und pflegebedürftiger, meist älterer, Menschen im Haushalt durch eine altersgerechte und barrierefreie Ausstattung zu erhöhen und folglich das Konzept *Ageing in Place* flächendeckend und nutzerzentriert zu unterstützen. Das soll durch eine prototypisch zu implementierende, digitale Anwendung erreicht werden, die im Wesentlichen eine portable Routine zur vollständigen Erfassung und korrekten maschinellen Verarbeitung wohnraumbezogener Daten hinsichtlich der Identifikation innerhäuslicher Barrieren nach DIN 18040-2:2011-09 darstellt. Ziel soll es weiterhin sein, eine hohe Nutzerakzeptanz durch eine weitgehend automatisierte, schnell erlernbare und erweiterbare Anwendung zu erwirken, welche die personenbezogenen Daten vertraulich behandelt und vor Zugriffen seitens Dritter kapselt. Die Zielsetzung des Automatismus ist an die Überführung der wohnraumbezogenen Daten in ein strukturiertes Informationsverzeichnis geknüpft. Dafür wird ein digitales WIM entwickelt, welches eine grundlegende Informationsbasis für sämtliche maschinelle Datenverarbeitungszyklen und Prüfroutinen schafft. Infolgedessen steht die Digitalisierung eines Wohnraumes in gleichbedeutendem Zusammenhang mit einer zielgerichteten Modellierung derselben. Aus dem *Use Case Diagramm* werden softwareseitig umzusetzende Prozessmodule abgeleitet und in standardisierter Notation nach OMG BPMN visualisiert.

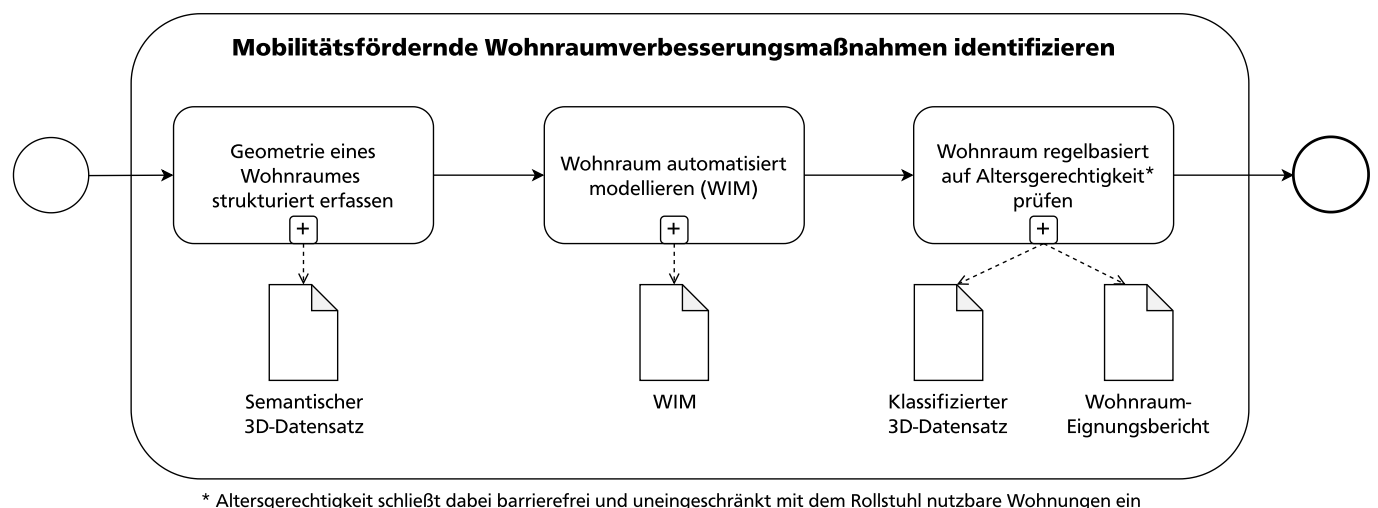


Abbildung 3.3: Prozessmodell der Identifikation von mobilitätsfördernden Wohnraumverbesserungsmaßnahmen, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

Der holistische Prozess zur Identifikation von innerhäuslichen und mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen im Kontext der Zielsetzung, eine Wohnraumausstattung unter dem Kriterium

---

der Altersgerechtigkeit zu bewerten, ist gemäß Abbildung 3.3 in drei generische und voneinander abhängige Komponenten gegliedert. Die strukturierte Geometrieerfassung bildet den initialen Ausgangspunkt, der in einer dreidimensionalen Beschreibung des aktuellen *as-built* Wohnraumzustands mündet. Ausgehend von diesem auch für die *Laiennutzung* interpretierbaren Zwischenergebnis erfolgt eine Transformation der Datenmodalität, wonach der 3D-Datensatz automatisiert in ein WIM überführt wird, welches wiederum die notwendige, atomare Informationsbasis für eine regelbasierte Prüfung auf Altersgerechtigkeit nach Tabelle 3.1 darstellt. Innerhalb des finalen Prozessmoduls findet demnach die Identifikation innerhäuslicher Barrieren anhand einzelobjektbezogener Wohnraumausstattungs-elemente statt, welche binär klassifiziert werden und so im Gesamtzusammenhang einen Eignungsbericht zwecks individueller Verbesserungsmaßnahmen informativ anreichern sollen. Die aus dem Prozess hervorgehenden Ergebnisse adressieren schlussfolgernd die Nutzeranforderungen aus Abschnitt 3.2.1. Mithilfe des (eignungs-)klassifizierten 3D-Datensatzes sowie dem Wohnraum-Eignungsbericht kann der **Klient** substanzielle Gefahrenbereiche innerhalb des Wohnraumes aufspüren und damit wohnraumbezogene Ausstattungselemente, die hinsichtlich der altersgerechten Nutzung als *nicht geeignet* klassifiziert werden, im Rahmen der eigenen Möglichkeiten anpassen. Ein klassifizierter 3D-Datensatz dient auch der **Pflegekasse** als Empfehlung während der Prüfung von Leistungsanträgen. Darüber hinaus können die gewonnenen Datensätze dabei unterstützen, eine orts- und zeitunabhängige Fernprüfung bzw. -beratung seitens der **Wohnberatung** durchzuführen. Die folgenden Unterabschnitte beschreiben die zusammenhängenden Prozessmodule ausführlich.

### Strukturierte Geometrieerfassung eines Wohnraumes

Innerhalb des gesamt-konzeptionellen Kontexts kommt dem ersten Prozessmodul in mehrfacher Hinsicht eine entscheidende Bedeutung zu. Diese repräsentiert zum einen die physische Schnittstelle zu der beschriebenen Zielgruppe, wodurch die geometriebasierte Digitalisierung eines Wohnraumes durch eine auf digitalen Technologien basierende Anwendung erfolgen und dabei gleichzeitig kompatiblen sowie benutzerfreundlichen Charakter haben soll. Zum anderen definiert der detaillierte Regelkatalog für spezifische Ausstattungselemente Geometriebedingungen, weshalb der resultierende 3D-Datensatz nicht nur die dazu erforderliche Genauigkeit sicherstellen, sondern auch über eine hinreichend hohe räumliche sowie semantische Auflösung verfügen muss, damit die darauf basierende Wohnraummodellierung in umfänglicher Dimension erfolgen kann. Mit Blick auf die Genauigkeitsanforderung gibt die DIN 18040-2:2011-09 die Höhe von Türanschlügen und Schwellen zwecks Zugänglichkeit als quantitativ kleinste geometrische Mindestanforderungen mit  $\leq 2$  cm an (vgl. R-Nr. 1.1 in Tabelle 3.1), womit eine relative Genauigkeit von mindestens 2 cm realisiert werden muss, um den Regelkatalog vollständig und korrekt abzubilden. Alternative Möglichkeiten zur validen Definition von messtechnischen Genauigkeiten existieren nicht. Zu dieser Erkenntnis führt sowohl eine differenzielle als auch toleranzbasierte Analyse. Über Türanschlüge und Schwellen hinaus existieren weitere geometrische Anforderungen an Abstell-, Bewegungs- sowie Freiflächen, Türen und Fenster, Greifhöhen und diverse weitere Ausstattungselemente im Sanitär- sowie dem gesamten Wohnraum, sodass hieran die räumliche und semantische Auflösung abgeleitet wird. Insbesondere die semantische Auflösung kann konkret beschrieben werden und muss über strukturelle, den Wohnraum begrenzende, Elemente aus den Klassen *Wand*, *Fußboden*, *Decke*, *Fenster* und *Tür* hinausgehen und auch funktionale Ausstattungsgegenstände bezüglich der Objektklassen *Tisch*, *Stuhl*

und z. B. *Waschbecken* berücksichtigen. Eine vollständige Auflistung der notwendigen semantischen Klassen folgt in Tabelle 3.3 des Folgeabschnitts 3.2.2. Die räumliche Auflösung bzw. Detailgenauigkeit, quantifiziert durch eine spezifische Anzahl an Datenpunkten pro Objektoberfläche, anhand der tabellarischen Geometriebedingungen abzuleiten, ist hingegen nicht möglich, wenngleich die objektbezogene Auflösung vergleichsweise hoch sein sollte, um auch Tür- und Fenstergriffe in dem 3D-Datensatz des Wohnraumes automatisiert erkennen zu können (vgl. R-Nr. 5.1 in Tabelle 3.1).

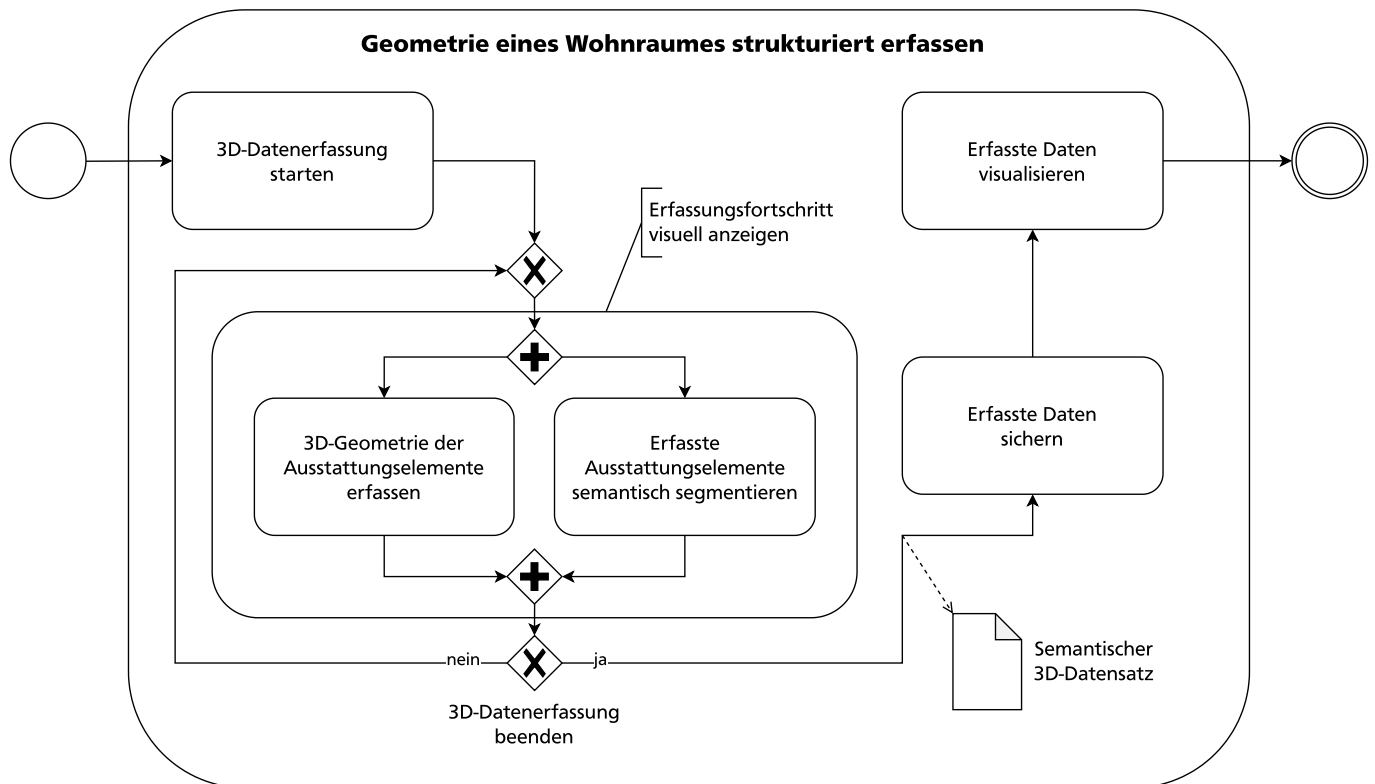


Abbildung 3.4: Prozessmodell der strukturierten Geometrieerfassung eines Wohnraumes, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

Das Prozessmodell zur strukturierten Geometrieerfassung eines Wohnraumes visualisiert Abbildung 3.4. Danach soll die Gebrauchstauglichkeit der Anwendung durch einen hohen Automatisierungsgrad, losgelöst von möglichst vielen Benutzerinteraktionen, erzielt und der Mobilitätseingeschränkte als Hauptnutzer adressiert werden (Nutzungsszenario 1). Typisch im Bereich der innerhäuslichen 3D-Datenaufnahme ist ein organisiertes Erfassungskonzept, welches sich an den Räumlichkeiten eines Wohnraumes orientiert. Repetitiv wird demnach jede Räumlichkeit einschließlich seiner Ausstattungselemente von mehreren Standpunkten dreidimensional erfasst, bis der Wohnraum vollständig digitalisiert ist (Luhmann 2018, S. 552, Blankenbach 2015, S. 357). Dabei wird in der vorliegenden Arbeit unter *Ausstattungselement* jegliches strukturelle wie auch funktionelle Bauteil bzw. Möbelstück verstanden. Während der Datenaufnahme soll die Anwendung die erfassten Objekte simultan klassifizieren und einen strukturierten 3D-Datensatz kreieren, der mit Beendigung der Anwendung gesichert, angezeigt und exportiert werden kann, um ihn den Folgeprozessen zur Verfügung zu stellen. Klassischerweise erfolgt die Strukturierung von 3D-Datensätzen nach dem

Erfassungsprozess und bindet dabei umfangreiche Ressourcen (vgl. Poux; Neuville; Nys et al. 2018, S. 8), die nicht mit der Anforderung nach Automatisierung und Gebrauchstauglichkeit bzw. den Fähigkeiten der Zielgruppe harmonieren. Aus diesem Grund soll im Rahmen der Arbeit auch ein neuheitliches Verfahren entwickelt werden, welches 3D-Geometrieerfassung und semantische Datenstrukturierung simultan löst. Darüber hinaus soll eine visuelle Anzeige des Erfassungsfortschritts implementiert werden, um benutzerorientiert den Grad der Vollständigkeit der Wohnraumerfassung zu maximieren und bereits während der Datenerfassung auf ausgelassene Wohnraumbereiche hinzuweisen, die im späteren Verlauf eine vollständige Identifikation von innerhäuslichen Barrieren unmöglich machen. Aus dem Prozess geht ein semantisch segmentierter 3D-Datensatz hervor, welcher die notwendige Informationsbasis zur Modellierung eines WIMs darstellt.

### Automatisierte Modellierung eines Wohnraumes

Das an die Geometrieerfassung anschließende Prozessmodul umfasst die gesamtheitliche dreidimensionale Datenverarbeitung mit der Absicht, ein räumlich-semantisches WIM zu modellieren. Um für die Nutzergruppe eine schnell erlern- und intuitiv bedienbare Anwendung zu schaffen, soll auch der Prozess der Datenvorverarbeitung und -modellierung weitgehend automatisiert und möglichst ohne Medienbrüche erfolgen. Darüber hinaus muss insbesondere die Kompatibilität mit der digitalen Datenerfassungskomponente und der Schutz der personenbezogenen Daten sichergestellt sein. Es gilt weiterhin zu berücksichtigen, dass die erhobenen 3D-Datensätze vom Umfang eines typischen Haushalts zumeist umfangreich sind und damit erhöhte Anforderungen an die Ressourcen eines Verarbeitungsprozesses stellen. Innerhalb dieses Spannungsfeldes wird eine effiziente und realisierbare Lösung verortet, welche die Prozessierungsdauer unter Wahrung der notwendigen räumlichen wie semantischen Auflösung für den Identifikationsprozess möglichst minimiert. Zusätzlich begründet sich der methodische Grundsatz zur Implementierung dieses und vorangegangenen Prozessmoduls vor dem Hintergrund eines vielseitigen Repertoires an Wohnraumausstattungsmöglichkeiten darauf, generische und sich durch Mustererkennung selbst optimierende Verfahren aus dem Bereich des

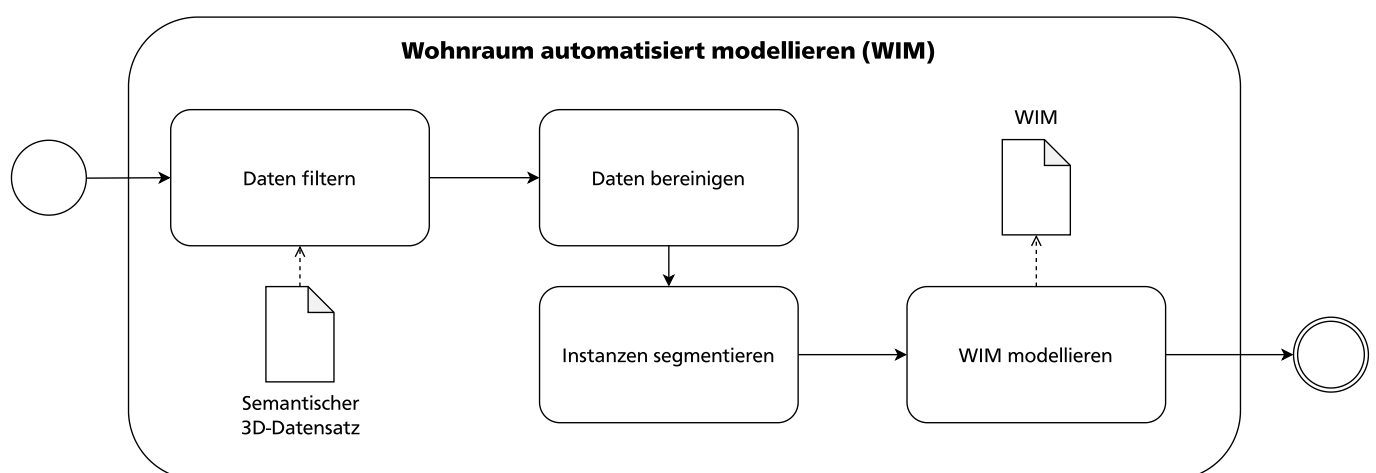


Abbildung 3.5: Prozessmodell der automatisierten Modellierung eines Wohnraumes (WIM), modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

Maschinellem Lernen (ML) zu verwenden, um sowohl die semantische Strukturierung während als auch die Segmentierung einzelner Objektinstanzen nach der Erfassung automatisiert durchzuführen.

Ausgehend von dem semantisch strukturierten 3D-Datensatz folgt eine klassische Verarbeitungskette aus dem Bereich der punktbezogenen Datenanalyse (vgl. Abbildung 3.5 und Poux 2019, S. 37). Die 3D-Daten werden dafür zunächst gefiltert und bereinigt, um anknüpfend die unter dem Terminus *Instanz Segmentierung* geläufige Aufschlüsselung in einzelne Instanzen einer semantischen Objektklasse durchzuführen. Folglich kann der Wohnraum modelliert und durch eine iterative Zuweisung aller segmentierter Objektinstanzen, welche zugleich von einer räumlich-topologischen Verortungs- und geometrischen Ausdehnungsinformation begleitet sind, informativ angereichert werden. Das WIM repräsentiert sich somit als ein lokales, alphanumerisches und der Datenmodalität des 3D-Datensatzes folgendes visuelles Informationsverzeichnis zur räumlich-semantischen Beschreibung des situativ erfassten und vollständig ausgestatteten Wohnraumes. Die Spezifikation des WIM wird in Abschnitt 3.5 ausgeführt.

### Regelbasierte Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit

Das dritte und finale Prozessmodul setzt die regelbasierte Prüfung eines Wohnraumes hinsichtlich innerhäuslicher Barrieren um, die gegen eine barrierefreie und mit dem Rollstuhl uneingeschränkte Nutzung sprechen und damit lebensgestaltende, alltägliche Prozesse von mobilitätseingeschränkten Menschen erschweren. In Kombination mit dem WIM soll hierbei die Identifikation von Barrieren vollautomatisiert stattfinden und das Ergebnis in verständlichem Maße sowohl visuell als auch textlich aufbereitet werden. Ein (eignungs-)klassifizierter 3D-Datensatz für den grafischen Transport der Informationen sowie ein Wohnraum-Eignungsbericht, welcher alle identifizierten Barrieren listet, zugleich die Gründe für eine Altersungerechtigkeit beschreibt und nach Möglichkeit Verbesserungsmaßnahmen vorschlägt, bildet damit den Abschluss der avisierten Prozesskette für die dreifaltige Nutzergruppe.

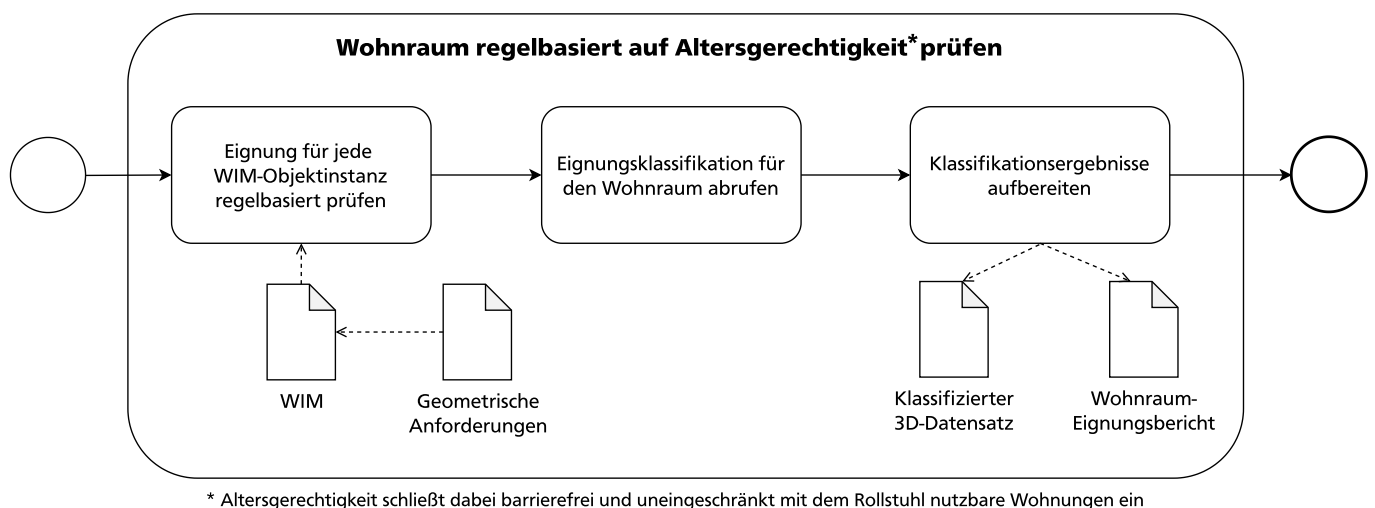


Abbildung 3.6: Prozessmodell der regelbasierten Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN



Entsprechend des aufgestellten Regelkatalogs nach DIN 18040-2:2011-09 gelten die dort definierten geometrischen Anforderungen an die jeweils einzelnen Objektinstanzen des Wohnraumes, welche atomarer Bestandteil des WIM sind. Zur finalen Prüfung gilt es entsprechend, die generischen Regeln, welche innerhalb des Wohnraumes primär relativer Natur sind (vgl. u. a. R-Nr. 3.1– 3.2 und R-Nr. 5.3 – 5.4 in Tabelle 3.1), auf die jeweiligen Objektinstanzen anzuwenden. Dies erfolgt unter Berücksichtigung der jeweiligen geometrischen Ausdehnungen, um z. B. Höhen- und Längeninformationen zu extrahieren und mit den Mindestmaßen aus der Norm vergleichen zu können. Dabei treten Abhängigkeiten zu räumlich benachbarten Instanzen auf, welche die prototypische Anwendung bedienen muss (vgl. R-Nr. 2.1 – 2.3 und R-Nr. 5.2 in Tabelle 3.1). Dazu werden mit einzelnen Objektinstanzen korrespondierende und richtungsbezogene Freiflächen kalkuliert sowie die räumliche Belegung notwendiger Bewegungszonen analysiert. Der gesamte Wohnraum gilt entsprechend als altersgerecht, wenn alle einzelnen Instanzen innerhalb des WIMs als *geeignet* klassifiziert sind. Gemäß dem Prozessmodell aus Abbildung 3.6 soll das WIM die Regeln inkorporieren und so die Prüfroutine nach vollständiger Modellierung kaskadisch erfolgen. Die Regelprüfung erfolgt dabei streng nach den geometrischen Anforderungen aus Tabelle 3.1, wodurch sich die bereits in Abschnitt 3.2.2 angesprochene semantische Auflösung ergibt (siehe Tabelle 3.3). Nachdem der Wohnraum die regelbasierte Prüfung durchlaufen hat, sollen die Ergebnisse benutzerfreundlich aufbereitet und zur Verfügung gestellt werden.

Tabelle 3.3: Spezifikation der mit den geometrischen Anforderungen nach DIN 18040-2:2011-09 in Zusammenhang stehende, semantische Klassen zur strukturierten Geometrieerfassung, automatisierten Modellierung und regelbasierten Prüfung eines Wohnraumes

K-Nr.	Semantische Klasse	Referenz auf Regelkatalog aus Tabelle 3.1
1	Fußboden	R-Nr. 1.1 – 1.3 und R-Nr. 2.1 – 2.3
2	Tür	R-Nr. 3.1 – 3.3 und R-Nr. 5.1 – 5.2
3	Dusche	R-Nr. 4.1 und R-Nr. 4.6
4	Toilette	R-Nr. 4.2 – 4.3
5	Waschbecken	R-Nr. 4.4 – 4.5
6	Fenster	R-Nr. 5.1 – 5.2
7	Stuhl	R-Nr. 5.4
8	Tisch*	R-Nr. 5.3 – 5.4
9	Wand	zur vertikalen Wohnraumbegrenzung (Form)
10	Decke	zur horizontalen Wohnraumbegrenzung (Höhe)
11	Sonstiges**	zusammenhängend mit R-Nr. 2.1 – 2.3

\* stellvertretend für Bedien- und Ausstattungselemente

\*\* stellvertretend für weitere, bisher unspezifizierte Klassen

Die tabellarische Auflistung 3.3 stellt die aus dem Regelkatalog abgeleitete und damit zwingend erforderliche semantische Objektvielfalt dar. Dabei stellt ein Großteil generische Basisklassen eines gewöhnlich ausgestatteten Wohnraumes dar, welche in zwei Kategorien aufgespalten werden können: Zum einen sind das grundlegende, den lichten Wohnraum strukturierende und damit die Bewegungsfreiheit bzw. Zugänglichkeit definierende, immobile Bauteilklassen mit *Fußboden*, *Wand*, *Decke*, *Tür* und *Fenster*; zum anderen existieren auch geometrische Bedingungen an Elemente, die

---

den Wohnraum funktional, durch z. B. einen *Stuhl* und *Tisch* (mobil) oder die *Toilette*, das *Waschbecken* und die *Dusche* (immobil), ausstatten und damit aktiv-handelnde Tätigkeiten oder häusliche Prozesse adressieren. Neben den im Regelkatalog konkret spezifizierten Klassen werden weitere vorgesehen, mit dem Zweck, die Prüfung untereinander abhängiger Geometrieanforderungen so umfassend wie möglich abzubilden. Insbesondere die Beachtung ausreichend großer Bewegungs- und Freiflächen kann dabei von diversen Ausstattungselementen begrenzt werden, die nicht in die bisher genannten Klassenmerkmale fallen. Dafür steht die semantische Klasse *Sonstiges*, welche stellvertretend alle potenziell vorkommenden, jedoch im Rahmen der semantischen Auflösung nicht genauer spezifizierten, Objektklassen repräsentiert. Da im Rahmen der DIN 18040-2:2011-09 Bedien- bzw. Ausstattungselemente (vgl. R-Nr. 5.3 – 5.4 aus Tabelle 3.1) nicht weiter definiert werden, betrachtet diese Arbeit exemplarisch *Tische* als solche. Für die Formulierung von mobilitätsfördernden Verbesserungsvorschlägen innerhalb des Wohnraum-Eignungsberichts zwecks individuelle Anpassungsmaßnahmen ist die Kenntnis der Beweglichkeit entsprechender Klassen notwendig, welche neben den geometrischen Merkmalen als zusätzliche Information eingeführt wird.

Mit Abschluss der Anforderungsanalyse unterliegt die prototypische Entwicklungsarbeit einem konkreten Rahmen, den es zu beachten gilt. Die an das Kapitel drei anschließenden Teile der Arbeit berücksichtigen die jeweiligen Anforderungen und referenzieren an geeigneter Stelle auf die tabellarisch gelisteten Merkmale. Die zur Lösung der übergeordneten Fragestellungen relevanten, semantischen Wohnraumklassen führen zu einem konzeptionellen Entwurf des WIMs, welcher nachfolgend in Abschnitt 3.5 geliefert wird. Zuvor werden Grenzen des Konzepts erläutert, welche vor allem in Zusammenhang mit der *as-built* Modellierung von Bestandsgebäuden nach dem Paradigma des Building Information Modelings (BIM) stehen.

### 3.3 As-Built Modellierung von Bestandsgebäuden

Dem Grundgedanken dieser Arbeit folgend soll ein möglichst langer Verbleib älterer Menschen in der eigenen Häuslichkeit selbstverantwortlich und unter Einsatz einer auf digitalen Technologien beruhenden Demonstratoranwendung namens *Progressive Home Care (PHC)* erfolgen. Dazu ist es erforderlich, innerhäusliche Barrieren automatisiert zu identifizieren, die für Mobilitätseingeschränkte im Alltag ein Hindernis darstellen und im schlimmsten Fall einen Sturz, verbunden mit einer Verschlechterung des Gesundheitszustands, verursachen. Diese ambitionierte Aufgabe kann nur gelingen, wenn dazu der Wohnraum in seiner alltäglichen Gestaltung eingeschlossen aller substantiellen und funktionalen Ausstattungselemente digitalisiert und in ein WIM überführt vorliegt. Die Dokumentation des tatsächlich vorliegenden Zustands baulicher Anlagen wird als Bestandsmodellierung bezeichnet und führt auf eine digitale Arbeitsmethode zurück, die eine „wesentliche Komponente der digitalen Transformation im Bauwesen“ (Witte et al. 2020, S. 422) darstellt, das Building Information Modeling (BIM).

Heutzutage wird unter dem Begriff BIM eine „kooperative Arbeitsmethodik [verstanden], mit der auf der Grundlage digitaler Modelle eines Bauwerks die für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben werden“ (Bundesministerium für

---

Verkehr und digitale Infrastruktur 2015, S. 4). Dabei führt BIM in seinen Grundzügen zunächst auf die theoretische Beschreibung eines *Building Description Systems* von Eastman et al. (1974) zurück, welches als gedanklicher Vorgänger eines Gebäudedatenmodells verstanden werden kann. Die Autoren van Nederveen et al. (1992) erweiterten dieses theoretische Modell und führten einige Jahre später zum ersten Mal den Begriff *Building Information Modeling* ein, welcher nun auch die koordinative Arbeitsweise sämtlicher Stakeholder mit Gebäudedatenmodellen einschließt. Seitdem findet die Thematik mit zunehmender Verbreitung und unter kontinuierlicher Weiterentwicklung Anwendung in der Forschung, Entwicklung und industriellen Praxis, was nicht zuletzt mit einem gestiegenen Angebot an unterschiedlichsten Softwarelösungen und dem Zuwachs an Effizienz, Produktivität und Qualität zusammenhängt (vgl. Borrmann et al. 2021, S. 3, Witte et al. 2020, S. 422). Dabei gilt zu berücksichtigen, dass die BIM-Methode „kein Softwarepaket, sondern eine Arbeitsmethode“ (VDI 2022, S. 4) ist, die sich über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes, angefangen von der Planungs- und Herstellungsphase, über den Betrieb und die Bewirtschaftung bis hin zu Um- und Rückbau, erstreckt (Witte et al. 2020, S. 423, R. Becker; Falk et al. 2018, S. 84). Diesen lebenszyklusbetonenden Grundsatz setzt auch die deutsche Fassung der ISO-Norm 19650 im entsprechenden Teil 1 für *Begriffe und Grundsätze* fest (DIN 2019).

In Kapitel eins wurde der Zusammenhang zwischen einer Entlastung des Gesundheitssystems und dem möglichst langen Verbleib hilfe- und pflegebedürftiger Älterer in der eigenen Häuslichkeit ausführlich dargelegt. Der private Wohnraum steht damit unter besonderer Betrachtung jeglicher diese Arbeit betreffenden Aspekte. Im Rahmen von BIM und Bestandswohnungen bzw. allgemein gefasst Bestandsgebäuden existieren unterschiedliche, meist synonym verwendete Begrifflichkeiten, welche nachfolgend erläutert und voneinander abgegrenzt werden.

Der Prozess *Scan-to-BIM* bezeichnet die zweckgebundene, realitätsgetreue Erfassung und anschließende Überführung des digital erfassten Bestandsgebäudes in ein parametrisches BIM-Modell (Pleiß und Klauer 2022b, S. 173, Petzold et al. 2021, S. 519). Dabei besteht das BIM-Modell selbst aus einer Vielzahl von Objekten, die bauteilorientiert modelliert, mit semantischen, geometrischen, sachlichen und relationalen Informationen angereichert und nach IFC<sup>20</sup>-Standard ausgetauscht werden (Witte et al. 2020, S. 426). Aus dem geplanten Nutzungszweck gehen Detaillierungsanforderungen an die zu modellierenden Bauteile hervor, die sowohl einen geometrischen wie auch semantischen Anteil besitzen und mit fortschreitender Stufe im Lebenszyklus ansteigen (Witte et al. 2020, S. 437). Zur Differenzierung der unterschiedlichen Anforderungen an die Detaillierung der Bauteilobjekte wurde das planungsorientierte Konzept der Fertigstellungsgrade (engl. *Level of Development (LOD)*) entwickelt, welches sich in unterschiedlichen Spezifikationen wiederfindet (vgl. Spezifikation für Australien nach NATSPEC 2013, für Amerika nach BIM-Forum 2020 und für Deutschland u. a. durch die Arbeitsgruppe Hochbau im Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. 2019 und nach Egger et al. 2013 im Auftrag des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR)). Der LOD wird meist in fünf bzw. sechs Modellierungsgraden beschrieben, welche von einer rein symbolhaften, konzeptionellen Bauteildarstellung (LOD 100) bis hin zu einer wirklichkeitsgetreuen, den tatsächlichen Gebäudezustand widerspiegelnden *as-built* Modellierung

---

<sup>20</sup>Die *Industry Foundation Class (IFC)* stellt ein von der Organisation *buildingSmart* entwickeltes und nach ISO 16739-1:2018 standardisiertes, hersteller- und softwareunabhängiges Datenmodell dar, in welchem neben Projektstrukturen auch Modellelemente einschließlich ihrer Geometrie-, Sach- und Relationsinformationen beschrieben und unter Stakeholdern ausgetauscht werden können (*buildingSMART International* o. J.).

(LOD 500) reichen (vgl. Abbildung 3.7). Letzterer stellt in der Regel den finalen Detaillierungsgrad mit geometrisch wie semantisch hochgradig detaillierten und funktionalen Bauteilobjekten dar, aus welchem verschiedene Fachmodelle wie ein Architektur- oder das noch spezifischere Ausbaumodell resultieren können (Egger et al. 2013, S. 54 f.). Wie bereits angesprochen, trennt das LOD dabei den Informationsgehalt in einen geometrischen (*Level of Geometry, (LOG)*) und einen semantischen Teil (*Level of Information, (LOI)*). Darüber hinaus wird der Grad der geometrischen Genauigkeit, welche in Verbindung mit der vermessungstechnischen Erfassung von Bestandsgebäuden (*Scan-to-BIM*) steht, in sogenannte *Level of Accuracy, (LOA)* eingestuft (USIBD 2019). Da die Genauigkeit an das zu realisierende WIM durch die geometrischen Anforderungen aus der DIN 18040-2:2011-09 bereits definiert ist, wird das LOA im Folgenden nicht weiter berücksichtigt. Selbiges trifft für das LOG und LOI zu. Ferner gilt es das LOD vom gleichnamigen Akronym *Level of Detail* zu unterscheiden, welches dem Bereich geografischer Informationssysteme (GIS) zugeordnet wird und folglich die Gebäudemodellierung unter einer verstärkt räumlichen und grafischen Erscheinungsperspektive betrachtet, während BIM insbesondere durch die Einheit geometrischer wie funktionaler Prozesskomponenten deutlich darüber hinausgeht (vgl. Borrmann et al. 2021, S. 253, NATSPEC 2013, S. 4 ff.).

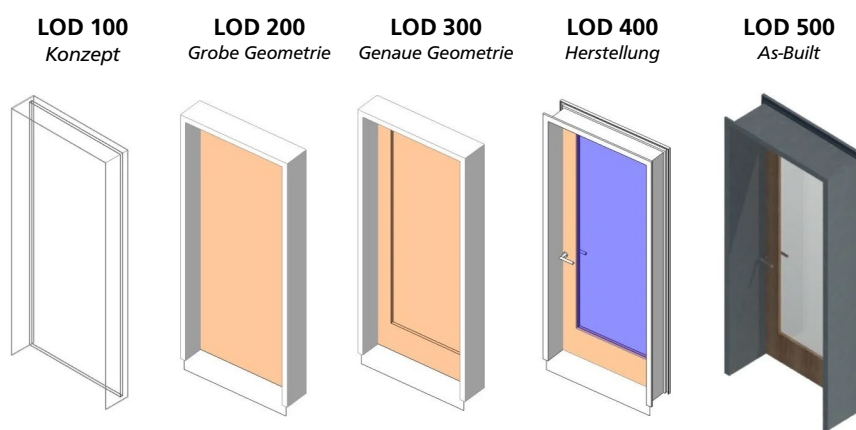


Abbildung 3.7: Level of Development (LoD) am Beispiel einer Tür, in Anlehnung an NATSPEC 2013 und Schatz et al. 2021

Neben den in Abbildung 3.7 illustrierten, planungsorientierten LOD-Stufen, die mit der *as-built* Modellierung abschließen, schlagen einige Autoren eine Erweiterung für BIM im Bestand vor, welche den Dokumentationsgrad eines bereits vollständig existierenden Bauwerks noch stärker unter Berücksichtigung der geplanten Anwendung stellt (R. Becker; Lublasser et al. 2019, S. 203, Wollenberg 2018, S. 79). Dazu wird das Konzept *LOAD* proklamiert, welches nach R. Becker; Lublasser et al. (2019) als *Level of As-is Dokumentation* und nach Wollenberg (2018) als *Level of As-built Dokumentation* definiert wird und gezielt „*Informationen eines Dokumentationsgrades [...] auf Basis anwendungsrelevanter Bestandsgeometrien [...] und Bestandsinformationen*“ (Wollenberg 2018, S. 79) in einem BIM-Modell zusammenträgt. Eine weitere in Verbindung mit BIM im Bestand stehende Begrifflichkeit ist der *Digitale Zwilling* (engl. Digital Twin). Das aus der Luft- und Raumfahrt stammende Konzept (Shafto et al. 2010) findet inzwischen vermehrt verbale Verwendung im Bauwesen, in der es BIM

---

mit *Internet of Things (IoT)*<sup>21</sup>-Technologie verbindet, um die reale Welt mit dem virtuellen Modell zwecks Verwaltung und Steuerung diverser Lebenszyklusprozesse zu synchronisieren (Tagliabue et al. 2021, S. 1 ff., Lu et al. 2020, S. 2). Wenngleich mehrere systematische Literaturrecherchen den sinnstiftenden Nutzen digitaler Zwillinge beschreiben (vgl. Nour El-Din et al. 2022, M. Deng et al. 2021, Couptry et al. 2021), findet sich bislang keine eindeutige Definition von repräsentativen, mit der BIM-Methode in Zusammenhang stehenden, nationalen sowie internationalen Institutionen. Aufgrund der Tatsache, dass weder das LOAD-Konzept noch der digitale Zwilling Bestandteil veröffentlichter Spezifikationen oder Definitionen sind, werden diese Bezeichnungen im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit nicht verwendet, sondern die *as-built* Modellierung als der Realität am nächsten kommende BIM-Spezifikation für Bestandsbauwerke betrachtet. Dabei leitet der zur Bewertung eines Wohnraumes nach altersgerechter Nutzbarkeit notwendige Umfang der Bestandsmodellierung diese Kategorisierung ab, wobei hinsichtlich der zu analysierenden Geometrie, Verortung sowie dem tatsächlichen Platzbedarf LOD 300 und höher ausreichend genaue Informationen liefern.

### 3.4 Grenze des Konzepts

Innerhalb dieses Kapitels wird ein Konzept zur strukturierten 3D-Datenerfassung und automatisierten Überführung eines vollständig ausgestatteten Wohnraumes in ein WIM zur Identifikation und Beschreibung innerhäuslicher Barrieren vorgestellt, welches den umfangreichen Bedarf an altersgerechten Wohnanpassungsmaßnahmen zur Wahrung der individuellen Selbstständigkeit bei gleichzeitiger Entlastung des Sozialhaushalts adressiert. Das Ziel der Arbeit stellt demnach eine prototypisch zu entwickelnde Anwendung dar, welche auf digitalen Technologien basiert, automatisierbar und folglich skalierbar ist und so in jeglicher, durchschnittlich großen Wohnung Anwendung finden kann. In diesem Kontext definiert die Anforderungsanalyse in Abschnitt 3.2 Merkmale an das zu entwickelnde System, welche gleichzeitig die Adaption existierender Methoden und Technologien begrenzen. Demzufolge ergibt sich eine konzeptionelle Limitation bezüglich der BIM-konformen *as-built* Modellierung.

Für die Realisierung der Forschungsaspekte ist es erforderlich, den zu prüfenden Wohnraum durch geometrische und alphanumerische Daten in Form eines semantischen Informationsmodells zu strukturieren. Das BIM-Modell als zentrales Informationsverzeichnis innerhalb der BIM-Methode folgt genau dieser Beschreibung. Beim *Scan-to-BIM* wird dafür das Bestandsgebäude innerlich wie äußerlich zunächst als 3D-Punktwolke diskretisiert und anschließend in ein *as-built* Modell überführt. Dieser Prozess wird von mehreren Autoren als interaktive, kompetenzbasierte, fehleranfällige und zeitintensive Arbeitsroutine bezeichnet, die signifikant von einer Automatisierung profitieren würde, um mit den Kostenvorstellungen innerhalb des Bauwesens zu harmonisieren (Barbosa 2018, S. 129, Volk et al. 2014, S. 19, Tang et al. 2010, S. 832). Forschungsarbeiten zur automatisierten Rekonstruktion semantischer Gebäudemodelle führen laut Nagel et al. (2009) auf eine langjährige Historie zurück, die bislang aufgrund der Komplexität von Innenräumlichkeiten nur geringe Fortschritte verzeichnet (C. P. H. Thomson 2016, S. 23). Die hauptsächlichen Ursachen dafür sind vielfältig und

---

<sup>21</sup>Das *Internet of Things* kann als ein aus physischen Geräten vernetztes und mit dem Internet verbundenes Ökosystem verstanden werden, welches Daten autonom erhebt, verarbeitet und selbstständig untereinander kommuniziert (Grosch et al. 2021, S. 4).

reichen von einer auf die jeweilige Erfassungstechnik zurückzuführende, heterogenen Auflösung innerhalb der 3D-Punktwolke, über insbesondere im Innenraum auftretende, unsichere und artefaktbelastete Daten durch ungleichmäßig beleuchtete und zum Teil stark reflektierende Flächen bis hin zu der unstrukturierten Datenmodalität von 3D-Punktwolken sowie der Ähnlichkeit von Räumlichkeiten bzw. der Diversität geometrischer Ausprägungen der Wohnraumausstattung, welche die Rekonstruktionsalgorithmen vor Herausforderungen stellen (vgl. Bonduel et al. 2017, Bassier; Vergauwen et al. 2016, Valero; Adán et al. 2016, C. P. H. Thomson 2016, Pătrăucean et al. 2015, Volk et al. 2014, Xiong et al. 2013, Tang et al. 2010). Darüber hinaus mangelt es automatisierten Ansätzen daran, die für BIM essenziellen Bauteilattribute und -beziehungen abzuleiten sowie die im Sinne von *as-built* realitätsgetreue und vollumfängliche Modellierung des Wohnraumes inklusive der vorgefundenen Ausstattungselemente vorzunehmen (vgl. López Iglesias et al. 2020, Hichri et al. 2013). Folglich bedienen entsprechende Ansätze lediglich eine grobe Modellierung unter der Voraussetzung geometrisch simpler Wohnraumstrukturen und einiger weniger Ausstattungselemente aus den Objektklassen *Fenster* und *Tür*, die in Summe jedoch nicht der Definition einer *as-built* Dokumentation entsprechen (López Iglesias et al. 2020, S. 488, Hichri et al. 2013, S. 346, Tang et al. 2010, S. 840). Auch wenn die Autoren Pătrăucean et al. (2015, S. 169) zweifellos und insbesondere durch interdisziplinäre Forschungsarbeiten die Verwirklichung einer automatischen *as-built* BIM Modellierung proklamieren, hat sich seitdem kein nennenswerter Erfolg eingestellt. Jüngste Forschungsarbeiten der Technischen Universität München (Collins et al. 2021), RWTH Aachen (Martens et al. 2023 und Martens et al. 2021) oder der Technischen Universität Darmstadt (Franz et al. 2018) erreichen hohe Automatisierungsgrade bei der Generierung von 2D- und 3D-Grundrissen, wodurch die parametrische Rekonstruktion sämtlicher Ausstattungselemente weiter als Forschungslücke besteht. Aus diesem Grund nimmt die vorliegende Arbeit Abstand von einer BIM-konformen *as-built* Modellierung und wählt ein alternatives und hierarchisches Bauteilrepräsentationslevel, welches wohnraumbezogene Ausstattungselemente visuell und alphanumerisch beschreibt.

Für eine Klassifikation verschiedener Umsetzungsstufen von BIM eignet sich das von Bew et al. (2008) in Großbritannien eingeführte *BIM Maturity Model*, welches auch als BIM Reifegradmodell bezeichnet wird (Borrmann et al. 2015, S. 9).

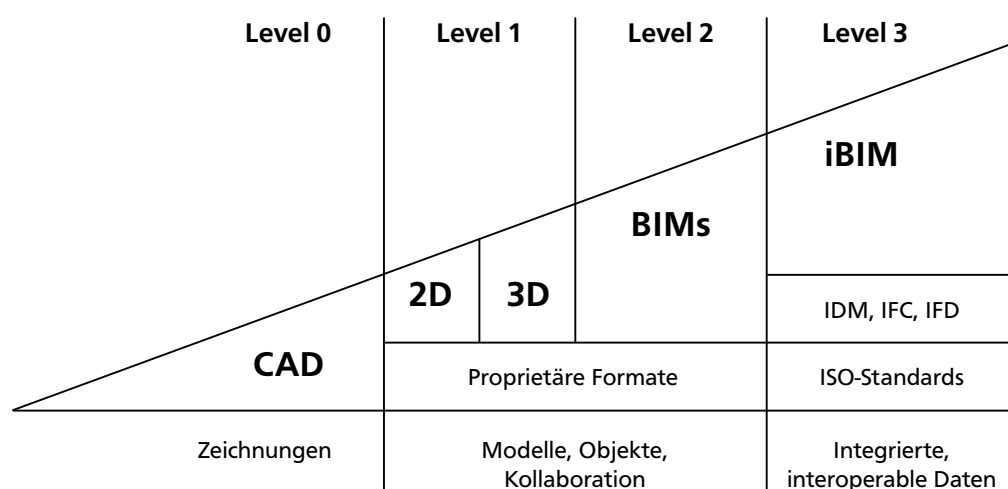


Abbildung 3.8: BIM Maturity Model in Anlehnung an Bew et al. 2008

---

Gemäß der grafischen Übersicht in Abbildung 3.8 werden vier verschiedene Reifegrad-Level bei der Anwendung von BIM unterschieden. In dem vorgeschalteten **Level 0** liegen die Informationen in Papierform oder in nicht miteinander verknüpften, zweidimensionalen CAD-Plänen vor. Das bedeutet in letzter Instanz, dass keine digitalen und objektorientierten Bauteilinformationen existieren und daher nicht von einer BIM-Anwendung gesprochen werden kann. Von einer Anwendung der BIM-Methode auf **Level 1** kann die Rede sein, wenn den Bauteilobjekten Informationen aus strukturierten Datenbeständen zugeordnet werden können. Erst mit Realisierung dieses Levels resultieren weitere Anwendungsfälle, wie z. B. die disziplinspezifische Regelprüfung von BIM-Modellen (vgl. Deubel 2020, S. 113). Gleichzeitig handelt es sich hier um keine durchgängige Anwendung der BIM-Methode und es existieren an dieser Stelle noch keine expliziten Vorgaben für eine interdisziplinäre Zusammenarbeit. Erst ab **Level 2** werden die BIM-Modelle in einer gemeinsamen Umgebung verwaltet, wodurch der Zugriff allen Stakeholdern ermöglicht wird, sodass per Definition ab diesem Level von einer echten Arbeitsweise nach der BIM-Methode gesprochen werden kann, die in **Level 3** noch durch eine nicht festgeschriebene Softwarelandschaft, herstellerneutrale Formate und offene Standards erweitert wird.

Anhand dieser Ausführungen lässt sich das im Rahmen dieses Kapitels vorgestellte Konzept zur räumlich-semanticen und damit objektinstanzbezogenen Wohnraumbeschreibung für eine automatisierte Prüfung auf Altersgerechtigkeit dem BIM Reifegrad **Level 1** zuordnen, wobei die Anforderung an Kompatibilität (vgl. QA-Nr. 3 in Tabelle 3.2) die Wahrung offener Austauschformate bedingt und damit einen Ausblick auf das **Level 2** gibt.

### 3.5 Spezifikation eines Wohnrauminformationsmodells

Zur semantische Beschreibung eines Wohnraumes mit dem Ziel, die geometrischen Voraussetzungen zur Prüfung der Eignung nach Altersgerechtigkeit zu adressieren, sind elf Klassen notwendig, die sich aus Tabelle 3.1 herleiten. Ein Wohnraum kann dabei mehrere Instanzen einer Klasse aufweisen, wie z. B. mehrere Türen, verschiedene Stühle oder auch Wände. Die Dokumentation eines Wohnraumes findet innerhalb der Arbeit in Form eines räumlich-semanticen WIMs statt, welches unter Einsatz von OMG UML in Abbildung 3.9 implementierungsunabhängig dargestellt wird. Die Modellierung des WIMs erfolgt in einem kaskadischen Dreiklang, wonach ein *Wohnraum* durch mehrere *Räumlichkeiten* strukturiert ist, welche wiederum verschiedene, semantische Instanzen enthalten. Da im Rahmen der Wohnraumprüfung sowohl geometrische wie auch semantische Informationen von Bedeutung sind, werden die Instanzen als abstrakte Klasse *Räumlich-semantic Element (RSE)* zusammengefasst, die in einer Kompositionsbeziehung zur *Geometrie* und *Semantik* sowie der *Eignung* steht. Letztere Fachklasse inkorporiert dabei die Ergebnisse der regelbasierten Prüfung. Zwecks Übersichtlichkeit verzichtet die Darstellung darauf, alle elf identifizierten Fachklassen abzubilden und führt daher mit dem *Wohnraumstrukturelement* und *Wohnraumausstattungs-element* zwei weitere abstrakte Klassen ein, die eine entsprechende Gruppierung vornehmen. Unter einem *Wohnraumstrukturelement* versteht diese Arbeit folglich Instanzen der Klassen *Fußboden*, *Wand* sowie *Decke* und unter einem *Wohnraumausstattungs-element* demnach Instanzen der verbleibenden Klassen (vgl. Tabelle 3.4). Die Kardinalitäten beschreiben die mögliche Anzahl assoziierter Elemente, wobei im Zusammenhang mit der kaskadischen Wohnraumorganisation 1:n Beziehungen stattfinden.

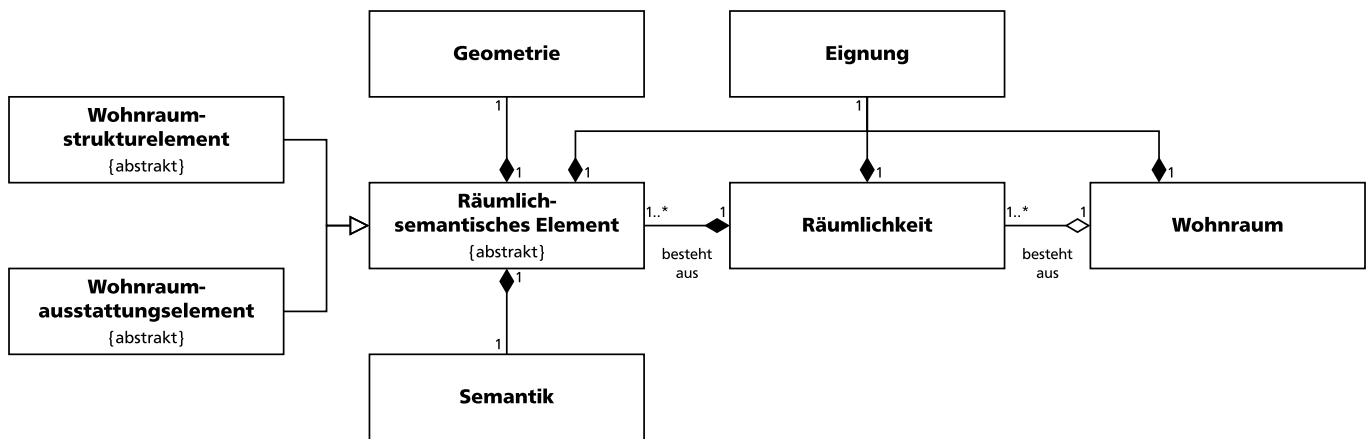


Abbildung 3.9: Klassendiagramm des Wohnrauminformationsmodells, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

Das *RSE* stellt die zentrale Einheit innerhalb des WIMs dar, welches die notwendige geometrische und semantische Information trägt. Dabei kann ein solches Element eine *Tür*, einen einzelnen *Stuhl* oder den *Fußboden* repräsentieren. Da die geometrischen Voraussetzungen der DIN 18040-2:2011-09 entweder das einzelne Element selbst oder entsprechendes in Abhängigkeit zu weiteren *RSE* adressiert, erfolgt die Eignungsprüfung durch die atomare Elementinstanz und kann anschließend sowohl auf die verschiedenen Räumlichkeiten als auch den Wohnraum aufkumuliert werden. Folglich stellt sich ein Wohnraum für eine altersgerechte Nutzung als *geeignet* dar, wenn alle Räumlichkeiten und damit alle darin vorkommenden Ausstattungselemente den geometrischen Regelkatalog erfüllen. Gegenteiliges gilt für den Fall, wenn geometrische Voraussetzungen verletzt werden. Von herausragender Bedeutung für die finale wohnraumbezogene Schlussfolgerung auf Eignung im Kontext der Altersgerechtigkeit sind die Gründe, weshalb eine elementbezogene Prüfung als nicht erfüllt gilt. Die daraus resultierenden, mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen sollen dem Nutzer für eine individuelle Wohnraumanpassung als Handlungsanweisung dienen, konkrete Maßnahmen einleiten, um die mobilitätsreduzierende Schwachstelle zu beheben. Diese Informationen werden während der Eignungsprüfung der *RSE* gesammelt und durch die Aggregationsbeziehung der digitalen Repräsentation der Räumlichkeit bzw. des Wohnraumes zur Verfügung gestellt. Auf der wohnraumbezogenen Ebene erfolgt in letzter Instanz die Ausformulierung eines textuellen Eignungsberichts sowie die Möglichkeit einen klassifizierten 3D-Datensatz zu exportieren, welcher die elementbezogene Eignung nach Altersgerechtigkeit farblich kodiert und damit auch visuell transportiert.

Tabelle 3.4: Einordnung der semantischen Fachklassen in die abstrakten Klassen des Wohnrauminformationsmodells

Wohnraumstrukturelement	Wohnraumausstattungs-element	
Fußboden	Tür	Fenster
Wand	Dusche	Stuhl
Decke	Toilette	Tisch
	Waschbecken	Sonstiges



---

## 3.6 Zwischenfazit

Im Rahmen dieses Kapitels werden unterschiedliche qualitative Anforderungsmerkmale zusammengetragen, die sich einheitlich vor den geometrischen Rahmenbedingungen zur Ausstattung eines barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnraumes positionieren und dabei den potenziellen Nutzergruppen (Klient, Wohnberatung und Pflegekasse) der Anwendung Rechnung tragen (vgl. Abschnitt 3.2.1). Aus diesen Anforderungen erschließt sich ein dreifaltiges Prozessmodell, welches mit einer strukturierten Geometrieerfassung (Forschungsaspekt 2) einleitet, anschließend die Informationsmodellierung des digitalisierten Wohnraumes vornimmt (Forschungsaspekt 1) und darin abschließend eine regelbasierte Geometrieprüfung zwecks Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen durchführt (Forschungsaspekt 3). Das spezifizierte WIM repräsentiert innerhalb dieser Anwendung die grundlegende, hierarchische Informationsmodellierung mit der Funktionalität zur geometrischen Regelprüfung und damit der Bewertung des Wohnraumes hinsichtlich der altersgerechten Nutzbarkeit. Dieses Datenmodell steht in Zusammenhang mit dem ersten Forschungsaspekt und stellt bezüglich der adaptierten Forschungsmethodik nach Hevner et al. (2004) sowie Gregor et al. (2013) ein Software-Artefakt mit spezifischem Gestaltungsdesign (Level 1) dar. Über das WIM hinaus ist die Implementierung einer Schnittstelle vorgesehen, über welche die aufbereiteten Ergebnisdaten in standardisierten Formaten ausgetauscht werden können. Von Bedeutung ist bei der Konzeptionierung einer solchen nutzerzentrierten Anwendung insbesondere die Automatisierung, welche sowohl bei der Datenerfassung als auch -modellierung in Erscheinung tritt. Der Grad der Automatisierung ist dabei von den Möglichkeiten, das angestrebte Ziel unter Einsatz digitaler Technologien zu erreichen, abhängig und damit letztlich entscheidend für die Einordnung der prototypisch implementierten Anwendung in die zuvor definierten Nutzungsszenarien.

Die vermessungstechnische Erfassung von Wohnraumbestand erfolgt heutzutage primär unter der Zielsetzung, eine dokumentative Datengrundlage für die *as-built* Modellierung zu generieren (vgl. Rocha et al. 2020, Usmani et al. 2020, Leoni et al. 2019, Barbosa 2018, X. Yang et al. 2017, Bassier; Vergauwen et al. 2017, Adami et al. 2017, Quintana et al. 2017, Stumm et al. 2017, Bassier; Vergauwen et al. 2016, Chai et al. 2016, C. P. H. Thomson 2016, Tommasi et al. 2016, Valero; Adán et al. 2016, Macher et al. 2015, Bassier; Yousefzadeh et al. 2015, Blankenbach 2015, C. Thomson et al. 2015, Pătrăucean et al. 2015, Son et al. 2015, C. Thomson et al. 2015, Ochmann et al. 2014, Xiong et al. 2013, Valero; Adan et al. 2011, Tang et al. 2010). Dabei setzen die aufgeführten Veröffentlichungen durchweg auf Punktwolken als repräsentierende Modalität von 3D-Daten, welche durch radiometrische Informationen, wie z. B. Intensitätswerte oder realitätstreue Farbwerte aus korrespondierenden Bildaufnahmen, koloriert werden können (Blankenbach 2017, S. 18, Clemen et al. 2014, S. 235 f.). Die originäre Punktwolke stellt damit neben geometrischen auch radiometrische Informationen eines diskretisierten Objekts bzw. einer Szene, z. B. eine Räumlichkeit wie das Wohn-, Schlaf- oder Badezimmer, zur Verfügung und ist infolgedessen einer bildbasierten Dokumentation informativ deutlich überlegen, wenngleich durch den unorganisierten Charakter und massiven Datenumfang dieser Modalität Herausforderungen bezüglich der automatisierten Verarbeitung einhergehen (Romero-Jarén et al. 2021, S. 216). Die Komplexität diskretisierter Wohnräume verstärkt diesen Tonus, welcher durch eine Vielzahl von Forschungsprojekten aus den unterschiedlichsten Disziplinen zu lösen versucht wird. Sofern eine automatisierte Verarbeitung von originären Punktwolken vorgesehen ist, gilt es den unorganisierten Charakter durch eine anwendungsbezogene

---

Strukturierung aufzulösen (vgl. Obrock et al. 2020, S. 360, Poux 2019, S. 37). Da diese für gewöhnlich durch eine nachgelagerte Verarbeitung erfolgt, welche nicht in Einklang mit den Anforderungen an eine intuitiv sowie für Mobilitätseingeschränkte nutzbare und zugleich mit möglichst wenig (technischen) Hilfsmitteln auskommende Anwendung steht, soll ein simultaner Datenerfassungs- und -strukturierungsprozess auf Basis schnell erlernbarer und verfügbarer Technologien entwickelt werden, durch welche die Digitalisierung und Regelprüfung eines bestehenden Wohnraumes anwenderorientiert und bedarfsgerecht ermöglicht wird.

Die in diesem Kapitel beschriebene Vorgehensweise zur automatisierten Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen im Rahmen eines räumlich-semanticen WIMs stellt eine innovative und zugleich vollkommen neuartige Herangehensweise zur Forcierung des dritten Gesundheitsstandorts im Kontext *Ageing in Place* sowie innerhalb der Bemühungen um eine Digitalisierung des Gesundheitswesens und der Pflege dar.

---

## 4 Technologien zur digitalen 3D-Geometrieerfassung und automatisierten Datenverarbeitung

---

Das im vorangegangenen Kapitel erarbeitete Konzept beschreibt einen neuartigen Lösungsweg zur Identifikation von innerhäuslichen Verbesserungsmaßnahmen auf Basis dedizierter Software-Artefakte, um das *Ageing in Place* für Menschen mit Mobilitätseinschränkungen zu unterstützen. Dafür wird der Entwurf eines räumlich-semantischen Wohnrauminformationsmodells (WIMs) vorgeschlagen, welches aus einem strukturierten 3D-Datensatz resultiert, der den zu prüfenden Wohnraum durch eine digitale Anwendung im Vorfeld diskretisiert. Gegenstand dieses Kapitels ist es, den Stand der Technik zur geometrischen Erfassung und semantischen Strukturierung eines solchen Datensatzes zwecks automatisierbarer Prozessierung zu erarbeiten. Dazu widmet sich der erste Abschnitt aktuellen und geeigneten messtechnischen Verfahren zur 3D-Erfassung baulicher Anlagen für Rekonstruktionsanwendungen. Im zweiten Abschnitt werden Verfahren zur Strukturierung von 3D-Daten vorgestellt und hinsichtlich ihrer Eignung unter Beachtung des aufgestellten Anforderungskatalogs analysiert. Aus den beiden Abschnitten resultieren schlussendlich hard- bzw. softwaretechnische Verfahren, welche die Grundlage für das Gestaltungswissen und damit die prototypische Implementierung der Anwendung legen. Das Kapitel schließt mit einer Diskussion bezüglich einer alternativen Anwendungsperspektive ab.

### 4.1 Stand der Technik zur 3D-Erfassung innerhäuslicher Szenen

Wie bereits im zweiten Kapitel dargelegt, hat die Digitalisierung das Gesundheitswesen erreicht und bietet u. a. durch digitale Anwendungen große Chancen die *„Herausforderungen besser anzugehen, vor denen fast alle Gesundheitssysteme der westlichen Welt stehen – immer mehr ältere [...] Menschen zu [...] versorgen“* (BMG 2023b). Disruptive Technologien erhalten heutzutage über das Gesundheitswesen hinaus Einzug in diverse Industrie- und Wirtschaftssektoren, verändern dabei Praktiken und erschaffen täglich neue Anwendungen (vgl. Poux 2019, S. 29). Die Erfassung und Repräsentation der gebauten Umwelt durch 3D-Daten wird zeitgemäß auch als *Reality Capture* bezeichnet und stellt sich als Teil dieser Technologien dar, welche die Erstellung räumlicher Datensätze in verschiedenskaligen Maßstäben erlauben (vgl. Poux 2019, S. 29). Dazu existieren diverse 3D-Datenerfassungstechnologien aus unterschiedlichen Verfahrenskategorien, welche im Rahmen dieses Abschnitts beleuchtet und bezüglich der Eignung für die wohnraumbezogene Digitalisierung

(vgl. Abbildung 3.2) selektiv bewertet werden. Der Abschnitt stellt zunächst Repräsentationsmodalitäten vor, welche zur Darstellung und Verarbeitung von 3D-Daten zielführend sind. Darüber hinaus wird der Stand der Technik zur Erzeugung von 3D-Daten präsentiert. Die Definition von selektiven Bewertungsmerkmalen schließt angesichts der Zielsetzung und Forschungsaspekte dieser Arbeit daran an. Anhand einer Testräumlichkeit werden die vorgestellten Verfahren gegenübergestellt und evaluiert. Eine Technologie, welche seit kurzem auch in mobilen Endgeräten verbaut und als Flash-LiDAR bezeichnet wird, qualifiziert sich folglich für die Digitalisierung von Wohnraum, weshalb dieses Verfahren zum Abschluss des Kapitels tiefgehend spezifiziert wird.

#### 4.1.1 Modalitäten zur Repräsentation von 3D-Daten

In ihrer allgemeinen Form stellen 3D-Daten für viele Anwendungen und Entscheidungen eine essenzielle Informationsgrundlage dar. Im Rahmen dieser Arbeit dienen sie zur räumlich-semantischen Beschreibung von Wohnräumen. Dafür können 3D-Daten in verschiedenen Repräsentationen vorliegen, welche als Sprache bezeichnet werden, um die geometrische und semantische Syntax zu definieren (vgl. Gezawa et al. 2020, S. 57567). Innerhalb dieses Abschnitts werden verschiedene Kategorien, die als Grundlage für einige in dieser Arbeit behandelte Verfahren dienen, kurz ausgeführt und anhand eines der meistverwendeten Testmodelle der 3D-Computergrafik verbildlicht, dem *Stanford Bunny*<sup>22</sup>. Nach Gezawa et al. (2020), Xiao et al. (2020), Ghorpade et al. (2017) sowie Shin et al. (2018) kann über das originäre Format hinaus in graphen- und oberflächenbasierte sowie volumetrische und parametrische Repräsentationen unterschieden werden. Letztere bleiben im Rahmen dieser Arbeit unberücksichtigt (vgl. Abschnitt 3.4) und sind damit nicht Bestandteil der weiteren Ausführungen.

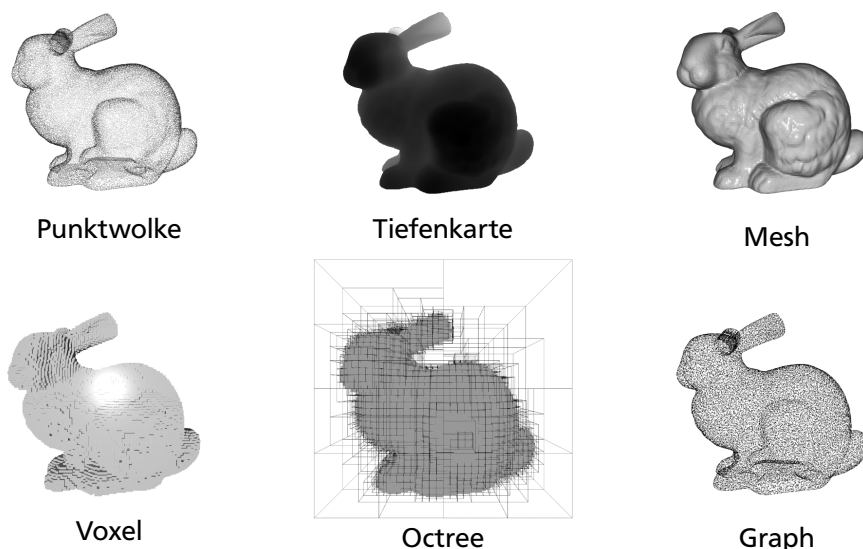


Abbildung 4.1: Beispiele unterschiedlicher Repräsentationen von 3D-Daten am *Stanford Bunny*

<sup>22</sup>Der *Stanford Bunny* geht aus der Veröffentlichung von Turk et al. (1994) hervor, die an der Stanford University durch Entfernungsmessungen polygonale Modelle ableiteten.

---

Originäre 3D-Daten können durch unterschiedliche messtechnische Verfahren gewonnen werden, von denen eine Auswahl im anknüpfenden Abschnitt vorgestellt wird. Hinsichtlich dieser spielen insbesondere die 3D-Punktwolke und Tiefenkarte (RGB-D Daten) eine Rolle. Eine **Punktwolke** besteht aus einer ungeordneten Menge einzelner Datenpunkte, die neben meist kartesischen Koordinatentripeln auch zusätzliche attributive Informationen, wie z. B. Farb- bzw. Intensitätswerte oder Oberflächennormalen, führen können. In aller Regel durch eine hohe räumliche Auflösung charakterisiert, finden Punktwolken in vielen Aufgabenbereichen der Computer Vision Anwendung, darunter die Klassifikation (vgl. H. Wu et al. 2020 und Tamajo, Plaß und Klauer 2022), Segmentierung (vgl. Qi; Yi et al. 2017), Objekterkennung (vgl. Qi; Litany et al. 2019) und Rekonstruktion (vgl. Nikoohemat et al. 2020). Das liegt darin begründet, dass sich Punktwolken leicht generieren lassen und heutzutage viele verschiedene Verfahren aus den unterschiedlichsten Preissegmenten dafür zur Verfügung stehen (vgl. Plaß; Emrich et al. 2021, S. 9). Darüber hinaus besitzen sie eine kanonische Struktur, die es erlaubt zwischen einigen Repräsentationsmodalitäten verlustfrei zu wechseln. Gleichzeitig gehen durch die Verwendung von Punktwolken Herausforderungen einher, die auf eine fehlende Struktur innerhalb der Modalität, einen massiven Umfang sowie weitere technische und messobjekt- bzw. umgebungsbezogene Abhängigkeiten, wie unvollständige, fehlende oder verrauschte Daten, zurückzuführen sind. Für einen umfangreichen Überblick über potenzielle Artefakte von 3D-Punktwolken wird an dieser Stelle auf Poux (2019, S. 33) verwiesen. Die **Tiefenkarte** repräsentiert eine weitere originäre Repräsentation, welche Informationen über die Entfernung von einem Sichtpunkt zur Oberfläche der Szeneobjekte als zusätzlichen Bildkanal codiert. Daraus resultiert ein vierkanaliger Bilddatensatz (RGB-D), der die Farbinformationen über die klassischen RGB-Kanäle und die Entfernung aus dem Tiefenkanal (engl. Depth, D) bezieht. Tiefenkarten zählen streng genommen nicht zu den reinen 3D-Daten und werden daher als 2,5D Daten bezeichnet. Zwischen Tiefenkarten und Punktwolken ist eine verlustfreie Datenüberführung bilateral möglich.

Die bekannteste, oberflächenbasierte Repräsentation von 3D-Daten sind polygonal-vermaschte Modelle, sogenannte **Meshs**. 3D-Meshs bestehen aus einer Kombination von Stützpunkten (*vertices*), Kanten (*edges*) und Dreiecksflächen (*faces*), wodurch die Oberfläche eines Szenenobjekts im Gegensatz zur Punktwolke flächenhaft beschrieben wird. Durch die Dreiecksflächen sind Meshes insbesondere für hardware-beschleunigte Renderingzwecke geeignet. Trotz der Konnektivität zwischen den einzelnen Stützpunkten ist das Datenschema von Meshes irregulär und komplex. Ausgehend von einem Mesh kann die Punktwolke entweder durch homogenes Punktsampling oder durch den *Poisson Disk* Ansatz (Yuksel 2015) generiert werden. Der umgekehrte Weg wird als Oberflächenrekonstruktion (*surface reconstruction*) bezeichnet, für welchen die Literatur eine Reihe von Methoden anbietet. Die bekanntesten darunter sind  $\alpha$ -*shape* (Edelsbrunner et al. 1983), *Ball-Pivoting* (Bernardini et al. 1999) und *Poisson surface reconstruction* (Kazhdan et al. 2006).

Volumetrische Repräsentationen von 3D-Daten dienen vor allem dem Zweck, den dreidimensionalen Raum virtuell zu partitionieren. Als binäre Datenstruktur definieren sie quadratische Teilräume innerhalb der räumlichen Ausdehnung der diskretisierten Szene, welche durch Daten als belegt oder unbelegt markiert sind. Volumenrepräsentationen leisten einen entscheidenden Beitrag zur diffusen Beschreibung des dreidimensionalen Raumes und zur effizienten Identifikation benachbarter Daten eines Abfragekandidaten. Entscheidender Nachteil hingegen ist zum einen die Unfähigkeit die Rauheit der Oberfläche zu beschreiben und zum anderen ein erhöhter Speicherbedarf aufgrund der Listung auch unbelegter Teilräume. Voxel und Octrees sind zwei der wichtigsten Modalitäten

---

bei der volumetrischen Repräsentation von 3D-Daten. Während Punktwolken und Meshes irreguläre geometrische Repräsentationen sind, stellt sich ein **Voxel** als reguläres, kubisches Volumenelement innerhalb eines gleichmäßigen dreidimensionalen Gitters dar. Diese speichert die räumliche Position nicht explizit, sondern leitet diese implizit aus der Verortung zu anderen Voxel her und ist damit zur Repräsentation eines äquidistant gesampelten Raumes geeignet. Sie lassen sich als dreidimensionales Äquivalent zu Bildpixeln verstehen, die aus Punktwolken und Meshes unter Angabe der Größe des Voxels oder aus Octrees erzeugt werden können. Die Kantenlänge der Voxel ist dabei abhängig von der Zielstellung und der Verteilung der Daten im dreidimensionalen Raum. Bei einem **Octree** handelt es sich um einen Oktonärbaum, welcher den 3D-Datensatz rekursiv in jeweils acht Quadranten separiert. Folglich besitzt ein resultierender Zweig entweder acht weitere Knoten oder keinen. Octrees werden mit einer zu spezifizierenden Maximaltiefe aus Voxelgittern oder Punktwolken konstruiert. Im Vergleich zum Octree handelt es sich bei dem KD-tree (Bentley 1980, Friedman et al. 1977) um einen Binärbaum, welcher eine Datenmenge im  $k$ -dimensionalen Raum durch Hyperebenen aufteilt, die senkrecht zu den Koordinatenachsen verlaufen. Die Partitionierung endet, wenn bis zur Wurzel des Baumes jeder Blattknoten einem einzelnen Datenpunkt entspricht (vgl. Samet 2006, S. 50 f.). KD-trees eignen sich für die effiziente Suche benachbarter Punkte.

Nach Gezawa et al. (2020, S. 57568) existiert eine weitere Repräsentationsmodalität, welche eine prägnante und zugleich umfangreiche Darstellung eines 3D-Datensatzes erlaubt, sogenannte *High-Level Strukturen*. Zu solchen Strukturen zählen im Allgemeinen **Graphen**. Im Rahmen dieser Arbeit finden Nachbarschaftsgraphen (*Nearest-Neighbor Graph*, *NNG*) Verwendung, die lokale Relationen zwischen einzelnen Datenpunkten modellieren (Eppstein et al. 1997, S. 263 f.). Der *NNG* wird für Datenpunkte im metrischen Raum definiert, indem zwei benachbarte Punkte  $p$  und  $q$  durch eine gerichtete Kante verbunden werden, sofern kein weiterer Punkt  $r$  existiert, der näher an  $p$  liegt als  $q$  (Eppstein et al. 1997, S. 264 f.). Der *NNG* lässt sich verallgemeinern, indem  $k$ -Kanten von einem Punkt  $p$  zu seinen  $k$ -nächstgelegenen Nachbarn eingeführt werden. Der *k-Nearest-Neighbor Graph* (*kNN-G*) ist ein in der Datenanalyse weit verbreiteter Graph für verschiedene Anwendungen aus dem Maschinellen Lernen (ML), darunter u. a. die spektrale Clusteranalyse und weitere unüberwachte Lernmethoden (vgl. Maier et al. 2007, S. 1 f.). In modifizierter Form ist der *kNN-G* auch für die Suche von  $k$ -nächsten Nachbarn geeignet (vgl. Hajebi et al. 2011, S. 1313 ff.).

## 4.1.2 Messtechnische Verfahren zur Erzeugung von 3D-Daten

Die Wichtigkeit von Punktwolken als originäre Repräsentationsmodalität von 3D-Daten für bauliche Dokumentations- und Rekonstruktionsanwendungen wird durch eine Vielzahl veröffentlichter Studien belegt, die im Rahmen der vorangegangenen Kapitel angeführt wurden (vgl. Abschnitt 3.3, 3.6 und 4.1.1). Dabei bleibt diese Arbeit es bislang schuldig, Verfahren aufzuführen, welche die geometrische Erfassung realisieren und die erhobenen Daten als Punktwolke repräsentieren. Dieser Abschnitt widmet sich deren Darstellung.

Nach Poux (2019, S. 30) sind für die Erfassung von baulichen Anlagen ausdrücklich drei Verfahren von Bedeutung: das terrestrische Laserscanning (TLS), handgetragene Laserscanning und die terrestrische Photogrammetrie (vgl. Abbildung 4.2). Diese Einschätzung teilen auch weitere Autoren, darunter u. a. Barbosa (2018) und Stumm et al. (2017). Darüber hinaus forciert der weltweit

---

steigende Bedarf zur Erfassung und Analyse großer Mengen von 3D-Daten das Wachstum und den technologischen Fortschritt auf dem sogenannten *3D-Scanning-Markt* (vgl. Research and Markets 2022). Infolgedessen sind im Laufe der letzten Jahre neue und vor allem preiswerte Verfahrenstechniken erschienen, die Daten über Geometrie und Erscheinung von realen Objektumgebungen durch Laufzeitmessungen (engl. Time-of-Flight (ToF)) erzeugen. Innovationsmotor ist hierbei insbesondere die Automobilindustrie, welche diese sogenannten Light Detection and Ranging (LiDAR)-Sensoren in Serienreife für das hochautomatisierte Fahren benötigt (vgl. Ying Li et al. 2021, You Li et al. 2020). Auch für die innerhäusliche Datenerfassung ist diese Technologie interessant, welche in der Literatur durch den synonym verwendeten Begriff der 3D-Kamera Platz findet (vgl. Lehtola et al. 2017).

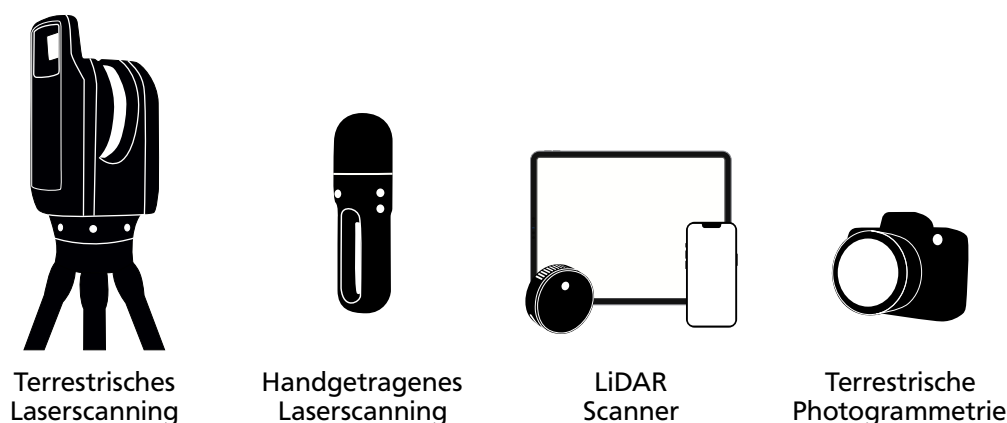


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der für die 3D-Erfassung von Wohnraum geeigneten, messtechnischen Verfahren

Die angeführten Verfahren erfassen die Szenen berührungslos sowie flächenhaft und repräsentieren das Ergebnis schlussendlich als Punktwolke oder Tiefenkarte. Dabei lassen sie sich zwei grundsätzlichen Aufnahmegruppen zuordnen, den *aktiven* und *passiven* Messverfahren. Beide Verfahren unterscheidet die eingesetzte Strahlungsquelle, welcher als Träger der Informationsübertragung verwendet wird (vgl. Heipke 2017, S. 2). Es folgt eine Kurzbeschreibung der Funktionsprinzipien und Benennung zugehöriger Instrumente bzw. Sensoren.

Die **terrestrische Photogrammetrie** ordnet sich den passiven Aufnahmeverfahren zu. Dazu werden Einzelbilder von der Szene aus unterschiedlichen Perspektiven und in möglichst hoher Überlappung aufgenommen, die anschließend orientiert und bei bekannter Kamerageometrie über einen räumlichen Vorwärtsschnitt zu einer Punktwolke weiterverarbeitet werden. In Gesamtheit wird dieser Prozess als Structure from Motion (SfM) bezeichnet, den Luhmann (2018, S. 487 ff.) ausführlich beschreibt. Nach dem Professor für Photogrammetrie und Fernerkundung gelingt der photogrammetrische Ansatz „generell dann, wenn eine ausreichende Oberflächentextur vorliegt, eine dichte Bildüberdeckung erzielt wird und die verwendete Kamera entweder vorab kalibriert oder zumindest während der Bildaufnahme mechanisch stabil bleibt“ (Luhmann 2018, S. 492). Damit eignet sich für photogrammetrische Verfahren grundsätzlich jede hochwertige Vollformat- oder Mittelformat-Digitalkamera, wie z. B. die *Nikon D3200*.

---

Beim Laserscanning wird die Szene durch einen Laserimpuls abgetastet, welcher vom Instrument generiert und typischerweise durch innenliegende, bewegliche Spiegel oder eine Zweiachsrotation der Sende- und Empfangseinheit abgelenkt wird. Durch die Entfernungsmessung, welche entweder nach dem ToF- oder Phasenvergleichsverfahren arbeitet (vgl. Kuhlmann et al. 2016, S. 6 ff.), und dem gemeinsamen Winkel- und Richtungsabgriff lässt sich das Laserscanning als polares Messverfahren bezeichnen. Während des Scans wird die im Blickfeld des Laserscanners liegende Oberfläche der Szeneobjekte durch ein Punktraster beschrieben, welches nach Abschluss des Erfassungsvorgangs als originärer Punktwolken-Datensatz zur Verfügung steht (vgl. Pfeifer et al. 2017, S. 432 f., Kern 2003, S. 10). Laserscanning zeichnet sich hauptsächlich durch drei wesentliche Merkmale aus: die flächenorientierte Szenenerfassung, die Robustheit gegenüber nicht oder schwach texturierten Oberflächen (vgl. terrestrische Photogrammetrie) und die vergleichsweise hohe Messgeschwindigkeit (Kutterer et al. 2009, S. 79). Sofern ein Laserscanner über On-Board Kameras verfügt, die zur Kolorierung der Punktwolke verwendet werden, wird allgemein von bildgebenden Laserscannern gesprochen. Beim **terrestrischen Laserscanning** wird die Position des Instruments während des Scans nicht verändert, wodurch in den meisten Fällen eine vollständige Diskretisierung der Szene erst über mehrere Standpunkte erzielt wird, die im Nachgang im sogenannten Registrierungsprozess (vgl. Wujanz et al. 2022) zusammengeführt werden. Das **handgetragene Laserscanning** aus dem Bereich der mobilen Sensorik stellt eine weitere Gruppe laserscannender Messverfahren mit bewegungsabhängigen Komponenten dar. Während des Scans muss folglich sowohl die 3D-Erfassung als auch Lokalisierung des Instruments im dreidimensionalen Raum gelöst werden. Dieses Verfahren wird als *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) bezeichnet und erfordert Näherungsinformationen, die über eine inertielle Messeinheit (IMU) geliefert werden. Inzwischen existieren verschiedene Varianten von SLAM, die neben den Beschleunigungswerten der IMU auch 2D-Bild- (visual SLAM) und 3D-Oberflächeninformationen (LiDAR SLAM) kombinieren, um sowohl Geschwindigkeits- und Genauigkeitsvorteile herbeizuführen (vgl. Debeunne et al. 2020). Weiterführende Informationen zum terrestrischen wie auch mobilen bzw. handgetragenen Laserscanning finden sich inzwischen in vielfältiger Form in der einschlägigen Literatur. Beispielhaft genannt sei an dieser Stelle Blankenbach et al. (2021, S. 491 ff.) sowie Kuhlmann et al. (2016, S. 4 ff.). Die Vielfalt von Laserscannern am vermessungstechnischen 3D-Scanning-Markt ist groß und die Leistungsparameter haben sich seit der Einführung vor über 20 Jahren stark weiterentwickelt. Aus diesem Grund umfasst die Arbeit an dieser Stelle keine vollständige Listung sämtlicher für die Bauwerksdokumentation relevanter Laserscanner. Gegenstand weiterer Ausführungen sind der terrestrische Laserscanner *Trimble X7* von gleichnamigem Hersteller und der *BLK2GO* von Leica Geosystems AG, welche zum Zeitpunkt der Untersuchung die aktuellsten auf dem Markt verfügbaren Laserscanner entsprechender Verfahrenstechnik darstellen. Für technische Spezifikationen wird auf die Internetauftritte der Anbieter verwiesen.

**LiDAR** bezeichnet eine Technik zur Bestimmung von Entfernungen mittels der ToF-Methode und zählt damit wie auch das Laserscanning zu den aktiven Messverfahren. Durch viele einzelne optische Abstandsmessungen wird die Szene abgetastet und damit dreidimensional in Form einer Tiefenkarte beschrieben. Je nach Art der einzeln erfassten Abstandsinformation wird unterschieden in scannendes LiDAR und nicht-scannendes LiDAR, wobei letzteres als abgrenzende Bezeichnung eingeführt ist, die durch Flash-LiDAR realisiert wird (vgl. C. Zhang et al. 2019, Liu et al. 2018). Durch die verlustfreie Überführung von Tiefenkarten in Punktwolken finden sich vereinzelt auch



Papiere, die Laserscanner als scannendes LiDAR betiteln. Diese synonyme Begriffsverwendung wird aufgrund der unterschiedlichen originären Datensätze nicht mitgetragen. Im Gegensatz zum scannenden LiDAR, welches rotierende Spiegel oder Mikro-Elektromechanische Systeme (MEMS) als Ablenkoptik einsetzt, kommt Flash-LiDAR gänzlich ohne beweglichen Teile aus, weshalb diese Sensoren kompakt, robust und günstig sind sowie unempfindlich auf Vibrationen reagieren (vgl. Jenoptik o. J.). Die flächenhafte Datenerfassung wird beim Flash-LiDAR durch einen aufgeweiteten Laserimpuls realisiert, der hochfrequent emittiert, an der Oberfläche der Szeneobjekte reflektiert und auf einen Fotodetektor abgebildet wird. Dabei wird die Signallaufzeit pro Detektorelement ausgewertet. Folglich resultiert aus einem emittierten Laserimpuls eine in drei Dimensionen aufgelöste Tiefenkarte. Die LiDAR Technologie bindet aufgrund ihrer Bedeutung für das hochautomatisierte Fahren einen eigenständigen Markt mit einer jährlichen Wachstumsrate von 16,3% und einem geschätzten Volumen von über 16,5 Milliarden USD bis 2030 (vgl. Research and Markets 2022). Darin existieren Sensoren verschiedener Couleur. Vor dem Hintergrund der innerhäuslichen Verwendung sind kompakte, preiswerte und vor allem eigenständige Systeme von Interesse, die hier durch zwei Flash-LiDAR-Sensoren repräsentiert werden: die Intel® RealSense™ *LiDAR Kamera L515* und den integrierten *LiDAR-Scanner* der ersten Generation, welchen Apple Inc. sowohl in den *iPhone 12+ Pro* als auch den *iPad Pro 2020+* verbaut (vgl. Niclass; Shpunt et al. 2020, S. 12).

### 4.1.3 Selektive Bewertungsmerkmale an messtechnische Verfahren

Gemäß dem Stand der Technik ist für die Rekonstruktion von Gebäudebestand ein Quartett an messtechnischen Verfahrenskategorien von Bedeutung, die im vorangegangenen Abschnitt genannt und mit Instrumenten bzw. Sensoren in Verbindung gebracht wurden. Um eine hinsichtlich der 3D-Erfassung von Wohnraum geeignete Verfahrensbewertung vornehmen zu können, werden acht selektive Bewertungsmerkmale definiert und in zwei Gruppen einsortiert, um sowohl der Zielgruppen-gerechten Nutzbarkeit, als auch der messleistungstechnischen Eignung nachzukommen. Weite Teile der anschließenden Ausführungen dieses Kapitelabschnitts basieren auf der Veröffentlichung von Plaß; Emrich et al. (2021).

Tabelle 4.1: Spezifikation selektiver Bewertungsmerkmale zur Evaluation geeigneter Techniken für die innerhäusliche Datenerfassung

Messtechnische Merkmale	Nutzungsrelevante Merkmale
3D-Punktgenauigkeit	Benutzerfreundlichkeit der Messung
Streckenmaßstab	Einfachheit der Auswertung
Messrauschen	Zuverlässigkeit der Technik
Punktdichte	Erwerbskosten

#### Messtechnische Bewertungsmerkmale

Diese Gruppe der Bewertungsmerkmale adressiert die Qualität der Sensorik der messtechnischen Verfahren, welche dementsprechend einen Einfluss auf die Genauigkeit des erhobenen, originären

---

3D-Datensatzes hat. Klassischerweise erfolgt die Spezifikation technischer Daten herstellerseitig und beschreibt die Qualität bzw. Ungenauigkeit sensorischer Einzelkomponenten, teilweise dieser auch im Wechselspiel miteinander, dediziert. Beim TLS sind das beispielsweise die Komponenten der elektrooptischen Distanzmessung und der Achsmechanik (vgl. Neitzel et al. 2014, S. 2). Bei der Photogrammetrie hingegen kommt u. a. der Aufnahmekamera und mit ihr der Größe des Bildsensors und die durch das Kameraobjektiv limitierte Qualität der optischen Abbildung eine besondere Bedeutung zu (vgl. Luhmann 2018, S. 614 f.). LiDAR-Sensoren verfügen neben Emittier- und Empfangseinheit auch über Inertialsensorik, welche allesamt das Ergebnis beeinflussen und damit einer getrennten technischen Beschreibung bedürfen. Da sich die Komponenten der messtechnischen Verfahren und mit ihr die Komponentenspezifikationen stark unterscheiden, werden generische Bewertungsmerkmale an den resultierenden 3D-Datensatz definiert, die sich aus den geometrischen Anforderungen an einen barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnraum ableiten und damit implizit Rückschlüsse auf die Qualität der Sensorik innerhalb dieses Anwendungsbereichs zulassen. Von Bedeutung für die Geometrieprüfung in ausgestatteten Wohnräumen sind dabei neben der inneren Genauigkeit, repräsentiert durch die *3D-Punktgenauigkeit* und den für die geometrische Regelprüfung nach Tabelle 3.1 wesentlichen *Streckenmaßstab*, auch das *Messrauschen* und die zu erzielende *Punktdichte*, welche allesamt als numerische Kennzahlen definiert werden. Ergänzend ist diesbezüglich zu nennen, dass die messtechnischen Merkmale nur bedingt in die sensorische Gesamtbewertung (siehe Abschnitt 4.1.5) einfließen, denn sofern die Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich des zu bedienenden Regelkatalogs (vgl. Tabelle 3.1) ausreichend erfüllt sind, bringen weitere Qualitätssteigerungen keine relevanten Vorteile ein. Insofern wird in dieser Gruppe primär bewertet, ob die Technik die Voraussetzungen erfüllt, einen qualifizierten 3D-Datensatz bereitzustellen.

### **Nutzungsrelevante Bewertungsmerkmale**

Im Vergleich zu den messtechnischen Merkmalen adressiert diese Gruppe die Gebrauchstauglichkeit der Techniken, welche einen entscheidenden Beitrag zur nutzerseitigen Akzeptanz und damit auch der Nutzungsdichte leistet. Das „*Ausmaß, in dem ein System [...] von bestimmten Nutzern verwendet werden kann, um bestimmte Ziele [...] in einem bestimmten Anwendungskontext zu erreichen*“ definiert die ISO 9241-201:2019 als *Usability* und führt damit zu einer wichtigen und weit verbreiteten Methode zur Bewertung der Gebrauchstauglichkeit von Systemen, dem *Usability-Test* (Wichansky 2000, S. 998). Solche werden nach Alshamari et al. (2009, S. 402) primär für Webseiten durchgeführt und verwenden mehrzahlige Faktoren, die versatile Auswirkungen auf das Bewertungsergebnis haben. Da im Rahmen dieses Abschnitts untersucht werden soll, welche Techniken, die in Abhängigkeit zum jeweiligen Verfahren vielschichtige und untrennbare hardware- sowie softwareseitige Komponenten besitzen, die Digitalisierung von Wohnraum möglichst nutzerfreundlich begünstigen, lässt sich die Methode der *Usability-Tests* nicht auf diese Teilstudie übertragen. Folglich werden die hier untersuchten Techniken nicht gesondert nach gängigen *Usability-Methoden* überprüft. Stattdessen werden vier Merkmale formuliert, die in ihrer Gesamtheit eine heuristische Bewertung der Zielgruppen-gerechten Nutzbarkeit ermöglichen: die *Benutzerfreundlichkeit der Messung*, die *Einfachheit der Auswertung*, die *Zuverlässigkeit der Technik* und zuletzt die aufzuwendenden *Erwerbskosten*. Zentrales Gebot für die Eignung der Technik ist eine Abwägung aus den genannten Bewertungsmerkmalen. Die

---

*Benutzerfreundlichkeit der Messung* erfasst dabei die Anwesenheit einer möglichst kompakten Technik, die mit wenig Hilfsmitteln auskommt, keinen oder einen schnell erlernbaren, initialen Konfigurations- oder Kalibrationsprozess benötigt und eine visuelle Anzeige des Erfassungsfortschritts anbietet, um die Durchführung der Messung auch für den technisch nicht ausgebildeten Nutzer so einfach wie möglich, fehlerfrei und umfassend zu ermöglichen (Nutzungsszenario 1–2). Unter der *Einfachheit der Auswertung* versteht diese Arbeit einen möglichst automatisierten Vorgang, der sich bestenfalls vor Ort ausführen lässt, keine zusätzlichen Gerätschaften wie Laptops oder Tablets benötigt und die Fähigkeit besitzt, die Daten in einem herstellerunabhängigen Format bereitzustellen. Die *Zuverlässigkeit der Technik* definiert sich allgemein durch einen stabilen und fehlerunanfälligen, hard- bzw. softwareseitig gestützten Prozess zur Erfassung und Auswertung der Szene bis hin zum fertigen 3D-Datensatz als Repräsentationsmodalität solcher. Abschließend spielen auch die *Erwerbskosten* der Technik, einschließlich aller erforderlichen Hilfsmittel und für die Auswertung notwendigen Gerätschaften und Softwarelösungen, eine Rolle. Mit Ausnahme des letzten Kriteriums definieren sich diese durch relative, kategorische Werte, um eine vergleichende Bewertung zu ermöglichen.

#### 4.1.4 Ausstattung und Erfassung einer Testräumlichkeit

Die Selektion einer Technik zur 3D-Datenerfassung, die sowohl hinsichtlich der Genauigkeitsbedingungen als auch Nutzungsvoraussetzungen Bestand hat, legt den Grundstein für die prototypisch zu entwickelnde Anwendung zur automatisierten Identifikation wohnraumbezogener Verbesserungsmaßnahmen (Forschungsaspekt 3). Aus diesem Grund stellt die Bewertung des benannten *Sensorzoos* (vgl. Abschnitt 4.1.2) eine wesentliche Säule innerhalb dieser Arbeit dar. Mit dem Ziel eine möglichst anwendungsnahe und übertragbare Evaluation vorzunehmen, wird eine nutzungsartenspezifische Testräumlichkeit geschaffen, die beide Gruppen der selektiven Bewertungsmerkmale (vgl. Tabelle 4.1) adressiert und darüber hinaus möglichst vielfältige Elemente einer üblichen Innenraumausstattung enthält, um die gewonnenen Erkenntnisse im Nachgang auf weitere Nutzungsarten übertragen zu können. Zusätzlich werden qualitative Gegebenheiten geschaffen, um eine messtechnische Genauigkeitsuntersuchung zu ermöglichen. Die Ausstattung der Testräumlichkeit ist in Abbildung 4.3 illustriert und lehnt sich an die geometrischen Anforderungen aus der DIN 18040-2:2011-09 (vgl. Tabelle 3.1) an. Danach wird der ca. 47 m<sup>2</sup> große Raum durch die jeweiligen Ausstattungselemente in einen Wohn- und Arbeits- bzw. Essbereich separiert, welche durch eine freie Bewegungsfläche miteinander verbunden sind. Neben den unterschiedlich angeordneten Elementen haben auch die Fensterfronten als Raumbegrenzung einen Einfluss auf den Datenerfassungsprozess und damit auf die Qualität des 3D-Datensatzes. Ergänzend dazu wird die Testräumlichkeit um 15 eindeutig identifizierbare, planare Zielzeichen vom Design nach D. Becker et al. (2023) in einer räumlich guten Verteilung und zwei fest definierte Maßstäbe sowie vier 50 cm × 50 cm große Testflächen auf Oberflächen verschiedenen Reflektanzverhaltens erweitert, um die notwendigen Voraussetzungen zur Quantifizierung der messtechnischen Merkmale zu schaffen.

Die Genauigkeit der zu bewertenden Techniken spielt innerhalb der messtechnischen Bewertungsmerkmale eine zentrale Rolle. Dabei ist die *Genauigkeit* nicht direkt messbar, sondern wird vielmehr indirekt aus technisch unvermeidbaren Messabweichungen abgeleitet (Schwarz et al. 2016, S. 3). Die DIN 55350-13 bezeichnet *Genauigkeit* als das Maß der Annäherung von Messergebnissen an einen Referenzwert, wobei dieser je nach Definition der wahre, der richtige oder der Erwartungswert

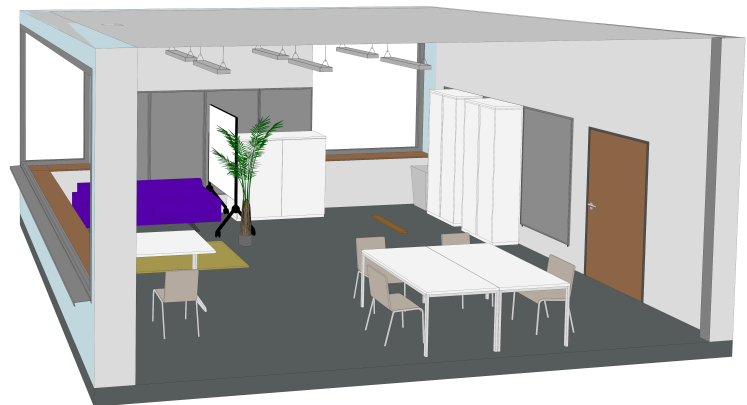
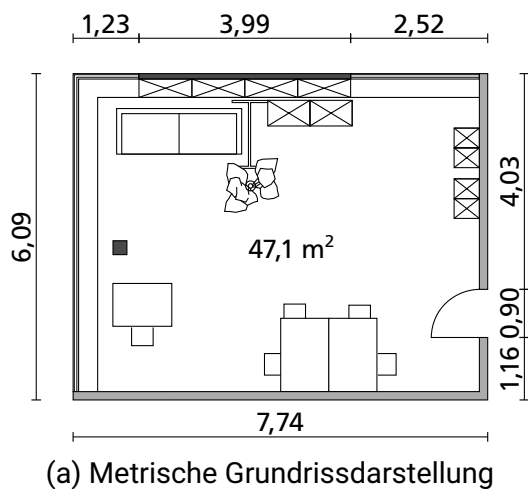


Abbildung 4.3: Ausstattung der Testräumlichkeit in zwei Ansichten nach Plaß; Emrich et al. (2021)

sein kann (vgl. Witte et al. 2020, S. 723 ff., Schwarz et al. 2016, S. 6 f.). Da insbesondere im geodätischen Kontext der wahre Wert häufig ideeller Natur ist, ist es nötig einen Näherungswert zu definieren, welcher dem unbekanntem wahren Wert möglichst nahekommt. Dieser Näherungswert wird auch als Vergleichsnorm, richtiger oder quasi-wahrer Wert bezeichnet (Witte et al. 2020, S. 725) und ist im Vergleich zu dem zu bewertenden Messergebnis durch ein deutlich genaueres und qualitativ hochwertigeres Verfahren zu bestimmen (vgl. Schwarz et al. 2016, S. 3). Innerhalb der Geodäsie entspricht die Standardabweichung  $\sigma$  der erläuterten Definition von *Genauigkeit* (Schwarz et al. 2016, S. 8). Gemäß der Varianzdefinition gleicht diese der positiven Quadratwurzel aus dem gewichteten Mittel der quadrierten Restabweichungen der Messwerte  $x_i$  zum Referenzwert  $\mu$ :

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2} \quad (4.1)$$

Zur Schätzung der Standardabweichung für entsprechende Bewertungsmerkmale nach Formel 4.1 müssen Mess- und Vergleichswerte in einem einheitlichen Bezugssystem vorliegen. Die Transformation einzelner 3D-Datensätze in ein gemeinsames Bezugssystem wird nach Wujanz et al. (2022, S. 2) als Registrierung definiert. Zur Bestimmung der sechs Freiheitsgrade existieren unterschiedliche Verfahren und damit einhergehend verschieden stark ausgeprägte Vorbereitungsaktivitäten (vgl. Wujanz et al. 2022, S. 13 ff.). Die vielseitigste Registrierungsmethode basiert auf dem Iterative Closest Point (ICP) Algorithmus, welcher die Transformationsparameter nach einer Vorausrichtung zur Vermeidung lokaler Minima automatisiert bestimmt, indem Punktkorrespondenzen in redundant erfassten Bereichen gesucht und iterativ minimiert werden (vgl. Besl et al. 1992). Damit ist es erforderlich, die 3D-Datensätze des zu bewertenden Verfahrenstechniken als 3D-Punktwolke zu repräsentieren. Die für den ICP-Algorithmus notwendige Vorausrichtung wird durch die planaren Zielzeichen realisiert, welche die Überführung aller Punktwolken in ein einheitliches, lokales Bezugssystem ermöglichen. Die Feinregistrierung der zu bewertenden Punktwolken auf die Referenzpunktwolke aus der hochwertigsten Technik des genannten *Sensorzoos* schließt daran an.

Das Prozessmodell des erläuterten Ablaufs zur Registrierung zwischen den 3D-Punktwolken liefert Abbildung 4.4. Im Anschluss daran werden die Prozesse zur Erfassung der Punktwolken innerhalb der Testräumlichkeit prägnant und im Wesentlichen auf die Bewertungsmerkmale nach Tabelle 4.1 hin beschränkt vorgestellt.

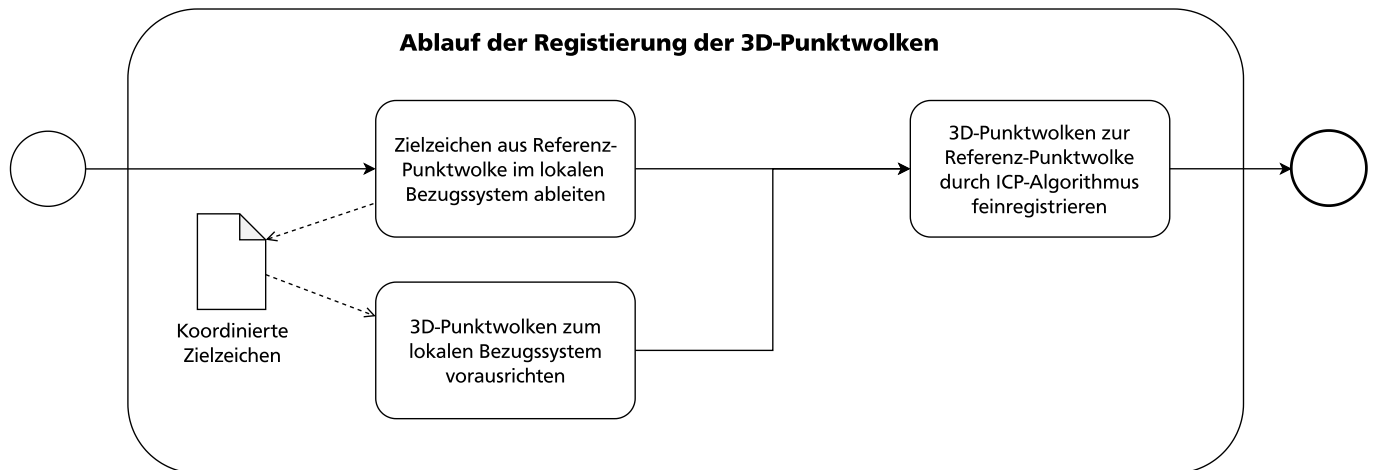


Abbildung 4.4: Schematischer Ablauf des Registrierungsprozesses der Testräumlichkeit durch den ICP-Algorithmus, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

Die Wahl der Technik zur Aufnahme der Referenzpunktwolke fällt im Hinblick auf die herstellerseitig angegebene Genauigkeit von 2,4 mm auf 10 m auf den *Trimble X7*. Dieser stellt zum Zeitpunkt der Bewertungsstudie (Oktober 2020) den aktuellsten terrestrischen Laserscanner auf dem Markt zur 3D-Datenerfassung dar, welcher durch eine Vielzahl technischer Neuerungen zweckmäßige Routinen vor und nach der Datenerfassung vereinfacht. Exemplarisch sei an dieser Stelle die automatische Kalibrierung, Vorregistrierung, Neigungskompensation und integrierte Bildverarbeitung zur direkten Kolorierung der Punktwolke aufgeführt. Für weitere technische Spezifikationen zum 5,8 kg schweren Laserscanner wird auf das Datenblatt verwiesen. Ein Tablet mit der herstellereigenen Software *Trimble Perspective* begleitet die Steuerung des Scanners sowie die Visualisierung und Verarbeitung der erfassten 3D-Daten. Die Bedienung ist dabei anleitend und für ausgebildete Anwender weitgehend selbsterklärend (Nutzungsszenario 3). Der Scanfortschritt kann über das Tablet angezeigt und die automatisch registrierte Punktwolke mehrerer Scans in herstellerneutralen Datenformaten exportiert werden. Für die Referenzmessung wird die Testräumlichkeit in hoher Auflösung durch sechs großzügig überlappende Standpunkte erfasst, die nach dem Registrierungsbericht eine durchschnittliche Überlappung von 67% und eine mittlere Abweichung von 1 mm aufweisen. Die Messdauer dafür beträgt ca. 30 Minuten und resultiert in einer rund 740 Millionen Punkten großen Datenwolke.

Der *BLK2GO* ist zum Zeitpunkt der Studie der erste handgetragene Laserscanner der Leica Geosystems AG und der kleinste zweiachsige Hochgeschwindigkeits-LiDAR am Markt. Der 650 g leichte, mobile Laserscanner zeichnet sich durch ein kompaktes Format aus, das eine schnelle und flexible Verwendung mit oder ohne zusätzliches Tablet ermöglicht. Im Vergleich zum *Trimble X7* ist die Scankonfiguration invariabel, wodurch die räumliche Auflösung durch Bewegungsgeschwindigkeit und Abstand zum Messobjekt definiert wird. Bevor die Datenerfassung beginnt, ist ein Initialisierungsprozess notwendig, welcher, durch visuelle Signale gestützt, automatisiert durchgeführt wird.

---

Die 3D-Punktgenauigkeit ist entfernungsunabhängig mit 20 mm angegeben. Durch ein integriertes Multi-Kamerasystem erfolgt die Kolorierung der Punktwolke automatisiert. Weitere Spezifikationen sind der Produktbroschüre zu entnehmen. Im Rahmen der Untersuchung ist ein Tablet verwendet worden, welches die Visualisierung der Datenerfassung in Echtzeit ermöglicht, jedoch keine Funktionalität hinsichtlich der finalen Auswertung bereitstellt. Dafür wird die rechnergestützte, proprietäre Software *Leica Register 360* benötigt, die in letzter Instanz auch den Datenexport in ein herstellerneutrales Format ermöglicht (Nutzungsszenario 3). Innerhalb von 10 Minuten ist die Testräumlichkeit erfasst worden und mündet nach der abschließenden, rechnergestützten Verarbeitung in einer Punktwolke mit ca. 19 Millionen Einzelpunkten.

Im Vergleich zu den obigen beschriebenen, professionellen Laserscannern stellt die *RealSense™ L515* als neuste LiDAR Kamera von Intel® sowohl den preiswertesten als auch mit einem Durchmesser von 6,1 cm den kleinsten aktiven Verbrauchersensor aus dem zu bewertenden Portfolio dar. Mit einem maximalen Messbereich von 9 m ist sie für Innenanwendungen aus den Bereichen der Robotik und Logistik entwickelt. Für diesen Nutzungszweck stellt der US-amerikanische Hersteller eine kostenfreie Softwarelösung namens *Intel RealSense Viewer* zur Verfügung, mit welcher die LiDAR Kamera angesteuert, die gewonnenen Tiefenkarte angezeigt und letztlich auch als kolorierte Punktwolke oder Mesh exportiert werden kann. Die integrierte Inertialsensorik ermöglicht darüber hinaus eine portable Verwendung, z. B. zur 3D-Erfassung von Innenräumlichkeiten. Durch die fehlende Registrierungsfunktionalität ist der kostenfreie *RealSense Viewer* dafür jedoch nicht nutzbar, weshalb dieser durch eine kompatible Anwendung ersetzt wird. In diesem Kontext hat sich die Verwendung von *Dot3D* als hilfreich erwiesen, welche in der proprietären Pro-Version eine automatische Registrierung einzelner Tiefenkarten sowie weitere Kalibrierungs- und Optimierungslösungen ermöglicht. Für die handgeführte 3D-Erfassung empfiehlt es sich, die LiDAR Kamera an einem Tablet oder Laptop zu befestigen. Bereits gescannte Bereiche werden durch die Anwendung mit einer transparenten Farbdarstellung überlagert, wodurch eine intuitive Bedienung und vollständige Datenerfassung unterstützt wird. Mit Verwendung von *Dot3D* gehen weitere Möglichkeiten zur Steigerung der Qualität der 3D-Daten einher, die softwareseitig durch den Einsatz von Passpunkten (April Tags) oder durch auswertbare Schleifenschlüsse gelöst werden. Diese konzeptionellen Ergänzungen bedürfen bei technisch nicht ausgebildeten Nutzergruppen einer vorherigen Einführung (Nutzungsszenario 2). Zur Erfassung der vorbereiteten Testräumlichkeit ist die *RealSense™ L515* in Verbindung mit einem handelsüblichen Büro-Laptop genutzt worden. Während des 15-minütigen Scans sind über 91 Millionen Punkte entstanden, die das System an seine Grenzen gebracht hat.

Seit 2020 verbaut Apple Inc. in ihren Warenmarken *iPhone Pro* und *iPad Pro* den LiDAR-Scanner. Dabei folgt dem im März 2020 vorgestellten iPad Pro etwa sechs Monate später das iPhone Pro mit entsprechender Technologie. Herstellerseitig werden keine technischen Spezifikationen zur Art und Qualität der in das Kamera-Modul integrierten Komponente veröffentlicht. Nach aktuellem Kenntnisstand beinhalten die Verbraucherendgeräte den selben LiDAR-Scanner (Luetzenburg et al. 2021, S. 2). Durch die Verwendung des Augmented Reality Kits (*ARKit*) kann der *Apple LiDAR* verwendet werden, um ein texturiertes Mesh zu erstellen. Dabei werden Tiefeninformationen abgerufen, mit dem Farbbild aus der Weitwinkelkamera verknüpft und zu Stützpunkten eines polygonalen Netzes verarbeitet, die sich in Kombination mit den Beschleunigungswerten aus der integrierten Inertialsensorik dynamisch erweitern und so kontinuierlich das Sichtfeld des Anwendergeräts dreidimensional approximieren. Um das Mesh zu partitionieren, werden sogenannte Anker erstellt und

---

einem eindeutigen Teil der polygonalen Struktur zugewiesen (vgl. Apple Inc. o. J.(d)). Die ursächliche Intention von Apple zur Entwicklung eines miniaturisierten und in Serienreife produzierbaren LiDAR-Scanners, Augmented Reality (AR)-Erlebnisse durch eine aktive Umgebungserfassung zu optimieren (vgl. Apple Inc. 2020b), ist inzwischen in einer Vielzahl an iOS<sup>23</sup>-Anwendungen aufgegriffen worden, die vorrangig aus der Unterhaltungskategorie stammen (vgl. PocketGamer.biz 2023). Die LiDAR Technologie ist darüber hinaus auch produktiv einsetzbar, wie die *3d Scanner App*<sup>TM</sup> von Laan Consulting Corp für Rekonstruktionsanwendungen zeigt. Diese stellte seinerzeit die erste im AppStore verfügbare Anwendung zur 3D-Datenerfassung dar und ist in Verbindung mit dem iPad Pro der 4. Generation für die Untersuchung verwendet worden. Die *3d Scanner App*<sup>TM</sup> erlaubt verschiedene Konfigurationsmodi zur Auflösung, Reichweite und Konfidenz der rückgestreuten und erfassten Laserimpulse. Seit 2020 ist die Anwendung kontinuierlich verbessert und funktional erweitert worden, wodurch die im Rahmen der Untersuchung identifizierten Schwachstellen derzeit nicht mehr zu verifizieren sind. Zur 3D-Erfassung sind neben den im Allgemeinen hochverfügbaren Apple-Endgeräten und z. B. der kostenfreien *3d Scanner App*<sup>TM</sup> keine weiteren Hilfsmittel notwendig, weshalb sich diese Verfahrenstechnik als sehr intuitiv und damit gebrauchstauglich erweist (Nutzungsszenario 1). Innerhalb von 15 Minuten ist die Testräumlichkeit in Maximalauflösung von 5 mm bei mittlerer Punktkonfidenz erfasst und durch rund 11 Millionen Punkte digital repräsentiert.

Als Alternative zu den vier beschriebenen aktiven Messverfahren können 3D-Punktwolken mittels SfM auch aus einem Verbund einzelner Bildaufnahmen abgeleitet werden. Da bei der terrestrischen Photogrammetrie eine Reihe prozessbedingter Abhängigkeiten existieren, muss im Vorfeld eine fachliche Beurteilung zur Eignung der Aufnahmekamera und der Messkonzeption unter den zu erwartenden Umgebungseinflüssen hinsichtlich der angestrebten Messgenauigkeit erfolgen (Nutzungsszenario 3). Auf detaillierte Ausführungen diesbezüglich wird an dieser Stelle verzichtet. Die *Nikon D3200* erfüllt mit einer Pixelgröße von 3,9  $\mu\text{m}$  und einem Auflösungsvermögen von 6.016 px  $\times$  4.000 px angesichts der Dimension der Testräumlichkeit entsprechende Voraussetzungen theoretisch. Um ein möglichst großes Sichtfeld und dadurch eine hohe Überlappung zu erzielen, wird die Brennweite auf  $f = 18 \text{ mm}$  fixiert. Bei innerräumlichen Aufnahmebedingungen eignet sich darüber hinaus die Aktivierung der Blitzautomatik, um eine gleichmäßige Belichtung zu gewährleisten. Wesentlich für ein hochwertiges Punktwolkenresultat ist nach Pattee (2016, S. 4 f.) auch die Beachtung einer ausreichend hohen Überlappung benachbarter Bilder sowie die Einhaltung möglichst gleicher Abstände und senkrechter Perspektiven zu den Szeneobjekten. Ausgehend von den erfassten Bildaufnahmen wird die rechnergestützte, photogrammetrische Auswertung eingeleitet, wobei sich auch hier die professionelle Variante *Agisoft Metashape* gegenüber kostenlosen SfM-Alternativen, wie z. B. Meshroom, VisualSfM oder Regard3D, als deutlich zuverlässiger erwiesen hat. Die Auswertung in *Agisoft Metashape* erfordert Fachkompetenzen, die über eine Kurzeinweisung hinausgehen. Zusätzlich dazu werden leistungsstarke Rechnerressourcen benötigen, die in Abhängigkeit zu der erfassten Bilddatenmenge stehen. Aus einem 4,5-stündigen Datenerfassungs- und teilautomatisierten Auswerteprozess resultiert eine dichte Datenwolke von ca. 41 Millionen Punkten, die nach der Berechnung in verschiedene offene Formate exportiert werden kann.

---

<sup>23</sup>iOS ist ein von Apple Inc. entwickeltes Betriebssystem (engl. Operating System (OS)) für verschiedene mobile Endgeräte, darunter das iPhone (iOS 16) und das iPad (iPadOS 16).

---

## 4.1.5 Evaluation der messtechnischen Verfahren

Die qualitative Bewertung der Mess- und Verarbeitungsprozesse sowie der daraus resultierenden 3D-Punktwolken wird im Folgenden ausgeführt und mündet in den in Tabelle 4.2 dargestellten Untersuchungsergebnissen. Die messtechnische Qualitätsuntersuchung setzt registrierte Punktwolken voraus, welche nach dem in Abbildung 4.4 illustrierten Prinzip zur Vergleichspunktwolke ausgerichtet werden. Aufgrund der unterschiedlich aufgelösten und damit großen Punktwolken ist eine vorangehende Datenhomogenisierung notwendig. Diese wird durch eine Reduktion der Punktdichte (engl. Subsampling) erzielt. Um lediglich redundante Daten zu entfernen, fällt angesichts der festgelegten Messgenauigkeit von 2 cm aus der DIN 18040-2:2011-9 (vgl. R-Nr. 1.1 in Tabelle 3.1) sowie der maximal zu erreichenden Auflösung des LiDAR-Scanners von Apple die Wahl auf 5 mm. Darüber hinaus gilt es die Punktwolken auf die Ausdehnung der Testräumlichkeit zuzuschneiden, um Artefakte, die durch Glas- und Spiegelflächen entstehen, zu entfernen. Die Vorbereitungsschritte zur Registrierung, Harmonisierung sowie zum Zuschnitt der 3D-Punktwolken werden mithilfe des Open Source Projekts *CloudCompare* durchgeführt. Zwei grafische Ansichten aller erfassten, homogenisierten und zugeschnittenen 3D-Punktwolken liefert der Anhang A.

Die *3D-Punktgenauigkeit* stellt hinsichtlich der Qualitätsbeurteilung ein Merkmal untergeordneter Bedeutung dar, welches die zu erwartende absolute Abweichung jedes einzeln erfassten 3D-Punktes beziffert. Für eine implizite Schätzung dieser 3D-Punktgenauigkeit werden die Koordinaten der räumlich verteilten Zielzeichen durch Mehrfachmessung bestimmt, gemittelt und mit den tachymetrisch bestimmten Referenzkoordinaten verglichen. Sie wird als  $1\sigma$  Größe angegeben, wonach 68,27% aller Punkte im Intervall der entsprechenden Standardabweichung liegen. Der *Streckenmaßstab* beschreibt die relative Genauigkeit einer aus der Punktwolke ermittelten Strecke. Normiert kann er als Faktor interpretiert werden, um welchen eine Strecke, definiert durch den euklidischen Abstand zweier 3D-Punkte, im Vergleich zur Referenz abweicht. Zur Bestimmung des Maßstabsfaktors werden zwei jeweils gegenüberliegende Ebenen parametrisch modelliert, der Abstand mehrfach entlang der Ebenennormale gemessen, ausgemittelt und mit entsprechendem Referenzwert dividiert. Die Angabe der relativen Streckengenauigkeit ist hinsichtlich der Prüfung von lichten Durchgangsbreiten und Bewegungsflächen (vgl. z. B. R-Nr. 3.1 in Tabelle 3.1) von Relevanz und stellt das wesentliche Bewertungskriterium des *Sensorzoos* dar. Zusätzlich zum normierten Streckenmaßstab wird die Messentfernung  $D_{\max}$  angegeben, welche unter Einhaltung der Genauigkeit von 2 cm nicht überschritten werden darf. Ein weiteres Merkmal, welches die Qualität eines messtechnischen Verfahrens beschreibt, ist das *Messrauschen*. Dazu werden aus den innerhalb der vier Testflächen (Sichtbeton, Holz, Edelstahl und weiß gefärbte Wand) liegenden Punkten mittlere Ebenen geschätzt, das dazugehörige Messrauschen einzeln ausgewertet und als arithmetischer Mittelwert angegeben. Als letzte numerische Kennzahl dient die *Punktdichte*, die auf den Quadratmeter angezeigt das räumliche Auflösungsvermögen darstellt. Sie wird vor der Datenharmonisierung abgeleitet und sollte möglichst hoch sein, um auch Ausstattungselemente kleinerer räumlicher Ausdehnung vollständig identifizieren zu können (vgl. z. B. R-Nr. 3.3 und 5.1 in Tabelle 3.1).

Während sich die messtechnischen Bewertungsmerkmale anhand reproduzierbarer Analysestrategien für Punktwolken quantifizieren lassen, erfolgt bezüglich der nutzungsrelevanten Kriterien eine dreistufige Klassifikation. Danach werden die Verfahren zur Erzeugung einer 3D-Punktwolke hinsichtlich der Teilkriterien der Bewertungsmerkmale bepunktet und danach eingestuft (vgl. Abschnitt 4.1.3).



Da sich drei der vier untersuchten messtechnischen Verfahren bereits für die Rekonstruktion baulicher Anlagen bewährt haben (vgl. Poux 2019, S. 30), liegen die Unterschiede hinsichtlich der *Zuverlässigkeit der Technik* nicht sehr weit auseinander. Insbesondere die professionellen, aktiven Verfahren überzeugen bezüglich der Prozessstabilität, insbesondere bei großen Datenmengen. Es kann jedoch beobachtet werden, dass auch die günstigeren ToF-Sensoren, wozu die Intel® *RealSense™ L515* und der LiDAR-Scanner aus dem *Apple iPad Pro* zählen, kontinuierlich an Robustheit gewinnen. Das steht u. a. in Zusammenhang mit der Progression leistungsfähiger Datenverarbeitungsalgorithmen und potenter Mikroelektronik. Der Grad der Benutzerfreundlichkeit variiert, wenngleich festzuhalten ist, dass die Bedienbarkeit der untersuchten Techniken nach einer technischen Einweisung grundsätzlich möglich ist. Dennoch sind teils signifikante Unterschiede im Besonderen hinsichtlich der Messvorbereitung und -auswertung festgestellt worden. Während in Zusammenhang mit dem *Trimble X7*, der *RealSense™ L515* und der *Nikon D3200* Vorbereitungstätigkeiten anfallen, kann der Messvorgang mit dem *Leica BLK2GO* und der *3d Scanner App™* auf dem *Apple iPad Pro* unmittelbar gestartet werden. Zusätzliche Hilfsmittel, die eine Datenerfassung unterstützen oder die Auswertung realisieren, fallen beim *Apple iPad Pro* nicht an, weshalb sich dieses Verfahren durch den höchsten Grad an Benutzerfreundlichkeit und Einfachheit auszeichnet (Nutzungsszenario 1). Eine durch visuelle Akzente begünstigte Messführung wird bei allen aktiven Aufnahmeverfahren umgesetzt. Eine vergleichsweise simple Auswertung ist auch mit dem *Trimble X7*, dem *Leica BLK2GO* und der *RealSense™ L515* zu erzielen, wenngleich die laserscannenden Systeme erheblich hinsichtlich der Erwerbskosten im Gesamtvergleich differieren. Der photogrammetrische Ansatz, realisiert durch die *Nikon D3200*, ermöglicht bei bekanntem Aufnahmeprinzip und der Einhaltung einiger weniger, aber gleichzeitig essenzieller Regeln eine benutzerfreundliche Messung. Gleichzeitig stellt die Auswertung, nicht zuletzt durch die mit der Anzahl erfasster Aufnahmen korrelierte Rechenleistung, keine automatisierte, einfach umzusetzende und damit gebrauchstaugliche Lösung dar.

Tabelle 4.2: Evaluation der messtechnischen Verfahren anhand selektiver Bewertungsmerkmale am Beispiel der Testräumlichkeit

Bewertungsmerkmal	Trimble X7	Leica BLK2GO	RealSense L515	Apple iPad Pro	Nikon D3200
3D-Punktgenauigkeit*	Referenz	1,2 cm	2,5 cm	7,5 cm	2,9 cm
Streckenmaßstab**	Referenz	1,002	0,997	1,007	1,006
↳ $D_{\max.}$ bei $\leq 2$ cm	$> 40,0$ m***	10,0 m	$\sim 6,7$ m	$\sim 2,8$ m	$\sim 3,3$ m
Messrauschen****	3 mm	5 mm	5 mm	2 mm	8 mm
Punktdichte [Pkt./m <sup>2</sup> ]	2.397.833	57.780	400.936	27.601	145.238
Benutzerfreundlichkeit	moderat	hoch	moderat	hoch	moderat
Einfachheit	moderat	moderat	hoch	hoch	gering
Zuverlässigkeit	hoch	hoch	moderat	hoch	moderat
Erwerbskosten	hoch	hoch	gering	gering	moderat

\* als  $1\sigma$  Größe angegeben, \*\* normiert, \*\*\* nach Herstellerangabe

\*\*\*\* über verschiedene Oberflächen gemittelte  $1\sigma$  Größe

Die Ergebnisse des evaluierten *Sensorzoos* werden in Tabelle 4.2 angezeigt. Demnach kann zusammengefasst werden, dass die dem skizzierten Anwendungsfall genauigkeitstechnisch entsprechende

---

Punktwolken nicht gleichzeitig auch durch ein alltagstaugliches Verfahren entstanden sind. Folglich gilt es einen verfahrenstechnischen Kompromiss zu finden, welcher einer hinreichend genauen Punktwolke möglichst nahekommt und zugleich die Kriterien der Benutzerfreundlichkeit, Einfachheit und Zuverlässigkeit bei möglichst geringen Erwerbskosten erfüllt. Sowohl der terrestrische als auch handgetragene Laserscanner fallen unter den Schirm professioneller Techniken, welche die qualitativ hochwertigsten und genauesten Punktwolken im absoluten wie auch relativen Bezug nachweisen. Dies korreliert vor allem mit hohen Erwerbskosten und geht zusätzlich einher mit diversen Hilfsmitteln zur Datenerfassung selbst oder für die Auswertung, die weitere Abhängigkeiten binden und damit einem möglichst schlanken, gebrauchstauglichen und für Mobilitätseingeschränkte nutzbaren Verfahren zur Digitalisierung des dritten Gesundheitsstandorts entgegenstehen. Ausgeschlossen wird auch die photogrammetrische Datenerfassung, die weder hinsichtlich der messtechnischen noch nutzungsrelevanten Kriterien überzeugt. Dabei steht die Datenerfassung und -auswertung in enger Verzahnung zueinander und wirkt bei Fehlanwendung stark limitierend auf die Qualität der resultierenden Punktwolke. Mit der Intel® *RealSense™ L515* und dem *Apple iPad Pro* LiDAR-Scanner verbleiben aus dem untersuchten *Sensorzoo* zwei preiswerte Techniken zur 3D-Datenerfassung mit einer potenziellen Eignung zur Digitalisierung von Wohnraum für die Identifikation von innerhäuslichen Barrieren, die mit einer altersgerechten Nutzbarkeit und einem möglichst langen Verbleib kollidieren. Beide Verfahrenstechniken überschreiten hinsichtlich der absoluten Punktgenauigkeit den avisierten Grenzwert von 2 cm bzw. erreichen diesen lediglich unter Beachtung einer maximalen Messentfernung, welche bei der LiDAR Kamera von Intel® etwa doppelt so hoch ist wie bei dem LiDAR-Scanner von Apple Inc. Während die *RealSense™ L515* durch eine höhere relative Genauigkeit überzeugt, stellt sich der LiDAR-Scanner aus dem *Apple iPad Pro* als wesentlich kompaktere Gesamttechnik dar, die zusätzlich benutzerfreundlich und intuitiv zu bedienen ist. Infolgedessen repräsentieren angesichts der anwendungsspezifischen Bewertungsmerkmale die Stärken des einen messtechnischen Verfahrens die Schwächen des anderen. Vor dem Hintergrund der beidseitig nur unter Bedingungen erreichten Messgenauigkeiten und der hohen Priorisierung nutzungsrelevanter Merkmale qualifiziert sich der LiDAR-Scanner von Apple Inc. als geeignete Plattform zur Entwicklung einer Anwendung für die automatisierte Digitalisierung von Wohnräumlichkeiten als erforderliche Informationsquelle bezüglich der daran anschließenden Identifikation innerhäuslicher Mobilitäts-einschränkungen. Diese Selektion wird auch durch einen mit 32,2% vergleichsweise hohen Anteil von Apple iPhones am deutschen Smartphone-Absatzmarkt im Dezember 2022 gestützt, welcher aus einer Marktstatistik von Kantar (2023) hervorgeht und damit eine gute Akzeptanzbasis der prototypisch zu entwickelnden Anwendung für mobilitätseingeschränkte Nutzer aus Szenario 1 und darüber hinaus repräsentiert. Dabei werden die aus der Evaluationsstudie gewonnenen Erkenntnisse gemäß der Gleichartigkeit der LiDAR Technologie in Apples Warenprodukten nach Luetzenburg et al. (2021, S. 2) auf das *iPhone Pro* als Gegenstand der Statistik von 2023 übertragen. Die Indikatoren eines vergleichsweise sehr niedrigen Messrauschens, quantifiziert mit 2 mm, bei einer absoluten Genauigkeit von 7,5 cm sowie das technische Spezifikationsdefizit des LiDAR-Scanners veranlassen dazu eine weitere Untersuchung hinsichtlich der entfernungsabhängigen Genauigkeit vorzunehmen, welche bei einer mobilen Sensorik durchaus von Interesse ist. Dabei wird auch ein Detailblick auf das Funktionsprinzip hinter der Flash-LiDAR Technologie aus dem Hause des US-amerikanischen Hard- und Softwareentwicklers aus Cupertino geworfen. Eine Zusammenfassung folgt im nächsten Abschnitt und referenziert an entsprechenden Stellen auf den dazu veröffentlichten Konferenzbeitrag von Plaß und Klauer (2022a).

---

## 4.1.6 Digital Flash-LiDAR Technologie

In den ingenieurgeodätischen Fachdisziplinen stellt sich seit mehreren Jahren der Trend zur flächenkontinuierlichen Erfassung von Objekten und ihrer Geometrie ein, der im Wesentlichen auf den „großen Fortschritten im Bereich der scannerbasierten Messtechnik“ basiert (Kuhlmann et al. 2016, S. 2). Professionelle terrestrische oder handgetragene Laserscanner ermöglichen die Erstellung von Punktwolken mit hohen Messgeschwindigkeiten bei einer 3D-Punktgenauigkeit<sup>24</sup> von bis zu wenigen Millimetern. Dabei erfolgt die Entfernungsmessung, wie bereits im Abschnitt 4.1.2 vorgestellt, entweder nach dem Verfahren der Impulslaufzeit (engl. ToF) oder des Phasenvergleichs. Während sowohl die technischen Grundlagen als auch die zu erwartenden Genauigkeitspotenziale professioneller Lasermessverfahren inzwischen verstanden und ausführlich beschrieben sind (vgl. Blankenbach et al. 2021, Kuhlmann et al. 2016 sowie Kern 2003), fehlt es hinsichtlich preiswerter ToF-Sensoren an ebensolchen ausführlichen Studien. Der Anspruch dieses Abschnitts ist es, diese Lücke am Beispiel des LiDAR-Scanners aus dem evaluierten *Apple iPad Pro* anzugehen. Dazu wird zunächst das Entfernungsmessverfahren durch einen Blick auf die Systemkomponenten vorgestellt, ehe aus weiteren Untersuchungen technische Spezifikationen nach Maßgabe der Datenblätter konventioneller Laserscanner abgeleitet werden.

### Direkte Laufzeitmessung

Der in den genannten Warenprodukten von Apple Inc. verbaute LiDAR-Sensor kommt im Vergleich zu den konventionellen, zweiachsig rotierenden Laserscannern ohne bewegliche Teile aus und wird daher Digital Flash-LiDAR genannt (vgl. C. Zhang et al. 2019, S. 1). Eine vollständige systemkomponentische Beschreibung ist nicht veröffentlicht. Dennoch sind vereinzelt Informationen zu den Komponenten des in das Kameramodul integrieren Flash-LiDAR-Sensors (vgl. Abbildung 4.6a) in Patentschriften, einigen wenigen akademischen Publikationen und Internetbeiträgen zu finden. Das US-Patent 10795001 B2 reiht sich in die seit 2017 bestehende Patentfolge 15/586286 von Apple Inc. ein und benennt eine opto-elektrische Erfindung, die durch Festkörper-basierte ToF-Sensoren, sogenannten Single Photon Avalanche Dioden (SPADs), realisiert wird (Niclass; Shpunt et al. 2020, S. 12). SPADs sind explizit für die Aufnahme von Tiefenkarten entwickelte, kompakte, zeitlich hochaufgelöste und zugleich preiswerte Fotodetektoren, welche in Verbindung mit statistischen Photonenanalysetechniken wie der zeitkorrelierten Einphotonenzählung (Time Correlated Single Photon Counting (TCSPC)) verwendet werden. Als solche stellen sie die technische Grundlage für das Prinzip der direkten Laufzeitmessung (Direct Time-of-Flight (dToF)) dar und kommen insbesondere bei bildgebenden 3D-Anwendungsfeldern aus dem Endverbraucher- und Automobilsektor zum Einsatz (Gyongy et al. 2022, S. 1 f., Padmanabhan et al. 2019, S. 1). Das Prinzip der dToF-basierten Entfernungsmessung bzw. Tiefenerfassung ist in der Literatur ausführlich beschrieben, u. a. in Gyongy et al. (2022), Padmanabhan et al. (2019) und Niclass; Soga et al. (2007), weshalb im Folgenden auf detaillierte Ausführungen verzichtet wird. In Abbildung 4.5 wird das Prinzip schematisch illustriert.

Bei dToF-Sensoren wird die zu erfassende Szene durch eine hochrepetitiv emittierende Lichtquelle, meist einen gepulsten Laser als dem nahen Infrarotbereich (NIR), flächenhaft beschienen. Das SPAD-Fotodetektor-Array registriert mithilfe einer Zeit-Digital-Wandlung (engl. Time-to-Digital-

---

<sup>24</sup>Als quantitatives Maß für die 3D-Punktgenauigkeit gilt die Standardabweichung  $\sigma$  (vgl. Kuhlmann et al. 2016, S. 2).

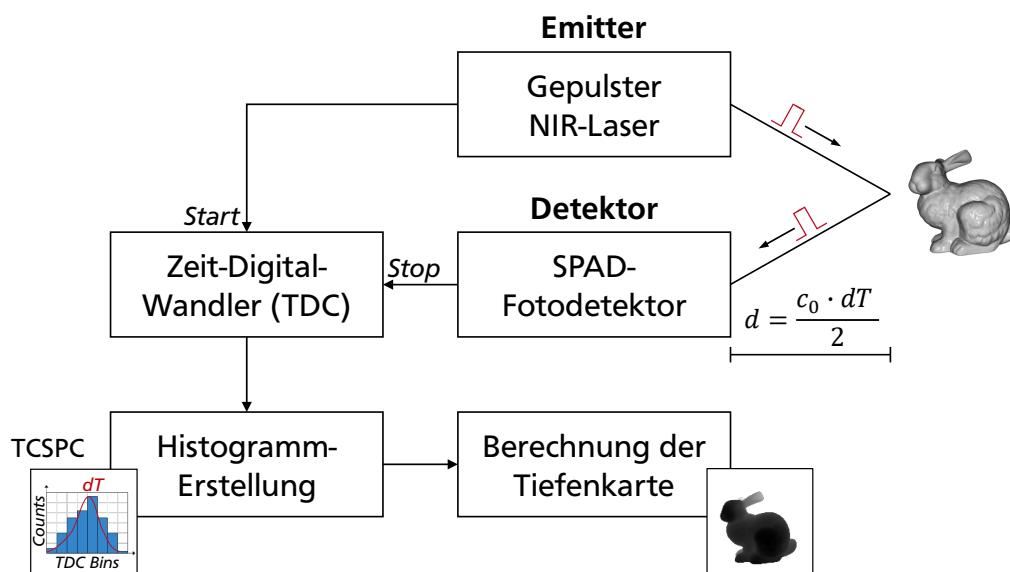


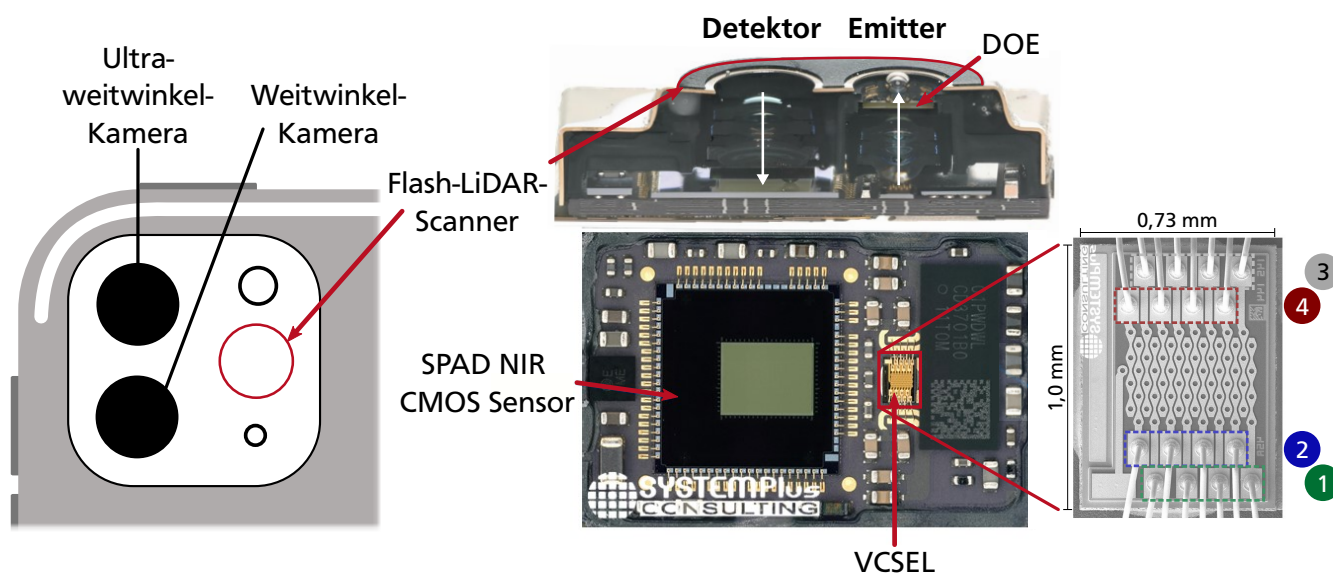
Abbildung 4.5: Prinzip der dToF-basierten Tiefenkartenerfassung

Converter (TDC)) die reflektierten Laserimpulse und berechnet pixelweise die Laufzeit, welche direkt proportional zur doppelt durchlaufenen Entfernung ist. Da die Lichtquelle hochrepetitiv emittiert, werden von jedem Pixel mehrere aufeinanderfolgende Signale akkumuliert und als Histogramm repräsentiert, welches die zu ermittelnde Zielgröße als identifizierbaren Peak zum Messrauschen des Sensors aufweist. Hinsichtlich der pixelweisen Auswertung ist dieses Prinzip kompatibel mit Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (CMOS)-Sensoren (vgl. C. Zhang et al. 2019, S. 2), weshalb SPADs in CMOS-Technik gefertigt werden. Die Auswertung des Histogramms erfolgt über das TCSPC und resultiert in einem zeitabhängigen Entfernungswert. Vor dem Hintergrund der Position des SPAD-Pixels auf dem Fotodetektor-Array entspricht diese Zielgröße der metrischen Tiefeninformation auf der aus dem dToF-Verfahren resultierenden Tiefenkarte, die wiederum in eine Punktwolke oder ein Mesh transformiert werden kann (vgl. Abschnitt 4.1.1).

### Systemkomponenten des Apple LiDAR-Scanners

Dieser Unterabschnitt widmet sich der technischen Systemanalyse von Apples verbautem dToF Flash-LiDAR-Scanner, welcher nach aktuellem Kenntnisstand in gleicher Spezifikation in allen *iPhone Pro*-Modellen, beginnend ab der Serie 12, und in allen *iPad Pro*-Modellen seit 2020 enthalten ist und in Kooperation mit Lumentum Operations LLC, Sony und Himax hergestellt wird (Yoshida 2020, Jazz 2020). Dabei besteht der nach dem dToF-Prinzip arbeitende LiDAR-Scanner aus zwei Komponenten, der Sende- und der Empfangseinheit, im Folgenden bezeichnet als Emitter und Detektor (vgl. Abbildung 4.6b). Als Emitter verbaut Apple Oberflächenlaserdioden (engl. Vertical Cavity Surface Emitting Lasers (VCSEL)) von Lumentum Operations LLC, die jeweils einen einzelnen Laserimpuls aus dem NIR mit  $\lambda = 1.550 \text{ nm}$  emittieren. Die VCSEL sind dabei rastergleich in vier Reihen á vier Strings mit jeweils vier Dioden angeordnet, woraus  $4 \times 4 \times 4 = 64$  native Einzelimpulse resultieren, die zur flächenhaften Bestrahlung einer Szene verwendet werden. Um die räumliche

Auflösung zu erhöhen, finden diffraktive optische Elemente (DOE) von Himax Einsatz, welche die ausgehenden Einzelimpulse in flächige Intensitätsmuster aufweiten und dabei gleichzeitig die nativ emittierte Signalcharakteristik beibehalten. Die reflektierten Laserimpulse werden durch einen von Sony produzierten, rund 1" großen SPAD NIR CMOS Sensor (Sony IMX590) mit einer Pixelgröße von  $10,0\ \mu\text{m}$  sowie einer theoretischen Auflösung von 30.000 Pixel registriert und über das im oberen Abschnitt ausgeführte TCSPC-Verfahren zu einer Tiefenkarte prozessiert. In Abbildung 4.6b sind die ausgeführten Systemkomponenten VCSEL, DOE und SPAD NIR CMOS Sensor zu erkennen. Dabei befindet sich die Mikroelektronik orthogonal zur Sende- bzw. Empfangsrichtung und ist nur zu Darstellungszwecken in Draufsicht abgebildet. Kombinationen aus Plastikklinsen kollimieren die aus- und eingehenden Laserimpulse zusätzlich.



(a) Schema vom Kameramodul und LiDAR-Scanner des während der Untersuchung verwendeten Apple iPad Pro 2020 (12,9", 4. Generation)

(b) Systemkomponenten des Flash-LiDAR-Scanners (Bildausschnitte von System Plus Consulting). Oben: Querschnitt durch den LiDAR-Scanner. Unten: Detaildarstellungen der Emittier- und Detektorelektronik

Abbildung 4.6: Schema und Detailsicht der Systemkomponenten des Flash-LiDAR-Scanners von Apple Inc.

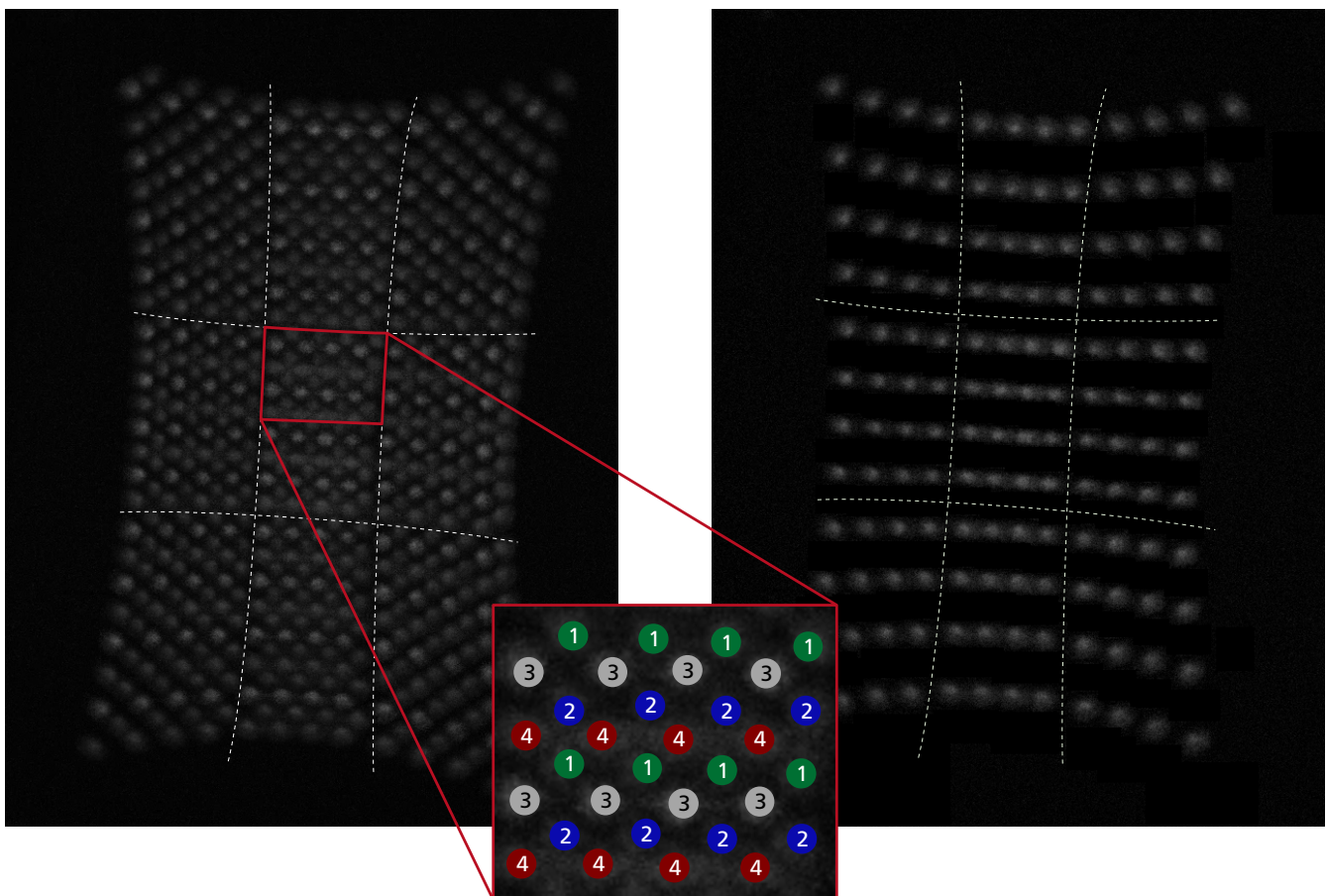
Das Adäquat der Messgeschwindigkeit von Laserscannern ist bei bildgebenden Verfahren die Bildrate, welche bei diesem LiDAR-Scanner mit 15 fps (engl. Frames per second) angegeben werden kann. Das zeigen Experimente unter Berücksichtigung des Abtasttheorems nach Whitaker-Kotelnikov-Shannon (WKS) (Gensun 1996). Dabei lässt sich ein charakteristisches Scanmuster beobachten, welches mittels Bildsequenzen aus einer monochromen Industriekamera<sup>25</sup> (nachfolgend uEye genannt) dokumentiert wird (vgl. Abbildung 4.7). Der Flash-LiDAR-Scanner differenziert zwischen zwei Arbeitsmodi: dem regulären Arbeitsmodus und dem Stromsparmmodus, wonach jeweils räumlich unterschiedlich aufgelöste Scanmuster emittiert werden. Im regulären Arbeitsmodus (vgl. Abbildung 4.7a) wird durch eine diffraktive Teilung der nativen VCSEL-Impulse eine Punktmatrix von  $9 \times 64 = 576$  Einzelimpulsen, die in einem  $3 \times 3$  Gitter à  $8 \times 8$  Punkte angeordnet sind, erzeugt.

<sup>25</sup>Für diese Studie ist die UI-3370CP-NIR-GL Rev.2 von IDS Imaging Development Systems GmbH verwendet worden.

Die Gesamtanzahl der Impulse dezimiert sich im Stromsparmodus auf  $9 \times 16 = 144$  Einzelimpulse, wobei je Gitterquadrant nur noch ein Viertel der Impulse verortet sind. Die weiterführende Analyse beschränkt sich auf den regulären Arbeitsmodus. Versuche unter statischen Laborbedingungen mit der uEye bei einer Bildwiederholungsrate von  $\geq 66$  fps haben darüber hinaus gezeigt, dass das Scanmuster nicht zeitsynchron, sondern alternierend in einer vierstufigen Sequenzfolge emittiert wird (vgl. Abbildung 4.7c). Dabei alternieren die Emittiersequenzen zeilenübersprungsweise und folgen der rastergleichen Anordnung der Dioden im VCSEL-Array (vgl. Abbildung 4.6b). In vier Strings zu je 16 Dioden verschaltet werden sie periodisch aktiviert, durch DOE geteilt und projizieren folglich das charakteristische Scanmuster auf die Oberfläche der zu erfassenden Szene. Die strahlteilenden DOE wirken dabei als Multiplikator von Faktor neun.

(a) Regulärer Arbeitsmodus mit  $8 \times 8$  Punkten je Gitterquadrant

(b) Stromsparmodus mit  $4 \times 4$  Punkten je Gitterquadrant



(c) Sequenzfolge des alternierenden Scanmusters im regulären Arbeitsmodus

Abbildung 4.7: Scanmuster des Apple Flash-LiDAR-Scanners, ergänzt um Gitterquadranten und Annotationen der Emittiersequenzen

Bei dieser systemkomponentischen Analyse wird vor allem deutlich, dass die theoretische Auflösung des Fotodetektors von 30.000 Pixel durch den deutlich geringer aufgelösten Emittier mit maximal

---

576 räumlich unkorrelierten Einzelimpulsen nicht vollumfänglich zur Berechnung der Tiefenkarte und damit zur Quantisierung der 3D-Punktwolke bzw. der Stützpunkte eines Meshs genutzt wird. Nach Apple Inc. (2020a) werden Tiefenkarte, Konfidenz der reflektierten Laserimpulse und Farbaufnahme der Weitwinkelkamera unter Anwendung von ML-Algorithmen fusioniert, um ein texturiertes Mesh zu kreieren, welches darüber hinaus als Punktwolke repräsentiert werden kann. Darüber hinaus fällt bei Betrachtung der Abbildung 4.7 die geometrische Verzerrung auf, durch welche die Laserimpulse zu den Rändern hin kissenförmig verzeichnet werden. Eine Bestimmung der Verzerrungsparameter von Sendeeinheit und Empfangseinheit ist bisher nicht experimentell durchgeführt worden. Vielmehr kann das Sichtfeld (engl. Field-of-View (FOV)) des LiDAR-Scanners durch den statischen Laborversuch mit bekannter Messentfernung und paralleler Sensorausrichtung geschätzt werden. Nach Auswertung der projektiv entzerrten, monochromen uEye-Bildaufnahmen geht ein FOV von  $58^\circ \times 47^\circ$  bei einer Standardabweichung von  $0,8^\circ \times 0,6^\circ$  hervor. Bei einer Messentfernung von 0,25 m beträgt entsprechendes unter Vernachlässigung der Verzerrung  $27,6 \text{ cm} \times 21,9 \text{ cm}$ . Der Punktabstand im mittleren Quadranten lässt sich demnach auf  $5^\circ \times 4^\circ$ , respektive  $0,24 \text{ cm} \times 0,18 \text{ cm}$ , beziffern.

## Technische Spezifikationen

Der vorangegangenen systemkomponentischen Analyse folgt eine abschließende technische Untersuchung über den gesamten Messbereich des Apple dToF-Flash-LiDAR-Scanners, welche damit die auf die Testräumlichkeit bezogene Evaluation aus Abschnitt 4.1.5 erweitert. Neben der Schätzung von Punktdichte und Spotgröße im Rahmen einer statischen Versuchsanordnung wird durch einen dynamischen Feldversuch die mittlere 3D-Punktgenauigkeit bezogen auf ein rechteckiges Referenzobjekt bekannter geometrischer Ausdehnung bestimmt. Der Messbereich des LiDAR-Scanners von Apple Inc. reicht von 0,25 m bis 5,0 m.

Die Punktdichte und Spotgröße werden anhand des durch die uEye dokumentierten Scanmusters abgeleitet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen, basiert die Schätzung beider Merkmale auf einem statischen Erfassungsprozess. Dafür wird das *Apple iPad Pro* in verschiedenen Abständen parallel und zentrisch vor einer planaren Fläche ausgerichtet. Aus einer innerhalb definierter Bereiche gezählten und anschließend extrapolierten Punktzahl resultiert eine theoretische Punktdichte, die in Abbildung 4.8a dargestellt ist und bei logarithmischer Skalierung einem linearen Trend folgt, beginnend mit ca. 5.500 Punkten pro  $\text{m}^2$  bei dem kleinstmöglichen Messabstand von 0,25 m bis zu 38 Punkten pro  $\text{m}^2$  bei der Maximalentfernung von 5,0 m. Hierbei gilt es anzumerken, dass diese Punktdichte aufgrund des statischen Laborversuchs theoretischer Natur ist und selbige während eines dynamischen Erfassungsprozesses höher quantifiziert ist, wie schon das Evaluationsergebnis aus Tabelle 4.2 feststellt. Die Spotgröße, parametrisiert durch den Durchmesser, wird durch eine manuelle Ellipsenausgleichung im mittleren Quadranten des Scanmusters (vgl. Abbildung 4.7c) durchgeführt, um den Einfluss der geometrischen Verzerrung zu minimieren. Bei einer Messentfernung von 0,25 m beträgt die Spotgröße 5,7 mm und weitet sich bis zu 49,0 mm bei 5,0 m auf (vgl. Abbildung 4.8b). Der lineare Trend bleibt bei logarithmischer Achsskalierung bestehen, wodurch bei zunehmender Messentfernung die Spotgröße zu- und die Punktdichte abnimmt. Durch die DOE, welche die Einzelimpulse der VCSEL-Dioden streuen, kommt es auch bei unterschiedlichen Messent-

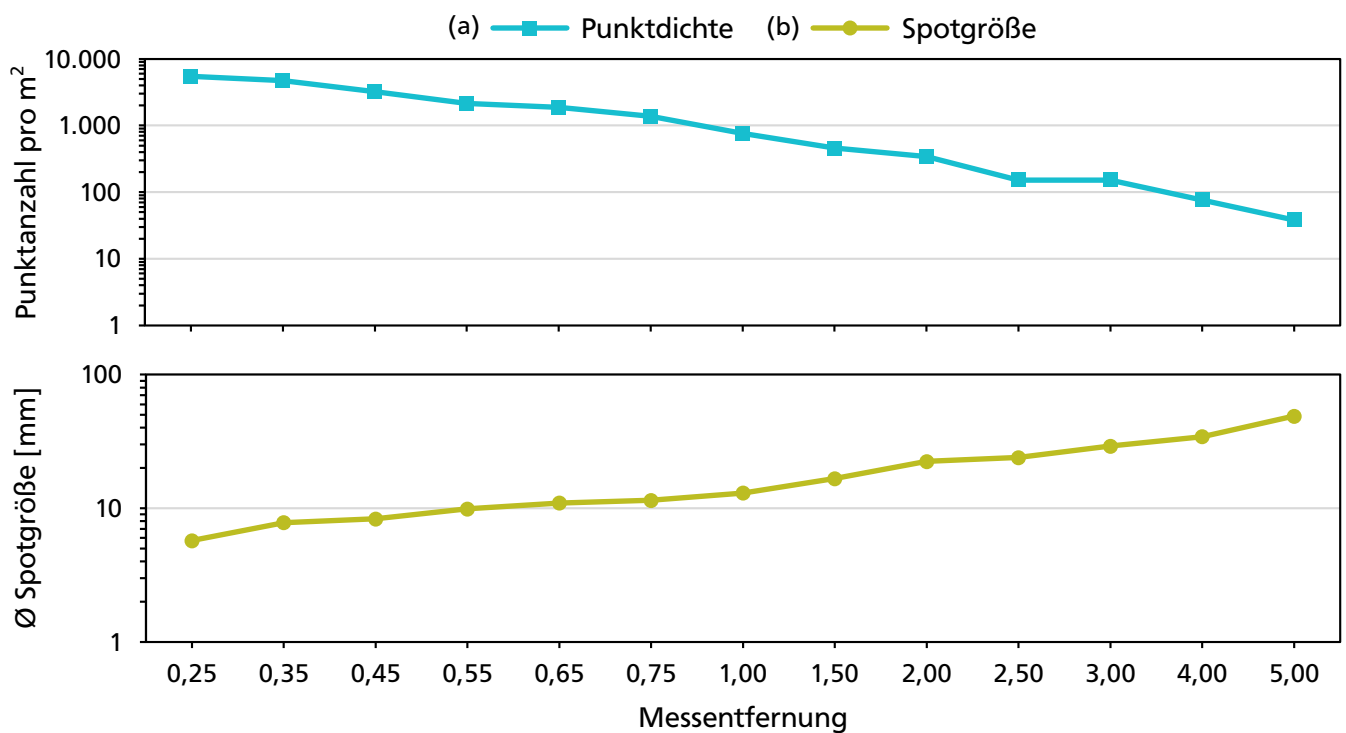


Abbildung 4.8: Theoretische Punktdichte und durchschnittliche Spotgröße des Apple Flash-LiDAR-Scanners über einen Messbereich von 0,25 m bis 5,0 m in logarithmischer Skalierung nach Plaß und Klauer (2022a, S. 157)

fernungen nicht zu ungewünschten Interferenzen oder gar Korrelationen, die einen redundanten Informationsgehalt bedeuten (vgl. Kern 2003, S. 58).

Die Bestimmung entfernungsabhängiger Punktgenauigkeiten bzw. Streckenmaßstäbe fußt auf einem rechteckigen Referenzobjekt der Dimension 46,5 cm × 17,0 cm × 34,0 cm, welches abseits von Laborbedingungen in näherungsweise gleichen Orbits zwischen 0,5 m und 5,0 m mit der *3d Scanner App<sup>TM</sup>* erfasst worden ist. Bei bekannter Geometriereferenz ist die gebräuchlichste Methode zur Bestimmung der 3D-Punktgenauigkeit die Cloud-to-Mesh Distanz (C2M), welche auf Cignoni et al. (1998) zurückführt und punktbasiert Abstände entlang der kürzesten Ebenennormale zwischen Punktwolke und Modelloberfläche misst. Die Registrierung der erfassten Punktwolken zur Referenz erfolgt dabei nach dem bereits beschriebenen ICP-Algorithmus nach Besl et al. (1992). Die C2M-Distanz wird in *CloudCompare* berechnet und resultiert in einer gemittelten Punktabweichung sowie Standardabweichung  $\sigma$ , welche zusammengefasst als mittlere 3D-Punktgenauigkeit interpretiert und in Abbildung 4.9a gezeichnet ist. Während die 3D-Punktabweichung bis zu einer Messentfernung von 2,5 m zwischen 0,8 cm und 2,1 cm variiert, vervielfacht sich diese Streuung mit zunehmendem Abstand auf bis zu 8,5 cm bei maximaler Messentfernung. Neben der Standardabweichung, welche die zufälligen Abweichungen repräsentiert, ist anhand der Darstellung auch ein systematischer Einfluss zu erkennen, welcher ab einer Messentfernung von 3,0 m mit exponentiellem Charakter verläuft. Über die 3D-Punktabweichung hinaus wird die innere Qualität der Punktwolke aus dem Flash-LiDAR-Scanner auch durch Streckenmaßstäbe, welche sich an den drei Achsen des Referenz-



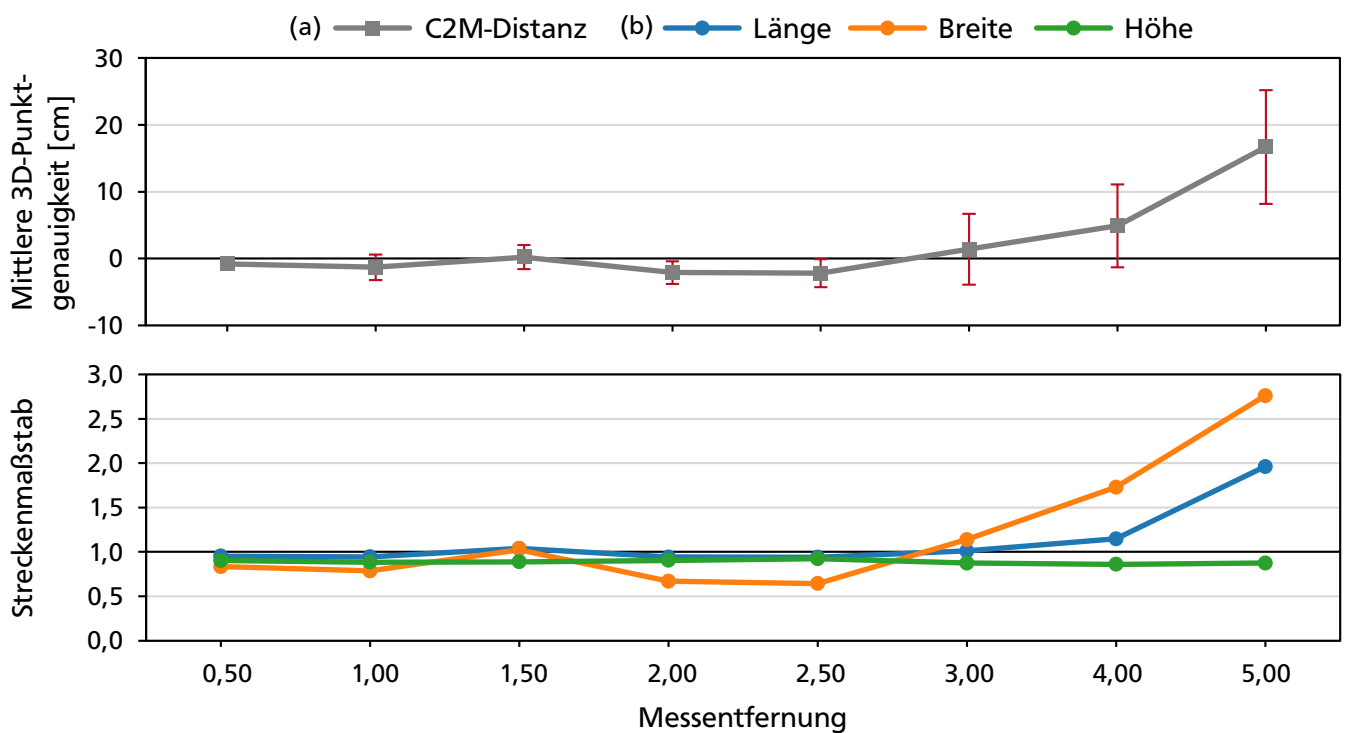


Abbildung 4.9: Mittlere 3D-Punktgenauigkeit mit Standardabweichung  $\sigma$  und relative Streckenmaßstäbe nach Länge, Breite und Höhe in Bezug zum Referenzobjekt über einen Messbereich von 0,25 m bis 5,0 m nach Plaß und Klauer (2022a, S. 158)

modells orientieren, beschrieben (vgl. Abbildung 4.9b). Dabei impliziert ein Maßstab  $< 1,0$  eine Stauchung und ein Maßstab  $> 1,0$  eine Streckung innerhalb der Datenwolke abgegriffener Strecken (vgl. dazu auch Abbildung 4.10). Um sonstige Fehlerquellen zu eliminieren, werden die Objektmaße über eine parametrische Modellierung mittels Random Sample Consensus (RANSAC) (vgl. Fischler et al. 1981) ermittelt. Es zeigt sich, dass die Abweichungen in der Vertikalachse (Höhe) auf einem konstanten Unsicherheitsniveau von ca. 10% verbleiben, während die horizontalachsbezogenen Messwerte (Länge und Breite) bis zu einer Messentfernung von 2,5 m systematisch gestaucht werden. Ab einer Distanz von 3,0 m folgt die Streckung einem monoton steigenden Trend, wodurch die rechteckige Referenzgeometrie innerhalb der Punktwolkenrepräsentationen immer mehr durch einen Pyramidenstumpf approximiert wird (vgl. Abbildung 4.10). Die Diagramme in Abbildung 4.9 zeigen bei den Messentfernungen von 2,0 m bzw. 2,5 m eine Anomalie in der Objektbreite, die sich dadurch auch auf die 3D-Punktgenauigkeit auswirkt. Als Ursache dafür werden überlappende Scanbereiche identifiziert, welche in Zusammenhang mit einem Drift der Orientierungssensoren des *Apple iPad Pro* stehen können und durch eine fehlende Schleifenschlussprüfung bzw. Ausgleichung der erfassten Daten in der *3d Scanner App*<sup>TM</sup> nicht zusammengeführt werden. Diese Vermutung begründet sich mit der nicht korrigierten Überlappung aus Abbildung 4.10 hinsichtlich der nach Messentfernung 2,5 m tannengrün kolorierten Punktwolke. Anhang B zeigt weitere Ansichten.

Aus den empirischen Untersuchungen des dToF-Flash-LiDAR-Scanners von Apple Inc. gehen technische Spezifikationen hervor, welche in Tabelle 4.3 zusammenfließen und damit ein abschließendes

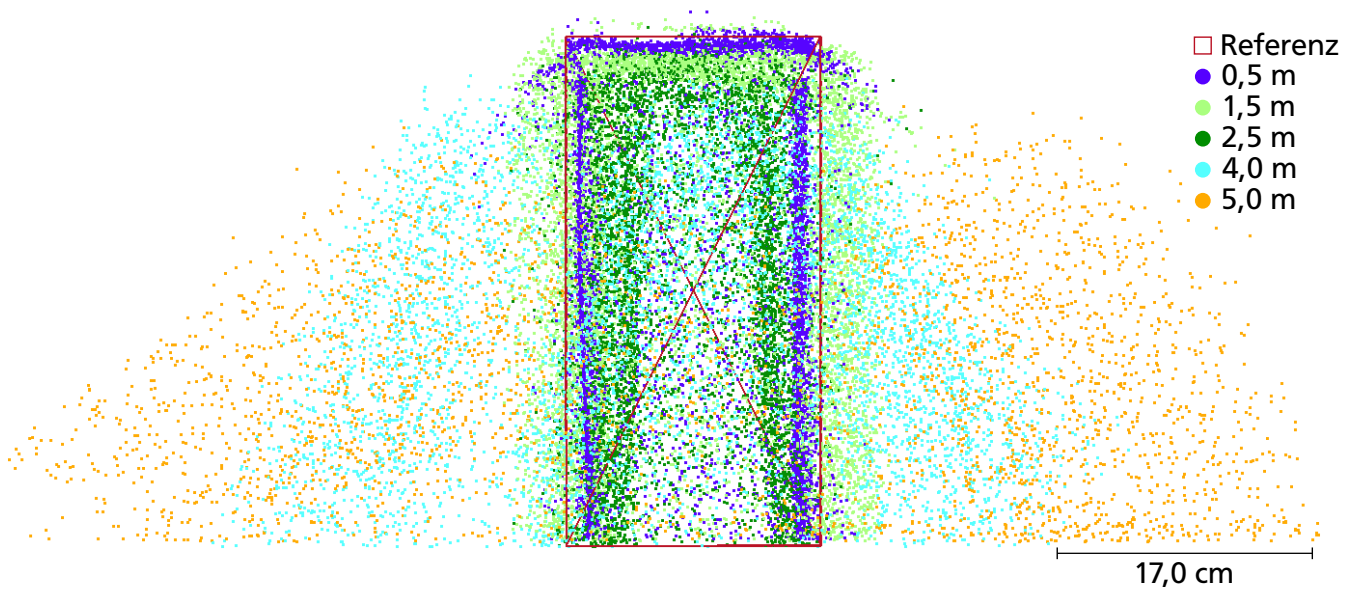


Abbildung 4.10: Seitenansicht der nach verschiedenen Messentfernungen kolorierten Punktwolken aus dem Apple Flash-LiDAR-Scanner im Vergleich zur Breite und Höhe der Referenzgeometrie nach Plaß und Klauer (2022a, S. 159)

Fazit ermöglichen. Es wird nachgewiesen, dass die aus dem Flash-LiDAR-Scanner resultierenden 3D-Daten mit einer Ungenauigkeit belegt sind, die ab einer Messentfernung von  $\geq 3,5$  m einem polynomialen Trend 2. Ordnung folgt und damit das produktive Anwendungsspektrum auf niedere Genauigkeiten begrenzt. Folglich stellt sich nur die Hälfte des angegebenen Messbereichs als effektiv nutzbar dar. Mit Blick auf die aus der ausgewerteten Testräumlichkeit hervorgegangenen Punktabweichung von 7,5 cm lässt sich schlussfolgern, dass die durchschnittliche Distanz zu den erfassten Szeneobjekten 4,0 m bis 4,5 m betragen haben muss (vgl. Abbildung 4.9a). Bezüglich der im Rahmen dieser Arbeit definierten geometrischen Anforderungen an einen altersgerecht ausgestatteten Wohnraum (vgl. Tabelle 3.1) kann entsprechender LiDAR-Sensor nur bis zu einer maximalen Messentfernung von 2,5 m hinreichend genau und damit nutzbare 3D-Daten produzieren (vgl. Tabelle 4.2 und 4.3). Folglich besteht die Notwendigkeit bei der Datenerfassung einen spezifischen Aufnahmeabstand einzuhalten, welcher jedoch durch das ToF-Prinzip automatisiert auswertbar ist und sich somit nicht als Einschränkung hinsichtlich der Gebrauchstauglichkeit in Verbindung mit technisch unausgebildeten Nutzergruppen erweist. Über die Ursachen des Verlusts an Genauigkeit bei größeren Messentfernungen lassen sich keine gesicherten Aussagen treffen. Als mögliche Gründe können sensorisch die geometrische Verzeichnung (vgl. Abbildung 4.7) und anwendungstechnisch nicht implementierte Schleifenschlüsse und Ausgleichungen in der *3d Scanner App*<sup>TM</sup> angeführt werden, welche im Rahmen dieser Studie als einzige Anwendungsimplementierung des LiDAR-Scanners untersucht worden ist. Eine Korrelation zwischen Messdauer und Gerätetemperatur ist festgestellt, jedoch nicht weiter untersucht worden. Vor dem Hintergrund dieser kritischen Analyse ist weiterhin anzumerken, dass dies die erste Generation von Flash-LiDAR-Sensorik in Verbraucherendgeräten darstellt und demnach technische Verbesserungen zu erwarten sind, welche laut zwei Barclay-Analysten bereits im neuen *iPhone 15 Pro* durch einen energiesparenderen und qualitativ hochwertigeren

Sensor stattfinden sollen (vgl. Rossignol 2023). Daraus resultieren weitere Bedarfe, sowohl für zukünftige Studien zur Genauigkeit als auch der weiteren Identifikation von gesellschaftlich relevanten Anwendungsfällen aus den *Life Sciences*.

Tabelle 4.3: Spezifikationen des Apple Flash-LiDAR-Scanners nach Plaß und Klauer (2022a, S. 159)

<b>Messverfahren</b>	dToF		0,8 cm auf 0,5 m
<b>Laserklasse</b>	1, $\lambda = 1.550 \text{ nm}$		1,8 cm auf 1,5 m
<b>Sichtfeld (FOV)</b>	$58^\circ \times 47^\circ$	<b>3D-Punkt-</b>	2,1 cm auf 2,5 m
<b>Reichweite</b>	0,25 m – 5,0 m	<b>genauigkeit**</b>	5,3 cm auf 3,0 m
<b>Spotgröße</b>	$5^\circ \times 4^\circ$ bei 0,25 m		6,2 cm auf 4,0 m
<b>Geschwindigkeit*</b>	15 fps		8,5 cm auf 5,0 m

\* bei isolierter Betrachtung der jeweils vier einzelnen Emittiersequenzen

\*\* als  $1\sigma$  Größe angegeben

## 4.2 Stand der Technik zur Strukturierung von 3D-Daten innerhäuslicher Szenen

Im Zuge des exponentiell verlaufenden, technischen Fortschritts haben sich Funktionalitäten und Prozessierungszyklen sämtlicher Verfahrenstechniken zur 3D-Datenerfassung erweitert. Während im Bereich des Laserscannings inzwischen u. a. Messraten von zwei Millionen Punkten pro Sekunde erreicht werden, unterstützt die Künstliche Intelligenz (KI) z. B. in Form generativer, neuraler Radianzfelder (engl. Neural Radiance Fields (NeRF)) heutzutage überdies bei der Rekonstruktion von Szenen aus einigen wenigen Bildaufnahmen (vgl. Mildenhall et al. 2022), ohne dabei in Abschnitt 4.1.2 genannte photogrammetrischen Gebote zu beachten. Dieser als global zu betrachtende Fortschritt manifestiert sich auch im Kontext von 3D-Kameras bzw. ToF-Sensoren, die einer zunehmenden Verfügbarkeit unterworfen, darüber hinaus vergleichsweise preiswert zu erwerben und für Anwendungsbereiche mit mittleren bis niederen Genauigkeitsanforderungen geeignet sind. In den vorangegangenen Abschnitten 4.1.5 f. wird das am Beispiel des evaluierten Flash-LiDAR-Scanners von Apple Inc. ausführlich darlegt. Mit dem Apple LiDAR-Scanner gestaltet sich die 3D-Erfassung baulicher Anlagen nicht nur einfach, sondern auch zeiteffizient und resultiert in einem 3D-Datensatz, welcher in verschiedenen Repräsentationsformen vorliegen kann (vgl. Abbildung 4.1). Dabei findet die Punktwolke als weitverbreitete und genutzte Modalität zur Diskretisierung von Szenen Verwendung. Die originäre Punktwolke beinhaltet im Anschluss an den Erfassungsprozess umfangreiche geometrische und radiometrische Detailinformationen, führt darüber hinaus jedoch keine semantischen Informationen, die den Datensatz strukturieren und damit für weitere Verarbeitungsschritte (vgl. Abbildung 3.3) zugänglich macht. Da für die Anwendung des geometrischen Regelkatalogs im Zuge der innerhäuslichen Wohnraumbewertung ein gesamtheitliches Verständnis der erfassten Szene Grundvoraussetzung ist, werden in diesem Abschnitt Methoden zur semantischen Ergänzung von Punktwolken vorgestellt, um aus diesen das maschinell zu verarbeitendes Informationsverzeichnis (WIM) ableiten zu können. Dazu wird zunächst der Begriff des Szenenverständnisses und

---

mit diesem die **Objekterkennung**, **Semantische Segmentierung** und **Instanz Segmentierung** als drei typische Aufgabenbereiche eingeführt. Darüber hinaus werden zwei Verfahren vorgestellt, mit welchen die semantische Ergänzung für 3D-Punktwolken realisierbar ist: wissensbasierte Verfahren (vgl. Ponciano 2019, Poux 2019) und KI-gestützte Lernansätze (vgl. Guo et al. 2021, Xie et al. 2020). Beide Verfahren werden darüber hinaus unter zweifachem Gesichtspunkt analysiert, hinsichtlich der simultanen und damit echtzeitfähigen Datenerfassung und -strukturierung einerseits sowie im Hinblick auf die Kompatibilität mit dem dToF-Flash-LiDAR-Scanner von Apple Inc. andererseits. Diese Anforderungen gehen aus dem Konzept zur strukturierten Geometrieerfassung hervor (vgl. Abschnitt 3.2.2 und Abbildung 3.4) und führen in letzter Instanz auf die übergeordneten Systemanforderungen (vgl. Tabelle 3.2) zurück, welche die potenzielle Nutzergruppe berücksichtigen und eine gebrauchstaugliche, einfach zu bedienende und mit möglichst wenig zusätzlichen Hilfsmitteln auskommende Anwendung zur Bewertung der Altersgerechtigkeit eines Wohnraumes vorsieht.

### 4.2.1 Szenenverständnis

Während die Extraktion aussagekräftiger und zweckgebundener Informationen aus visuellen, multimodalen Daten für den Menschen nahezu mühelos erfolgt, gestaltet sich diese Aufgabe für Berechnungsalgorithmen als außerordentlich herausfordernd (vgl. M. Y. Yang et al. 2019, S. 1 f.). Das Forschungsfeld der Computer Vision befasst sich intensiv mit der computergestützten Extraktion wesentlicher Informationen aus visuellen Eingabedaten, um auf dessen Grundlage Maßnahmen zu ergreifen oder Entscheidungen zu treffen, die eine hohe Relevanz für verschiedene Anwendungsbereiche besitzen, darunter die Automobilindustrie, Medizin, Robotik, Vermessung, Unterhaltungsindustrie und sämtliche Bereiche aus den *Life Sciences*, zu denen auch der hier diskutierte Anwendungsfall der Wohnraumbewertung zählt. Dabei umfassen die Aufgaben über die Erkennung einzelner Objekte hinaus auch die semantische Interpretation der gesamten Szene, einschließlich der darin enthaltenen Objekte sowohl in individualisierter als auch korrespondierender Betrachtungsweise. Die Ergänzung semantischer Informationen innerhalb einer multimodalen Szene wird in der Literatur als Szenenverständnis (engl. Scene Understanding) beschrieben und führt auf eine mehrstufige, zunehmend komplexere Aufgabenreihe zurück, deren Endstadium eine holistische, semantische Interpretation der diskretisierten Szene erlaubt. Die für diese Arbeit relevanten Aufgaben werden nachfolgend erläutert sowie in Verbindung mit Abbildung 4.11 am Beispiel einer Bildaufnahme und auf näherungsweise selbige Perspektive zugeschnittene Flash-LiDAR-Punktwolke illustriert. Einen ausführlichen und methodenneutralen Überblick über sämtliche Computer Vision Aufgaben geben die Autoren Szeliski (2022) sowie Forsyth et al. (2012) am Beispiel von Bilddaten. Eine Analogie für 3D-Daten, vorrangig unter Priorisierung von Punktwolken, existiert in diesem literarischen Umfang bislang nicht.

### Objektdetektion

Die Objekterkennung (engl. Object Recognition) kann als Oberbegriff für sämtliche Aufgaben aus dem Bereich der Klassifikation (engl. Object Classification) und Detektion (engl. Object Detection) angesehen werden. Dabei ist der grundlegende Unterschied zwischen einer Klassifikation und Detektion die Anzahl der in den Eingabedaten zu identifizierenden Objekte. Während bei der Klassifikation

---

die Existenz eines dominierenden Objekts vorausgesetzt wird, welches sogenannte Klassifikationsverfahren (engl. Classifier) erkennen und damit die Eingabedaten entsprechender Kategorie, in der Literatur ist dafür auch der Begriff Klasse (engl. class) gebräuchlich, ganzheitlich zuordnen, verfolgt die Objektdetektion einen anderen Ansatz, der auf sogenannte Detektionsverfahren (engl. Detector) zurückführt. Solche analysieren Teilmengen der Eingabedaten und weisen dem Objekt im Falle einer Klassifikation gleichzeitig eine konkrete Lokalisation zu, welche in Form eines umschließenden Begrenzungsrahmens (engl. Bounding Box) erfolgt, wobei die Dimension eines solchen den visuell zu interpretierenden Daten gleicht (vgl. Abbildung 4.11b). Je nach Anzahl der zu identifizierenden Kategorien differenziert man zwischen Einklassen-Objekterkennung (engl. One-Class- bzw. Single-Class Object Detection) und Mehrklassen-Objekterkennung (engl. Multi-Class Object Detection). Die Objektdetektion adaptiert dabei das Paradigma von Klassifikationsverfahren grundlegend in Verbindung mit sich dynamisch verändernden Sichtfenstern (engl. Sliding Windows).

### **Semantische Segmentierung**

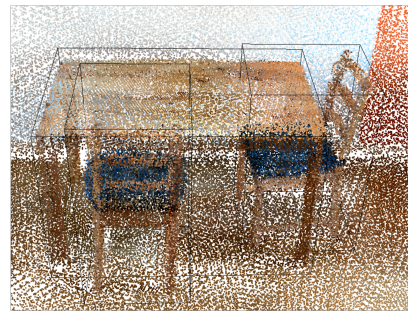
Im Verlauf von Detektionsverfahren werden Objekte in den Eingabedaten klassifiziert und über eine Bounding Box lokalisiert, wobei die Objektlokalisierung nur grob und nicht kantenscharf beschrieben wird. Eine über die Maßen der Objektdetektion hinausgehende und anspruchsvolle Aufgabe des Szenenverständnisses stellt die kantenscharfe Objekterkennung dar, welche auch als Semantische Segmentierung bezeichnet wird. Dort wird jedem atomaren Element der Eingabedaten (bei Bild-daten: Pixel, bei Punktwolken: 3D-Punkt, bei Meshs: Dreiecksfläche) eine Kategorie zugewiesen. Abbildung 4.11c stellt die semantische Segmentierung am Beispiel einer Bildaufnahme (links) und auf den äquivalenten Sichtbereich zugeschnittenen Flash-LiDAR-Punktwolke (rechts) dar. Mithilfe dieser Form der semantischen Ergänzung können Objekte innerhalb visueller Eingabedaten ohne Veränderung der originären Datenmodalität detailliert analysiert werden. Die Segmentierung wird über eine Kolorierung der atomaren Elemente angezeigt, wobei jede Kategorie einen individuellen Farbwert erhält. Infolgedessen wird das Segmentierungsergebnis häufig auch als *Maske* bezeichnet (vgl. Szeliski 2022, S. 386 f.).

### **Instanz Segmentierung**

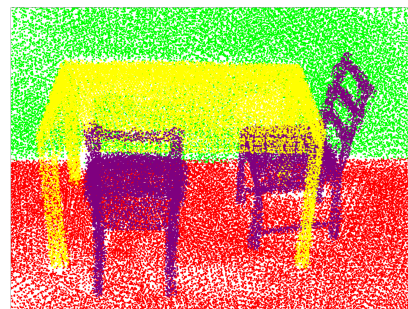
Während bei der Semantischen Segmentierung die Strukturierung der visuellen Eingabedaten auf kategorischer Ebene erfolgt, unterscheidet das Ergebnis der Instanz Segmentierung auch Objekte innerhalb einer Kategorie. Demnach besteht die Herausforderung bei der Lösung dieser Aufgabe darin, die atomaren Elemente der Eingabedaten zu klassifizieren und darüber hinaus mit einer einzelnen Objektinstanz innerhalb der Kategorie zu assoziieren (vgl. Szeliski 2022, S. 391 ff.). Die kategorische Objektzuordnung wird dabei in Analogie zur Semantischen Segmentierung über Farbwerte visualisiert (vgl. Abbildung 4.11d). Die Kombination beider Segmentierungsaufgaben erlaubt eine umfassende Beschreibung der erfassten Szene als Ganzes, wodurch der Begriff des holistischen Szenenverständnisses hervorgeht, welcher in verschiedenen Publikationen genannt wird, darunter Heitz et al. (2008) sowie Yao et al. (2012). Als höchste Form der semantischen Ergänzung ist diese Informationsbasis für die Bewertung von Wohnräumlichkeiten und damit auch der Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen (Forschungsaspekt 3) vonnöten.



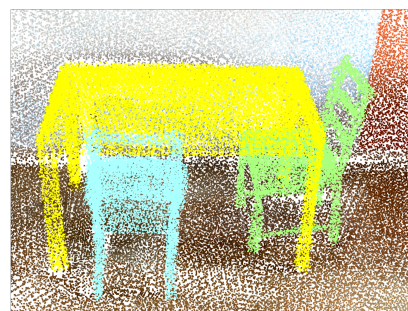
(a) Eingabedaten



(b) Objektdetektion



(c) Semantische Segmentierung



(d) Instanz Segmentierung

Abbildung 4.11: Ergebnisse der semantischen Ergänzung am Beispiel einer Bildaufnahme (linke Spalte) und zugeschnittenen Flash-LiDAR-Punktwolke (rechte Spalte) derselben Szene bei näherungsweise gleicher Perspektive

---

## 4.2.2 Verfahren zur semantischen Ergänzung

Infolge der Progression von Verfahren zur 3D-Datenerfassung sind Punktwolken (vgl. Abschnitt 4.1.1) in den letzten Jahrzehnten zum Stand der Technik bei der Rekonstruktion von Objekt- oder ganzer Szenenoberflächen avanciert. Durch den Einsatz von Punktwolken sind verschiedene Eigenschaften und Unvollkommenheiten verbunden, die gleichzeitig Herausforderungen für die automatisierte Verarbeitung bedeuten. Eine kompakte Übersicht dazu liefern Poux (2019, S. 33) und Qi; Hao Su et al. (2017, S. 654). Drei der größten Herausforderungen stellen dabei die inhärente Ordnung, ungleichmäßige Punktverteilung in Folge der Messentfernung und Verdeckung sowie der meist große Umfang an Daten dar, welche sich entsprechend auf die Wahl der Verfahren zur Strukturierung von Punktwolken auswirken. Für Aufgaben der semantischen Ergänzung qualifizieren sich neben wissensbasierten Verfahren (vgl. Ponciano 2019, Poux 2019) gegenwärtig vor allem selbstlernende Ansätze aus dem daten- und statistikgetriebenen Bereich des Deep Learning (DL), wie die systematischen Literaturrecherchen von Guo et al. (2021) sowie Xie et al. (2020) nachweisen. Beide Ansätze werden in den folgenden Abschnitten kurz vorgestellt und unter Beachtung der abschnitteinleitend genannten Anforderungen eingeordnet.

### Wissensbasierte Verfahren

Die semantische Ergänzung von Punktwolken über die „*Integration von objektbezogenem Vorwissen*“ (Marbs et al. 2010, S. 2) fällt in die Kategorie der **wissensbasierten Verfahren**, welche auch als Expertensysteme bezeichnet werden. Solche verwenden „*komplexe Formalismen zur Repräsentation und umfangreiche Techniken zur Verarbeitung*“ (Altenkrüger et al. 1992, S. 1) von Punktwolken, mit dem Ziel semantische Informationen zu ergänzen. Das explizite Vorwissen wird dabei in der Regel über semantische Netze oder Ontologien formal abgelegt und umfasst sämtliche Elemente des Anwendungsgebiets, wie im hier dargestellten Fall die erfasste Szene, ihre Objekte und Nachbarschaftsbeziehungen sowie den Datenerfassungsprozess (vgl. Ponciano 2019, S. 63, Poux 2019, S. 56, Ponciano et al. 2017, S. 3, Marbs et al. 2010, S. 2). Ontologien können in zwei Ebenen unterschieden werden: (a) die abstrakte Ebene, in welcher Elementklassen, deren Beziehungen untereinander und konsistente Regeln definiert werden und (b) die faktenbasierte Ebene, auf der elementweise Merkmale (engl. Features) und Abhängigkeiten festgeschrieben werden. In Verbindung mit unterschiedlichen Algorithmen zur Berechnung punktbasierter Merkmale (z. B. geometrischer Art in Form von Oberflächennormalen) erfolgt in einem automatisierten Schlussfolgerungsprozess (engl. Reasoning) die Ergänzung semantischer Informationen, wobei diese in konsistenter Weise den formalisierten Regeln der Ontologie folgen. Dabei sind die Ontologien, welche größtenteils von Experten manuell definiert werden, für ein spezifisches Anwendungsgebiet entworfen und erlauben damit nur unter Aufwand die Adaption auf weitere Nutzungsszenarien. Durch die Veröffentlichung einer selbstlernenden Ontologie (*Self-Learning Ontology*) nach Poux und Ponciano (2020) gestaltet sich die wissensbasierte Erweiterung mithilfe überwachter Lernverfahren (engl. supervised Learning) bedeutend leichter, weshalb dieser wissensbasierte Ansatz zur Bewertung von Wohnräumen erprobt und in Plaß; Prudhomme et al. (2021) veröffentlicht worden ist.

Darin wird ein pflegerisches Entscheidungsunterstützungssystem (engl. *Medical Decision Support System (MDDS)*) vorgestellt, welches die Eignung eines diskretisierten Wohnraumes durch darin ent-

---

haltene Ausstattungselemente am Beispiel eines Rollstuhlfahrers und im Kontext der geometrischen Mindestanforderungen aus der DIN 18040-2:2011-9 bewertet. Dazu dient eine aus drei Ontologien bestehende Wissensdatenbank, mittels welcher die Verarbeitung und daran anschließend die Bewertung der Wohnraumrepräsentation erfolgt. Am Beispiel einer Konzeptprüfung (engl. Proof of Concept (PoC)), die auf eine zufällig ausgewählte Räumlichkeit aus dem populären Benchmark-Datensatz *Stanford 3D Indoor Scene (S3DIS)* nach Armeni et al. (2016) zurückführt, wird nachgewiesen, dass das MDSS in der Lage ist, den Eignungszustand jedes Ausstattungselements zu bestimmen, die Bewertungsklassifikation auf den Wohnraum zu übertragen und textlich zu erklären (Plaß; Prudhomme et al. 2021, S. 212). Die ontologische Schlussfolgerung erfolgt dabei als nachgeschalteter Verarbeitungsprozess, welcher der konzeptionellen Anforderungen an eine simultane und damit echtzeitfähige Datenstrukturierung entgegensteht. Aus diesem Grund wird ein auf wissensbasierten Verfahren gründender Implementierungsansatz nicht weiterverfolgt. Details zur Implementierung wissensbasierter Ansätze liefert Poux (2019) am Beispiel konventioneller und Ponciano (2019) hinsichtlich selbstlernender Ontologien. Darunter finden sich jeweils auch Anwendungsbeispiele für Innenräumlichkeiten.

## Selbstlernende Verfahren

Im Vergleich zu wissensbasierten Verfahren, die in Regeln formalisiertes, explizites Vorwissen verwenden, um eine ontologische Schlussfolgerung zur semantischen Ergänzung von Punktwolken zu unterstützen, verfolgen **selbstlernende Verfahren** aus dem Bereich der KI einen anderen Ansatz. Solche setzen umfangreiche und manuell vorverarbeitete Daten voraus, welche das notwendige Vorwissen implizit enthalten und anhand derer hochparametrisierte Modelle, sogenannte Künstliche Neuronale Netze (KNN) (engl. Artificial Neural Networks oder auch Multi-Layer Perceptrons (MLP)), im Rahmen eines zyklischen Trainingsprozesses optimiert werden (vgl. Goodfellow et al. 2016, S. 164 ff., Bishop 2006, S. 225 ff.). KNN bestehen aus mehreren verschiedenartigen Schichten, deren Anzahl und Größe anhand der Komplexität der zu lösenden Aufgabe bemessen wird. Für die semantische Ergänzung kommen folglich insbesondere mehrschichtige bzw. tiefe KNN zum Einsatz, welche auch als DL-Modelle bezeichnet werden und in der letzten Dekade vor allem in Form faltender Architekturen (engl. Convolutional Neural Network (CNN)) große Popularität erreicht haben (vgl. Alzubaidi et al. 2021, S. 2 ff., Gu et al. 2018, S. 354). CNN sind durch den biologisch-visuellen Wahrnehmungsmechanismus inspiriert und haben sich seit dem Erfolg des *AlexNet* (Krizhevsky et al. 2012) über die ursprüngliche Bildklassifikation hinaus stark weiterentwickelt. Das steht vorwiegend in Zusammenhang mit der zunehmenden Verfügbarkeit großer Trainings- und Benchmark-Datensätze, welche mit die relevanteste Voraussetzung für den Gebrauch von DL darstellen. Für innerräumliche Szenen existieren derweilen eine Reihe verschiedener Benchmarks mit zum Teil multimodalen Eingabedaten, wie z. B. *ModelNet* (Z. Wu et al. 2015), *ShapeNet* (Chang et al. 2015), *ScanNet* (Dai et al. 2017), *S3DIS* (Armeni et al. 2016), *NYU* (Silberman und Fergus 2011, Silberman; Kohli et al. 2012), *SUN RGB-D* (Song et al. 2015), *ARKitScenes* (Baruch et al. 2022) oder der *Omni3D* Datensatz (Brazil et al. 2023). Dabei erhebt die Auflistung keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die gelisteten Datensätze decken mit Ausnahme von *ScanNet* jeweils nur einen Teil der erforderlichen semantischen Auflösung (vgl. Tabelle 3.3) zur Bewertung von Wohnräumen hinsichtlich der Altersgerechtigkeit ab. Dank dieser Benchmarks sowie der Möglichkeit mittels Faltungsoperationen



---

(engl. Convolutions) lokale Datenstrukturen zu extrahieren und dabei gleichzeitig einen effizienten Umgang mit den zu optimierenden Parametern (engl. Parameter sharing) (Goodfellow et al. 2016, S. 331 f.) zu pflegen, haben sich CNN auch für die Verarbeitung von Punktwolken etabliert und kommen in unterschiedlichsten Architekturen für die genannten Aufgaben des Szenenverständnisses zum Einsatz. Die Taxonomie für DL auf Punktwolken ist vielfältig (vgl. Guo et al. 2021, S. 2) und entwickelt sich kontinuierlich weiter. Neben punktbasierten Methoden, welche die Punktwolke direkt konsumieren (z. B. Qi; Yi et al. 2017, Qi; Hao Su et al. 2017), existieren auch Ansätze, die Voxelgitter verarbeiten (z. B. Maturana et al. 2015) oder die Punktwolke zunächst in mehrere zwei-dimensionale Ansichten (*Multi-Views*) projizieren, um sie anschließend über klassische, bildbasierte CNN zu segmentieren (z. B. Hang Su et al. 2015). Darüber hinaus existieren z. B. graphenbasierte (z. B. Z.-H. Lin et al. 2020) oder hybride (z. B. Elich et al. 2019) Ansätze, die in Guo et al. (2021) beschrieben jedoch hier nicht weiter ausgeführt werden. In Analogie zur Adaption wissensbasierter Verfahren ist selbiges für die Punktwolkenklassifikation mittels DL erfolgt. Dabei befindet sich die im nachfolgenden Absatz einleitend genannte Arbeit zur *Shrinking unit* zum Zeitpunkt der Einreichung noch im Begutachtungsprozess.

In Tamajo, Plaß und Klauer (2022) wird ein Modul namens *Shrinking unit* vorgestellt, welches dem Prinzip von Faltungsoperationen stringent folgt, um ein äquivalentes Gegenstück zu bildverarbeitenden CNN-Architekturen für die Klassifikation von Punktwolken bereitzustellen. Dazu wird vorgeschlagen, das Modul zur Reduktion der Größe der Punktwolke horizontal und zur Extraktion unterschiedlicher geometrischer Merkmale vertikal zu stapeln. Um die Wirksamkeit des neuartigen Moduls zu testen, ist eine als *Shrinking Net* bezeichnete Architektur für die Klassifikation entworfen und auf *ModelNet* getestet worden. Dabei zeigt sich die Performance mit 90,64% vergleichbar mit anderen State-of-the-Art Methoden und vollzieht, konsequent im Sinne des Konzepts von DL, einen steigenden Verlauf bei Erhöhung der Anzahl von *Shrinking units* sowie der Ergänzung weiterer neuronaler Netzwerkschichten (vgl. Tamajo, Plaß und Klauer 2022, S. 7). Neben dem *Shrinking Net* für die Punktwolkenklassifikation innerhäuslicher Szenen existieren weitere optimierte DL-Modelle, wie z. B. *CAGroup3D* für die Objektdetektion (Wang et al. 2022), *CMX* zur Semantischen Segmentierung (J. Zhang et al. 2023) und *ISBNNet* für die Instanz Segmentierung (Ngo et al. 2023). Diese Auswahl stellt gemäß der Plattform *Papers With Code*<sup>26</sup> die aktuellsten und auf dem Benchmark *ScanNetV2* am besten performenden Modelle dar. Aufgrund verschiedener Metriken für die jeweiligen Aufgaben der semantischen Ergänzung wird von der Angabe solcher abgesehen. Für das erforderliche, holistische Szenenverständnis existieren über *CMX* sowie *ISBNNet* hinaus weitere Modelle wie z. B. die Pionierarbeit *PointNet* (Qi; Hao Su et al. 2017) bzw. *PointNet++* (Qi; Yi et al. 2017) oder ganz aktuell *Mask3D* (Schult et al. 2022). Dabei ermöglichen die angeführten Ansätze die semantische Ergänzung nur im Rahmen einer der 3D-Geometrieerfassung nachgeschalteten Verarbeitung. Das liegt vor allem an der definierten Datendimensionalität begründet, die tief in der Modellarchitektur verankert ist. Punktbasierte Ansätze erwarten z. B. eine spezifische Menge an Eingabepunkten, welche bei der Konzeptionierung der Architektur frei wählbar und danach unveränderlich ist (vgl. Tamajo, Plaß und Klauer 2022, S. 4, Qi; Yi et al. 2017, S. 5106 f.). Gleichermaßen verhält es sich

---

<sup>26</sup>*Papers With Code* ist eine gemeinschaftsbetriebene Plattform für State-of-the-Art Forschungsarbeiten aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen. Die Abfrage ist am 13.04.2023 für den Bereich Computer Vision erfolgt und betrachtet den Indoor-Benchmark *ScanNetV2* aufgrund seiner 200 Klassen umfassenden, semantischen Diversität (Papers with Code 2023).

---

bei projektiven *Multi-View* Ansätzen hinsichtlich der Dimensionalität der Eingabebilder. Andere Methoden hingegen konsumieren eine beliebig große Punktwolke, reduzieren diese jedoch im Rahmen einer Voxelisierung (vgl. Abschnitt 4.1.1), wodurch die Extraktion geometrischer Merkmale durch Faltungen ermöglicht wird (vgl. Guo et al. 2021, S. 4, Wang et al. 2022, S. 3 f., Schult et al. 2022, S. 3). Folglich fallen diese modellbedingten Restriktionen nicht mit der Anforderung an eine simultane Echtzeitstrukturierung zusammen, wodurch diese Arbeit einen alternativen und zugleich innovativen Ansatz verfolgt, der im Folgeabschnitt erläutert wird.

### 4.2.3 Ansatz zur semantischen Echtzeit-Strukturierung

Angesichts der ausgeschlossenen, nachgelagerten Verfahren zur semantischen Ergänzung im Zusammenhang mit dem für die Wohnraumerfassung als geeignet befundenem dToF Flash-LiDAR-Technik grenzt sich der methodische Handlungsspielraum auf das Ökosystem von Apple Inc. ein. Das *ARKit* stellt neben der Instrumentalisierung des LiDAR-Scanners auch eine Möglichkeit bereit, die als Mesh repräsentierte Szene zu klassifizieren. Da hierbei nur ein Teil der zur Beschreibung und Prüfung eines Wohnraumes erforderlichen Klassen adressiert wird, besteht die Notwendigkeit eine Verfeinerung vorzunehmen, wonach die semantische Echtzeit-Strukturierung einem zweistufigen Ansatz folgt, dessen Komponenten zum Abschluss dieses Kapitels näher beleuchtet werden.

#### Echtzeit-Mesh-Klassifikation

Rund drei Monate nach der Vorstellung des ersten iPad Pro mit integriertem LiDAR-Sensor (Apple Inc. 2020b) stellte Apple auf der *Worldwide Developer Conference 2020* auch softwareseitige Neuerungen vor. Darunter fiel u. a. die Veröffentlichung der vierten Generation des Frameworks *ARKit*, dessen Kernfunktionalität die Erfassung und visuelle, dreidimensionale Repräsentation der Umwelt darstellt, um AR-Anwendungen in iOS-Apps zu integrieren. Die Fortsetzung der AR-Entwicklung mittels LiDAR-Technik ist durch die Ambition begründet, AR für die verschiedensten Anwendungen, darunter z. B. die Platzierung von Objekten (engl. Object Placement) (Apple Inc. 2020a) oder die parametrische 3D-Modellierung einer innerräumlichen Szene durch *RoomPlan* (Apple Inc. 2022), weiter zu optimieren bzw. für letztere erstmalig zu ermöglichen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass das Framework *RoomPlan* keinen funktionalen Anteil innerhalb dieser Arbeit einnimmt, wengleich eine signifikante Schnittmenge des Funktionsumfangs zur Lösung der definierten Zielsetzung vorherrscht. Für zusätzliche Ausführungen hinsichtlich des Funktionsumfangs von *ARKit*, seit 2021 in der fünften und seit 2022 in der sechsten Generation verfügbar, wird an dieser Stelle auf die entsprechende Dokumentation verwiesen. *ARKit* inkorporiert Funktionen, mit welcher die polygonale Erfassung der betrachteten Szene im Sichtfeld des iOS-Geräts realisiert wird. Mehr Details zum Vermaschungsprozess einer Szene liefert der Abschnitt 5.2. Das resultierende Mesh führt dabei neben der obligatorischen 3D-Geometrie auch Oberflächennormale und Texturinformationen aus der Aufnahme der Weitwinkel-Kamera in Form eines sich in Echtzeit erweiternden Geometrieobjekts (siehe Abbildung 4.12a für die vermaschte 3D-Geometrie einer Beispielszene ohne weitere Texturierung). Über die 3D-Erfassung und Anzeige hinaus ermöglicht das Framework auch die Klassifikation einer jeden Dreiecksfläche des Szenen-Meshs, welche gemäß der *ARKit*-Dokumentation auf einer geometrischen wie auch radiometrischen Analyse basiert (vgl. Apple Inc. o. J.(c) und

Apple Inc. o. J.(d)). Details zu dem verwendeten Klassifikationsalgorithmus veröffentlicht Apple Inc. nicht. Die Mesh-Klassifikation von *ARKit* enumeriert acht Kategorien, darunter *Decke*, *Wand* und *Fußboden* sowie *Tür*, *Fenster*, *Stuhl* und *Tisch*. Alle Dreiecksflächen, die nicht klassifiziert werden können, werden als *unbekannt* beschriftet. In Tabelle 4.4 sind diese Kategorien den zur Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit erforderlichen semantischen Klassen gegenübergestellt. Es zeigt sich, dass unter Verwendung der Mesh-Klassifikation von *ARKit* acht von elf Klassen belegt werden. Die Klasse *unbekannt* belegt dabei die zu *Sonstiges* korrespondierende Position mit einer entscheidenden Bedeutung für die semantische, bildbasierte Verfeinerung, welche anschließend beschrieben wird. In Abbildung 4.12b ist das Resultat der Echtzeit-Mesh-Klassifikation aus einer untexturierten Flash-LiDAR 3D-Geometrie am Beispiel der semantischen Klassen *Fußboden*, *Wand* und *Sonstiges* visualisiert.

### Semantische Verfeinerung durch bildbasierte Echtzeit-Objektdetektion

Die an die Mesh-Klassifikation anschließende Verfeinerung soll die drei verbliebenen und für die Wohnraumbewertung notwendigen semantischen Klassen ergänzen. Solche stellen allesamt Badezimmer-bezogene Ausstattungselemente dar, welche nach der Mesh-Klassifikation durch *ARKit* als *Sonstiges* klassifiziert sind, über bildbasierte Ansätze jedoch detektierbar sind (vgl. Tabelle 4.4). Zu dieser Erkenntnis kommt eine Untersuchung hinsichtlich der genannten Klassen *Dusche*, *Toilette* und *Waschbecken* auf drei der populärsten und größten Bilddaten-Benchmarks zur Objektdetektion: *Microsoft COCO* (T.-Y. Lin et al. 2014), *ImageNet* (Russakovsky et al. 2013) und *PASCAL VOC* (Everingham et al. 2010).

Mit dem Ziel, den Stand der Technik bei der Erkennung grundlegender Objektkategorien zu forcieren und damit das Szenenverständnis zu verbessern, sind seit 2005 eine Reihe von Benchmark-Datensätzen entstanden und seitdem in diversen Publikationen und Computer Vision Wettbewerben übernommen worden (T.-Y. Lin et al. 2014, S. 743). Mit dem *Common Objects in Context COCO* führen T.-Y. Lin et al. (2014) einen 328.000 Bilder umfassenden Benchmark von Alltagsszenen

Tabelle 4.4: Vergleich zwischen den für die Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit erforderlichen semantischen Klassen und den Kategorien der ausgewählten Verfahren zur semantischen Echtzeit-Strukturierung

Semantische Klassen	Fußboden	Tür	Dusche	Toilette	Waschbecken	Fenster	Stuhl	Tisch	Wand	Decke	Sonstiges
Mesh-Klassifikation*	✓	✓			✓	✓	✓	✓	✓	✓	(✓)
Microsoft COCO**				✓	✓	✓	✓				(87)
ImageNet (LSVRC OD)***					✓	✓	✓				(197)
Pascal VOC****						✓	✓				(18)

\* Apple Inc. (o. J.[b]), \*\* Benchmark nach T.-Y. Lin et al. (2014)

\*\*\* Benchmark nach Russakovsky et al. (2013), \*\*\*\* — Everingham et al. (2010)

---

ein, der insgesamt 2,5 Millionen Bounding Box annotierte Objekte aus 91 Kategorien in gewöhnlich vorkommenden Umgebungen enthält. Vier der 91 Kategorien entsprechen den notwendigen semantischen Klassen für ein Szenenverständnis im Kontext der Altersgerechtigkeit, wobei davon bereits zwei Klassen durch die Mesh-Klassifikation von *ARKit* belegt sind. Der Benchmark aus der *PASCAL Visual Object Classes (VOC) Challenge* (Everingham et al. 2010) listet über 27.000 lokalisierte Objektinstanzen in über 11.000 Bildern aus 20 Kategorien. Dabei stimmen zwei Kategorien mit den semantischen Klassen überein, welche überdies bereits von *ARKit* adressiert sind. Der letzte Benchmark resultiert aus dem umfangreichsten Bilddaten-Benchmark weltweit: ImageNet (J. Deng et al. 2009). Im Zuge der *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge (ILSVRC 2014)* ist aus einem Bruchteil dessen ein Benchmark zur Objektdetektion entstanden, welcher in knapp einer halben Million Bildern über 530.000 Objekte aus 200 Kategorien enthält (vgl. Russakovsky et al. 2013 und ImageNet 2014). Drei Kategorien haben für die vorliegende Arbeit Relevanz, sind jedoch durch die Mesh-Klassifikation von Apple Inc. bereits gedeckt. Während der vollständige ImageNet Benchmark mit 1.000 Kategorien sämtliche verbleibende semantischen Klassen enthält (*Dusche*: ImageNet Kategorie ID: 794, *Toilette*: ImageNet Kategorie ID: 861, *Waschbecken*: ImageNet Kategorie ID: 896) (vgl. ImageNet o. J.), verfügen diese hingegen nicht über eine Bounding Box Annotation, welche für die Aufgabe der Objektdetektion erforderlich ist. Folglich können diese vorliegenden Informationen nicht zur semantischen Verfeinerung im Rahmen des hier vorgeschlagenen zweistufigen Ansatzes beitragen, weshalb sich der Benchmark *Microsoft COCO* zur weiteren Verwendung in Verbindung mit einem Echtzeit-Bilddetektor qualifiziert. Tabelle 4.4 hält das Ergebnis dieser Untersuchung fest und gibt unter *Sonstiges* die Anzahl der Kategorien jedes Benchmarks abzüglich der semantisch korrespondierenden Klassen an.

Die bildbasierte Objekterkennung findet seit der Publikation des *AlexNet* (Krizhevsky et al. 2012) vorrangig unter Verwendung von CNN statt. Regelmäßig werden neue Architekturen vorgeschlagen und State-of-the-Art Performance-Benchmarks gebrochen. Dabei unterscheiden sich die Ansätze darin, wie die Bildobjekte klassifiziert und über Bounding Boxen lokalisiert werden. Während *Two-Stage* Detektoren, wie z. B. das *Faster R-CNN* nach Ren et al. (2015), zunächst eine vordefinierte Anzahl an Bildregionen über ein *Region Proposal Network (RPN)* vorschlagen, welche im Anschluss final klassifiziert und präzise lokalisiert werden, erfolgt die Klassifikation und Bounding Box Regression bei *One-Stage* Detektoren, wie dem *You Only Look Once (YOLO)* (Redmon; Divvala et al. 2016), in einem gemeinsamen Schritt (vgl. Carranza-García et al. 2021, S. 6). Der architektonische Unterschied wirkt sich auf die Performance und Inferenzgeschwindigkeit aus. Dabei liegt die Detektionsgenauigkeit von *One-Stage* Ansätzen gewöhnlich unterhalb der von *RPN*, wohingegen sie eine signifikant höhere Geschwindigkeit aufweisen (Lohia et al. 2021, S. 2 f.), weshalb sie für die Echtzeit-Objekterkennung besser geeignet sind.

Eine vielfach zitierte und seit 2016 kontinuierlich weiterentwickelte *One-Stage* Architektur ist unter dem Pseudonym *YOLO* bekannt. Das Modell zur Objektdetektion ist 2015 von Redmon; Divvala et al. an der Universität Washington entwickelt worden und hat im Zuge des guten Verhältnisses zwischen Genauigkeit und Geschwindigkeit zügig an Popularität gewonnen. Inzwischen kann *YOLO* auf eine vielschichtige Historie<sup>27</sup> mit diversen Neuerungen zurückblicken (vgl. Encord 2023). Eine

---

<sup>27</sup>Gegenwärtig stellt *YOLOv8*, eingeführt im Januar 2023, das aktuellste *One-Stage* State-of-the-Art Modell zur Objektdetektion dar (Ultralytics 2023).

umfassende Änderung in Form der vollständigen Erneuerung des einst einzelnen CNN zur Extraktion von Bildmerkmalen durch die sehr viel tiefere und speziell für die Objektdetektion entwickelte Architektur namens *Darknet-53* ist mit dem *YOLOv3* 2018 eingeführt worden (vgl. Redmon und Farhadi 2018). *Darknet-53*, als 53-schichtiges, residuales CNN mit fünf Blöcken von jeweils zwei unterschiedlich dimensionierten und mehrfach gestapelten Faltungsoperationen (engl. Convolutions), fungiert als Gerüst (engl. Backbone) für die Merkmalsextraktion. Es konsumiert ein dreikanaliges Bild der Ausdehnung  $256 \text{ px} \times 256 \text{ px}$  und prädiziert je nach Konfiguration innerhalb von 22 ms bis 51 ms (entspricht einer Bildrate von 45 fps bis 20 fps) die Klassifikation sowie genaue Lokalisation identifizierter Objekte. Dabei erreicht es auf *Microsoft COCO* eine mittlere Genauigkeit (engl. mean Average Precision (mAP)) von 51,5%, respektive 57,9% bei einer geringeren Inferenzzeit (vgl. Redmon und Farhadi 2018, S. 4). Details zur Architektur, der Geschwindigkeit im Vergleich zu anderen Objektdetektoren sowie der Performance auf dem *Microsoft COCO* Benchmark sind in Redmon und Farhadi (2018) nachzuschlagen.

Ein auf *Microsoft COCO* trainiertes *YOLOv3* Modell stellt sich folglich als geeigneter Lösungsansatz vor, die Klassifikation der polygonalen Dreiecksflächen des Meshs für die semantischen Klassen zu ergänzen, welche von *ARKit* nicht identifizierbar sind und somit als *Sonstiges* interpretiert werden. Aus der Objektdetektion mit *YOLOv3* resultieren klassifizierte Bounding Boxes einschließlich ihrer lokalen Bildkoordinaten, welche sich für die semantische Verfeinerung als hilfreich erweisen. Diese Koordinaten, in Verbindung mit der sich aus der Orientierung des Erfassers ergebenden Normalenrichtung, erlauben die Berechnung eines dreidimensionalen Sichtstrahls (engl. Raycast), mittels welchem zunächst eine geometrische Verschneidung des teilklassifizierten Meshs, anschließend eine

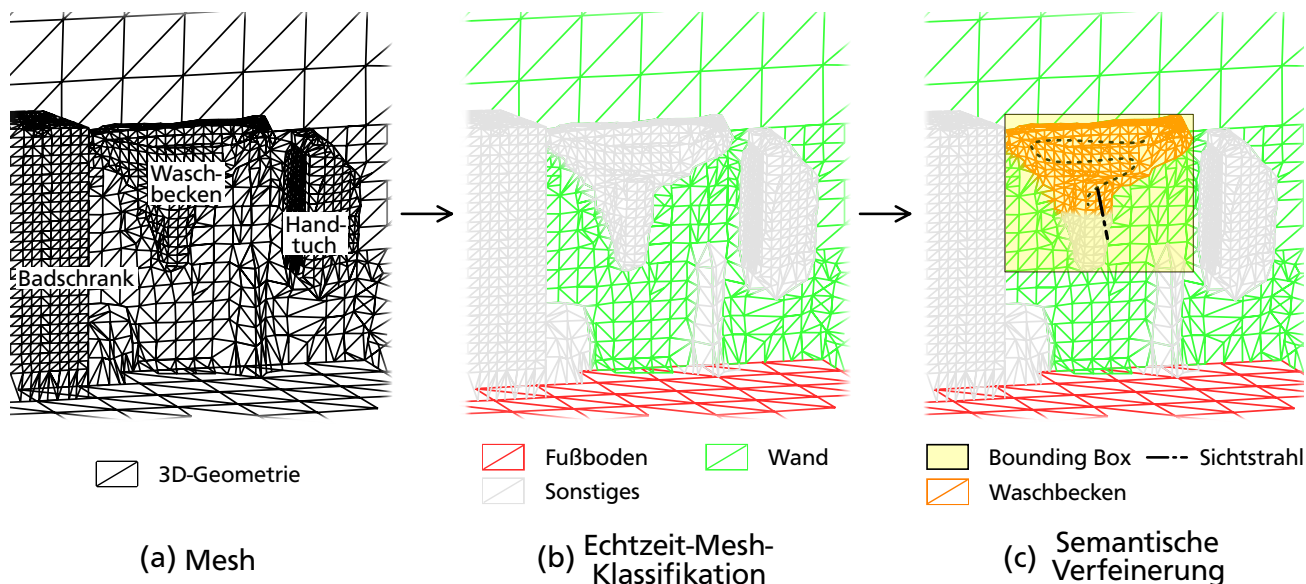


Abbildung 4.12: Prozess zur semantischen Strukturierung eines Meshs, illustriert ist in (a) die unstrukturierte polygonale 3D-Geometrie, in (b) das teilklassifizierte Mesh nach der Echtzeit-Mesh-Klassifikation mittels *ARKit* und in (c) das Ergebnis der semantischen Verfeinerung durch eine bildbasierte Objektdetektion mittels Raycasting, hier exemplarisch anhand der Klasse *Waschbecken* dargestellt

---

semantische Abfrage und abschließend die semantische Injektion für die Klassen *Toilette* und *Waschbecken* erfolgt, sofern die verschnittene Dreiecksfläche der Klasse *Sonstiges* angehört. Während dieses Prozesses wird das Mesh fixiert und die *Raycasting*-Funktionalität (Apple Inc. o. J.(e)) aus dem *ARKit* Framework verwendet, um die geometrische Verschneidung berechnungseffizient durchzuführen. Der Prozess zur semantischen Ergänzung ist generisch in Abbildung 4.12c dargestellt und generiert ein semantisch segmentiertes Mesh, welches gemäß Abschnitt 4.1.1 verlustfrei als 3D-Punktwolke repräsentiert werden kann. Der von Apple verwendete Terminus der *Mesh-Klassifikation* ist an dieser Stelle irreführend, da er in einem semantisch segmentierten Mesh mündet (vgl. Abbildung 4.12b). Terminologisch ist dies jedoch korrekt, da der Algorithmus nicht die Dreiecksflächen selbst, sondern sogenannte Anker klassifiziert, welche jeweils Teile der polygonalen Strukturen binden und darüber die semantische Struktur mit dem Mesh verknüpft (vgl. Abschnitt 4.1.4, Absatz zum LiDAR-Scanner von Apple Inc.). Unter Verwendung der *ARKit* Mesh-Klassifikation und dem auf *Microsoft COCO* trainierten *YOLOv3* können zehn von elf erforderlichen semantischen Klassen für die Wohnraumbewertung identifiziert werden. Infolgedessen entfällt die Klasse *Dusche* einschließlich der an diese gebundenen Regeln im weiteren Verlauf dieser Arbeit (vgl. Tabelle 3.3).

## 4.3 Diskussion der Technologien zur Erfassung und Strukturierung eines Wohnraumes

Neben der Automatisierung definieren auch die Erlernbarkeit, Gebrauchstauglichkeit und Verfügbarkeit grundlegende Schlüsselanforderungen an den Prozess zur 3D-Erfassung und -Strukturierung innerräumlicher Szenen für die Bewertung der Altersgerechtigkeit (Forschungsaspekt 2), um das *Ageing in Place* durch eine technologische Anwendung zu forcieren. Dieses Kapitel setzt sich mit verschiedenen Verfahren auseinander, die zur Realisierung des Anwendungsfalls unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen infrage kommen. Während kapitelintern konsequent zwischen Verfahren zur 3D-Datenerfassung sowie semantischen Strukturierung separiert wird, soll dieser diskursive Abschluss den gesamtheitlichen, gestaltungsorientierten Design-Prozess und damit die Bedeutung zur Automatisierung der Wohnraumbewertung unter einer zusätzlichen Modellperspektive betrachten.

Das den Rahmen dieser Arbeit definierende Leitmotiv sieht eine dreifaltige Zielgruppe vor, für welche eine digitale Anwendung in verschiedener Hinsicht einen relevanten Vorteil bedeutet (vgl. Abschnitt 3.2.1). Aus diesem Grund erhalten die nutzungsrelevanten Anforderungen eine hohe Gewichtung und führen damit zu einer handgetragenen und vergleichsweise preiswerten Technologie, welche derzeit lediglich in einer Teilmenge von mobilen Verbrauchergeräten integriert ist, gleichzeitig jedoch ein weitreichendes Nutzungspotenzial besitzt, wodurch zukünftig eine Zunahme der Verfügbarkeit durch weitere Hard- und Softwarehersteller erwartet wird. Der Flash LiDAR-Scanner von Apple Inc. repräsentiert einen Sensor, welcher eine anwenderorientierte und unter Beachtung der Messentfernung zur Sicherstellung der erforderlichen Qualität des resultierenden 3D-Datensatzes bedarfsgerechte Wohnraumerfassung ermöglicht. Durch dessen Integration in multifunktionale Endgeräte eignen sich das *iPhone 12+ Pro* bzw. *iPad 2020+ Pro* von Apple Inc. für den hier vorgestellten Anwendungsfall und die oben genannte Zielgruppe in umfänglicher Weise. Im Rahmen des Kapitels

---

sind weitere Verfahren intensiv untersucht worden, die aufgrund der spezifischen Anforderungen im Verlauf dieser Arbeit nicht weiter adressiert werden, jedoch durchaus Potenzial besitzen, um den formulierten Forschungsaspekt 2 im Kontext des Nutzungsszenarios 3 anderweitig zu lösen. Dazu wird exemplarisch die Möglichkeiten um die Intel® RealSense™ LiDAR Kamera L515 skizziert.

Die *RealSense™ L515* verfügt über einen hochwertigen Tiefensensor und stellt in Verbindung mit zusätzlicher, kostenpflichtiger Hard- und Software eine Alternativlösung für die dreidimensionale Wohnraumerfassung unter Beachtung der Echtzeitfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit dar. In Verbindung mit leistungsfähigen Modellen aus der DL-gestützten Bildverarbeitung ist folglich auch mit diesem System eine strukturierte Echtzeit-Geometrienerfassung (vgl. Abschnitt 3.2.2) denkbar, die in das generisch entwickelte WIM überführt und dadurch den Wohnraum automatisiert auf Barrieren respektive mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen hin untersuchen kann. Dabei könnte die Entwicklung eines solchen Systems als technologische Grundlage für ein leihbasiertes Geschäftsmodell dienen, welches durch den herausgestellten und eindeutig bezifferten Wohnraumanpassungsbedarf getrieben wird und sich dem florierenden Markt für Ambient Assisted Living (AAL)-Systeme, Digitalen Gesundheits- (DiGA) oder Digitalen Pflegeanwendungen (DiPA) zuordnen lässt. Ein entsprechendes Geschäftsmodell verspricht bilateralen Nutzen auf mehreren Ebenen, einerseits bei den anbietenden Akteuren hinsichtlich des durchaus skalierbaren Angebotscharakters, angefangen von der pflegegeleiteten Wohnraumbewertung bis hin zur parametrischen Modellierung selbiger für technische Umbau- und Sanierungsmaßnahmen, sowie der zu erwartenden wirtschaftlichen Vorteile. Andererseits können auch die potenziellen Nutzer profitieren, die ein entsprechendes System für eine überschaubare Gebühr im Rahmen eines in der Regel temporären Bedarfsfalls verwenden. Das Fundament für einen rein bildbasierten Ansatz mittels *RealSense™ L515* Tiefenkamera legen an dieser Stelle die in der Industrie 4.0 bereits flächig eingesetzten Computer Vision Modelle, denen immer mehr Benchmark-Datensätze zu besseren Leistungen verhelfen und den Zugang zu verschiedenen Anwendungsbereichen ermöglichen. Für den hier skizzierten Ansatz ist das beispielhaft der Benchmark *ScanNet* oder *S3DIS* in Verbindung mit Instanz Segmentierungsmethoden nach u. a. Schult et al. (2022) für ein holistisches Szenenverständnis.

In Summe zeigen die aufgeführten Ansätze ein weitreichendes und umfangreiches Potenzial, welches sich durch transparente, effektive und fehlervermeidende Prozesse auszeichnet. Aus diesen resultieren reichhaltige, semantische Informationen, die maschinell verarbeitet werden können, sowie durch die systemische Kompatibilität mit den eingesetzten Anwendergeräten eine flexible Datenübertragung an weitere daran anschließende Systeme, z. B. aus dem Portfolio von DiGA oder DiPA, ermöglichen. Obwohl die Entwicklung von KI-gestützten Ansätzen und Verfahren in der Forschungslandschaft bereits starken Durchsatz verzeichnet, quittiert der wirtschaftliche Sektor diesen Vorteil bislang noch mit abwartender Haltung. Das Ergebnis dieser Arbeit kann dazu beitragen, diese Zurückhaltung durch den adressierten Anwendungsfall der Wohnraumbewertung für das Gesundheits- und Pflegesystem als Sektor mit vergleichsweise unterdurchschnittlichem Digitalisierungsindex (Deutsche Telekom AG 2020b, vgl. dazu auch Deutsche Telekom AG 2020a) abzulegen.





---

# 5 Entwurf und Implementierung einer Demonstratoranwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell

---

Dieses Kapitel widmet sich dem Entwurf und der prototypischen Entwicklung einer Demonstratoranwendung zur Digitalisierung von Wohnräumlichkeiten, mit der Absicht innerhäusliche Verbesserungsmaßnahmen automatisiert zu identifizieren, die einer barrierefreien und rollstuhlgerechten Nutzung entgegenstehen. Die im Folgenden vorgestellte Anwendung *Progressive Home Care (PHC)* stellt eine kompositäre Implementierung der in Kapitel drei ausgeführten Konzepte unter Verwendung der aus Kapitel vier als qualifiziert evaluierten Verfahren dar. Im Rahmen dieses Kapitels wird zunächst die ganzheitliche Architektur beschrieben, ehe in den daran anschließenden Abschnitten die zwei Anwendungskomponenten, welche gemäß der gefassten Forschungsmethodik als Software-Artefakte gelten, ausgeführt werden. Darüber hinaus werden Limitationen sowie perspektivische Optimierungsmöglichkeiten des konzeptionell entworfenen und prototypisch implementierten Ansatzes präsentiert, ehe das Kapitel mit einem Zwischenfazit abschließt. Die Codebasis beider Artefakte ist verfügbar unter [gitlab.rlp.net/bastianplass/PHC](https://gitlab.rlp.net/bastianplass/PHC).

## 5.1 Demonstratoranwendung *Progressive Home Care*

Eine Anwendung, die zur Digitalisierung, Modellierung und Bewertung von ausgestattetem Wohnraum dienen und dabei den Anforderungen einer in Zusammenhang mit Mobilitätseinschränkungen stehenden, heterogenen Nutzergruppe entsprechen soll, muss möglichst schnell erlernbar, weitestgehend automatisiert und situativ einsetzbar sein sowie auf verfügbaren und gebrauchstauglichen Technologien aufbauen. Angesichts dieser sowie weiterer in Tabelle 3.2 gelisteten systemischen Qualitätsanforderungen sind in Abschnitt 4.1.5 verschiedene Verfahren zur 3D-Datenerfassung und -strukturierung untersucht worden. Für die anspruchsvollen Aufgaben aus dem 3D-Datenkontinuum qualifizieren sich die mobilen und mit LiDAR-Scanner ausgerüsteten Endgeräte von Apple Inc., weshalb solche als Basisplattform für die Implementierung einer begrifflich an Dahm-Griess (2013) angelehnte Anwendung namens *PHC* identifiziert worden sind. Folglich stellt ein wesentlicher Aspekt der Demonstratoranwendung eine auf diesen Endgeräten lauffähige App dar, welche einen maßgeblichen Teil des entwickelten Konzepts umsetzt: die strukturierte 3D-Datenerfassung. Der ganzheitliche

Prozess zur digitalen Umsetzung der identifizierten Forschungslücke innerhalb ambulanter Versorgungslösungen für wohnumfeldzentrierte Hilfsangebote (vgl. Abbildung 2.2) ist nachfolgend illustriert. Dabei gleicht die grundlegende Modellstruktur dem Konzept aus Abschnitt 3.2.2 und ist in der Abbildung 5.1 hinsichtlich einer zweifachen Kennzeichnung erweitert, welche die Themen der Anwendungskomponenten (grau) und des Automatisierungsgrads (blau) betreffen. Während demnach eine iOS-kompatible App mit Namen *Semantic Data Capture* einen strukturierten bzw. semantisch segmentierten 3D-Datensatz erhebt, setzt eine daran anschließende *Modellierungs- und Prüfanwendung* die Informationsmodellierung und regelbasierte Bewertung des erfassten Wohnraumes um. Infolge der digitalen DNA der Demonstratoranwendung lassen sich Prozessmodule automatisieren. So erfolgt bei Ausführung der App *Semantic Data Capture* die strukturierte Datenerfassung durch die in Abschnitt 4.2.3 vorgestellten Methoden, ebenso wie die regelbasierte Prüfung des Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit im Rahmen des maschinell analysierbaren Wohnrauminformationsmodells (WIMs), vollautomatisiert. Da die Modellierung eines WIMs einige wenige Steuerungsparameter benötigt, wird diese Komponente als teilautomatisiert ausgezeichnet. Details dazu werden im späteren Verlauf des Kapitels beschrieben. Die aus den Prozessmodulen hervorgehenden Datensätze werden in standardisierten Austauschformaten über eine interoperabel nutzbare Schnittstelle bereitgestellt, die eine Verzahnung der integrierten Anwendungsmodule und darüber hinaus eine potenzielle Anbindung an weitere Applikationen aus dem Ökosystem von Digitalen Gesundheits- (DiGA) bzw. Digitalen Pflegeanwendungen (DiPA) ermöglicht.

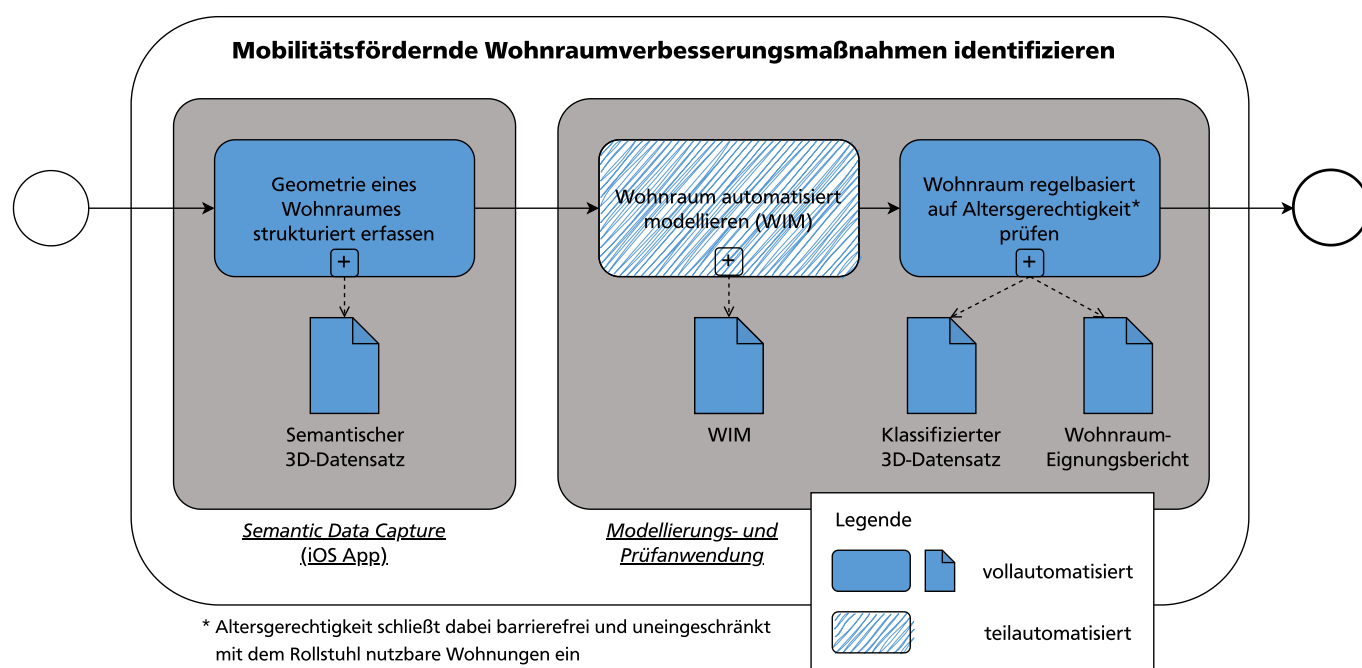


Abbildung 5.1: Erweitertes Prozessmodell der Identifikation von mobilitätsfördernden Wohnraumverbesserungsmaßnahmen einschließlich Kennzeichnung voll- und teilautomatisierter Prozesse bzw. Ergebnisse, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

Die Module aus dem erweiterten Prozessmodell zur Identifikation innerhäuslicher und mobilitätsfördernder Wohnraumverbesserungsmaßnahmen fassen Funktionalitätskomponenten zusammen,

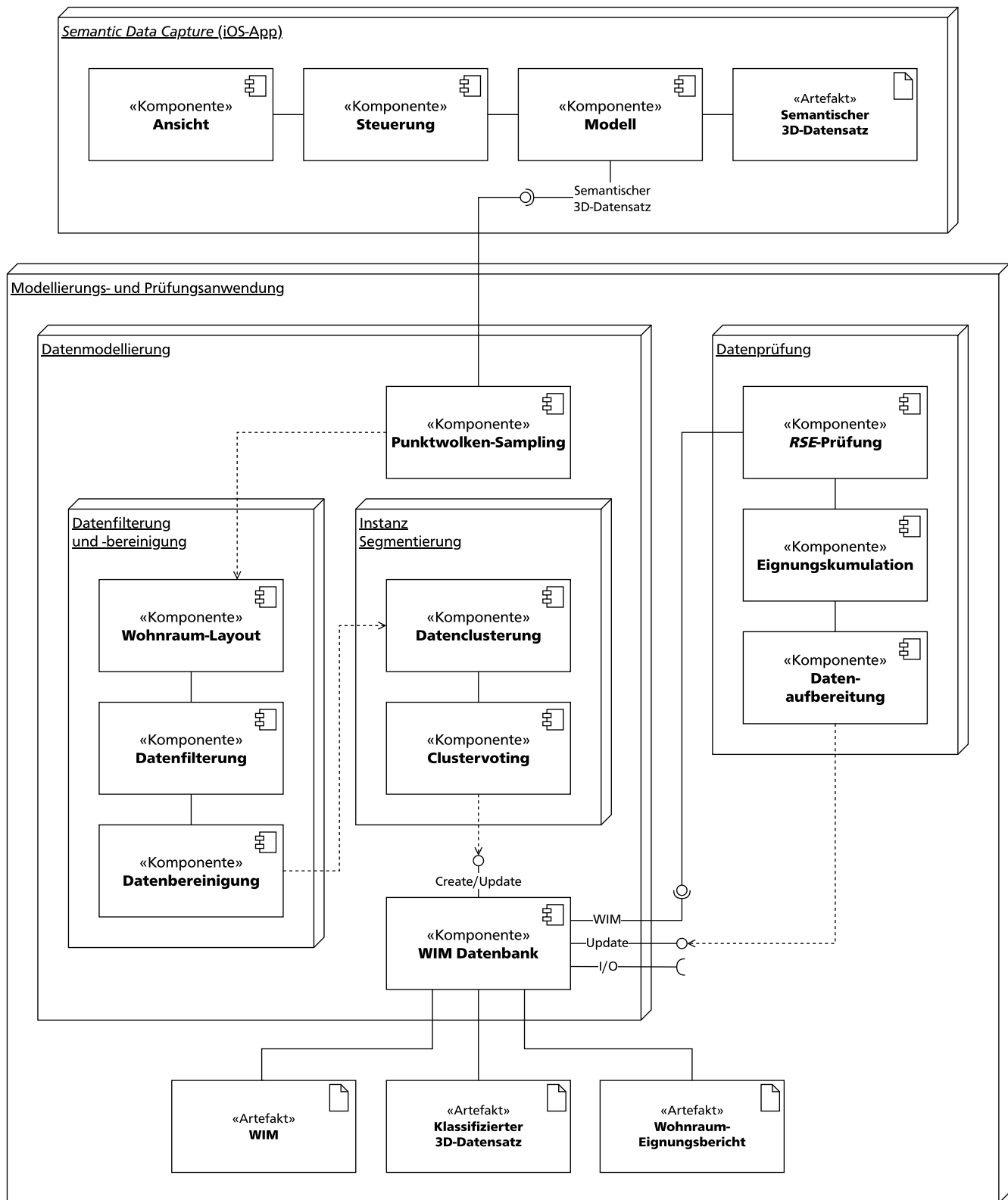


Abbildung 5.2: Architektur von *Progressive Home Care* als Komponentendiagramm, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

welche im Rahmen des in Abbildung 5.2 dargestellten Architekturentwurfs offengelegt werden. Danach folgt die Implementierung der Demonstratoranwendung einem modularen Aufbau und berücksichtigt weitere, in Tabelle 3.2 gelistete Systemanforderungen, deren Validierung in Kapitel sechs folgt. Das WIM fungiert innerhalb von *PHC* als generische Kernkomponente, welche in Folge der illustrierten, modularen Verarbeitungskette prozesszyklisch angereichert wird. Als alphanumerisches sowie grafisches Datenmodell enthält entsprechendes die instanzsegmentierten Struktur- und Ausstattungselemente, respektive *räumlich-semantischen Elemente (RSE)*, des erfassten Wohnraumes einschließlich ihrer Eignung im Kontext der geometrischen Mindestanforderungen nach DIN 18040-2:2011-09 und stellt solche im assoziativen Sinn als Räumlichkeitskomposition sowie Wohnraumaggregation zusammen (vgl. Abbildung 5.3).

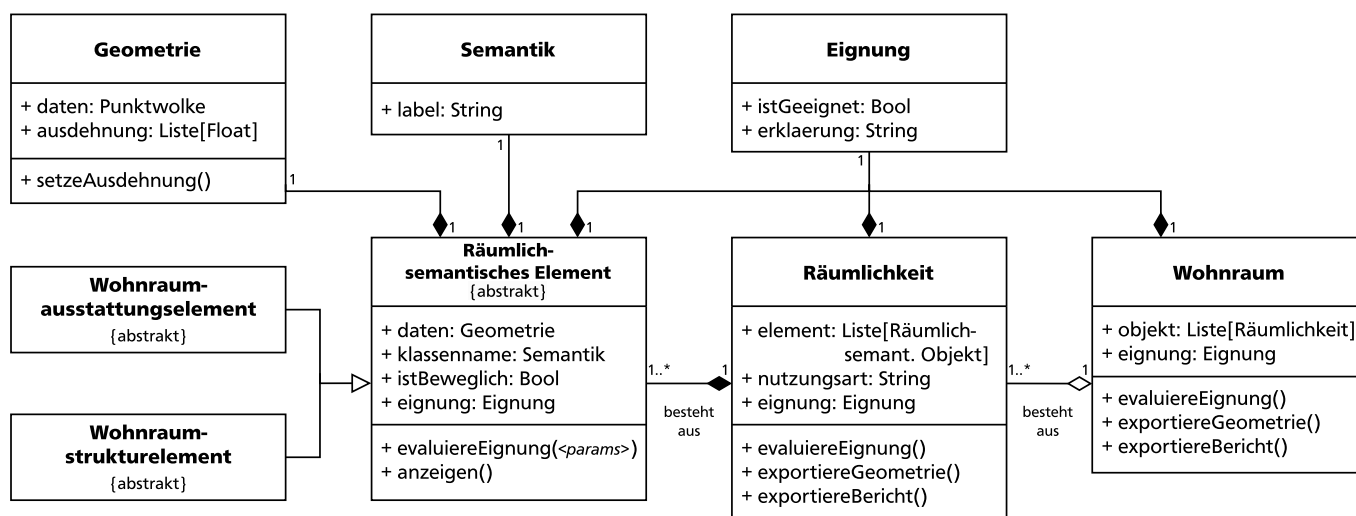


Abbildung 5.3: Qualifiziertes Klassendiagramm ausgewählter Klassen aus dem Wohnrauminformationsmodell, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

Das zentrale Objekt innerhalb des WIMs stellt das *RSE* dar (vgl. Abschnitt 3.5). Dieses speichert sowohl geometrische als auch semantische Informationen. Zu den geometrischen Eigenschaften zählen dabei sowohl die Punktwolke und dadurch implizit die relative Position innerhalb des Wohnraumes, als auch die Ausdehnung, während der Klassenname die Semantik repräsentiert. Das *RSE* dient darüber hinaus als atomare Basis zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen und damit für die Bewertung gemäß der Altersgerechtigkeit. In Komposition definieren *RSE* eine *Räumlichkeit* bzw. mehrere *Räumlichkeiten* einen *Wohnraum*. In Abbildung 5.3 sind relevante Attribute und ein Teil der Methoden des Fachklassen-Dreiklangs zusammengetragen. An dieser Stelle verzichtet die Arbeit auf detaillierte Ausführungen zu jedem dieser Elemente, einschließlich ihrer Bedeutung im Prozesszyklus. Gleichzeitig ist die Methode *evaluierEignung*, mit variabler Parameterliste (*<params>*), von wesentlicher Bedeutung, da diese in der Implementierung für das *RSE* die klassenbezogenen geometrischen Anforderungen aus Tabelle 3.1 inkorporiert und damit auf die fundamentale Wohnraumelementebene transferiert. In Zusammenhang mit der geometrischen Ausdehnung werden die relevanten Mindestanforderungen abgefragt und münden schließlich in dem binären Klassifizierungsergebnis *istGeeignet* einerseits und der erklärenden Textzeichenfolge andererseits, welche gemäß dem *Single-Responsibility Principle (SRP)* nach Martin 2017 als Fachklasse *Eignung* ausgelagert sind

---

und somit innerhäusliche Mobilitätseinschränkungen alphanumerisch sowie grafisch repräsentieren. Falls räumliche Abhängigkeiten über ein einzelnes *RSE* zu prüfen sind, werden sämtliche Elemente des dreidimensional repräsentierten Wohnraumes miteinbezogen. Zwecks Übersichtlichkeit enthält die Abbildung keine spezifischen Parameterangaben. Während die Implementierung der Prüfmethode für das *RSE* einer räumlich-orientierten Logik folgt, gestaltet sich selbige innerhalb der Klassen *Räumlichkeit* bzw. *Wohnraum* bedeutend leichter, da diese lediglich sämtliche Klassifizierungszustände der enthaltenen, hierarchisch untergeordneten Klassen abfragt und in logischer Operatormanier rekursiv kumuliert. Nach der regelbasierten Prüfung im Sinne des *Bottom-up-Prinzips* verfügt jedes WIM-Objekt über eine Eignungsklassifizierung und einer danach abgeleiteten kausalen Erklärungsinformation, welche zwecks Transparenz und Verständlichkeit final in den Wohnraum-Eignungsbericht eingesetzt wird. Ausführungen zur Implementierung der gruppierten Komponenten, die zu dem geschilderten Ergebnispaar hinführen, folgen. Abschnitt 5.2 geht dabei auf die iOS-App *Semantic Data Capture* und Abschnitt 5.3 auf die *Modellierungs- und Prüfanwendung* ein. Letztere verfügt im Vergleich zu *Semantic Data Capture* über keine grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical User Interface (GUI)), weshalb solche nicht nach dem klassischen, dreiteiligen Softwaredesign-Muster (Modell-Ansicht-Steuerung, engl. *Model-View-Controller (MVC)*), sondern, getreu der Absicht als betriebssystemagnostische Logik zu fungieren, als Kommandozeilen-Applikation (engl. Command-line Interface (CLI)) entwickelt worden ist (vgl. Abbildung 5.2). Da sämtliche Anforderungsdefinitionen zur prototypischen Entwicklung der holistischen Anwendung im vorangegangenen Kapitel drei bereits ausführlich erläutert sind und damit auch für die beiden Anwendungskomponenten Bestand haben, verzichten die jeweils anschließenden Abschnitte auf eine wiederholende Detailaufzählung. Die nachfolgend erläuterte, prototypische Implementierung von *PHC* als zweikomponentige Anwendung reduziert sich auf den räumlichkeitsbezogenen Realisierungsnachweis, mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen automatisiert zu identifizieren. Abschnitt 5.6 führt konzeptionell aus, in welcher Form die Komponenten zur Erfassung und Bewertung eines ganzen Wohnraumes beitragen.

## 5.2 Strukturierte 3D-Geometrieerfassung mit *Semantic Data Capture*

Die iOS-App *Semantic Data Capture* implementiert das initiale Modul von *PHC* mit dem Ziel, einen Wohnraum situativ zu erfassen (vgl. Forschungsaspekt 2) und die erforderlichen räumlich-semantischen Informationen zur Anreicherung des WIMs bereitzustellen (vgl. Abbildung 5.1). In Form einer interaktiven App tritt sie als unmittelbarer Gebrauchsgegenstand für die potenziellen Nutzer in Erscheinung, weshalb ihre Entwicklung für die Erfüllung der gesellschaftlich sowie gesundheitspolitisch relevanten Herausforderung für das Konzept *Ageing in Place* von Bedeutung ist. Gemäß den Anforderungen des identifizierten Nutzer-Trios (vgl. Abschnitt 3.2.1) folgt die Gestaltung der GUI einem minimalistischen und vom Industriestandard geleiteten Prinzip, das Ordnung vermittelt und dadurch auch für technisch nicht versierte Anwender eine intuitive Bedienung ermöglicht (Nutzungsszenario 1). In technischer Sicht ist *Semantic Data Capture* als native iOS-App, die mit sämtlichen mobilen Endgeräten mit LiDAR-Scanner von Apple Inc. kompatibel ist, in Swift<sup>28</sup> entwickelt.

---

<sup>28</sup>Swift ist die multiparadigmatische Programmiersprache von Apple Inc. für diverse iOS-Plattformen.

Sie implementiert die im Rahmen der technischen Evaluation möglichen semantischen Klassen zur Prüfung eines Wohnraumes auf Altersgerechtigkeit nach DIN 18040-2:2011-09 (vgl. Tabelle 4.4) und realisiert die simultane Datenstrukturierung autark auf dem Endgerät, auf welchem auch ausschließlich die Datenhaltung stattfindet. Die modular aufgebaute App (vgl. Abbildung 5.2) stellt darüber hinaus entsprechende Interaktionsfunktionalitäten bereit, um den strukturierten 3D-Datensatz zu generieren und zu exportieren. In den Unterabschnitten 5.2.1 sowie 5.2.2 werden weitere Details zum Designentwurf und der technischen Implementierung der strukturierten Datenerfassung geliefert. *Semantic Data Capture* generiert einen 3D-Datensatz, welcher über standardisierte Datenformate an die *Modellierungs- und Prüfanwendung* weitergegeben wird. Während der Datenerfassung ist die Messentfernung zu den Szeneobjekten anwenderseitig zu beachten, welche maximal 2,5 m betragen darf, um die erforderliche Genauigkeit sicherzustellen (vgl. Tabelle 4.3). In der aktuellen Version von *Semantic Data Capture* ist eine Funktionalität zur entfernungsabhängigen Auswertung der registrierten Laserimpulse nach dem Prinzip der direkten Laufzeitmessung (dToF) noch nicht implementiert. Den Nachweis zur realisierbaren technischen Funktionalitätsimplementierung liefert die *3d Scanner App<sup>TM</sup>* von Laan Consulting Corp. Folglich ergibt sich ein prinzipielles Vorgehen bei der 3D-Erfassung eines Wohnraumes, welches Abbildung 5.4 anschaulich und maßstäblich illustriert. Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Smartphone-gestützte 3D-Geometrieerfassung dynamisch und in einem permanenten Bewegungszustand in der zu erfassenden Szene erfolgt und erst abgeschlossen ist, wenn die entsprechenden innerhäulichen Elemente von allen Seiten lückenfrei diskretisiert sind. Die implementierte Anzeige des Erfassungsfortschritts (vgl. Abbildung 3.4) unterstützt den Anwender dabei visuell und erlaubt so ein intuitives Bewegungsmuster auch bei einer hohen Geometriekomplexität.

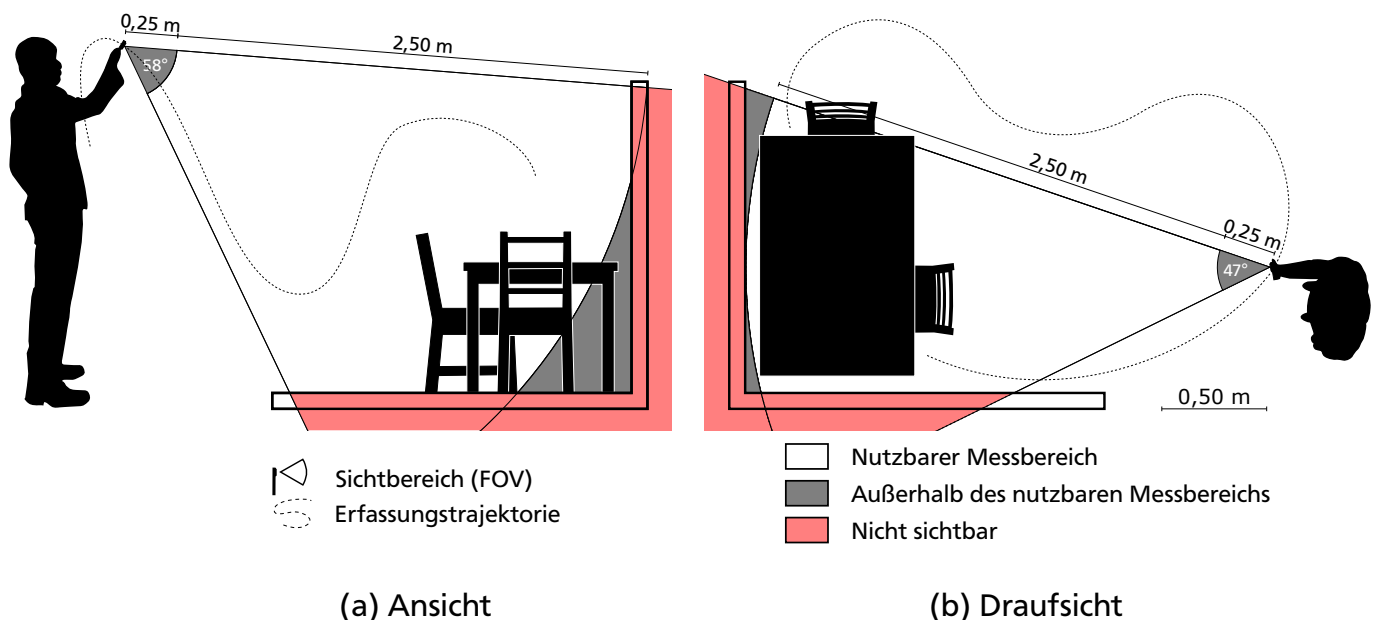


Abbildung 5.4: Prinzip zur innerhäulichen 3D-Datenerfassung mit einem LiDAR-fähigen Smartphone im dynamischen Prozess, exemplarisch illustriert anhand einer möglichen Erfassungstrajektorie sowie einzelner statischer Beobachtungsstandpunkte in (a) Ansicht und (b) Draufsicht

## 5.2.1 Benutzeroberfläche und Verwendungsmodi

Im Rahmen dieser Arbeit ist die App *Semantic Data Capture* sowohl für iPhones als auch iPads umgesetzt worden, wobei im weiteren Verlauf lediglich auf die Implementierung für Smartphone-basierte Plattformen referenziert wird. Die GUI sowie die Navigationsmöglichkeiten von *Semantic Data Capture* sind am Beispiel des Apple iPhone 12 Pro in Abbildung 5.5 aufgezeigt. Dabei orientiert sich die Gestaltung der Benutzeroberfläche und Navigationsmethodik an den Richtlinien des *Material Design* (Apple Inc. o. J.(g)), um durch das charakteristische *Look-and-Feel* an das Apple-Ökosystem anzuschließen und dadurch eine benutzerfreundliche und gebrauchstaugliche Bedienbarkeit (vgl. QA-Nr. 4 in Tabelle 3.2) zu erzielen. Die Navigation innerhalb der App erfolgt über Navigationsleisten, die im oberen oder unteren Bereich des Bildschirms angeordnet sind. Dabei dient die obere Leiste primär der rückwärtigen Navigation und die untere Leiste aufgrund der Nähe zur steuernden Hand der Aktivierung von prozessbezogenen Funktionalitäten. Die Anzahl interaktiver Schaltflächen ist auf das Wesentliche reduziert und inkorporiert damit weite Teile der notwendigen Funktionalitäten, um den Automatisierungsgrad zu maximieren (vgl. Abbildung 5.6 und 5.7). *Semantic Data Capture*

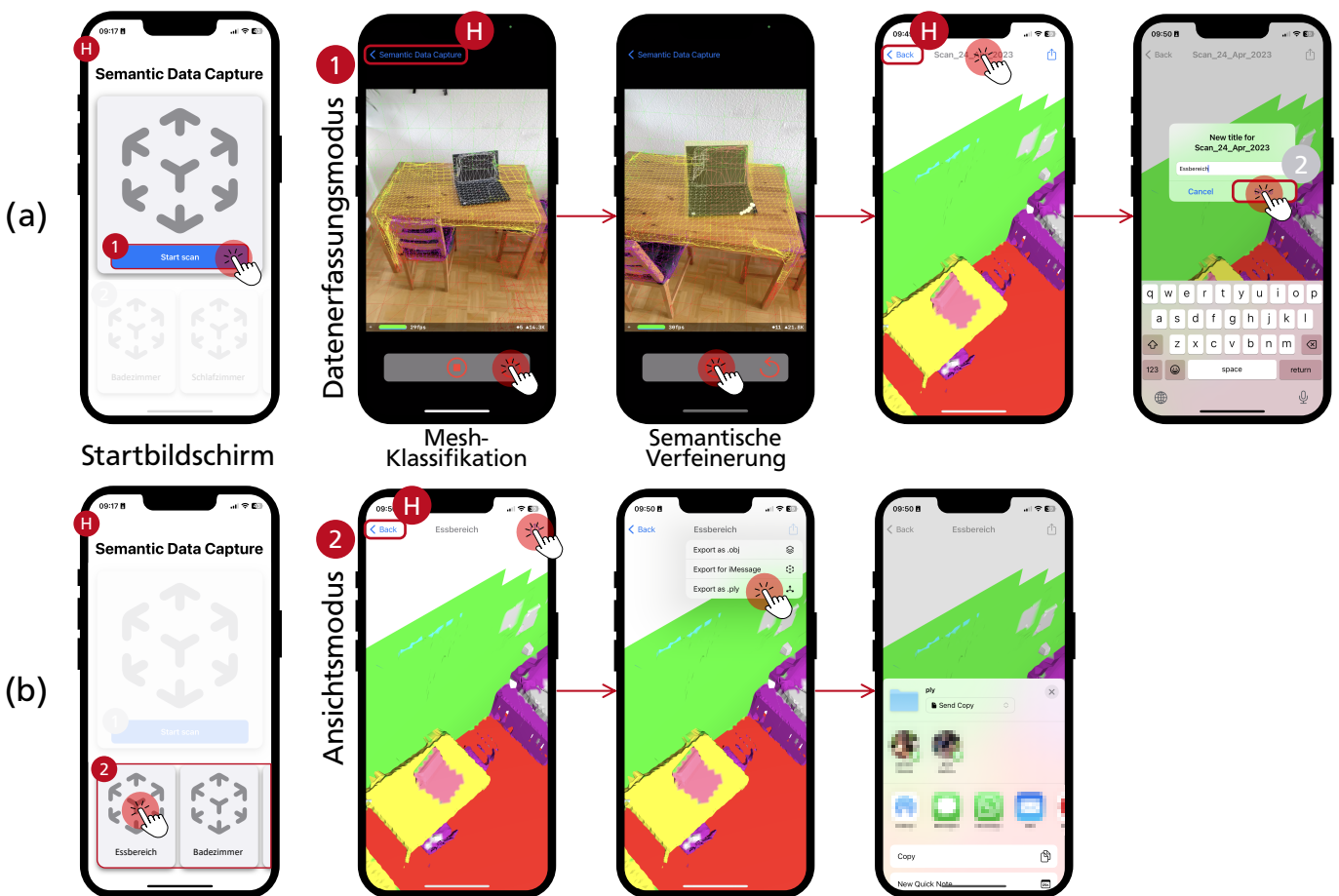




Abbildung 5.5: Benutzeroberfläche und Navigationsmöglichkeiten von *Semantic Data Capture* am Beispiel des *Apple iPhone 12 Pro*, separiert in den (a) Datenerfassungsmodus (1) und (b) Ansichtsmodus (2)

---

offert zwei Verwendungsmodi, die über den Startbildschirm (H) aufgerufen werden können: den **Datenerfassungsmodus** (1) und den **Ansichtsmodus** (2). Während der Modus zur strukturierten Datenerfassung nach Aufnahmeende unmittelbar in den Ansichtsmodus führt, kann letzterer auch autark gestartet werden, indem das jeweilige Projekt aus der Projektgalerie ausgewählt wird. Beide Verwendungsmodi werden in Zusammenhang mit Abbildung 5.5 hierauf beschrieben.

## Datenerfassungsmodus

Der Datenerfassungsmodus (1) ist das zentrale Element der *Semantic Data Capture*-App, innerhalb dessen der Anwender die Möglichkeit hat, die Geometrie des Wohnraums strukturiert zu erfassen. Über die Schaltfläche **Start scan** startet dieser Modus, welcher in einer neuen Ansicht ausgeführt wird und dort die mit den RGB-Bildern der Weitwinkelkamera überlagerte, vermaschte und klassifizierte Szene aus dem Sichtfeld (FOV) des Endgeräts anzeigt. Die Klassifikation des Meshs bzw. der Mesh-Anker, welche jeweils Teile der polygonalen Strukturen binden (vgl. Abschnitt 4.1.4, Absatz zu LiDAR-Scanner von Apple Inc.), erfolgt dabei in Echtzeit und unmittelbar über die von *ARKit* bereitgestellte *Mesh-Klassifikation* (vgl. Abschnitt 4.2.3) mit einer Bildrate von bis zu 30 fps (vgl. Abbildung 5.5). In der aktuellen Konfiguration des App-Prototyps wird neben weiteren Debugging-Informationen, auf die hier nicht weiter eingegangen wird, das Resultat des Klassifizierungsprozesses durch eine Kolorierung der Dreiecksseiten innerhalb eines Bereichs visualisiert, der sich von dem Bildschirmformat des Smartphones unterscheidet. Diese Einschränkung ist vor allem grafischer Natur, welche auf das Bildformat (Verhältnis 3:4) der verwendeten RGB-Weitwinkel-Kamerabilder zurückzuführen und demnach von keinen funktionalen Einschränkungen begleitet ist. Eine Skalierung des Ansichtsbereichs ist möglich, mit entsprechendem Verlust an darzustellenden Informationen auf dem Smartphone-Bildschirm verbunden und daher nicht implementiert. Im Rahmen dieses Schrittes wird die Räumlichkeit zunächst vollständig geometrisch erfasst und mittels der über *ARKit* bereitgestellten *Mesh-Klassifikation* teilklassifiziert. Daran schließt der Prozess zur semantischen Verfeinerung durch die bildbasierte Echtzeit-Objekterkennung (vgl. Abschnitt 4.2.3) an. Dieser kann nach Abschluss der teilklassifizierten Geometrieerfassung durch die Schaltfläche  gestartet werden, lokalisiert und markiert entsprechende semantische Klassen über Bounding Boxen in den Bildern der Weitwinkelkamera und projiziert deren Zentroid-Koordinaten entlang der sich aus der Orientierung der Erfasserpose ergebende Normalenrichtung zurück auf die unklassifizierte Dreiecksflächen des Meshs, welche innerhalb dieses Prozesses statisch sind. Die damit in Verbindung stehenden Sichtstrahlen (engl. Raycasts) werden als weiße Schnittpunkte auf dem Mesh dargestellt. Die semantische Verfeinerung ist als optionale Funktionalität von *Semantic Data Capture* implementiert. Die nachträgliche semantische Verfeinerung der Klasse *Laptop*, welche *YOLOv3* über die in Tabelle 4.4 bereits dargestellten Klassen ebenfalls anbietet, ist in den Abbildungen 5.5 sowie 5.6 nur zu demonstrativen Zwecken visualisiert. Die Klasse *Laptop* besitzt keine Relevanz für die Bewertung eines Wohnraumes. Ergänzend dazu ist anzumerken, dass in *Semantic Data Capture* die Räumlichkeit von Interesse an einem Stück und nicht in Teilen erfasst werden muss, da empirische Untersuchungen zur Erweiterung eines Scans mit einem hohen Fehlerpotenzial verbunden waren. Der Datenerfassungsmodus, welcher wie hier geschildert die Visualisierung des Erfassungsfortschritts und der semantischen Auflösung realisiert, wird über die Schaltfläche  beendet, legt danach die Daten in ein lokales Projektverzeichnis ab und führt anschließend in den Ansichtsmodus.



---

## Ansichtsmodus

Der Ansichtsmodus (2) schließt an die Datenerfassung an oder kann über den Startbildschirm autark gestartet werden, indem ein gespeicherter Datensatz aus der Galerie ausgewählt wird. Hierbei werden die lokal persistierten Daten aus dem Projektverzeichnis des verwendeten Endgeräts eingelesen und dargestellt. Wie in Abbildung 5.5 zu erkennen, erfolgt dabei die Kolorierung der semantischen Informationen über die Dreiecksflächen des Meshs. Der Ansichtsmodus unterstützt *Multi-Touch-Gesten*, wonach Rotation, Skalierung und Translation der 3D-Daten handgesteuert ausführbar sind. Neben der visuellen Anzeige des Erfassungsfortschritts im Rahmen des Datenerfassungsmodus kann innerhalb des Ansichtsmodus unmittelbar nach der Datengenerierung das Resultat situativ vor Ort betrachtet und auf relevante Lücken hin untersucht werden. Eine nachträgliche Ergänzung einer bereits beendeten 3D-Datenerfassung ist aufgrund der nicht persistierten Mesh-Anker, welche Teile der polygonalen Strukturen mit einem physischen Objektmerkmal aus der Realität verbinden, ausgeschlossen. Innerhalb des Ansichtsmodus kann der Name der erfassten Szene vergeben werden, welcher als Attribut *Nutzungsart* im Rahmen der WIM-Klasse *Räumlichkeit* fungiert (vgl. Abbildung 5.3). Standardmäßig wird dafür das Datum des Erfassungstages vergeben, um eine Datenüberschreibung zu vermeiden. Eine weitere, relevante Funktionalität innerhalb dieses Modi ist der Datenexport (📤), über welchen das semantisch strukturierte Mesh komponentenübergreifend ausgetauscht werden kann. Derzeit implementiert *Semantic Data Capture* drei Austauschformate (vgl. Abbildung 5.5). Von Bedeutung für *PHC* sind dabei insbesondere die zwei für 3D-Datensätze gängigen und standardisierten Austauschformate *Wavefront OBJ (.obj)*<sup>29</sup> sowie *Polygon File Format (.ply)*<sup>30</sup>. Die Export-Funktionalität stellt durch die Integration des Standard-Steuerungsdienstes des Apple Betriebssystems sämtliche Schnittstellen zu korrespondierenden Apps zur Verfügung, über welche der Datenaustausch zur *Modellierungs- und Prüfanwendung* letztlich erfolgt.

### 5.2.2 Implementierungsdetails

Über die bildlich übertragenen Ausführungen zu den Funktionalitäten der App *Semantic Data Capture* hinaus soll dieser Abschnitt einen Blick auf technische Implementierungsdetails werfen. Dafür wird das Verhalten der beiden Verwendungsmodi in Form elementarer Aktionen sowie deren Verbindungen untereinander anhand eines Aktivitätsdiagramms grafisch nach OMG UML modelliert.

#### Datenerfassungsmodus

Die geometrische Erfassung und semantische Anreicherung in Verbindung mit einem LiDAR-fähigen Endgerät von Apple Inc. erfolgt durch das Framework *ARKit* (Apple Inc. o. J.(a)). Innerhalb einer *ARSession* (vgl. Abbildung 5.6) werden die geometrischen Informationen des im Sichtfeld liegenden Szenenausschnitts durch eine Integration aus RGB-Bild der Weitwinkelkamera, Tiefen- und

---

<sup>29</sup>Das OBJ-Format definiert ein offenes Dateiformat zur Speicherung dreidimensionaler Geometrien einschließlich Texturierungen, wodurch es für plattformübergreifende Datentransfers von 3D-Datensätzen geeignet ist. Für eine Datenspezifikation wird auf Boulos (o. J.) verwiesen.

<sup>30</sup>Das PLY-Format stellt ein leicht zu implementierendes und allgemein nutzbares Dateiformat zur Speicherung grafischer Objekte dar, die als Sammlung von Polygonen beschrieben werden. Eine Spezifikation des auch unter *Stanford Triangle Format* bekannten Datenformats liefert Bourke (o. J.).

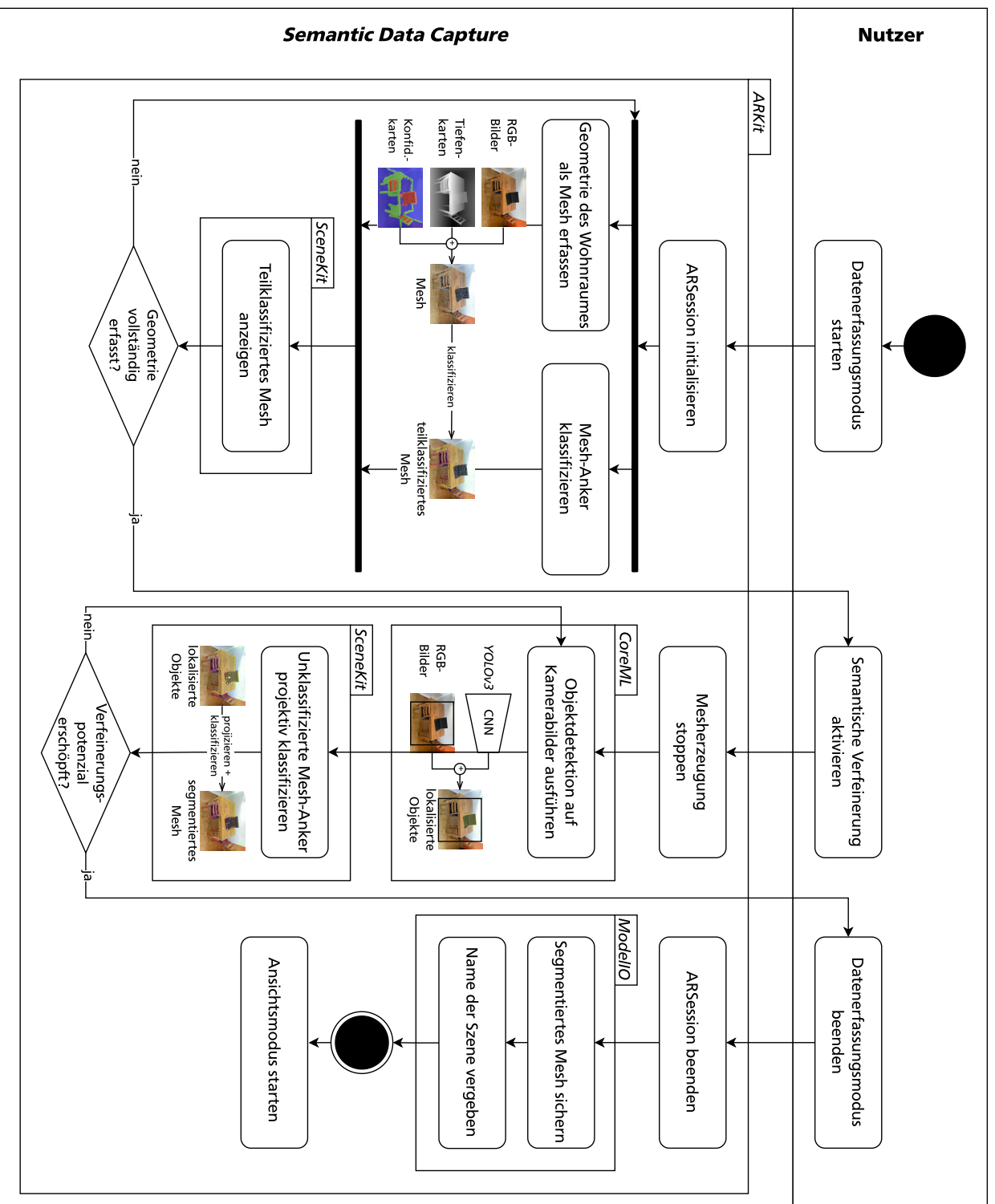


Abbildung 5.6: Illustriertes Aktivitätsdiagramm zum Datenerfassungsmodus von *Semantic Data Capture*, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

---

sogenannter Konfidenzkarte berechnet. Die Konfidenzkarte beschreibt dabei die Vertrauenswürdigkeit des reflektierten und mittels zeitkorrelierter Einzelphotonenzählung (TCSPC) ausgewerteten Laser-Impulses, welche in drei Stufen, von gering, über mittel bis hoch, angegeben wird. Um das mobile Endgerät in der Szene zu orientieren und diese dadurch stetig geometrisch zu approximieren, verwendet *ARKit* neben den bildgebenden und für die visuelle Inertialodometrie (engl. Visual Inertial Odometry (VIO)) notwendigen Kamerasensoren auch das dreiachsige Gyroskop und den Beschleunigungssensor (Klauer und Plaß 2021, S. 161 ff.). Als Ergebnis resultiert aus diesem Prozess ein Mesh sowie Mesh-Anker, welche die polygonalen Strukturen mit Objektmerkmalen der Realität verknüpfen. Solche liegen unklassifiziert oder RGB-texturiert zur weiteren Verwendung vor. In Verbindung mit der *Mesh-Klassifikation* werden den Mesh-Ankern und damit jeder Dreiecksfläche eine semantische Information aus dem achtklassigen Repertoire (vgl. Tabelle 4.4) zugewiesen. Dabei erfolgt die Klassifikation mit 30 fps (vgl. Abbildung 5.5), trotz der nach offizieller Angabe 60 fps unterstützende Erzeugung der Tiefenkarten durch die in *ARKit* integrierte *DepthAPI* (Apple Inc. 2020a). Die Darstellung des Meshs erfolgt anschließend durch *SceneKit*. Sobald die Geometrie der Szene vollständig erfasst ist, kann der Anwender die zweite Phase zur semantischen Verfeinerung aktivieren. Dieser bildbasierte Ansatz lokalisiert Objekte durch das anhand von *MLCore* inkludierte Convolutional Neural Network (CNN) *YOLOv3* nach Redmon und Farhadi (2018). Der *One-Stage* Detektor *YOLOv3* erwartet quadratische Bilder, wodurch die RGB-Bilder aus der Kameraübertragung (engl. Feed) zunächst durch Apples *Vision-Framework* vorbereitet werden müssen. Aus der Objektdetektion resultieren probabilistisch klassifizierte Bounding Boxen, deren Schwerpunkt über das in *ARKit* inkorporierte *Raycasting* auf das immutable, teilklassifizierte Mesh projiziert wird und die unspezifizierten Dreiecksflächen der Klasse *Sonstiges* anhand der höchsten Prädiktionswahrscheinlichkeit semantisch ergänzt. Der geschilderte Prozess wird durchgängig auf dem Bildschirm des Endgeräts visualisiert. Dank der Überlagerung von Kamera-Feed und Mesh wird zugleich ein Augmented Reality (AR)-Erlebnis vermittelt. Letzteres ist vor allem für die Visualisierung des Erfassungsfortschritts von Bedeutung. Ein parallelisierter Klassifizierungsvorgang mittels *Mesh-Klassifikation* und *YOLOv3* ist prototypisch nicht umsetzbar, da die Datenstrukturen von *SceneKit* an die sich kontinuierlich (re-)generierenden Mesh-Anker von *ARKit* gebunden sind. Sobald die relevanten Klassen im Rahmen der semantischen Verfeinerung in das Mesh übertragen sind, beendet der Anwender die *ARSession*. Dabei werden die erzeugten Daten eindeutig benannt, automatisiert auf dem lokalen Speicher des mobilen Endgeräts abgelegt und anschließend direkt im Ansichtsmodus dargestellt.

## Ansichtsmodus

Der Ansichtsmodus ermöglicht die Darstellung des erfassten und segmentierten Meshs nach abgeschlossenem Erfassungsprozess. Im Vergleich zum Datenerfassungsmodus werden dabei die 3D-Daten nicht im Sinne des AR mit Bildern aus dem Kamera-Feed erweitert (vgl. Abbildung 5.5). Mittels *ModelIO* werden die gespeicherten 3D-Daten eingeladen und durch *SceneKit* angezeigt. Entsprechend der Nutzeraktion kann im Rahmen dieses Modus entweder der erfasste 3D-Datensatz via Gestensteuerung betrachtet, der Name der Szene vergeben, Daten exportiert oder zum Startbildschirm zurückgekehrt werden. Der Datenexport in Verbindung mit der Auswahl des entsprechenden Austauschformats (*.obj* oder *.ply*) und korrespondierenden Austauschdienstes wird dabei ebenfalls über Apples *ModelIO* Framework realisiert. Das Verhalten des Ansichtsmodus zeigt Abbildung 5.7.

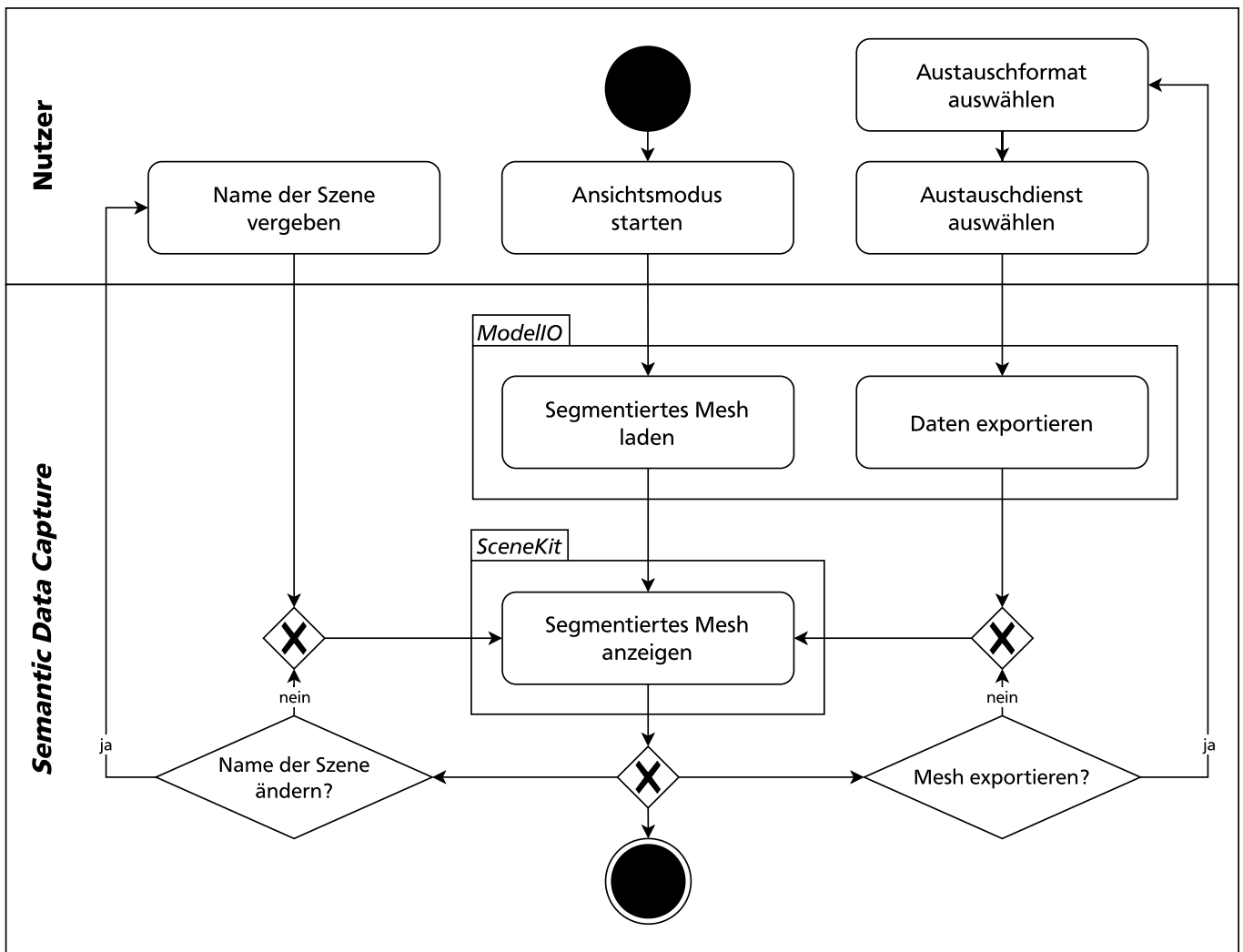


Abbildung 5.7: Aktivitätsdiagramm zum Ansichtsmodus von *Semantic Data Capture*, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

Die prototypische Implementierung von *Semantic Data Capture* realisiert den in Abbildung 3.4 konzeptionell entworfenen Erfassungsprozess und adressiert damit den Forschungsaspekt 2 dieser Arbeit. Aus diesem Abschnitt geht detailliert hervor, wie die vorgestellte iOS-App die Anforderungen nach einer strukturierten 3D-Geometrieerfassung einzelner Wohnräumlichkeiten unter Beachtung von wesentlichen Automatisierungsgrundsätzen und der visuellen Unterstützung während der Datenerfassung für technisch unausgebildete Nutzer umsetzt (Nutzungsszenario 1). *Semantic Data Capture* realisiert mit Ausnahme der Klasse *Dusche* (vgl. dazu die Ausführungen im Abschnitt 4.2.3) die erforderliche semantische Auflösung durch einen zweiphasigen Ansatz. Die LiDAR-basierte Lösung zur AR-unterstützten semantischen 3D-Geometrieerfassung über die Apple iPhone Pro erweist sich als innovativer Ansatz, da Verbrauchergeräte und -anwendungen über die Datenerfassung hinaus bisher nicht in der Lage gewesen sind, die Datenstrukturierung simultan vorzunehmen. Dieser Status Quo hat sich mit der Vorstellung von Apples neuem *RoomPlan* Framework (Apple Inc. 2022, Apple Inc.

---

o. J.(f)), welches von *ARKit* und dem LiDAR-Scanner getrieben ist, geändert. Inzwischen verfügen diverse iOS-Apps über eine verschiedenmodale Form von Echtzeit-Datenstrukturierung, vorrangig parametrischer Natur durch *RoomPlan*, wobei die semantische Segmentierung als Mesh-Repräsentation bislang *Semantic Data Capture* vorbehalten ist. Wie bereits erläutert, bedingt oder inkorporiert diese keine Funktionalitäten von *RoomPlan*, u. a. aufgrund der erst jungen Vergangenheit des Frameworks. In Klauer und Plaß (2021) sind Teilaspekte der in diesem Abschnitt vorgestellten Implementierung bereits veröffentlicht. Die an die Smartphone-gestützte Datenerfassung anschließende *Modellierungs- und Prüfanwendung* wird im nächsten Abschnitt gleichermaßen vorgestellt.

## 5.3 Modellierungs- und Prüfanwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen

Die Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen, die einem barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnraum entgegenstehen, erfolgt durch eine *Modellierungs- und Prüfanwendung*. Basierend auf dem semantisch strukturierten 3D-Datensatz aus *Semantic Data Capture* (vgl. Abschnitt 5.2), wird darin zunächst das erforderliche, räumlichkeitsbezogene WIM modelliert und darauf aufbauend die Eignungsbewertung durchgeführt. Die zweite Anwendungskomponente von *PHC* ist als Kommandozeilen-Applikation in Python 3.7 mit möglichst wenig verwendeten Bibliotheken entwickelt, um den Weg hinsichtlich einer zukünftigen Integration in die iOS-App *Semantic Data Capture* zu ebnen. Verwendung finden *Open3D* (Import, Export und Modalitätswechsel von 3D-Daten), *Numpy* (numerische Berechnung und effiziente Datenstrukturen), *Scikit-Learn* (Datenanalyse mit maschinellen Lernverfahren (ML)), *Dijkstra3D* (Pfadnavigation innerhalb eines Voxelgitters) und *Jakteristics* (Berechnung geometrischer Merkmale). Der ganzheitliche und zweistufige Prozess ist nach OMG UML modelliert in Abbildung 5.8 zusammengefasst. Ergänzend dazu liefert der anschließende Abschnitt dokumentative Details zur pythonischen Implementierung.

### 5.3.1 Prozess und Implementierungsdetails

Die hier vorgestellte *PHC*-Anwendungskomponente gliedert sich gemäß Abbildung 5.2 sowie 5.8 in zwei Hauptmodule: die **Datenmodellierung**, innerhalb welcher die *RSE* identifiziert und in das WIM transferiert werden, und die **Datenprüfung**, welche von dem WIM ausgehend die regelbasierte Prüfung durchführt bzw. kumuliert und die Klassifizierungsergebnisse für die Ausgabe aufbereitet. Beide Module schließen jeweils verschiedene Komponenten ein, deren Zweckdienlichkeit für die genannte Zielsetzung anschließend beschrieben und an geeigneter Stelle illustriert wird. Ferner ist eine vielschichtige Ausnahmebehandlung (engl. Exception Handling) implementiert, um die Wartbarkeit (vgl. QA-Nr. 7 in Tabelle 3.2) dieser Anwendungskomponente zu gewährleisten.

#### Datenmodellierung

Im Rahmen der Datenmodellierung wird zunächst das segmentierte Mesh über die definierte Schnittstelle zu *Semantic Data Capture* importiert und in die Repräsentationsmodalität der Punktwolke

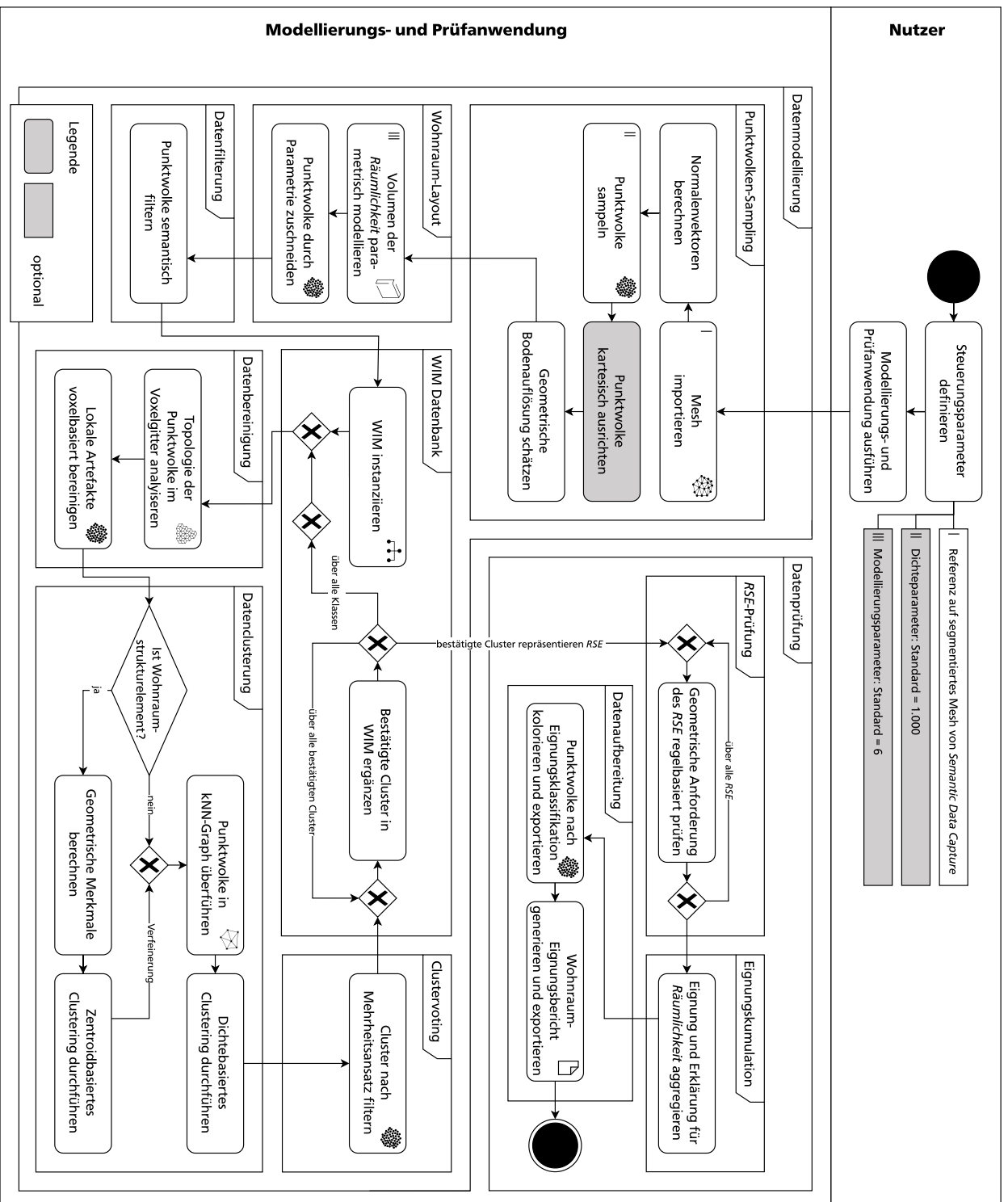


Abbildung 5.8: Ikonisiertes Aktivitätsdiagramm zur Modellierungs- und Prüfanwendung, modelliert nach ISO/IEC 19505-2:2012 OMG UML

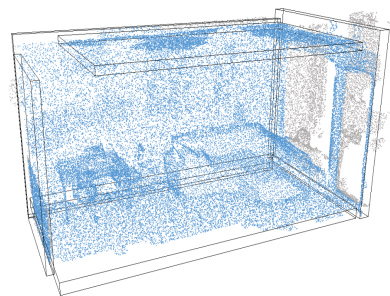
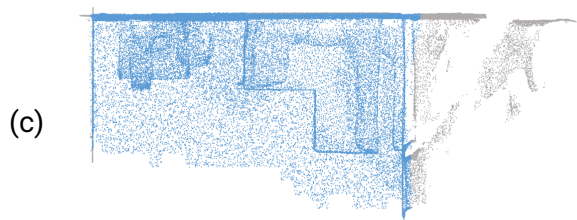
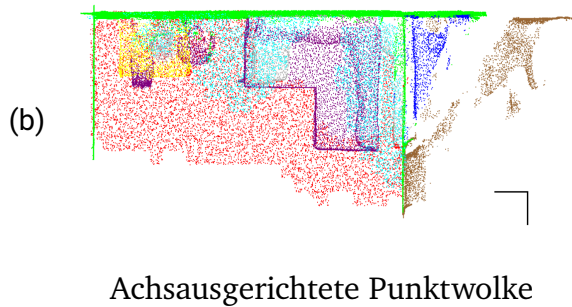
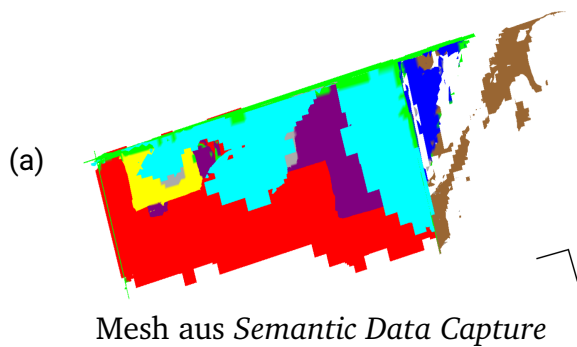
---

überführt. Daran schließt ein Prozess an, welcher die erfassten 3D-Daten geometrisch zuschneidet, semantisch filtert und bereinigt, um neben globalen Artefakten, bedingt durch z. B. gläserne und spiegelnde Flächen, auch lokale Artefakte in Folge von Ungenauigkeiten durch die preiswerte Verbrauchertechnik des dToF Flash-LiDARs zu entfernen. Die Instanz Segmentierung adressiert die Identifikation von *RSE* in der bereinigten Punktwolke und ermöglicht so die Anreicherung des WIMs, welche wiederum als Schnittstelle für die Datenprüfung betrachtet werden kann. Vor der Ausführung von Implementierungsdetails werden die bereits angesprochenen Steuerungsparameter benannt.

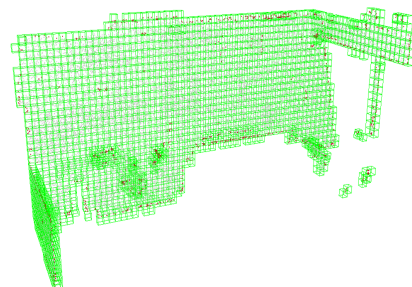
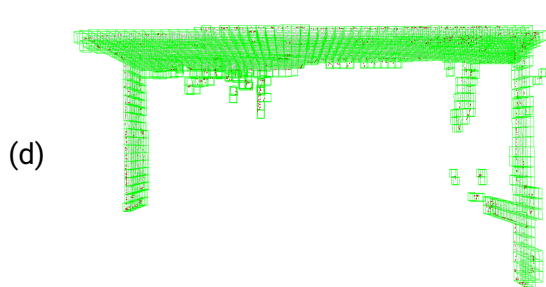
*Steuerungsparameter*: Die Kommandozeilenanwendung benötigt zur adäquaten Erfüllung des geschilderten Prozesses drei Steuerungsparameter (vgl. Abbildung 5.8). Als obligatorisch ist der Verweis auf das semantisch segmentierte Mesh von *Semantic Data Capture* aufzuführen, welches hierbei in Form einer *OBJ Wavefront* Datei einschließlich semantischer Texturierung verwendet wird. Darüber hinaus sind zwei optionale Parameter dem Programmaufruf mitzugeben: ein *Dichteparameter*, welcher für die Modalitätsüberführung von Mesh in Punktwolke Anwendung findet, und ein *Modellierungsparameter* für das RANSAC-gestützte **Wohnraum-Layout**. Letzterer definiert die Anzahl an substanziellen Wohnraumstrukturelementen (vgl. Tabelle 3.4) zwecks geometrischen Zuschnitts. Sämtliche Prozessschritte innerhalb der *Modellierungs- und Prüfanwendung* erfolgen nach Programmaufruf vollautomatisiert.

**Punktwolken-Sampling**: Dem Import folgt die Berechnung der Normalenvektoren über die Dreiecksflächen des Meshs. Die Punktnormalen dienen in mehrfacher Hinsicht als relevante Informationsquelle, wie z. B. für die Berechnung geometrischer Merkmale für die **Datenclustering** oder die im nächsten Schritt notwendige Orientierung parametrisch modellierter *RSE*. Die Überführung von Mesh in Punktwolke wird als *Sampling* bezeichnet, stellt den namensgebenden Vorgang dieser Modulkomponente dar und erfordert die Angabe des *Dichteparameters*, mittels welchem die Auflösung der Punktwolke bezüglich des eingehenden Meshs definiert wird. Implementiert sind zwei unterschiedliche *Sampling*-Verteilungsansätze, das *Poisson Sampling* und das *uniform Sampling*. Letzteres folgt einer zufälligen Standardnormalverteilung, die im Rahmen unüberwachter Lernmethoden, welche im weiteren Verlauf zur Anwendung kommen und die Ähnlichkeit von Merkmalen bewerten, Grundvoraussetzung ist (vgl. Ambarwari et al. 2020). Die kartesische Ausrichtung der gesampelten Punktwolke anhand der geodätischen Globalachsen schließt mit optionalem Charakter daran an. Die Ausrichtung erfolgt durch eine Transformation mit drei rotatorischen Freiheitsgraden anhand der Normalenvektoren drei senkrecht zueinanderstehenden Ebenen. Zuletzt wird die räumliche Punktauflösung (engl. Ground Sample Distance (GSD)) als arithmetisches Mittel aus einer spezifisch definierten Menge an Bodenpunkten geschätzt. Diese steht in einem Abhängigkeitsverhältnis zu dem *Dichteparameter* und wird im weiteren Verlauf als skalierbarer Parameter für verschiedene Algorithmen aus dem ML zur Datenmodellierung verwendet. Aus dieser Komponente geht eine gleichmäßig gesampelte und kartesisch ausgerichtete Punktwolke hervor, die als Repräsentationsmodalität für alle weiteren Modulkomponenten dient (vgl. Abbildung 5.9a und 5.9b).

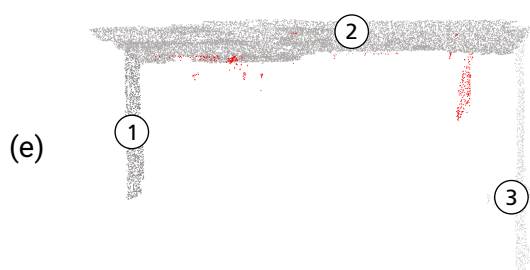
**Wohnraum-Layout**: Diese Modulkomponente widmet sich der Exklusion grober Datenartefakte, die bei reflektorlosen Entfernungsmessungen, zu welchen auch das beschriebene dToF-Verfahren zählt, auf spiegelnde oder transmissive Flächen entstehen, wie sie häufig Ausstattungselement belebter Wohnräume sind. Aufgrund von Mehrfach- oder Spiegelreflexionen werden signifikant längere Signallaufzeiten registriert, wodurch die resultierenden 3D-Punkte durch einen größeren



Aus dem Wohnraum-Layout resultierende und zugeschnittene Punktwolke in Falschfarbe (blau) in zwei Darstellungen, zum Vergleich die Ausgangspunktwolke (grau)



Ergebnis der Datenfilterung und -bereinigung am Beispiel der Klasse *Wand* im Voxelgitter (grün): rote Datenpunkte werden als Artefakte identifiziert und ausgeschlossen



Ergebnis der Datenclustering am Beispiel der Klasse *Wand*: bestätigt werden drei in verschiedenen Grautönen kolorierte Cluster, rote Datenpunkte werden ausgeschlossen

Abbildung 5.9: Visualisierung ausgewählter Zwischenergebnisse aus dem datenmodellierenden Hauptmodul der *Modellierungs- und Prüfanwendung* am Beispiel eines Ausschnitts aus einer Wohnzimmer-Szene



---

Abstand zur Datenerfassungssensorik ausgezeichnet werden (vgl. Wehmann et al. 2007, S. 179, Kern 2003, S. 49). Es existieren verschiedene Ansätze, diese Messfehler bei kinematischen Verfahren zu eliminieren. Beispielhaft sei an dieser Stelle die „*dynamische Objektentfernung*“ (Higgins 2020) der NavVis GmbH genannt, welche auf einem filterbasierten Ansatz fußt. Im Vergleich zu dieser berechnungsintensiven Methode wird innerhalb dieser Arbeit die Exklusion unter der Annahme rechtwinkliger Räumlichkeiten durch parametrisch modellierte Schnittkörper gelöst. Dieser setzt sich durch räumlichkeitsbegrenzende Wohnraumstrukturelemente (vgl. Tabelle 3.4) zusammen, welche dem Beispiel von Poux (2021) folgend durch RANSAC (vgl. Fischler et al. 1981) sowie DBSCAN (vgl. Ester et al. 1996) in der Punktwolke parametrisch modelliert werden. Die Parametrisierung dieser Algorithmen stützt sich einerseits auf den *Modellierungsparameter*, welcher die Anzahl der zu modellierender Ebenen innerhalb dieser Klassen quantifiziert, sowie andererseits die räumliche Punktauflösung als Suchparameter hinsichtlich des Ähnlichkeitsmerkmals (engl. Similarity). Da eine Räumlichkeit in der Regel durch vier vertikale und zwei horizontale Ebenen begrenzt ist, wird der *Modellierungsparameter* standardmäßig mit sechs ausgewiesen. Nach der Extraktion der Parametrie folgt eine räumliche Abfrage unter Beachtung der Flächennormalen, wodurch einerseits das einhüllende Layout der Räumlichkeit definiert wird und andererseits außenliegende Datenpunkte berechnungseffizient exkludiert werden. Abbildung 5.9c visualisiert das Ergebnis der Modulkomponente in Falschfarbendarstellung.

**Datenfilterung:** Vor dem Hintergrund des in Abschnitt 4.2.1 definierten Begriffs des Szenenverständnisses, zählt die zugeschnittene Punktwolke zu diesem Zeitpunkt als semantisch segmentierter Datensatz. Um die für das WIM erforderlichen instanziellen Ausstattungselemente, respektive *RSE*, zu extrahieren, folgt zunächst eine Datenfilterung, innerhalb welcher alle Datenpunkte einer semantischen Klasse separiert und für die Weiterverarbeitung isoliert werden. Aufgrund der als Textur vorliegenden Semantik erfolgt dieser Prozessschritt durch eine farbwertbasierte Abfrage. Mit dieser folgt zugleich die Einleitung eines mehrstufigen, inkrementellen Verarbeitungsprozesses (vgl. Abbildung 5.8).

**Datenbereinigung:** Im Vergleich zur Exklusion grober Datenartefakte durch räumliche Verschneidungskörper, werden lokal auftretende Artefakte mithilfe eines topologischen Verständnisses segregiert. Dafür adaptiert diese Arbeit einen graphenbasierten Konnektivitätsansatz (engl. Connectivity Graph) (Clementini et al. 1997, S. 194), welcher sich bei der semantischen Modellierung von Innenräumen bereits als nützlich erwiesen hat (vgl. Poux und Billen 2019, Poux; Neuville; Hallot et al. 2017). Voraussetzung dafür ist die Existenz eines Voxelgitters, innerhalb welchem das topologische Verhältnis anliegender Voxel numerisch extrahiert wird (vgl. Poux und Billen 2019, S. 10 f.). Dabei leitet sich die Tiefe des Voxelgitters bzw. die Größe der Voxel aus der räumlichen Punktauflösung ab. Die Bereinigung erfolgt anschließend durch eine charakteristische Numerik der 26 angrenzenden Nachbarvoxel hinsichtlich der semantisch gefilterten Punktwolken-Teilmenge (engl. Patches). Auf weitere Ausführungsdetails wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Codebasis verwiesen. In Abbildung 5.9d ist das Ergebnis des Bereinigungsprozesses exemplarisch anhand der Klasse *Wand* illustriert.

**Datenclustering:** Die Identifikation von semantischen Instanzen, welche im weiteren Prozessverlauf als *RSE* interpretiert werden, wird im Rahmen dieser Modulkomponente adressiert und ist durch eine

---

*Clusteranalyse* realisiert. Diese stellt eine zentrale Disziplin innerhalb des Data-Minings<sup>31</sup> bzw. ML dar und verwendet Algorithmen, welche Merkmale aus den Daten herausbilden und solche anhand von Ähnlichkeitsmaßstäben in sogenannte Cluster gruppieren. Im Vergleich zu Klassifizierungsaufgaben ist dabei die Bedeutung der Cluster im Sinne von Kategorien bzw. Klassen unbekannt. Da im hier vorgestellten Anwendungsfall die Kenntnis der Anzahl zu identifizierender Cluster ebenfalls unbekannt ist, werden sogenannte *uniformierte Verfahren* mit Bezug zum unüberwachten ML implementiert. Dabei gilt es, die Parametrik der Algorithmen so zu schätzen, dass diese möglichst robust und auf die Repräsentation der semantischen Punktwolken-Patches abgestimmt ist. Um entsprechende Herausforderung automatisiert zu lösen, folgt die Clusteranalyse einem zweigeteilten Ansatz, welcher den Algorithmus passend zur Art der Wohnraumelemente wählt (vgl. Abbildung 5.8). Aufgrund der gleichartigen Charakteristik von Wohnraumstrukturelementen, wie *Fußboden*, *Wand* sowie *Decke*, erfolgt das Clustering anhand dreier geometrischer Merkmale. Die *Planarität* (engl. Planarity), *Vertikalität* (engl. Verticality) sowie *Oberflächenvariation* (engl. Surface Variation) werden aus den Eigenwerten bzw. -vektoren der Punktwolke abgeleitet und als Grundlage für den zentroidbasierten Algorithmus *K-means* nach Lloyd (1982) und MacQueen (1967) verwendet. Ferner unterstützt an dieser Stelle der *Modellierungsparameter* mittels welchem die Clusteranzahl vordefiniert ist. Da durch die geometrischen Merkmale lediglich ähnlich ausgerichtete Cluster identifiziert werden, schließt ein dichte-basiertes Clustering an, welches ebenfalls auf alle verbleibenden Wohnraumausstattungs-elemente übertragen wird. Im Kontext der beliebigen Repräsentation von innerhäuslichen Ausstattungselementen wird hier ein weiterer Algorithmus adaptiert, welcher das Cluster durch inkrementelle Ergänzung von Datenpunkten dynamisch erweitert und dabei die Clustergrenze anhand der zugrundeliegenden euklidischen Wahrscheinlichkeitsgrenze isometrisch positioniert. Einen solchen wachstumsorientierten und dichte-basierten Algorithmus schlagen Lemke et al. (2018) unter dem Namen *Common Nearest Neighbor Clustering* vor und evaluieren die Eignung für multidimensionale und durch Rauschen beeinflusste Daten. Dafür ist ein *k-Nearest-Neighbor Graph (kNN-G)* vonnöten, welcher aus den Punktwolken-Patches generiert wird und zugleich eine Gewichtung anhand der Kantenlänge mit in die Clusteranalyse einbringt. Mit Abschluss dieser Modulkomponente erhält jeder Datenpunkt der semantischen Punktwolken-Patches eine eindeutige Clusterzuweisung.

**Clustervoting:** Aus der Datenclustering gehen eine bestimmte Anzahl an Clustern hervor. Dabei können sich unter solchen auch Punktmengen verbergen, die angesichts der Instanz Segmentierung kein *RSE* repräsentieren. Ziel des hier behandelten Votings ist es, nicht repräsentative Cluster hinsichtlich der instanziellen Wohnraumelemente herauszufiltern. Dies erfolgt durch einen datenquotierten Mehrheitsansatz (engl. Majority Voting), der basierend auf dem Umfang einerseits sowie der geometrischen Auszeichnung andererseits die generierten Cluster für weiterführende Betrachtungen im Sinne des WIM bestätigt oder ablehnt. Für eine visuelle Darstellung der votierten Datencluster am Beispiel der semantischen Klasse *Wand* wird an dieser Stelle auf Abbildung 5.9e verwiesen.

**WIM Datenbank:** Die Modellierung des WIMs erfolgt innerhalb der hier beschriebenen, inkrementellen Datenmodellierung ebenfalls sequentiell. Die Instanziierung der räumlichkeitsbezogenen Datenbank findet mit Beginn der ersten inkrementellen Sequenz statt, nimmt daraufhin bestätigte Cluster auf und ordnet diese grafischen Repräsentationen ihrer Semantik entsprechend in die al-

---

<sup>31</sup>Data-Mining umfasst Algorithmen zur computergestützten Verarbeitung von Datenmengen, mit dem Ziel, durch Regelmäßigkeiten und Gesetzmäßigkeiten verborgene Zusammenhänge und daraus resultierend potenziell nützliches Wissen zu extrahieren (Duden o. J.(b)).

---

phanumerische Modellstruktur ein. Mit Abschluss des ersten datenmodellierenden Hauptmoduls liegt ein angereichertes WIM vor, welches den informellen Grundstein für die nun anschließende Datenprüfung legt.

## Datenprüfung

Die an die Datenmodellierung anschließende -prüfung adressiert den Forschungsaspekt 3 dieser Arbeit, indem es die atomaren *RSE* des WIMs vor dem Hintergrund relevanter, geometrischer Anforderungen prüft, die Tabelle 3.1 zusammenfasst. Die Datenprüfung identifiziert somit Barrieren und Verbesserungsmaßnahmen und ermöglicht folglich eine Eignungsklassifizierung als Antwort auf die Fragestellung, ob die erfasste *Räumlichkeit* den Anforderungen einer altersgerechten Wohnraumnutzung entspricht, durch eine logisch-kumulative Übertragung der Eignungszustände der *RSE*. Das prüfende Hauptmodul endet mit einem methodisch in das WIM implementierten Prozess zur Datenaufbereitung, welcher gleichzeitig das Ergebnis des ganzheitlichen Prozesses visuell und textlich aufbereitet (siehe dazu Abbildung 5.10g und 5.10h vergleichend zu Abbildung 5.8).

**RSE-Prüfung:** Da die Prüfung der *RSE* nicht autark, sondern zum Teil in Abhängigkeit zu räumlich benachbarten Wohnraumelementen aus jeglichen Klassen steht, erfolgt der inkrementelle Prüfprozess nach vollständiger Anreicherung des WIMs. Jedes *RSE* wird hierbei unter Berücksichtigung seiner geometrischen Repräsentation auf Eignung bewertet. Aufgrund der Vielzahl geometrischer Anforderungen verzichtet die Arbeit darauf, sämtliche Regeln zu implementieren bzw. an dieser Stelle aufzuführen. Anhand der geometrischen Bedingungen für neigungsfreie Bewegungs- und Freiflächen (vgl. Kategorie 1 und 2 in Tabelle 3.1), Türen (vgl. Kategorie 3 in Tabelle 3.1) sowie Tische als Beispiel für die Elementprüfung über Oberfläche Fertigfußboden (OFF) (vgl. z. B. R-Nr. 4.2, 4.4 und 5.3 in Tabelle 3.1) wird das Prinzip verdeutlicht und damit der konzeptionelle Realisierungsnachweis erbracht, den Regelkatalog gemäß DIN 18040-2:2011-9 möglichst vollständig abzubilden.

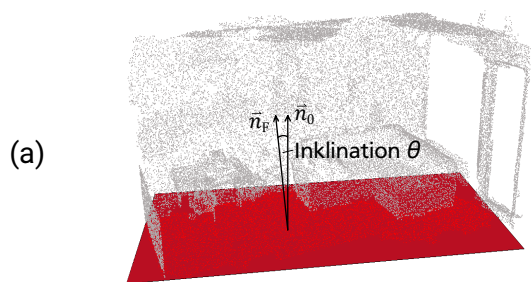
Das erste exemplarische Beispiel bezüglich der Anforderung an neigungsreduzierte sowie ausreichend dimensionierte Bewegungs- und Freiflächen innerhalb des Wohnraumes steht u. a. in Korrespondenz mit der semantischen Klasse *Fußboden*. Gemäß R-Nr. 1.2 aus Tabelle 3.1 darf die Neigung des Fußbodens bei einem barrierefrei und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnraum 3% bzw.  $1,7^{\circ 32}$  nicht überschreiten. Die Berechnung der Inklination des Fußbodens erfolgt, wie in Abbildung 5.10a veranschaulicht, auf Grundlage einer mittels RANSAC parametrisch modellierten Ebene unter Anwendung des gängigen Formelapparats aus linearer Algebra und analytischer Geometrie:

$$\cos \theta = \frac{\vec{n}_F \cdot \vec{n}_0}{|\vec{n}_F| \cdot |\vec{n}_0|} \quad (5.3)$$

Dabei beschreibt  $\vec{n}_F$  die Flächennormale des Fußbodens und  $\vec{n}_0$  einen vertikalen Vektor als Referenz einer nicht inklinierten Fläche (vgl. Abbildung 5.10a). Sofern die Bedingung  $\theta \leq 1,7^{\circ}$  als erfüllt gilt, ist bezüglich dieser geometrischen Teilanforderung an die Klasse *Fußboden* die Eignung nachgewiesen.

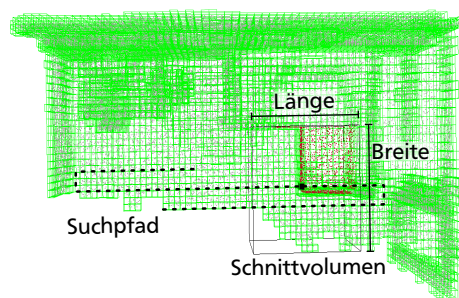
---

<sup>32</sup>Die Umrechnung der Neigungsangabe von Prozent in Grad erfolgt nach der Arkustangensfunktion, wodurch  $3\% \equiv 1,718^{\circ}$ .



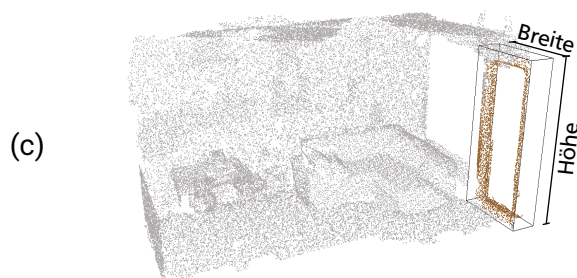
(a)

Berechnung der Fußboden-Neigung  
(vgl. R-Nr. 1.2)



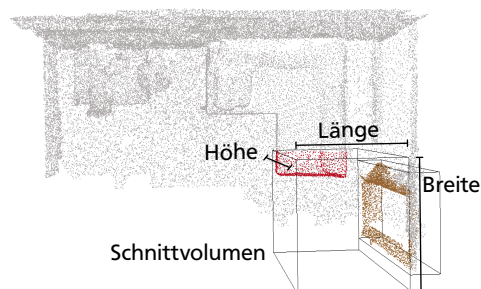
(b)

Ermittlung von Bewegungsflächen  
(vgl. R-Nr. 2.1)



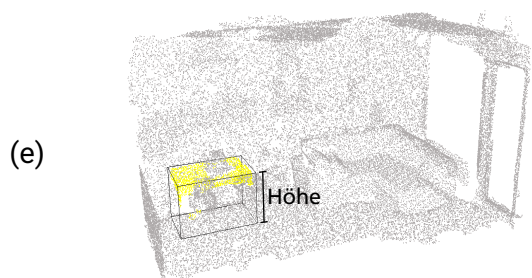
(c)

Ermittlung der Türbreite und -höhe  
(vgl. R-Nr. 3.1–3.2)



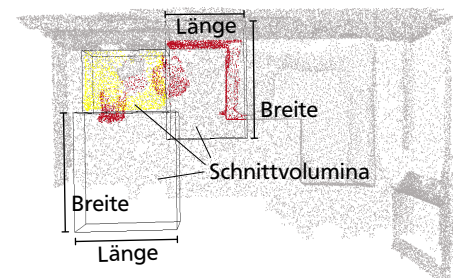
(d)

Ermittlung der Freifläche vor Tür  
(vgl. R-Nr. 2.2)



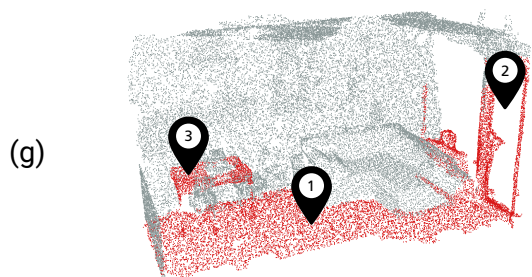
(e)

Ermittlung der Tischhöhe  
(vgl. R-Nr. 5.3)



(f)

Ermittlung der Freifläche vor Tisch  
(vgl. R-Nr. 2.1–2.2)



(g)

(Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke ↔

(h)

Wohnraum-Eignungsbericht

Das **Wohnzimmer** ist nicht altersgerecht nutzbar, weil:

- ❶ der Fußboden keine ausreichenden Bewegungsflächen aufweist.
- ❷ die Tür durch Gegenstände verstellt ist - verstelle den Sitz für mehr Freifläche.
- ❸ der Tisch zu niedrig, nicht unterfahrbar und durch Gegenstände verstellt ist - verstelle die Sitze für mehr Freifläche.

Abbildung 5.10: Ergebnisvisualisierung aus dem datenprüfenden Hauptmodul der *Modellierungs- und Prüfanwendung* am Beispiel eines Ausschnitts aus einer Wohnzimmer-Szene mit Bezug zu einem Teil der geometrischen Anforderungen aus Tabelle 3.1

---

Im Falle einer Nichteignung wird hierauf eine Begründung formuliert, die als Erklärungsinformation zum Ende des Prüfprozesses den Wohnraum-Eignungsbericht speist. Analog dazu verhält es sich bei sämtlichen und zusätzlich implementierten Regeln. Bewegungs- und Freiflächen spielen eine übergeordnet bedeutende Rolle in altersgerecht ausgestattetem Wohnraum hinsichtlich der Nutzung von Gehhilfen wie dem Rollator oder Rollstuhl (vgl. Abschnitt 2.2.6). Um diese im dreidimensionalen Raum  $\mathbb{R}^3$  zu prüfen, wird der Ansatz implementiert, welcher ursprünglich für das „*indoor pathfinding through an octree representation of a point cloud*“ (Rodenberg, Oliver B. P. M. et al. 2016, S. 249) entwickelt worden ist. Danach werden zunächst sämtliche belegte und unbelegte Bereiche des Raumes durch maskierende Knoten (engl. nodes) modelliert (vgl. Abbildung 5.10b). Anschließend wird für jeden Knoten in Verbindung mit einem Schnittvolumen der Dimension  $150\text{ cm} \times 150\text{ cm}$  (vgl. R-Nr. 2.1 aus Tabelle 3.1) untersucht, ob Punktmenge  $\mathbf{P}$  sämtlicher Klassen, exklusiv des *Fußbodens*, Schnittmenge  $\mathbf{S}$  des Schnittvolumens  $\mathbf{V}$ , welches die Freiflächenanforderung repräsentiert, darstellen. Sofern  $\mathbf{S} = \mathbf{P} \cap \mathbf{V}$ ;  $\mathbf{S} = \{ \}$ , fungieren solche Knoten als Grundlage für eine 3D-Pfadnavigation nach der *Dijkstra-Methodik* (Dijkstra 1959). Ist keine zusammenhängende Routenführung innerhalb der erfassten *Räumlichkeit* möglich, leitet sich daraus ab, dass keine ausreichend große Bewegungs- und Freifläche vorliegt.

Das zweite Prüfbeispiel adressiert *Türen*, welche die Zugänglichkeit zu *Räumlichkeiten* ermöglichen. Hierbei sind zum einen die Breite und Höhe der Tür und zum anderen die Erreichbarkeit solcher im Sinne von räumlich verbundenen Freiflächen relevante geometrische Anforderungen (vgl. R-Nr. 2.2, 3.1 und 3.2 aus Tabelle 3.1). Ferner ist die Öffnungsrichtung von *Türen* entscheidend, welche laut R.-Nr. 5.2 aus Tabelle 3.1 in die *Räumlichkeit* führen muss. Die Grafiken in den Abbildungen 5.10c und 5.10d veranschaulichen das Prinzip, mit Ausnahme der Regel zur Öffnungsrichtung der Tür. Solche ist, sofern die Tür nicht geschlossen ist, in algorithmischer Analogie zur Bestimmung der Fußboden-Neigung implementiert und valide prüfbar. Die Ausdehnung von *Türen* wird über eine umschließende Bounding Box quantifiziert und mit den geometrischen Mindestmaßen von 90 cm für die lichte Durchgangsbreite und 205 cm für die Durchgangshöhe über OFF verglichen. Ferner wird die Erreichbarkeit von *Türen* durch ein zentrisch positioniertes Schnittvolumen geprüft. Gilt  $\mathbf{S} = \mathbf{P} \cap \mathbf{V}$ ;  $\mathbf{S} = \{x_i, x \in \mathbf{P}\}$ , ist die räumliche Mindestfreifläche beschnitten und damit eine uneingeschränkte Erreichbarkeit nicht gewährleistet. In diesem Fall wird die Eignung der Tür hinsichtlich dieser Teilanforderung nicht nachgewiesen. Darüber hinaus wird über die Semantik der Schnittmenge von  $\mathbf{P}$  ermittelt, welche Wohnraumausstattungs-elemente zu replatzieren sind, um die Anforderung zu erfüllen. Die grafische Illustration in Abbildung 5.10d zeigt dies am Beispiel einer die Freifläche beschneidenden Instanz der Klasse *Stuhl*. Hinsichtlich dessen ist auch die nicht näher spezifizierte Klasse *Sonstiges* maßgebend.

Im dritten hier angeführten Beispiel spricht die Instanz der Klasse *Tisch* stellvertretend sämtliche geometrische Voraussetzungen in Zusammenhang mit Bedien- und Ausstattungselementen an (vgl. R-Nr. 2.1 – 2.2, 4.2, 4.4 – 4.5 und 5.3 aus Tabelle 3.1). Die Höhe solcher über OFF leitet sich relativ aus der Entfernung zwischen Oberkante der umschließenden Bounding Box und dem Fußboden ab, wobei die geometrische Prüfgröße je nach Ausstattungselement in einem Bereich von 46 cm bis 85 cm liegt. Gleichzeitig wird die Freifläche bei frontaler und seitlicher Anfahrt an Bedienelemente sowie die Unterfahrbarkeit von Ausstattungselementen geprüft (vgl. R-Nr. 2.1 – 2.2 und 5.4 aus Tabelle 3.1). Hierbei wird gleichermaßen verfahren wie bereits bei der Prüfung auf Erreichbarkeit von *Türen*. In Abhängigkeit des Seitenverhältnisses des Ausstattungselements wird

das kleinere Schnittvolumen von 150 cm × 120 cm seitlich und das größere Schnittvolumen von 150 cm × 150 cm frontal platziert. Sämtliche innerhalb der umschließenden Bounding Box der zu prüfenden Ausstattungselementinstanz begrenzen die Unterfahrbarkeit und schränken folglich die Eignung auf Altersgerechtigkeit ein. Die grafische Logik des geschilderten Sachverhalts zeigen Abbildungen 5.10e und 5.10f. Anhand dieses Beispiels wird deutlich, dass sowohl die beidseitige Anfahrt als auch die Unterfahrbarkeit des dargestellten Tisches eingeschränkt ist.

**Eignungskumulation:** Die Eignung des WIMs leitet sich aus den Eignungszuständen der darin enthaltenen *RSE* ab. Diese werden als Elementaraussagen interpretiert und mittels Operationen der Booleschen Algebra, auch als Aussagenlogik bezeichnet, kumuliert. Dabei folgt die Kumulation der konjunktiven Verknüpfung von Aussagen, wodurch die Eignung einer *Räumlichkeit* nur dann gegeben ist, wenn sämtliche Elementaraussagen ebenfalls geeignet bzw. wahr sind. Identisch verhält es sich für die Aggregationsbeziehung zwischen den *Räumlichkeiten* und dem *Wohnraum*.

**Datenaufbereitung:** Zweck der letzten Modulkomponente ist die Aufbereitung des Prozessergebnisses in ein allgemein verständliches, als Handlungsempfehlung interpretierbares, interdisziplinär nutzbares und multimodales Repräsentationsformat, um der Gesamtheit der nutzerbezogenen Anforderungen Rechnung zu tragen (vgl. Abschnitt 3.2.1 und Abbildung 3.2). Dafür wird einerseits ein visuelles Ergebnis generiert, welches der Repräsentationsmodalität der Punktwolke folgt, hinsichtlich der Eignung der atomaren *RSE* klassifiziert und demnach koloriert ist. Eine rote Textur beschreibt somit eine Nicht-Eignung bzw. eine innerhäusliche Barriere oder auch den Ansatzpunkt für eine Verbesserungsmaßnahme. Eine grüne Textur beschreibt demgegenüber eine Eignung und die graue Textur weist auf *RSE* hin, welche zur Regelprüfung lediglich passiv partizipieren. Über die grafische Ergebnisrepräsentation in Abbildung 5.10g hinaus wird andererseits ein alphanumerischer Wohnraum-Eignungsbericht formuliert, welcher die Erklärungsinformationen der *RSE* verkettet und so als Handlungsempfehlung verwendet, um Verbesserungsmaßnahmen umzusetzen und damit den Wohnraum für eine altersgerechte Nutzbarkeit umzugestalten (vgl. Abbildung 5.10h). Derzeit folgt der textliche Teil des Ergebnisses der *Modellierungs- und Prüfanwendung* keinen gestalterischen Richtlinien, sondern wird als reines, unformatiertes Formular ausgegeben.

Zum Abschluss der regelbasierten Prüfung eines aus *RSE* bestehenden WIMs wird der Implementierungsstand der geometrischen Voraussetzungen an die innere Erschließung eines Gebäudes sowie

Tabelle 5.1: Überblick über den regelbasierten Implementierungsstand für die Bewertung von Wohnräumen nach altersgerechter Nutzbarkeit gemäß dem Regelkatalog nach Tabelle 3.1 im Kontext der DIN 18040-2:2011-09

Umsetzung der R-Nr.	Allgemeine Grundsätze	Bewegungs- / Freifläche	Türen	Sanitärbereich	Sonstiges
Nicht möglich	1.1		3.3	4.1, 4.6	5.1
Konzeptionell	1.2 – 1.3	2.1 – 2.3	3.1 – 3.2	4.2 – 4.5	5.2 – 5.4
Implementiert	1.2	2.1	3.1 – 3.2	4.2, 4.4	5.2 – 5.4

dessen Bedienelemente tabellarisch zusammengestellt. Aus Tabelle 5.1 geht hervor, dass 14 von 19 aus der DIN 18040-2:2011-09 abgeleiteten Voraussetzungen durch den hier vorgestellten Ansatz, welcher auf der stringenten Kombination geometrisch primitiver Datenmodellierung beruht, konzeptionell realisierbar sind. Rund zwei Drittel dieser Regeln sind, wie zuvor ausgeführt, im Rahmen des datenprüfenden Hauptmoduls der *Modellierungs- und Prüfanwendung* implementiert. Der Ausschluss von fünf Regeln aus vier Kategorien beruht im Wesentlichen auf der reduzierten Auflösung durch die in Zusammenhang mit der Demonstratoranwendung *PHC* stehenden technischen Komponenten. Obwohl die in Abschnitt 4.1.6 vorgestellte Studie dem integrierten dToF Flash-LiDAR-Scanner in Apples Endgeräten eine Genauigkeit von 2 cm bescheinigt, sofern eine maximale Messentfernung von 2,5 m beachtet wird, generalisiert die kontinuierliche Mesh-Generation durch *ARKit* feine Details wie beispielsweise schmale Schwellen (R-Nr. 1.1), den Türspion (R-Nr. 3.3) oder Tür- bzw. Fenstergriffe (R-Nr. 5.1). Diese sind folglich auch nicht radiometrisch aus dem Flash-LiDAR-Mesh extrahierbar. Die letzten beiden, nicht realisierbaren geometrischen Voraussetzungen stehen in Verbindung mit der Klasse *Dusche* (R-Nr. 4.1 und 4.6), welche keines der untersuchten Modelle zur Echtzeit-Datenstrukturierung anbietet (vgl. Tabelle 4.4). Während dieses Defizit in theoretischer Hinsicht durch eine Erweiterung der bildbasierten, semantischen Verfeinerung lösbar wäre, kann eine Steigerung der räumlichen Auflösung zur Detaillierung von wandöffnungsbezogenen *RSE* nur durch eine Optimierung des LiDAR-Sensors erfolgen, welche im neuen iPhone 15 Pro erwartet wird (vgl. Rossignol 2023).

### 5.3.2 Laufzeit

Aufgrund des Qualitätsanforderungsmerkmals der Leistungsfähigkeit (vgl. QA-Nr. 2 aus Tabelle 3.2) steht die Implementierung der *Modellierungs- und Prüfanwendung* unter dem Einfluss der Berechnungseffizienz. Infolgedessen wird zum Ende des Abschnitts ein Blick auf die Laufzeit geworfen. Diese ist von mehreren Parametern abhängig, darunter die Größe der Räumlichkeit und der *Dichteparameter* (vgl. Tabelle 5.2), welcher die räumliche Auflösung der Punktwolke spezifiziert. Ferner wird an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass weitere Schwellenwerte und Parameter definiert sind, die aus empirischen Beobachtungen resultieren und deren Definition ebenfalls Einfluss auf die Laufzeit nehmen. Aufgrund der Vielzahl solcher im Rahmen der *Modellierungs- und Prüfanwendung* wird nicht weiter darauf eingegangen. Die tabellarisch dokumentierte Laufzeit leitet sich aus dem arithmetischen Mittel von vier 16 m<sup>2</sup> großen Räumlichkeiten unterschiedlicher Nutzungsarten, welche exemplarisch einen typischen Wohnraum aggregieren, ab. Dabei reichen die Laufzeiten von einigen Sekunden bis hin zu wenigen Minuten, die allesamt mit den zuvor gesteckten Erwartungen an eine Quasi-Echtzeitidentifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen innerhalb eines digitalen WIMs für die Nutzungsszenarien 1–2 übereinstimmen. Aus der Definition des

Tabelle 5.2: Mittlere Laufzeit der *Modellierungs- und Prüfanwendung* in Abhängigkeit verschiedener Dichteparameter bei einer 16 m<sup>2</sup> großen Räumlichkeit

Dichteparameter	500	1.000	1.500	2.000
Mittlere Laufzeit [s]	20,85	62,31	124,43	207,10

---

Dichteparameters folgen räumlich unterschiedlich aufgelöste Punktwolken und damit verschiedene große Bounding Boxen, welche Grundlage für die regelbasierte Prüfung der dadurch approximierten *RSE* darstellen. Durch empirische Untersuchungen sind nur geringfügige achsbezogene Differenzen solcher Bounding Boxen zwischen gering und hoch aufgelösten Punktwolken nachweisbar, weshalb sich der potenziell nutzbare Wertebereich des *Dichteparameters*, vor dem Hintergrund der angesetzten Genauigkeit  $\leq 2$  cm bei möglichst optimaler Approximation *RSE* auf der einen und einer möglichst geringen Laufzeit auf der anderen Seite, zwischen 1.000 und 1.500 erstreckt. Alle Experimente sind auf einem Notebook mit Intel Core i7 Prozessor der 9. Generation bei einer Taktrate von 2,6 GHz und mit 16 GB RAM ausgeführt worden. Dabei wird ein Thread für die Berechnung genutzt. Die Implementierung der pythonischen Anwendungskomponente realisiert keine Parallelisierung. In Anbetracht des inkrementellen Prozesses (vgl. Abbildung 5.8) wird von einer dedizierten Laufzeitanalyse hinsichtlich der Hauptmodulkomponenten abgesehen. Gleichwohl ist festzustellen, dass der weitaus größte Teil der Laufzeit ( $\geq 94\%$ ) auf den graphenbasierten Konnektivitätsansatz zwecks topologischer Analyse zur Datenbereinigung entfällt (vgl. Abschnitt 5.3.1). Sämtliche weitere Operationen zur Raffinerie der Daten konsumieren wenig bis sehr wenig Ressourcen, welche bei Aktivierung des entsprechenden Modus (engl. verbose) im Quellcode einsehbar sind.

## 5.4 Limitationen

Vor dem Hintergrund des sowohl gesellschaftlich als auch gesundheitsökonomisch relevanten Anwendungsfalls eines möglichst langen Verbleibes in der eigenen Häuslichkeit, respektive das *Ageing in Place*, werden in diesem Kapitel über einen konzeptionellen Entwurf hinaus auch Detailinformationen hinsichtlich der softwareseitigen Implementierung geliefert. Unter dem Gesichtspunkt des prototypischen Charakters der bimodularen Demonstratoranwendung *PHC* stehen zwangsläufig technische Limitationen, welchen sich dieser Abschnitt unter Berücksichtigung unterschiedlicher Auswirkungsgrade widmet. Solche können einerseits als Hauptaspekte für weitere Forschungsrichtungen und andererseits als Grundlage für die Finalisierung einer potenziell marktfähigen Anwendung aus dem Portfolio von DiGA bzw. DiPA interpretiert werden. Aus einer kritischen Analyse gehen acht Limitationen hervor, welche in absteigender Gewichtung hieran anknüpfend beschrieben werden. Dabei präsentieren die ersten vier Aspekte konzeptionelle Limitationen und die darauffolgenden vier Aspekte allgemeine Restriktionen und Voraussetzungen.

- L1. Die hierarchische Modellierung und informelle Anreicherung des WIMs reduziert sich auf den räumlichkeitsbezogenen Realisierungsnachweis, welches auf zwei Gründe zurückzuführen ist. Zum einen ist die strukturierte 3D-Datenerfassung durch *Semantic Data Capture* aufgrund der speicherbedingten Leistungsfähigkeit von mobilen Verbraucherendgeräten beschnitten, sodass anhand empirischer Beobachtungen der Funktionsnachweis lediglich für die Erfassung einzelner *Räumlichkeiten* erbracht wird. Zum anderen realisiert das Wohnraum-Layout als inkorporierte Komponente der *Modellierungs- und Prüfanwendung* die Elimination grober Datenartefakte durch ebene, räumlichkeitseinhüllende Schnittvolumen (vgl. Abschnitt 5.3.1 und Abbildung 5.9b). Angesichts dessen ist die Implementierung des WIMs für jeweils einzelne *Räumlichkeiten* erfolgt, wobei dadurch keine Einschränkungen hinsichtlich der darauffolgenden, regelbasierten Datenprüfung einhergehen. Darüber hinaus ist die Modellierung eines aus



- 
- mehreren *Räumlichkeiten* bestehendes WIM im Rahmen eines übergeordneten, inkrementellen Prozesses realisierbar, sofern solche jeweils isoliert erfasst und ausgewertet werden.
- L2. Die Betrachtung von ausschließlich planaren Wohnraumstrukturelementen für die datenmodellierende Komponente des Wohnraum-Layouts repräsentiert eine weitere konzeptionelle Limitation des vorgestellten Ansatzes. Diese basiert auf einem ebenenorientierten Parametrisierungsansatz und exkludiert durch räumliche Schnittvolumen grobe Datenartefakte, um so den eingehenden Datensatz für die weitere Verarbeitung zu verbessern. Folglich ist die Anwendbarkeit der *Modellierungs- und Prüfanwendung* ausschließlich für *Räumlichkeiten* gegeben, welche durch ebene Flächen begrenzt sind, wohingegen die strukturierte 3D-Datenerfassung mit *Semantic Data Capture* auch für komplex geformte Strukturelemente erfolgen kann.
  - L3. Die Identifikation von atomaren *RSE* für die Anreicherung eines WIMs wird innerhalb der semantisch segmentierten Punktwolke durch eine Kombination aus Datenclustering und Clustervoting erzielt (vgl. Abschnitt 5.3.1 und Abbildung 5.8). Dabei folgt das Voting einem datenquotierten Mehrheitsansatz (*Majority Voting*), welcher sensitiv auf Datencluster unterschiedlicher Größe und Dichte reagiert. Folglich ist eine zuverlässige Filterung generierter Cluster nur bei annähernd gleichmäßiger Datenrepräsentation möglich.
  - L4. Die Prüfung der modellierten *Räumlichkeiten* innerhalb eines digitalen WIMs ist von den geometrischen Anforderungen der DIN 18040-2:2011-9 geleitet und basiert auf Bounding Boxen, welche die Geometrie der *RSE* nur grob approximieren. Damit geht ein erheblicher Verlust an geometrischem Detailgrad einher, welcher im Rahmen der messtechnischen Evaluation geeigneter Verfahren (vgl. Abschnitt 4.1.5) zu maximieren versucht worden ist.
  - L5. Die *Modellierungs- und Prüfanwendung* inkorporiert keine Modulkomponenten zur Prüfung der Richtigkeit der semantisch segmentierten Wohnraumelemente, sodass die initiale Segmentierung durch *Semantic Data Capture* als fehlerfrei angenommen wird. Darüber hinaus wird von solcher ein Mesh erwartet, dessen kartesisches Achssystem den Maßgaben eines rechtsläufigen Koordinatensystems folgt. Damit muss die Vertikalachse nach oben zeigen, wohingegen eine grobe Ausrichtung der Horizontalachsen ausreicht und, falls notwendig, automatisiert feinjustiert wird.
  - L6. Die Implementierung der auf einem graphenbasierten Konnektivitätsansatz basierenden Datenbereinigung (vgl. Abschnitt 5.3.1) konsumiert im Vergleich zu vor- bzw. nachgelagerten Modulkomponenten einen signifikant hohen Anteil der gebundenen Berechnungsressourcen, die einer zukünftigen Eingliederung auf mobilen Endgeräten für mobilitätseingeschränkte Anwender aus Nutzungsszenario 1 entgegensteht. Eine mögliche, bislang jedoch nicht untersuchte Optimierungsalternative stellt die Prozessparallelisierung durch einen mehrskaligen Octree-Ansatz dar.
  - L7. Die Datenüberführung von Mesh in die grundlegende Prozessierungsmodalität erfolgt durch das Punktwolken-Sampling. Da die semantischen Informationen in den Stützpunkten gespeichert sind und bei topologisch benachbarten, jedoch ungleichen Klassen einen Farbverlauf innerhalb der Dreiecksflächen ergeben, ist die klassische flächenbasierte Sampling-Methode zur Separierung der semantisch segmentierten Wohnraumelemente ungeeignet. Daher erfolgt die Modalitätsüberführung in einem inkrementellen, semantisch geleiteten Prozess unter Be-

---

achtung des homologen *Dichteparameters*. Daraus resultieren gesampelte Punktwolken-Patches unterschiedlicher räumlicher Auflösung, was angesichts der u. a. zur Parametrisierung der implementierten Algorithmen, wie z. B. für die Datenclustering, verwendeten räumlichen Punktauflösung zu inadäquaten Resultaten führen kann. Eine Optimierung der Datenstruktur bei dem Export aus *Semantic Data Capture* verspricht Abhilfe (vgl. Abschnitt 5.5).

- L8. Der Vollständigkeit halber wird zum Abschluss auf die nicht umfänglich realisierte semantische Auflösung durch den Ansatz zur semantischen Echtzeit-Strukturierung und damit einhergehend die partiell nicht zu realisierende Implementierung der geometrischen, innerhäuslichen Voraussetzungen (vgl. Tabelle 5.1) hingewiesen. Diese dem Leitsatz „*Was nicht erkannt wird, kann auch nicht überprüft werden*“ folgenden Einschränkungen sind bereits in Abschnitt 4.2.3 sowie 5.3.1 benannt und werden daher hier nicht erneut ausgeführt.

## 5.5 Perspektiven

Mit Blick auf die im vorangegangenen Abschnitt 5.4 genannten technisch-konzeptionellen Limitationen wird deutlich, dass diese primär in Zusammenhang mit dem semantischen Strukturierungsniveau stehen, welches zur Anreicherung des WIMs auf instanzsegmentierter Basis benötigt, jedoch von *Semantic Data Capture* lediglich in Form eines semantisch segmentierten 3D-Datensatzes bereitgestellt wird (vgl. Abbildung 4.11). Folglich wirken sich die Hauptaspekte vorrangig auf die *Modellierungs- und Prüfanwendung* aus, die u. a. anhand uniformierter Algorithmen aus dem Bereich des unüberwachten Lernens Instanzen segmentieren, welche anschließend als *RSE* in Erscheinung treten und geometrisch prüfbar sind. Aus diesem Grund blickt die hier vorgestellte Perspektive in erster Linie auf tiefgreifende Optimierungsalternativen hinsichtlich des Funktionsumfangs der strukturierten iOS-gestützten 3D-Datenerfassung, mit dem Potenzial, den Anteil von *Edge Computing* Prozessen auszuweiten und demzufolge den Automatisierungsgrad von *PHC* vollumfänglich zu realisieren.

Die bimodulare Prozessabhängigkeit zwischen *Semantic Data Capture* und der *Modellierungs- und Prüfanwendung* zwecks Anreicherung eines WIMs kann durch die Integration eines weiteren, zu *ARKit* kompatiblen Frameworks aus dem iOS-Ökosystem aufgelöst werden. Hinsichtlich dessen bietet sich vor allem und insbesondere die Integration von *RoomPlan* an, welche auf *ARKit* basiert und durch die Nutzung des LiDAR-Scanners die parametrische 3D-Modellierung innerräumlicher Szenen in Echtzeit ermöglicht (vgl. Apple Inc. o. J.(f)). Eingebunden in den 3D-Geometrieerfassungsstrang von *Semantic Data Capture* (vgl. Abbildung 5.6), kann es die Modulkomponente des Wohnraum-Layouts und mit dieser verbunden die Angabe des steuernden *Modellierungsparameters* gegenstandslos ersetzen. Darüber hinaus könnte es den Weg in Richtung einer räumlichkeitsübergreifenden Wohnraumerfassung und damit auch -bewertung ebnen. Diese Einschätzung basiert auf empirischen Untersuchungen der *RoomPlan*-Funktionalität in zwei unterschiedlichen iOS-Apps<sup>33</sup>. Weitere wissenschaftlich fundierte Studien zur Stützung dieser These stehen hingegen aus. Die derzeitige Version von *RoomPlan* bietet ebenfalls nur für ebene Elemente eine parametrische Geometrieapproximation an, wodurch diese konzeptionelle Limitation (vgl. Limitation L2 in Abschnitt 5.4) auch nach einer entsprechen-

---

<sup>33</sup>Konkret sind dabei die Applikationen *3d Scanner App™* von Laan Consulting Corp und *Polycam™* von gleichnamigem Anbieter gemeint, die *RoomPlan* in ihren aktuellsten Versionen zur Verfügung stellen.

---

den Erweiterung Bestand hat. Über die Erweiterung der Geometrieerfassung hinaus ist auch eine Ausdehnung der semantischen Verfeinerung durch die bildbasierte Echtzeit-Objektdetektion (vgl. Abschnitt 4.2.3 und Abbildung 5.6) vorstellbar. An dieser Stelle ist der Austausch von *YOLOv3* durch einen funktionaleren *One-Stage* Detektor denkbar, welcher über die bildbasierte Objektdetektion zwecks semantischer Injektion hinaus auch eine präzise Zählung (engl. Detection and Counting) erkannter Objekte einer Klasse realisiert. Angesichts des kürzlich veröffentlichten und entsprechend leistungsfähigen Modells *YOLOv8* (vgl. Ultralytics 2023) ist diese perspektivische Überlegung in der Theorie umsetzbar, sofern die Definition des für die Objektzählung notwendigen Bereichs von Interesse (engl. Region of Interest) auch für bewegte Anwendungen lösbar ist. Eine entsprechende Erweiterung kann das notwendige Vorwissen bereitstellen, um unüberwachte Clusteralgorithmen durch ihr parametrisiertes Pendant zu substituieren. In abschließender Überlegung und mit Blick auf die im Rahmen der *Modellierungs- und Prüfanwendung* primär verwendete, punktbasierte Repräsentationsmodalität, empfiehlt es sich, *Semantic Data Capture* durch einen *Punktwolken-Erfassungsmodus* zu erweitern, wie es auch seitens der *3d Scanner App<sup>TM</sup>* angeboten wird. Dieser stellt die gleichmäßige, räumliche Auflösung sicher (vgl. Limitation L7 in Abschnitt 5.4) und macht damit den zweiten steuernden *Dichteparameter* obsolet, wodurch der teilautomatisierte Charakter der *Modellierungs- und Prüfanwendung* in einen vollautomatisierten wechselt. In Zusammenhang mit einem weiteren Erfassungsmodus ließe sich die entfernungsabhängige Signalverarbeitung realisieren, um registrierte Impulse mit einem hohen Unsicherheitspotenzial ab 2,5 m auszuschließen (vgl. Abschnitt 4.1.6) und gleichzeitig ein RGB-Texturlayer mit kontextbezogenen Informationen zu ergänzen, welcher sich hinsichtlich der Merkmalsextraktion für z. B. die Datenclusterung als profitabel erweisen würden.

Die vorgestellten Optimierungen adressieren Teile der genannten Limitationen unter Beachtung des Aspekts der Datensicherheit (vgl. QA-Nr. 6 aus Tabelle 3.2) und damit einhergehend der Forcierung des *Edge Computings* (vgl. Ausführungen zur Anforderung *Sicherheit* im Abschnitt 3.2.2). Eine weitere und bedeutende Limitation stellt die sehr einfach gehaltene und grobe geometrische Abbildung der *RSE* für die regelbasierte Prüfung über Bounding Boxen dar (vgl. Limitation L4 in Abschnitt 5.4). Eine zusätzliche Modulkomponente innerhalb der *Modellierungs- und Prüfanwendung*, welche für die partitionierende Instanz Segmentierung (engl. Part Segmentation) zuständig ist, kann diese Beschränkung lösen, ohne dabei die Grenze zu einer bauteilorientierten, parametrischen Modellierung im Rahmen des Building Information Modeling (BIM) zu überschreiten.

Die im Rahmen dieses Kapitels ausführlich vorgestellte Demonstratoranwendung *PHC* setzt sich aus zwei Anwendungskomponenten zusammen, um die digitale Modellierung und regelbasierte Bewertung von Wohnräumlichkeiten im Kontext der altersgerechten Nutzbarkeit zu realisieren. Für die strukturierte Datenerfassung von Räumlichkeiten geht aus dieser Arbeit die iOS-App *Semantic Data Capture* hervor, welche die über Flash-LiDAR generierten 3D-Daten simultan mit ML-gestützten Verfahren klassifiziert. Dieser Prozess erfolgt in Echtzeit auf situativ einsetzbaren, mobilen und hochverfügbaren smarten Endgeräten, wie dem *iPhone 12+ Pro* oder *iPad Pro 2020+* von Apple Inc. mit LiDAR-Scanner, weshalb diese Komponente auch von Mobilitätseingeschränkten ohne spezifische technische Fähigkeiten oder hoher Digitalkompetenz leicht anzuwenden und niederschwellig zu bedienen ist (Nutzungsszenario 1). Ergänzend dazu wird durch die pythonische, als Kommandozeilenapplikation entwickelte, *Modellierungs- und Prüfanwendung* die WIM-Modellierung und anschließende Bewertung der mit *Semantic Data Capture* strukturiert-erfassten Räumlichkeit vorgenommen. Der manuelle Datenaustausch zwischen iOS-App und Kommandozeilenapplikation erfolgt

---

derzeit manuell und setzt, ebenso wie die Ausführung eines Skripts ohne grafische Benutzeroberfläche (GUI), IT-technische Grundkenntnisse voraus, weshalb diese Lösung dem Nutzungsszenario 2 zuzuordnen ist. Zur Steigerung der Bedienbarkeit ist es denkbar, die *Modellierungs- und Prüfanwendung* als Cloud-Dienst anzubieten, um sowohl den lokalen Datenaustausch als auch die Prozessierung auf einem vorausgesetzt existierenden Computer zu umgehen. Gleichzeitig gilt es dabei den Aspekt der Datensicherheit (vgl. QA-Nr. 6 aus Tabelle 3.2) zu berücksichtigen. Perspektivisch könnte die nachgelagerte Datenverarbeitung auch auf dem mobilen Erfassungsgerät stattfinden, wobei dafür die entsprechende Ausführungsumgebung und Rechenleistung gegeben sein muss. Sollte dem (mobilitätseingeschränktem) Anwender kein entsprechendes, mit LiDAR-Scanner ausgerüstetes Endgerät vorliegen, ist es ferner vorstellbar, diese als Dienstleistung über Wohnberatungsstellen oder Pflegekassen zu beziehen und darüber hinaus Unterstützungsleistungen bei der Prozessierung oder individuellen Wohnraumanpassungsmaßnahmen in Anspruch zu nehmen (Nutzungsszenario 3).

Abschließend stellt die bereits beworbene Veröffentlichung eines neuen LiDAR-Sensors weitere Evaluationsstudien in den Raum, welche es zwingend durchzuführen gilt, um eine wissenschaftlich fundierte Einsicht über die von Apple Inc. veröffentlichten Informationen hinaus zu erhalten. Dabei wird empfohlen, komparative Untersuchungen vorzubereiten und mit Blick auf weitere sensorische Leistungsparameter, welche die Aufnahmekapazität zeitlich sowie datentechnisch begrenzen, auszuwerten.

## 5.6 Zwischenfazit

Die sich über Kapitel drei und vier erstreckende, konzeptionelle Vorbereitung wird im Rahmen dieses Kapitels implementiert. Dabei wird unter Berücksichtigung des spezifizierten, digitalen WIMs zur räumlich-semantischen Beschreibung von Wohnraum (Forschungsaspekt 1) eine mobile, situativ einsetzbare iOS-App namens *Semantic Data Capture* zur strukturierten 3D-Geometrieerfassung (Forschungsaspekt 2) sowie eine *Modellierungs- und Prüfanwendung* zwecks Anreicherung und geometrischer Prüfung des wohnraumbezogenen Informationsmodells nach DIN-definierten Anforderungen (Forschungsaspekt 3) entwickelt, welche als separate Software-Artefakte in Kombination die Demonstratoranwendung *PHC* verkörpern. Innerhalb dieses Kapitels werden technische Implementierungsdetails präsentiert und die verzahnende Abhängigkeit hinsichtlich beider Anwendungskomponenten beleuchtet. Die prototypische Realisierung steht unter einer Reihe technischer Limitationen, welche daran anschließend ausgeführt und mit perspektivischen Lösungsmöglichkeiten verbunden vorgestellt werden. Eine essenzielle Grundlage für die technische Implementierbarkeit ist die mit handelsüblichen Endanwendergeräten realisierbare, strukturierte 3D-Geometrieerfassung. Die Möglichkeit, die Geometrie und Semantik eines Wohnraumes situativ mit dem Smartphone zu erfassen, stellt eine technische Innovation dar, welche sich im Zusammenhang des auf das Gesundheitssystem bezogenen Anwendungsfalls um das *Ageing in Place* als nützlich und zielführend erwiesen hat. Insofern stellt sich die prototypische Entwicklung von *Semantic Data Capture* daran anknüpfend ebenfalls als Neuheit vor, sowohl innerhalb eines sozialgesellschaftlichen als auch ingenieurtechnischen Sektors. Diese Feststellung beruht bislang auf einem rein technischen Blickwinkel und wird im hieran anschließenden Kapitel durch objektive Kriterien validiert.

---

## 6 Validierung der Demonstratoranwendung zur Identifikation von Verbesserungsmaßnahmen in einem Wohnrauminformationsmodell

---

Die flächendeckende Realisierung des Konzepts *Ageing in Place* gründet auf einem barrierefreien und uneingeschränkt mit dem Rollstuhl nutzbaren Wohnraum. Diese substantielle Auszeichnung sieht die Vakanz sämtlicher wohnraumbezogenen Verbesserungsmaßnahmen vor, welche alltägliche Barrieren und damit verbunden Sturzrisiken für die dort wohnenden Menschen darstellen. Da gegenwärtig ausschließlich analoge Hilfsangebote zur Identifikation solcher Gefahrenquellen existieren (vgl. Abbildung 2.2), wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein technologisch geleiteter Ansatz entworfen, welcher diese Tätigkeit durch die zielführende Kombination digitaler Verfahren optimiert. Die Optimierung stellt sich in Form einer digitalen, situativ nutzbaren Anwendung dar, welche den Wohnraum zunächst mit dem Smartphone dreidimensional erfasst, anschließend in ein Wohnrauminformationsmodell (WIM) überführt und darin regelbasiert Verbesserungsmaßnahmen vor dem Hintergrund der geometrischen Anforderungen nach DIN 18040-2:2011-9 (vgl. Tabelle 3.1) identifiziert. Aus diesem konzeptionellen Entwurf ist die Demonstratoranwendung *Progressive Home Care (PHC)* hervorgegangen, die den prototypischen Nachweis zur Realisierbarkeit des dargestellten Konzepts erbringt und im Folgenden anhand von realen Anwendungsbeispielen validiert wird. Im ersten Abschnitt des Kapitels werden diese Anwendungsbeispiele, welche in Gesamtheit aus neun Räumlichkeiten unterschiedlicher Nutzungsarten bestehen, beschrieben. Anhand einer evaluativen Auswertung werden verschiedene Metriken berechnet, die im darauffolgenden Abschnitt verwendet werden, um eine priorisierte Teilmenge der in Tabelle 3.2 definierten funktionalen Qualitätsanforderungen quantitativ zu validieren. Im dritten Abschnitt wird mit einem perspektivischen Blick auf die qualitative Validierung der verbleibenden nicht-funktionalen Anforderungsmerkmale fortgeföhren. Darüber hinaus werden Erfahrungswerte angeführt, welche in Zusammenhang mit der Smartphone-gestützten 3D-Datenerfassung während der Forschungsarbeit gesammelt worden sind.

### 6.1 Modellierung und Bewertung unterschiedlicher Räumlichkeiten

Als Validierung definiert die ISO 9000:2015 die „Bestätigung durch einen objektiven Nachweis, dass die Anforderungen für eine bestimmte Anwendung oder einen bestimmten Gebrauch erfüllt sind“. Dafür

werden innerhalb dieses Abschnitts Räumlichkeiten dargestellt, durch welche der Nachweis mit Blick auf die Anforderungsmerkmale der *funktionalen Eignung* (QA-Nr. 1 aus Tabelle 3.2) und *Leistungsfähigkeit* (QA-Nr. 2 aus Tabelle 3.2) erbracht wird. Zur Wahrung der Objektivität werden diesem Konzept Metriken zugrunde gelegt, über welche eine Beurteilung der Funktionalität und Qualität auswerterneutral erfolgt. Diese Metriken resultieren aus einer komparativen Gegenüberstellung zwischen einer analogen und mittels *PHC* automatisierten Bewertung mehrerer Räumlichkeiten angesichts der altersgerechten bzw. barrierefreien und rollstuhlgerechten Nutzbarkeit.

### 6.1.1 Validierungsprozess

Die funktionale Validierung folgt dem in Abbildung 6.1 dargestellten Prozess. Hiernach wird die Bewertung der Räumlichkeit zweimal unabhängig voneinander vorgenommen: (1) analog und (2) digital. Als Referenz gilt die analoge Beurteilung, welche auf Einzelmessungen mit technischen Hilfsmitteln wie dem Zollstock bzw. einem lasergestützten Entfernungsmesser (kurz Disto) basiert und, visualisiert mittels der *3d Scanner App<sup>TM</sup>*, dem automatisiert generierten Ergebnis aus der prototypischen Demonstratoranwendung *PHC* gegenübergestellt wird. Dabei ist Gegenstand dieser evaluativen Auswertung nicht nur das kumulierte Ergebnis der Eignungsbewertung, sondern berücksichtigt auch die vorangegangenen Verarbeitungsstufen, rückläufig beginnend bei der regelbasierten Datenprüfung bis zur Identifikation der atomaren *räumlich-semantischen Elemente (RSE)* im Rahmen der Datenmodellierung nach Abbildung 5.8. Die Evaluation orientiert sich an dem

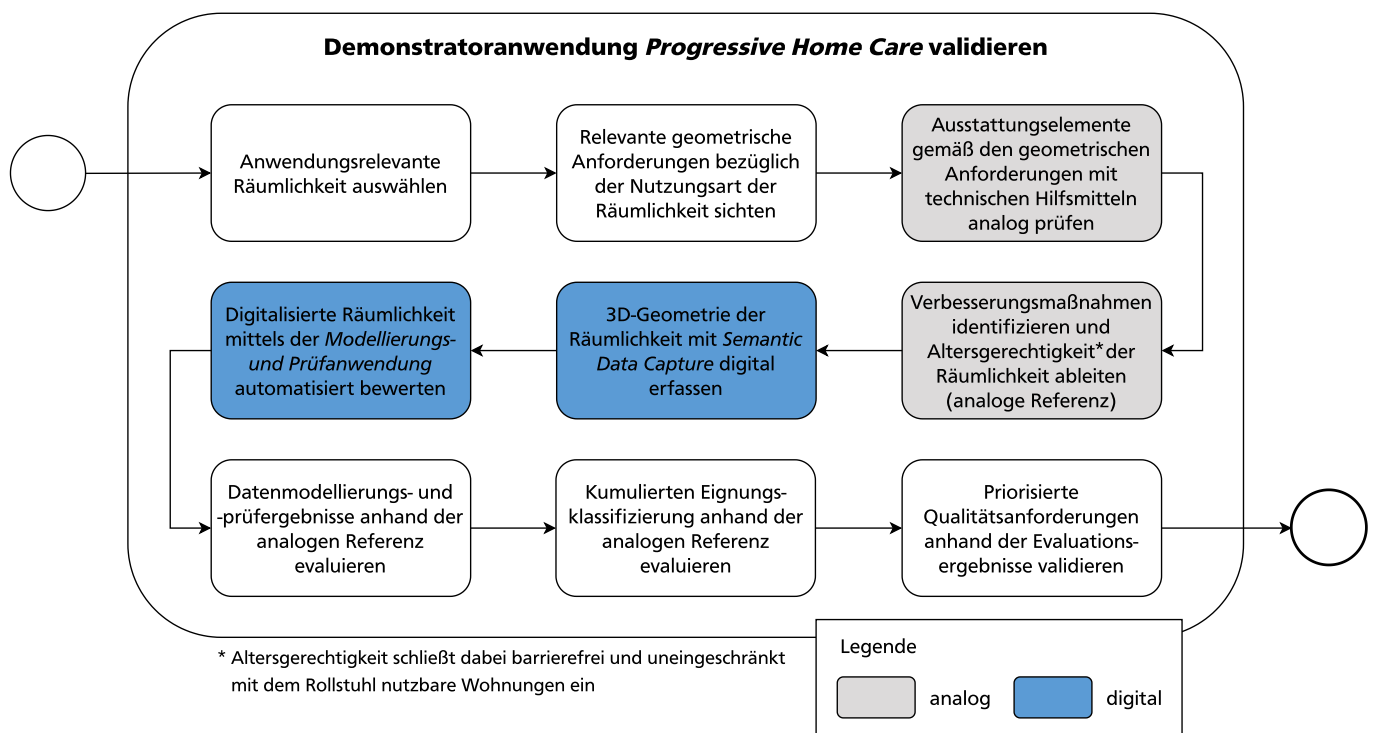


Abbildung 6.1: Prozessmodell der funktionalen Validierung der Demonstratoranwendung *Progressive Home Care*, modelliert nach ISO/IEC 19510:2013 OMG BPMN

---

Prinzip einer Klassifizierungsaufgabe zwischen einem Testklassifikator (Demonstratoranwendung *PHC*) und einer Grundwahrheit (analoge Referenz) und mündet in einer binären Wahrheitsmatrix (engl. Confusion Matrix). Anhand dieser können Metriken zur Bewertung der qualitativen Leistung des Testklassifikators abgeleitet werden. Von Bedeutung für die Validierung ist dabei die Frage nach der Vollständigkeit der instanzsegmentierten, atomaren *RSE* zur strukturierten Modellierung des WIMs (Datenmodellierung) einerseits und der identifizierten Barrieren zur prüfenden Bewertung des Wohnraumes (Datenprüfung) andererseits. Aus der Wahrheitsmatrix, welche gegenüberstellt, ob die manuell erkannten Elemente bzw. Barrieren auch von *PHC* erkannt worden sind, werden *Precision*, *Recall* und *F1-Score* als harmonisches Mittel aus diesen beiden Kennzahlen sowie die *Overall Accuracy* abgeleitet. Darüber hinaus werden auch arithmetisch gemittelte Metriken, wie die *Average Precision (APrec)* und der *Average Recall (ARec)*, berechnet, um die neutrale Leistungsfähigkeit bezüglich einzelner Räumlichkeiten anzugeben. Die *Precision* (Genauigkeitsquote) quantifiziert dabei die Fähigkeit des Klassifikators, *RSE* ihrer korrekten semantischen Klasse zuzuordnen bzw. tatsächliche Barrieren richtig zu detektieren, während der *Recall* (Vollständigkeitsquote) misst, wie viele *RSE* der jeweiligen Klassen gefunden werden. Die *Overall Accuracy* (Gesamtgenauigkeit) gibt im Übrigen an, wie viele Aussagen unabhängig von der semantischen Klasse insgesamt korrekt sind. Selbiges gilt für die Identifikation von mobilitätsreduzierenden Barrieren. Auf eine ausführliche mathematische Definition zur Berechnung entsprechender Metriken wird an dieser Stelle verzichtet und auf einschlägige Literatur verwiesen. Für die Evaluation der Datenmodellierung wird auch der *mittlere absolute Fehler* (engl. *Mean Absolute Error (MAE)*), die Flächen- und Längenabweichung betreffend, angegeben.

## 6.1.2 Anwendungsbeispiele

Zur funktionalen Erprobung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Demonstratoranwendung dienen mehrere Räumlichkeiten, welche sich in ihren Nutzungsarten unterscheiden. Dabei findet die Selektion solcher vor dem Hintergrund der durch die standardisierten, geometrischen Anforderungen adressierten Wohnraumelemente statt. Zur Steigerung der Aussagekraft der Ergebnisse werden insgesamt neun Räumlichkeiten analysiert (siehe Anhang C), wobei dieser Abschnitt aus Gründen der Kompaktheit die Resultate von lediglich dreien sowohl illustrativ als auch tabellarisch darstellt. Die unterschiedliche räumliche Auflösung der anschließenden Anwendungsbeispiele begründet sich durch den Dichteparameter (vgl. Abschnitt 5.3.1), welcher gemäß der empirischen Laufzeitanalyse aus Abschnitt 5.3.2 mit 1.000 definiert wird. Die Bewertung der Altersgerechtigkeit erfolgt zum einen tabellarisch anhand der für diese Räumlichkeit relevanten Regeln im Vergleich zur analogen Referenz. Zum anderen werden darüber hinaus die (eignungs-)klassifizierte Punktwolken sowie die Wohnraum-Eignungsberichte als unmittelbare Ergebnisse aus *PHC* nach der Datenraffinerie durch die *Modellierungs- und Prüfanwendung* abgebildet.

### Räumlichkeit der Nutzungsart Badezimmer

Eine rund 4 m<sup>2</sup> große Räumlichkeit der Nutzungsart *Badezimmer* stellt das erste exemplarische Anwendungsbeispiel dar. Diese Räumlichkeit verfügt über eine nach innen öffnende Tür, ein dahinter gelegenes Fenster und ist durch sechs Wandflächen begrenzt. Darüber hinaus enthält es typische

Visualisierte Referenz (Soll)

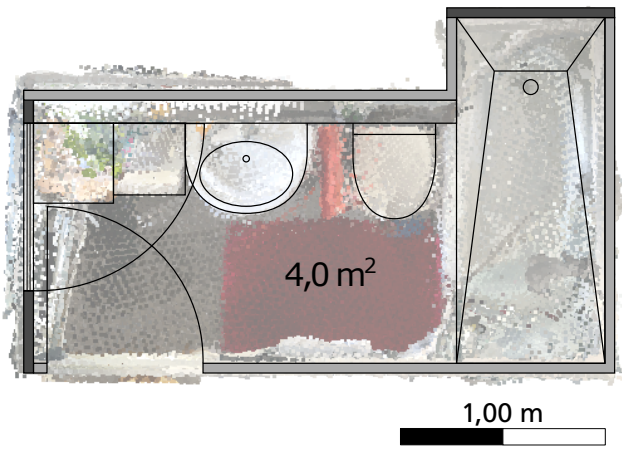


Abbildung 6.2: Grundrissdarstellung mit RGB-texturierter Punktwolke eines Badezimmers

Demonstratoranwendung (Ist)

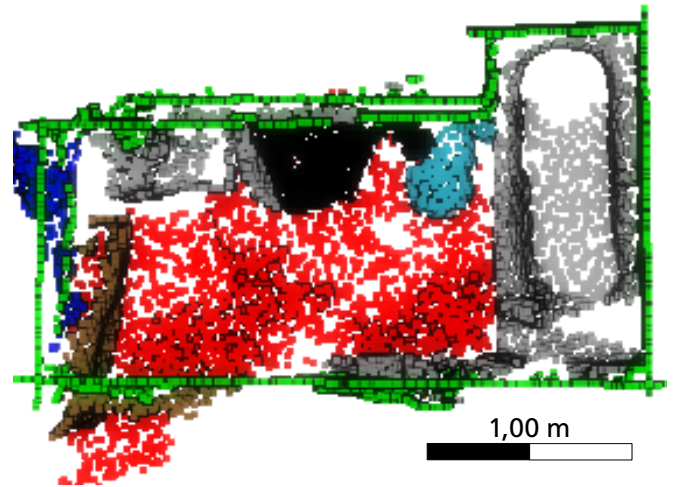


Abbildung 6.3: Punktwolkenrepräsentation des modellierten WIMs eines Badezimmers

Tabelle 6.1: Komparative Gegenüberstellung identifizierter RSE zur Modellierung eines Badezimmers

Semantische Klassen	Fußboden	Tür	Toilette	Waschbecken	Fenster	Stuhl	Tisch	Wand	Decke	Sonstiges
Farbkodierung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Anzahl RSE [Soll   Ist]	1   1	1   1	1   1	1   1	1   1	0   0	0   0	6   6	1   1	2   2

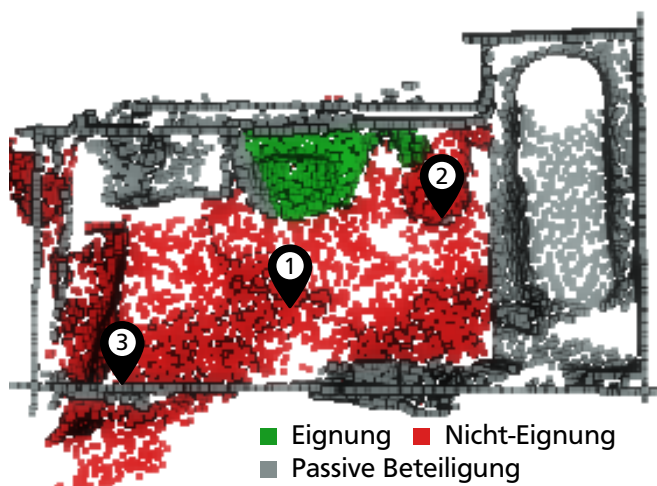


Abbildung 6.4: (Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke aus dem bewerteten WIM eines Badezimmers

Das **Badezimmer** ist nicht altersgerecht nutzbar, weil:

- ① der Fußboden keine ausreichenden Bewegungsflächen aufweist.
- ② die Toilette zu niedrig und durch Gegenstände verstellt ist.
- ③ die Tür zu niedrig ist.

Abbildung 6.5: Wohnraum-Eignungsbericht aus dem bewerteten WIM eines Badezimmers



Tabelle 6.2: Komparative Bewertung eines Badezimmers auf altersgerechte Nutzbarkeit

R-Nr.	Anforderung an [...]	Soll		Ist	
		relevant	erfüllt	relevant	erfüllt
1.2	Längsneigung	✗		✓	✗
2.1	Bewegungsfläche	✓	✗	✓	✗
3.1	Lichte Türbreite	✓	✗	✓	✓
3.2	Lichte Türhöhe	✓	✗	✓	✗
4.2	Höhe WC Becken	✓	✗	✓	✗
4.4	Höhe Waschplatz	✓	✗	✓	✓
5.2	Öffnungsrichtung	✓	✓	✓	✓
5.3	Höhe Bedienelemente	✗		✗	
5.4	Unterfahrbarkeit	✓	✗	✓	✗
<b>Badezimmer</b> altersgerecht nutzbar?		✗		✗	

sanitäre Ausstattungselemente (Waschbecken, Toilette und Duschbadewanne) sowie eine horizontal versetzte Spiegelfläche oberhalb der Waschbeckenzeile. Abbildung 6.2 visualisiert den zusätzlich durch eine RGB-texturierte Punktwolke aus der *3d Scanner App<sup>TM</sup>* hinterlegten Grundriss. Dem gegenüber ist in Abbildung 6.3 die semantisch und instanzsegmentierte Punktwolkenrepräsentation des modellierten WIMs gezeigt. In vergleichender Betrachtung beider Abbildungen und Tabelle 6.1 wird deutlich, dass alle relevanten *RSE* korrekt identifiziert und im WIM modelliert sind. Hinsichtlich der über die semantische Verfeinerung in *Semantic Data Capture* segmentierten Klassen *Waschbecken* und *Toilette* ist ein Versatz in der räumlichen Positionierung zu erkennen (vgl. Abbildung 6.3), welcher aus der Erfassungsperspektive und Anordnung der von *ARKit* generierten Mesh-Anker resultiert. Folglich liegt eine vollständig atomare, wenngleich nicht gänzlich richtig lokalisierte Datenbasis für die automatisierte Prüfroutine durch *PHC* vor.

Die Bewertung des *Badezimmers* ist in den Abbildungen 6.4 und 6.5 sowie der Tabelle 6.2 ersichtlich. Mit Blick auf die beiden Abbildungen räumt die Demonstratoranwendung *PHC* dem Badezimmer keine altersgerechte Nutzbarkeit ein, da diese Räumlichkeit, wie im Wohnraum-Eignungsbericht in Abbildung 6.5 formuliert bzw. als (eignungs-)klassifizierte Punktwolke in Abbildung 6.4 visualisiert, keine ausreichend dimensionierten Bewegungsflächen, eine nicht zugängliche und zu niedrige Toilette sowie Tür aufweist. Mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen lassen sich an dieser Stelle nicht ableiten, da diese über individuelle Anpassungsmaßnahmen hinausgehen und eine strukturelle Veränderung benötigen würden. Die automatisiert identifizierten Barrieren (Ist) sind den manuell detektierten Schwachstellen (Soll) gegenübergestellt (vgl. Tabelle 6.2). Während die Referenz-Bewertung ebenfalls zu dem Ergebnis kommt, dass diese Räumlichkeit aufgrund ihrer geringen räumlichen Dimensionierung sowie grundsätzlich zu schmalen bzw. niedrigen Ausstattungselementen die Auszeichnung der Altersgerechtigkeit nicht erhält, finden sich Abweichungen in der Kausalität dieser Schlussfolgerung. Diese liegen darin begründet, dass die Breite der Tür (vgl. R-Nr. 3.1 in Tabelle 6.2) sowie die Höhe des Waschbeckens (vgl. R-Nr. 4.4 in Tabelle 6.2) im WIM wenige Zentimeter überdimensioniert sind. Die Tür betreffend ist die Zarge und hinsichtlich des Waschbeckens die Armatur für die Abweichung von jeweils 3,5 cm bzw. 2,7 cm verantwortlich. Die

---

Längsneigung, welche nach DIN 18040-2:2011-9 nur für Flurflächen gilt, ist dessen ungeachtet berechnet und überschreitet aufgrund eines Hochflorteppichs (siehe Abbildung 6.2) den spezifizierten Schwellenwert von 1,7°.

### **Räumlichkeit der Nutzungsart Schlafzimmer**

Das zweite exemplarische Anwendungsbeispiel stellt eine Räumlichkeit der Nutzungsart *Schlafzimmer* mit einer rechteckigen Grundfläche von ca. 12 m<sup>2</sup> dar. In Zusammenhang mit dieser Räumlichkeit ist als Besonderheit zu nennen, dass die begrenzende Wandfläche im östlichen Bereich fast vollständig durch einen Kleiderschrank verdeckt wird und im westlichen Teil vorrangig aus bodentiefem, flächig verhängenem Fensterglas besteht, vor welchem darüber hinaus ein Kompaktheizkörper platziert ist. Das exemplarische Anwendungsbeispiel verfügt über zwei nach innen öffnende Türen, wobei die linksseitige Tür durch ein Möbelstück verstellt und geschlossen ist (vgl. Abbildung 6.6). Das modellierte WIM ist in der nebenliegenden Abbildung 6.7 dargestellt und offenbart unter Zuwendung der Tabelle 6.3 Abweichungen bezüglich der identifizierten *RSE*. Diese betreffen die geometrische Repräsentation der linken Glastür, welche durch innenräumliche Spiegelungen Artefakte erzeugt, die selbst als Teil der Türsemantik erkannt werden. Darüber hinaus sind Teile des vermaschten Bettes als *Stuhl* sowie der Kompaktheizkörper vor dem Fenster als *Wand* klassifiziert. Eine weitere Abweichung betrifft die Klasse *Sonstiges*, innerhalb welcher lediglich zwei von vier *RSE*-Instanzen segmentiert worden sind. Im Vergleich zu den vorweg genannten Fehlklassifizierungen, welche im Rahmen der *Modellierungs- und Prüfanwendung* nicht abgefangen werden, folglich in das WIM hineinreichen und Einfluss auf den Bewertungsprozess nehmen, spielt die nicht ausreichende Instanzsegmentierung in Folge der genannten Limitation beim Clustervoting (siehe L3 in Abschnitt 5.4) keine bedeutende Rolle, da Elemente der Klasse *Sonstiges* keine geometrischen Regeln inkorporieren und somit nur passive am Bewertungsprozess partizipieren.

Die Resultate aus der Bewertung des *Schlafzimmers* sind in den Abbildungen 6.8 und 6.9 sowie der Tabelle 6.4 dokumentiert. Gemäß beiden Abbildungen bescheinigt die automatisierte Routine in *PHC* dem Schlafzimmer keine barrierefreie und uneingeschränkte Nutzbarkeit mit dem Rollstuhl in Folge fehlender Bewegungsflächen sowie einer zu niedrigen Tür bzw. im Rahmen der Öffnungsbereiche nicht zugänglichen Türen. Diese Erkenntnisse sind in der (eignungs-)klassifizierten Punktwolke visualisiert (Abbildung 6.8) und ergänzend dazu als Wohnraum-Eignungsbericht verschriftlicht (Abbildung 6.9). Zu der finalen Schlussfolgerung der nicht altersgerechten Eignung gelangt auch die analoge Bewertung, wobei die detektierten Schwachstellen nicht deckungsgleich sind, da die Breite anstelle der Höhe der linken Tür als Regelverletzung identifiziert worden ist (vgl. R-Nr. 3.1 bzw. 3.2 in Tabelle 6.4). Diese Unstimmigkeit geht einher mit dem im oberen Absatz beschriebenen Artefakt durch eine Glasspiegelung, modelliert und bewertet dadurch die Türdimension inkorrekt als Fehler 2. Art (engl. False Negative). Sämtliche weitere einschränkende Barrieren sind korrespondierend korrekt identifiziert, wobei anzumerken ist, dass die Zugänglichkeit zur rechten Tür durch das Bett nur innerhalb wenige Millimeter beschnitten ist. In Zusammenhang mit dem Wohnraum-Eignungsbericht stellt sich an dieser Stelle die erste mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahme vor, welche bezüglich der nicht ausreichenden Bewegungsfläche genannt wird. Durch die Fehldetektion der mobile Klasse *Stuhl* besitzt diese individuelle und leicht umzusetzende Maßnahme jedoch keine Richtigkeit und damit auch keine Auswirkung auf die Vergrößerung der angelegten Bewegungsfläche.

Visualisierte Referenz (Soll)

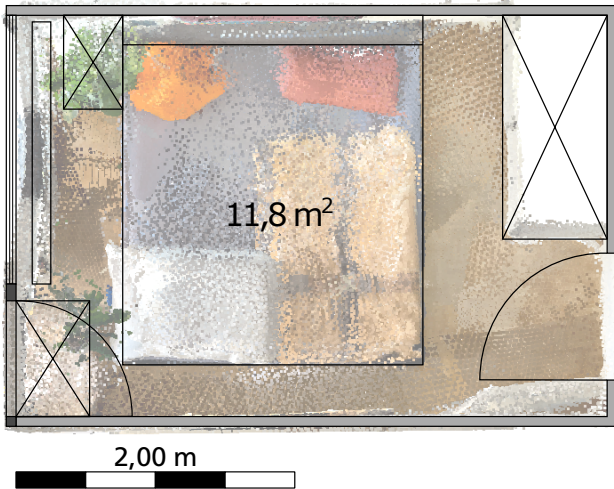


Abbildung 6.6: Grundrissdarstellung mit RGB-texturierter Punktwolke eines Schlafzimmers

Demonstratoranwendung (Ist)

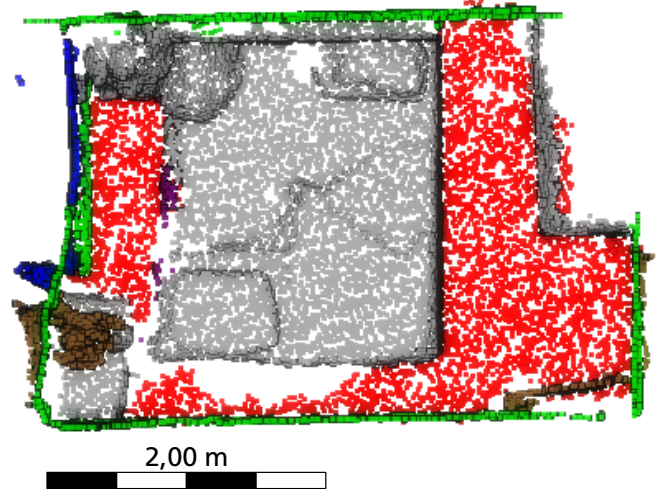


Abbildung 6.7: Punktwolkenrepräsentation des modellierten WIMs eines Schlafzimmers

Tabelle 6.3: Komparative Gegenüberstellung identifizierter RSE zur Modellierung eines Schlafzimmers

Semantische Klassen	Fußboden	Tür	Toilette	Waschbecken	Fenster	Stuhl	Tisch	Wand	Decke	Sonstiges
Farbkodierung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Anzahl RSE [Soll Ist]	1 1	2 2	0 0	0 0	1 1	0 1	0 0	4 5	1 1	4 2

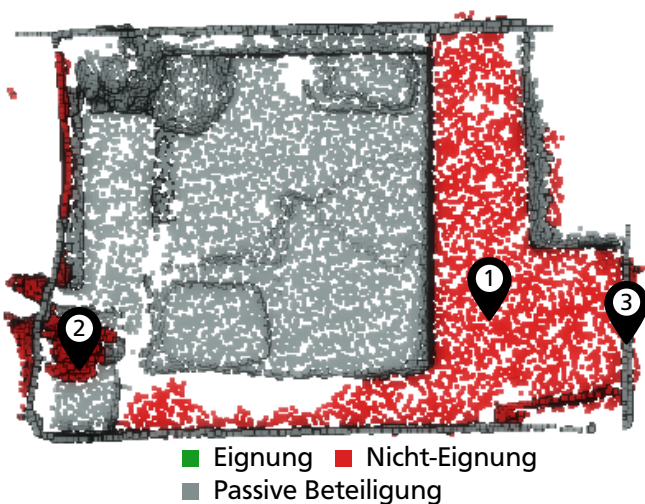


Abbildung 6.8: (Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke aus dem bewerteten WIM eines Schlafzimmers

Das **Schlafzimmer** ist nicht altersgerecht nutzbar, weil:

- ① der Fußboden keine ausreichenden Bewegungsflächen aufweist - verstelle den Sitz für mehr Freifläche.
- ② die Tür zu niedrig und durch sonstige Gegenstände verstellt ist.
- ③ die Tür durch sonstige Gegenstände verstellt ist.

Abbildung 6.9: Wohnraum-Eignungsbericht aus dem bewerteten WIM eines Schlafzimmers

Tabelle 6.4: Komparative Bewertung eines Schlafzimmers auf altersgerechte Nutzbarkeit

R-Nr.	Anforderung an [...]	Soll		Ist	
		relevant	erfüllt	relevant	erfüllt
1.2	Längsneigung	X		✓	✓
2.1	Bewegungsfläche	✓	X	✓	X
3.1	Lichte Türbreite	✓	X	✓	✓
3.2	Lichte Türhöhe	✓	✓	✓	X
4.2	Höhe WC Becken	X		X	
4.4	Höhe Waschplatz	X		X	
5.2	Öffnungsrichtung	✓	✓	✓	✓
5.3	Höhe Bedienelemente	X		X	
5.4	Unterfahrbarkeit	X		X	
<b>Schlafzimmer</b> altersgerecht nutzbar?		X		X	

### Räumlichkeit der Nutzungsart Wohnzimmer

Die dritte Räumlichkeit stellt mit rund 21 m<sup>2</sup> das flächenmäßig größte und ausstattungsreichste Anwendungsbeispiel dar. Gemäß der vorrangigen Nutzungsart ist die Räumlichkeit als *Wohnzimmer* zu beschreiben, wenngleich ein Ess- und Arbeitsbereich in das Raumkonzept integriert sind. Infolge der gemischten Nutzung sind verschiedene Struktur- und Ausstattungselemente enthalten, darunter eine nach innen zu öffnende, zum Zeitpunkt der Datenerfassung jedoch geschlossene Tür, ein nicht verhangenes Fenster, vier Sitzgelegenheiten sowie drei Tische und mehrere Schränke bzw. kleinere Möbelstücke (vgl. Abbildung 6.10). Wie in den vorangegangenen Anwendungsbeispielen illustriert die benachbarte Abbildung 6.11 das angereicherte WIM und ermöglicht in Verbindung mit Tabelle 6.5 eine dedizierte Analyse der identifizierten *RSE*. Dabei zeigen sich Differenzen, welche die semantischen Klassen *Stuhl* und *Tisch* betreffen und mit der bereits genannten Limitation des datenquotierten bzw. mehrheitsorientierten Clustervoting-Ansatzes (siehe L3 in Abschnitt 5.4) in Verbindung stehen. Der originäre, aus *Semantic Data Capture* resultierende, Datensatz (visualisiert als gesampelte Punktwolke in Abbildung C.3g) diskretisiert sämtliche Ausstattungselemente und enthält folglich auch die im WIM fehlenden Stühle und Tische, welche aufgrund ihrer räumlichen Dimension gegenüber den verbliebenen Instanzen dieser Klassen nachteilig behandelt und demnach während des Datenmodellierungsprozesses aussortiert werden. Vor diesem Hintergrund bildet das modellierte WIM nicht die vollständig situative Realität der Räumlichkeit ab.

Die Bewertung des *Wohnzimmers* wird durch die Abbildungen 6.12 und 6.13 sowie die Tabelle 6.6 transportiert. In Übereinstimmung bescheinigen sowohl die Demonstratoranwendung *PHC* (Ist) als auch die manuelle Referenz (Soll) dieser Räumlichkeit keine barrierefreie und rollstuhlgerechte Nutzbarkeit. Gemäß der analogen Referenz führt die nur teilweise vorliegende Bewegungsfläche, eine zu schmale Türbreite sowie zu niedrige und nicht unterfahrbare Bedienelemente, unter welchen im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch Elemente der Klasse *Tisch* verstanden werden (vgl. Abbildung 5.10c in Abschnitt 5.3.1), zu dieser Schlussfolgerung. Die automatisierte Bewertung mit der hier vorgestellten Demonstratoranwendung *PHC* identifiziert die begrenzte Bewegungsfläche sowie die durchgängig zu niedrigen und nicht unterfahrbaren Bedienelemente ebenfalls als mo-

Visualisierte Referenz (Soll)



Abbildung 6.10: Grundrissdarstellung mit RGB-texturierter Punktwolke eines Wohnzimmers

Demonstratoranwendung (Ist)

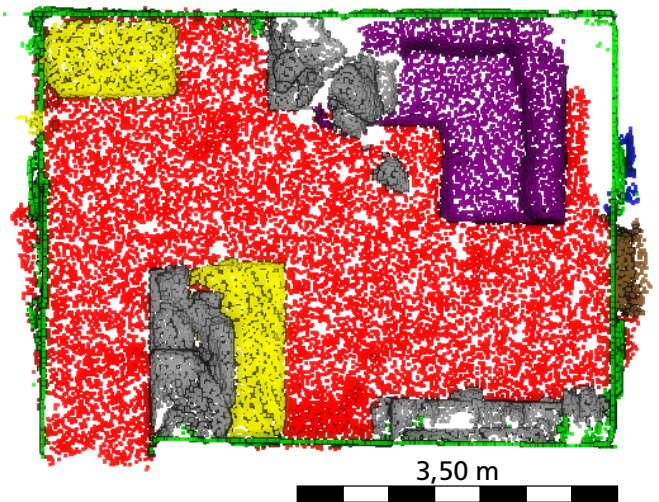


Abbildung 6.11: Punktwolkenrepräsentation des modellierten WIMs eines Wohnzimmers

Tabelle 6.5: Komparative Gegenüberstellung identifizierter RSE zur Modellierung eines Wohnzimmers

Semantische Klassen	Fußboden	Tür	Toilette	Waschbecken	Fenster	Stuhl	Tisch	Wand	Decke	Sonstiges
Farbkodierung	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Anzahl RSE [Soll Ist]	1 1	1 1	0 0	0 0	1 1	4 1	3 2	4 4	1 1	3 3

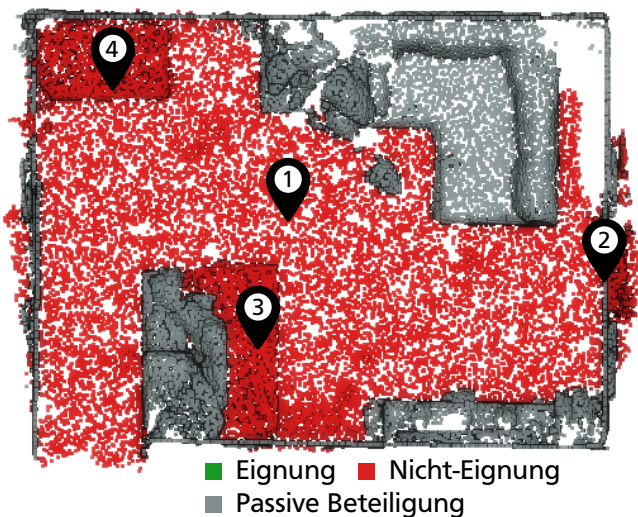


Abbildung 6.12: (Eignungs-)Klassifizierte Punktwolke aus dem bewerteten WIM eines Wohnzimmers

Das **Wohnzimmer** ist nicht altersgerecht nutzbar, weil:

- ① der Fußboden keine ausreichenden Bewegungsflächen aufweist - verstelle Tische und Sitze für mehr Freifläche.
- ② die Tür durch Gegenstände verstellt ist - verstelle den Sitz für mehr Freifläche.
- ③ der Tisch zu niedrig und nicht unterfahrbar ist durch sonstige Gegenstände.
- ④ der Tisch zu niedrig ist.

Abbildung 6.13: Wohnraum-Eignungsbericht aus dem bewerteten WIM eines Wohnzimmers

Tabelle 6.6: Komparative Bewertung eines Wohnzimmers auf altersgerechte Nutzbarkeit

R-Nr.	Anforderung an [...]	Soll		Ist	
		relevant	erfüllt	relevant	erfüllt
1.2	Längsneigung	✓	✓	✓	✓
2.1	Bewegungsfläche	✓	✗	✓	✗
3.1	Lichte Türbreite	✓	✗	✓	✓
3.2	Lichte Türhöhe	✓	✓	✓	✓
4.2	Höhe WC Becken	✗		✗	
4.4	Höhe Waschplatz	✗		✗	
5.2	Öffnungsrichtung	✓	✓	✗	
5.3	Höhe Bedienelemente	✓	✗	✓	✗
5.4	Unterfahrbarkeit	✓	✗	✓	✗
<b>Wohnzimmer</b> altersgerecht nutzbar?		✗		✗	

bilitätsreduzierende Schwachstelle, detektiert die Türbreite jedoch nicht als Regelverletzung (vgl. R-Nr. 3.1 in Tabelle 6.6), da bei geschlossener Tür die Zarge zu einer geometrischen Verbreiterung und damit regeltechnisch konformen Durchgangsbreite führt. Eine weitere Unstimmigkeit betrifft die Öffnungsrichtung, welche durch die geschlossene Tür nicht automatisiert abzuleiten ist (vgl. R-Nr. 5.2 in Tabelle 6.6). In Verbindung mit der (eignungs-)klassifizierten Punktwolke (Abbildung 6.12) beschreibt der Wohnraum-Eignungsbericht (Abbildung 6.13) auch mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen, die in diesem Beispiel als individuelle Anpassungsmaßnahme unverzüglich vorgenommen werden können, da sie mobile Ausstattungselemente der Klassen *Tisch* und *Stuhl* als flexibel anpassbare Gegenstände interpretiert.

### 6.1.3 Abschließende Evaluationsergebnisse

Über die im vorangegangenen Abschnitt detailliert ausgeführten Anwendungsbeispiele hinaus werden sechs weitere Räumlichkeiten gemäß dem entworfenen und in Abbildung 6.1 illustrierten Validierungsprozess qualitativ analysiert und komparativ ausgewertet. Zusammen mit den Ergebnissen aus dem vorangegangenen Abschnitt bilden sie eine Stichprobengröße zur Validierung der *funktionalen Eignung* und *Leistungsfähigkeit*, welche hieran anschließt. Eine Illustration sämtlicher analysierten Anwendungsbeispiele dieser Arbeit liegt in Anhang C vor. Die Ergebnisse dieser Evaluation sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert, die nun im weiteren Kontext erläutert und eingeordnet werden.

In Tabelle 6.7 sind verschiedene Leistungsmetriken der prototypisch implementierten Demonstratoranwendung, *RSE* räumlichkeitsunabhängig zu identifizieren, dargestellt. Dabei wird zum einen nach den implementierten semantischen Klassen zur Modellierung und Bewertung eines Wohnraumes sondiert. Zum anderen wird mit der *Overall Accuracy* eine durchschnittliche und klassenunabhängige Gesamtgenauigkeit aus der Wahrheitsmatrix abgeleitet. Diese liegt bei 83%, wonach *PHC* über vier von fünf wohnraumbezogene Elemente korrekt identifizieren und instanzsegmentieren kann. Mit Blick auf die klassenbezogenen Metriken ist zu erkennen, dass die Fähigkeit, relevante *RSE*

Tabelle 6.7: Zusammenfassende Evaluationsergebnisse der identifizierten *RSE* aus dem Vergleich zwischen analoger Referenz (Grundwahrheit) und *Progressive Home Care* (Testklassifikator) anhand von neun Räumlichkeiten, sondiert nach den implementierten semantischen Klassen

Semantische Klassen	Fußboden	Wand	Decke	Toilette	Waschbecken	Tür	Fenster	Stuhl	Tisch	Sonstiges
<b>Precision</b>	1,00	0,98	1,00	1,00	1,00	0,94	0,83	0,60	1,00	1,00
<b>Recall</b>	1,00	0,96	1,00	1,00	1,00	1,00	0,96	0,32	0,78	0,69
<b>F1-Score</b>	1,00	0,97	1,00	1,00	1,00	0,97	0,89	0,41	0,88	0,82
<b>Overall Accuracy</b>	0,83									

zuverlässig zu identifizieren und der tatsächlichen semantischen Klasse korrekt zuzuweisen (Metrik *F1-Score*), erheblich variiert. Klassen, welche sowohl den Wohnraumstrukturelementen zugeordnet sind (*Fußboden*, *Wand* und *Decke*) als auch solche, die über den bildbasierten Verfeinerungsansatz mit *YOLOv3* abgeleitet werden (*Toilette* und *Waschbecken*), erreichen einen sehr hohen bis maximalen *F1-Score* von  $\geq 97\%$ . Ebenso fällt die Klasse *Tür* in diese Gruppierung. Demzufolge werden wohnraumbezogene Elemente aus dieser Semantik nicht nur vollständig erkannt (*Recall*  $\approx 100\%$ ), sondern weitestgehend auch stets korrekt klassifiziert (*Precision*  $\approx 100\%$ ). Diese hohe Leistungsquote kann bei den weiteren Ausstattungselementen nicht gehalten werden. Hervorzuheben sind an dieser Stelle die niedrigeren Genauigkeits- und Vollständigkeitsquoten von Elementen der Klasse *Fenster*, *Tisch*, *Sonstiges* und *Stuhl*. Insbesondere Stühle werden nur sehr unzuverlässig erkannt, was vor allem daran liegt, dass im Zuge der *Modellierungs- und Prüfanwendung* Datencluster aussortiert werden, welche benachbarten Clustern gleicher Semantik quantitativ stark unterlegen sind (vgl. Anwendungsbeispiel der Nutzungsart Wohnzimmer in Abschnitt 6.1.2). Sofern eine größere Wohnlandschaft die Räumlichkeit ausstattet, werden gewöhnlich große Ess- oder Bürostühle das Nachsehen haben. Diese Limitation trifft und begründet damit auch die niedrigeren Kennzahlen der weiteren, bisher nicht explizit beispielten Klassen geringerer Genauigkeit. Mit Blick auf das originäre Ergebnis der Smartphone-gestützten Wohnraumerfassung zeigt sich allerdings, dass signifikant höhere Leistungsmetriken zu erwarten sind, sofern die nachgelagerte Prozessierung bezüglich dieses qualitativen Defizits optimiert wird. Als Beweis sei dafür auf die Vollständigkeit des semantisch segmentierten Meshs aus *Semantic Data Capture*, visualisiert in den drei Panelgrafiken des Anhangs C, verwiesen.

Über die semantisch sondierten Leistungsmetriken im Zusammenhang mit der Identifikation von *RSE* hinausgehend, werden in Tabelle 6.8 Metriken gelistet, welche sich sowohl nach Anwendungsbeispielen verschiedener Nutzungsarten (Bade-, Schlaf- und Wohnzimmer) als auch den entsprechenden Prozessierungsroutinen (Datenmodellierung und Datenprüfung) gruppieren. Darüber hinaus wird auch die finale Schlussfolgerung im Sinne der kumulierten Eignungsklassifizierung angeführt. In Folge der Gruppierungen werden an dieser Stelle nur arithmetisch gemittelte Metriken, wie der *MAE*, die *APrec* oder der *glsARec*, gelistet. Der *F1-Score* bleibt als harmonisches Mittel zwischen *APrec* und *ARec* begrifflich identisch. Bestandteil der weiteren Erläuterung soll das jeweilige Mittel der taxierten

Tabelle 6.8: Gruppierte Evaluationsergebnisse für jeweils drei verschiedene Räumlichkeiten der Nutzungsart Bade-, Schlaf- und Wohnzimmer, getrennt nach Datenmodellierung und Datenprüfung

Fehlermaß	Badezimmer	Schlafzimmer	Wohnzimmer	Mittel
Anzahl Räumlichkeiten	3	3	3	–
Datenmodellierung				
MAE <sub>Fläche</sub> * [m <sup>2</sup> ]	0,16	0,36	0,40	0,31
MAE <sub>Länge</sub> ** [m]	0,03	0,07	0,04	0,04
APrec <sub>RSE</sub>	0,98	0,87	1,00	0,95
ARec <sub>RSE</sub>	0,95	0,89	0,73	0,86
F1-Score <sub>RSE</sub> ***	0,96	0,87	0,85	0,89
Datenprüfung				
APrec	0,75	0,58	0,77	0,70
ARec	0,58	0,89	0,71	0,73
F1-Score***	0,63	0,65	0,73	0,67
Kumulierte Eignungsklassifizierung				
Overall Accuracy	1,00	1,00	1,00	1,00

\* bezogen auf die Grundfläche der *Räumlichkeit*, \*\* bezogen auf die Längen hinsichtlich der implementierten Regeln für die Klassen *Tür* (R-Nr. 3.1 – 3.2), *Toilette* (R-Nr. 4.2), *Waschbecken* (R-Nr. 4.4) und *Tisch* (R-Nr. 5.3) aus Tabelle 3.1  
 \*\*\* als arithmetischer Mittelwert angegeben und damit über die korrespondierende APrec bzw. ARec rechnerisch nicht verifizierbar

Metriken sein, da in Abschnitt 6.1.2 bereits explizit auf verschiedene Nutzungsarten geblickt wurde. Nichtsdestotrotz finden sich in den Tabellen C.1–C.3 die zu den jeweiligen Räumlichkeiten und Nutzungsarten korrespondierenden Auswertungen.

Ausgehend von dem *F1-Score* werden im Rahmen der Datenmodellierung durchschnittlich neun von zehn *RSE* mit einem *MAE* von 4 cm zuverlässig identifiziert und korrekt klassifiziert (*F1-Score* = 89%). Die Genauigkeitsquote (*APrec* = 95%) liegt dabei höher als die Vollständigkeitsquote (*ARec* = 86%), wonach die Stärke der Demonstratoranwendung mehr auf der Qualität statt auf der Quantität einer Identifikation liegt. Die mittlere flächige Abweichung des modellierten Wohnraumes, welche für die Auswertung der notwendigen Bewegungs- und Freiflächen nachweislich relevant ist, liegt bei 0,31 m<sup>2</sup> und damit in einem akzeptablen Rahmen bezüglich der geometrischen Anforderungen. Im Nutzungsart-vergleichenden Überblick zeigt sich, dass die Leistungsmetriken vom Bade- zum Wohnzimmer zu einem dezenten Abfall tendieren, welcher in Zusammenhang mit dem flächenmäßigen Umfang sowie der Anzahl vorhandener *RSE* liegen kann. Weitere Untersuchungen sind notwendig, um diese Tendenz zu bestätigen oder zu erklären.

Vergleichend zur Datenmodellierung schneidet die Datenprüfung prozentual schlechter ab. Hier werden lediglich zwei von drei mobilitätseinschränkende Barrieren zuverlässig und richtig erkannt (*F1-Score* = 67%). Dabei liegt die durchschnittliche Genauigkeitsquote (*APrec*) der identifizierten Bar-



riere, welche nach Möglichkeit als Verbesserungsmaßnahme Platz in dem Wohnraum-Eignungsbericht findet, bei 70% und die mittlere Vollständigkeitsquote (*ARec*) bei 73%. Diese Stagnation der Leistungsmetrik führt darauf zurück, dass der Demonstrator nicht immer in der Lage ist, alle Schwachstellen zu identifizieren. Deutlich in Erscheinung getreten ist diese Abweichung bei der Detailvorstellung der einzelnen Anwendungsbeispiele in Abschnitt 6.1.2 (vgl. tabellarisch gelistete komparative Bewertungen zwischen Soll und Ist).

Wird das Resultat der Demonstratoranwendung auf die finale Schlussfolgerung gemäß der Frage „Ist dieser Wohnraum altersgerecht?“ reduziert, so kann für diese kumulierten Eignungsklassifizierungen eine *Overall Accuracy* von 100% nachgewiesen werden, welche gleichbedeutend mit einer stets korrekten Bewertung ist. Dabei ist jedoch anzumerken, dass aufgrund der vorrangig zu geringen Bewegungs- und Freiflächen keine der analysierten Räumlichkeiten die Auszeichnung der altersgerechten Nutzbarkeit erhält und damit die Aussagekraft nicht unmittelbar belastbar ist. Zusammenfassend kann trotz einzelner Defizite bei der Identifikation von *RSE* sowie mobilitätsreduzierenden Barrieren bzw. -fördernden Verbesserungsmaßnahmen ein qualitativ gutes Ergebnis für einen prototypisch implementierten Demonstrator auf technologischem sowie fachlichem Neuland nachgewiesen werden.

## 6.2 Validierung der Qualitätsanforderungen

Aufbauend auf den Evaluationsergebnissen wird nun der funktionale Teil der Qualitätsanforderungen validiert, die in Verbindung mit der primären Zielsetzung dieser Arbeit stehen. Wie einleitend ausgeführt, sind das vor allem die Anforderungen der *funktionalen Eignung* und *Leistungsfähigkeit*. Die übrigen nicht-funktionalen Anforderungsmerkmale werden zusammengefasst und argumentativ eingeordnet. Dies erfolgt vor dem Hintergrund des Konzeptkapitels und berücksichtigt sämtliche Entwurfs- sowie Implementierungsdetails der Demonstratoranwendung *PHC*. Einen vorgreifenden Überblick hinsichtlich der validierten Qualitätsanforderungen stellt Tabelle 6.9 dar.

Tabelle 6.9: Ergebnisübersicht der validierten Qualitätsanforderungen

QA-Nr.	Anforderungsmerkmal	Validierungsergebnis
1	Funktionale Eignung	(✓)
2	Leistungsfähigkeit	✓
3	Kompatibilität	✓
4	Gebrauchstauglichkeit	(✓)
5	Zuverlässigkeit	✓
6	Sicherheit	✓
7	Wartbarkeit	✓
8	Portabilität	(✓)

Die *Funktionale Eignung* definiert im Kontext der spezifizierten Nutzeranforderungen die systemisch bereitzustellenden Funktionalitäten. Diese referenzieren auf den standardisierten Regelkatalog, um mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen in Wohnräumen zu identifizieren. Darüber hinaus ist

---

sicherzustellen, dass die Ergebnisse mit der erforderlichen Genauigkeit ausgewertet und angemessen aufbereitet werden können. Diese Teilaspekte werden im Rahmen des prototypisch implementierten Demonstrators berücksichtigt, einerseits durch die Adaption der geometrischen Anforderungen nach DIN 18040-2:2011-9 und andererseits durch die Auswahl eines messtechnischen Verfahrens, welches die zur Regelprüfung erforderliche Genauigkeit von  $\leq 2$  cm sicherstellt, sofern mit dem inkorporierten Flash-LiDAR-Scanner aus dem Hause Apple Inc. eine Messentfernung von 2,5 m nicht überschritten wird. Darüber hinaus werden die in Tabelle 6.8 dokumentierten Leistungsmetriken als Nachweis der technischen Realisierbarkeit und somit der funktionalen Eignung angeführt. Da aufgrund der limitierten räumlichen bzw. semantischen Auflösung des LiDAR-Scanners nicht alle Anforderungen aus dem standardisierten Regelkatalog abbildbar sind (vgl. R-Nr. 3.3 oder R-Nr. 4.1 aus Tabelle 3.1), wird dieser Nachweis mit einer Einschränkung versehen.

Das im Rahmen dieser Arbeit definierte Anforderungsmerkmal *Leistungsfähigkeit* weicht angesichts der prototypisch gefärbten Zielsetzung von der Norm ab. Hierbei wird die Befähigung der technischen Hard- und Softwarekomponenten betrachtet, Geometriedaten eines durchschnittlich großen Haushalts zu erfassen und darin möglichst unmittelbar Verbesserungsmaßnahmen zu identifizieren. Die räumlichkeitsbezogene Erfassung, Modellierung und Bewertung wird durch die bimodulare Demonstratoranwendung vollumfänglich abgedeckt (vgl. Abbildungen C.1–C.3) und ermöglicht folglich den Transfer auf einen gesamten Haushalt. Dabei nimmt der gesamte Zyklus, welcher ganzheitlich vor Ort stattfinden kann, nur wenige Minuten Zeit in Anspruch (vgl. Tabelle 5.2). Infolgedessen wird die definierte Leistungsfähigkeit nachgewiesen und somit dieses als funktional zu betrachtende Anforderungsmerkmal als erfolgreich validiert gekennzeichnet.

Die übrigen Anforderungsmerkmale werden im Rahmen der Implementierung ebenfalls berücksichtigt. Gleichzeitig erfolgt hinsichtlich dieser keine quantitative Analyse, da eine solche im Kontext des prototypischen Umsetzungsziels keinen unmittelbaren Mehrwert für diese Arbeit erbringt. Das Anforderungsmerkmal der *Kompatibilität* wird als erfolgreich validiert betrachtet, da die Demonstratoranwendung zum einen Teil als iOS-App namens *Semantic Data Capture* implementiert ist. Diese tauscht die erfassten 3D-Daten über offene Standards mit der *Modellierungs- und Prüfanwendung* aus, welche wiederum ihre Ergebnisse in programm- und plattformübergreifend unterstützten Formaten exportiert. Abschnitt 5.2 und 5.3 liefern dazu den entsprechenden Nachweis. Darüber hinaus wird vor dem Hintergrund der avisierten Zielgruppe eine Anwendung angestrebt, welche schnell erlernbar ist und eine nutzergruppenspezifische Interaktionsfähigkeit besitzt. Diese unter dem Merkmal der *Gebrauchstauglichkeit* positionierten Anforderungen werden angesichts des erreichten Automatisierungsgrads einerseits und im Kontext des Designs der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) andererseits adressiert. Da die Automatisierung aufgrund der notwendigen und von der erfassten Räumlichkeit individuell abhängigen Steuerungsparameter (vgl. Abschnitt 5.3.1) nicht vollumfänglich realisiert ist und keine statistisch signifikanten Nutzertests zur Bewertung der *User Interfaces* vorliegen, ist der Validierungsnachweis für die *Gebrauchstauglichkeit* lediglich als eingeschränkt zu bewerten. Vor dem Hintergrund des Nachweises der technisch-funktionalen Eignung sowie der komponentenbezogenen Leistungsfähigkeit erreicht die prototypisch implementierten Demonstratoranwendung das erklärte Ziel, wodurch definitionsgemäß aus QA-Nr. 5 in Tabelle 3.2 auch die *Zuverlässigkeit* als validiert gilt. Der Schutz der erhobenen, wohnraumbezogenen Daten wird sichergestellt durch die ausschließlich auf dem Verbraucherendgerät stattfindende Datenverarbeitung und -verwaltung. Folglich ist keine gesonderte Authentifizierung zur Validierung der

---

*Sicherheit* der Demonstratoranwendung zu implementieren. Die in Abbildung 5.6, 5.7 sowie 5.8 dargestellten Aktivitätsdiagramme veranschaulichen neben dem Kontroll- und Datenfluss auch die Beachtung der Prinzipien der modularen Programmierung. Darüber hinaus ermöglicht die Kapselung des Quellcodes in funktionale Module bzw. Pakete (engl. Packages) auch die Modifizierbarkeit ohne Funktionseinschränkungen, wonach das Anforderungsmerkmal der *Wartbarkeit* als berücksichtigt betrachtet wird. Die prototypische Implementierung der beiden Komponenten von *PHC* basiert auf zwei unterschiedlichen Programmiersprachen. Während die App *Semantic Data Capture* in Swift implementiert und damit ausschließlich für die iOS-Plattformen *iPhone Pro* und *iPad Pro* zur Verfügung steht, gründet die *Modellierungs- und Prüfanwendung* auf der *Cross-Plattform-Sprache* Python und ist damit auch plattformunabhängig ausführbar. Demnach ist die Validierung der *Portabilität* der Demonstratoranwendung mit einer Einschränkung zu versehen, wengleich diese geringfügig ausfällt.

## 6.3 Validierungsperspektiven

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt erklärt, erfolgt die objektive Validierung ausschließlich unter Berücksichtigung der für das grundlegende Ziel dieser Arbeit priorisierten funktionalen Qualitätsanforderungen (vgl. QA-Nr. 1 – 2 in Tabelle 6.9). Dennoch werden die darüberhinausgehend definierten, nicht-funktionalen Merkmale grundsätzlich im Rahmen der Implementierung bedacht und daher qualitativ analysiert. Der Abschnitt soll neben dieser Argumentation, welche gemäß der Validierungsdefinition nach ISO 9000:2015 als Limitation betrachtet wird, einen perspektivischen Ausblick auf mögliche objektive Ansätze mit der Intention in Richtung marktreifer Anwendung geben.

Die Validierung nicht-funktionaler Anforderungen beabsichtigt die Erbringung des Nachweises weiterer, allgemeiner Qualitätsmerkmale neben der reinen Funktionalität. Nach Spillner et al. (2019) existieren dafür eine Reihe systematischer Tests, welche in Verbindung mit Abschnitt 5.4 (Limitationen) als Anknüpfungspunkte für eine Weiterführung dieser Arbeit betrachtet werden dürfen. Der Ausblick grenzt die nicht-funktionalen Anforderungsmerkmale *Kompatibilität* und *Portabilität* aus, da das Implementierungsdesign der nativen Demonstratoranwendung spezielle Hardware-Komponenten sowie Software-Frameworks von Apple Inc. inkludiert und folglich nicht ohne opulente strukturelle Änderungen auf weitere Betriebssysteme übertragbar oder als responsive Applikation (engl. responsive App) umzusetzen ist. Die *Gebrauchstauglichkeit* wird klassischerweise durch sogenannte Nutzertests (engl. Usability Tests) validiert, welche von der adressierten Zielgruppe durchzuführen sind. In diesem Zusammenhang sind auch Akzeptanztests (engl. User Acceptance Tests (UAT)) vorzusehen, die anhand objektiver Kriterien überprüfen, ob die Anwendung aus Sicht des Benutzers wie beabsichtigt funktioniert und dieser sie folglich auch verwendet. Die Durchführung repräsentativer Nutzertests spielt eine entscheidende Rolle hinsichtlich des prognostizierten Effekts, den die nachweislich funktionale Demonstratoranwendung sowohl für die Lebensqualität des Individuums als auch das multifaktoriell überstrapazierte Gesundheitssystem erzielen kann. Folglich wird die Validierung der Gebrauchstauglichkeit als zwingend erforderlich eingeordnet. Durch Last- und Stresstests wird im Rahmen der Validierung von Software die *Zuverlässigkeit* des Anwendungsverhaltens bei Überlastung geprüft. Da der konzipierte und prototypisch realisierte Demonstrator keiner dauerhaften Auslastung unterworfen ist, wird in Bezug zu dem hier beschriebenen, bedarfsorientier-

---

ten Anwendungsfall empfohlen, weitere Räumlichkeiten zu analysieren und gemäß Abbildung 6.1 auszuwerten, um die Belastbarkeit der Evaluationsergebnisse zu erhöhen. Anwendungsbeispiele mit variierender Größe, Nutzungsart und von unterschiedlichem geometrischen Zuschnitt sind dabei von Interesse. Die Beurteilung des Aspekts der *Sicherheit* berücksichtigt derzeit ausschließlich das Paradigma der Datenprozessierung und -verwaltung. Darüber hinaus gilt es zu prüfen, inwiefern die Sicherheit der auf dem Verbraucherendgerät gespeicherten, wohnraumbezogenen Daten vor unerlaubten Zugriffen seitens Dritter gewährleistet ist und ob beispielsweise authentifizierende Maßnahmen zu treffen sind, um diese zu forcieren. Die Beachtung von Code-Standardisierung ist sowie die Sicherstellung einer hohen Codequalität ein entscheidender Faktor bei der kollaborativen Entwicklungsarbeit. Diese Aspekte fallen in den Rahmen des Anforderungsmerkmals *Wartbarkeit* an und werden, sofern relevant, typischerweise durch Reviews oder werkzeuggestützte statische Analysen innerhalb der Entwicklungsumgebung bewertet.

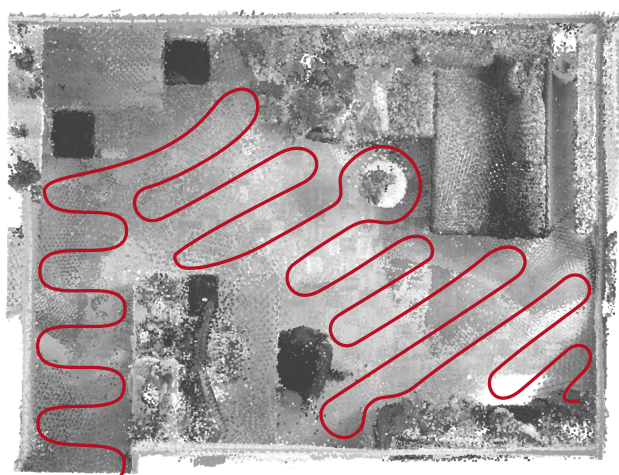
Die hier ausgeführten Perspektiven skizzieren zertifizierte Validierungsverfahren, die sich entlang den Qualitätsanforderungen nach ISO 9000:2015 definieren und in der Praxis zum Einsatz kommen. Die Mehrheit davon spielt ausschließlich dann eine Rolle, wenn die Absicht vorliegt, entsprechende Demonstratoranwendung zur Marktreife zu entwickeln. Über den funktionalen Eignungsnachweis hinaus empfiehlt es sich, die *Gebrauchstauglichkeit* durch repräsentative Nutzerstudien zu validieren, da sich u. a. anhand dieser der gesellschaftliche Mehrwert dieser Arbeit prognostizieren lässt.

## 6.4 Erfahrungswerte zur Smartphone-gestützten 3D-Geometrieerfassung

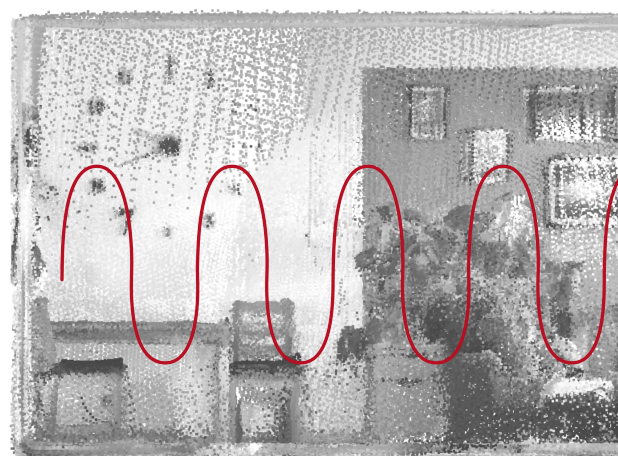
Während die vorliegende Arbeit zu einem Großteil aus theoretischer Konzeption und softwareseitiger Implementierung besteht, nehmen auch experimentelle Phasen einen wesentlichen Stellenwert darin ein, um die funktionalen Eigenschaften der entwickelten Anwendung zu überprüfen. Eine wichtige Komponente stellt im Rahmen dieser Praxisphasen die Smartphone-gestützte 3D-Datenerfassung dar, welche in unterschiedlichen Entwicklungsstadien und verschiedenen Aufnahmesituationen erprobt worden ist. Aus zahlreichen empirischen Versuchen sind Erfahrungen im Umgang mit dem Smartphone als 3D-Datenerfassungstechnologie hervorgegangen. Diese werden zum Abschluss dieses Kapitels, mit dem Ziel, als wertvolle Erkenntnis und bewährte Verfahrensweise auch unerfahrenen Anwendern zu einem hochwertigen Resultat bei vergleichsweise geringem Zeitaufwand zu verhelfen, zusammenfassend dargestellt.

Auch wenn die strukturierte 3D-Geometrieerfassung mit den LiDAR-ausgestatteten Verbraucherendgeräten von Apple Inc. u. a. durch die Augmented Reality (AR)-unterstützte Echtzeitanzeige des Erfassungsfortschritts prinzipiell eingängig und intuitiv bedienbar ist, empfiehlt es sich, die Route vor dem Start der Datenakquise zu planen. Als hilfreich hat sich in diesem Zusammenhang ein S-förmiges Bewegungsmuster in Verbindung mit einer leichten vertikalen und oszillierenden Verschwenkung des Sichtfeldes (FOV) erwiesen, um sämtliche Bereiche der Räumlichkeit gleichmäßig zu erfassen (vgl. Abbildung 6.14). Nach Abschluss der 3D-Erfassung des Raumpanoramas ist die Visur auf noch nicht digitalisierte Bereiche des Fußbodens und der Decke zu richten, um ein geschlossenes Mesh zu erhalten. Dieser Aspekt der Boden- bzw. Deckenerfassung ist in der unten dargestellten Abbildung

aus Übersichtlichkeitsgründen nicht enthalten. Im Kontext der Planung sei auch erwähnt, dass Türen bzw. Fenster vorab zu öffnen sind, um die geometrische Regel der Öffnungsrichtung (vgl. R-Nr. 5.2 in Tabelle 3.1) adäquat bewerten zu können. Wie auch *Semantic Data Capture* mangelt es dem Gros an iOS-Apps an einer rechnerischen Auswertung überlappend erfasster Bereiche zwecks Genauigkeitssteigerung, weshalb gleichzeitig zu beachten ist, dass eine Überlappung zu vermeiden bzw. die Erfassungszeit bei Unvermeidbarkeit einer solchen grundsätzlich zu minimieren ist. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass die Stabilität der inneren Orientierung des sich generierenden Meshs erhöht wird, indem die Datenerfassung an geometrisch markanten Oberflächenmerkmalen startet bzw. die Visur auf solchen innerhalb des Aufnahmevorgangs kurzzeitig pausiert. Eckpunkte oder Kanten zwischen z. B. Wandflächen repräsentieren solche markanten Merkmale. Ferner ist die Geometrieerfassung unter Berücksichtigung einer ruhigen und gleichmäßigen Bewegung durchzuführen, um sensorische Drifts zu vermeiden, die wiederum Auswirkungen auf die relative Genauigkeit der 3D-Daten haben. Zitternde Hände könnten die Genauigkeit und damit die Qualität der gewonnenen Daten weiter reduzieren. Während die Stärke der Flash-LiDAR-gestützten Datenerfassung vor allem bei großflächigen Aufnahmeobjekten liegt, welche im Vergleich zu kleinen, detaillierten Elementen durch weniger Mesh-Dreiecksflächen approximiert werden, erfordert die Erfassung von Details mehr Ressourcen und dementsprechend Messzeit. Dies ist folglich bei der Anpassung der Bewegungsgeschwindigkeit zu berücksichtigen. Unter Beachtung dieser wenigen, gleichzeitig jedoch wesentlichen Grundsätze, sind Effekte zu erzielen, die schlussendlich sowohl die Datenakquise erleichtern als auch die Datenqualität erhöhen. Über die genannten Aspekte hinaus erweist sich der Einsatz eines Teleskopstabs als funktionale Armverlängerung zur Einhaltung der Messentfernung als durchaus sinnvoll und das *iPhone Pro* aufgrund seines Gewichts und der Kompaktheit im Vergleich zum Tablet als besser geeignetes Endgerät hinsichtlich eines komfortablen Messvorgangs. Erste Untersuchungen zwischen kompatiblen iOS-Geräten unterschiedlichen Baujahres haben gezeigt, dass mit der Steigerung der



(a) S-förmiges Bewegungsmuster



(b) Oszillierende Verschwenkung des Sichtfeldes

Abbildung 6.14: Exemplarische Erfassungstrajektorie nach (a) S-förmigem Bewegungsmuster in Grundrissdarstellung und (b) oszillierende Verschwenkung des Sichtfeldes als Ansicht im dynamischen Prozess am Beispiel einer Räumlichkeit unter Berücksichtigung des Messbereichs von 0,25 m bis maximal 2,5 m

---

Leistungsparameter der technischen Komponenten auch eine Erhöhung der Geschwindigkeit und des Umfangs der Datenerfassung, ausgewertet anhand der numerischen Kontinuität der Bildwiederholungsrate (in fps gemessen) sowie der Anzahl erfasster Mesh-Dreiecksflächen, einhergeht. Infolgedessen sind in Zukunft neben einer Genauigkeitssteigerung durch eine neue Version des LiDAR-Scanners auch höhere Erfassungsraten und größere Datenkapazitäten zu erwarten, wodurch die hier behandelte Thematik weiter an Attraktivität gewinnt.

## 6.5 Zwischenfazit

Das Kapitel thematisiert die Validierung der im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten Demonstratoranwendung *PHC*. Während der Entwicklungsarbeit standardisierte Anforderungsmerkmale von sowohl funktionalem als auch nicht-funktionalen Charakter zugrunde liegen, werden hierbei vorrangig die funktionalen Eigenschaften durch eine prototypische Erprobung anhand verschiedener Anwendungsbeispiele bewertet. Dafür dienen Leistungsmetriken, welche aus einer komparativen Gegenüberstellung zwischen den Modellierungs- und Bewertungsergebnissen des Demonstrators und einer manuellen Referenzanalyse hervorgehen. Danach liegt die arithmetisch gemittelte Genauigkeit hinsichtlich der Datenmodellierung bei 89% und bezüglich der Datenprüfung bei 67%, wonach die funktionale Zweckerfüllung als Kern dieser Arbeit als erfolgreich geprüft bewertet wird. Die verbleibenden, gleichzeitig depriorisiert behandelten Anforderungsmerkmale werden durch eine argumentative Bewertung adressiert und ferner mit einem Ausblick hinsichtlich einer objektiven, testbasierten Validierung bedacht.

Anhand der in Abschnitt 6.1.2 geschilderten Anwendungsbeispiele wird unter realistischen Bedingungen gezeigt, dass das auf einem räumlich-semantischen WIM basierende und schlussendlich als prototypische Demonstratoranwendung implementierte Konzept in der Lage ist, die bisher gänzlich manuelle Bewertung der barrierefreien und rollstuhlgerechten Nutzung eines Wohnraumes unter Einsatz digitaler Technologien abzubilden. Inwiefern dieser Ansatz eine digitale Zäsur im Gesundheitswesen darstellen kann, gilt es im Kontext weiterer Studien unter Beteiligung der genannten Zielgruppe zu erörtern. Dabei ist insbesondere die Gebrauchstauglichkeit der vorgestellten Anwendung im Kontext der dargestellten Limitationen sowie der erreichten Leistungsmetriken zu analysieren.

---

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

---

Im Rahmen des abschließenden Kapitels wird der Bogen zwischen der eingangs beschriebenen und als Motivation gefassten Ausgangssituation bezüglich des Konzept *Ageing in Place* und der konzeptionell entwickelten und prototypisch umgesetzten Lösung geschlagen. Dafür werden die gewonnenen Erkenntnisse gesamtheitlich zusammengefasst und in Beziehung zu den definierten Forschungsaspekten gesetzt. In Zusammenhang mit der definierten Forschungsmethodik wird über den anwendungsbezogenen Nutzen (engl. Application Benefit) hinaus auch der wissenschaftliche Mehrwert (engl. Research Contribution) einzelner Teilaspekte aus dieser Arbeit eingeordnet, ehe weiterführende Überlegungen das Kapitel und damit die Thesis beschließen.

### 7.1 Zusammenfassung

Die Folgen einer sich kontinuierlich zuspitzenden demografischen Entwicklung sind in vielen Bereichen des öffentlichen Lebens zu beobachten. Besonders deutlich zeigen sich die Auswirkungen einer steigenden Lebenserwartung und zunehmend alternden Gesellschaft in Bezug auf das Gesundheitssystem und die Pflege, welche diesbezüglich vor tiefgreifenden und zugleich vielfältigen Herausforderungen steht. Das Konzept der zeitlichen Maximierung des Verbleibs in der eigenen Häuslichkeit, welches internationalisiert auch als *Ageing in Place* bezeichnet wird, gewinnt angesichts dieser Entwicklung sowohl im Kontext fachpersoneller und gesundheitsökonomischer Faktoren, als auch vor dem Hintergrund des prävalenten gesellschaftlichen Wunsches nach Autonomie, Selbstbestimmung und Lebensqualität in vertrauter Umgebung im hohen Alter stetig an Bedeutung. Die Voraussetzung dafür ist ein altersgerechter Wohnraum, der barrierefrei bzw. -reduziert ausgestattet und damit grundsätzlich gefahrenfrei nutzbar ist, allerdings bei einem Großteil der älteren, in der Regel mobilitätseingeschränkten Menschen, nicht vorliegt. Die Empfehlung zu sogenannten wohnumfeldverbessernden Maßnahmen setzt eine Identifikation solcher voraus, welche derweilen ausschließlich über Dritte angeboten wird oder die thematische Kenntnis zwecks Eigeninitiative voraussetzt. Darüber hinaus profitiert dieser Prozess bislang nicht von digitalen Wertschöpfungsketten, sondern setzt auf fachliche Erfahrungswerte und handwerkliches Messwerkzeug. Diese Beobachtung hat auch der GKV-Spitzenverband angestellt und daraus resultierend eine „*Empfehlung zu wohnumfeldverbessernden Maßnahmen unter besonderer Berücksichtigung digitaler Technologien beschlossen*“ (GKV-Spitzenverband 2021, S. 3), welche in Einklang mit den nachhaltigen Bestrebungen der kürzlich unter dem Motto *Gemeinsam Digital* veröffentlichten Digitalisierungsstrategie 2030 des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG) steht (vgl. BMG 2023). Diese Aufforderung nach technischen Lösungen für ein sozial-gesellschaftliches Problem beschreibt die Grundlage, welcher sich diese

---

Arbeit verschreibt. Als Ziel ist folglich eine technische Lösung zu kreieren, die mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen aus innerhäuslichen Barrieren situativ identifiziert, gleichzeitig auch präventiv einsetzbar ist und die vorherrschende manuelle Arbeitsweise durch den Einsatz digitaler Verfahren ergänzt bzw. zukünftig ablöst. Dazu sind einleitend drei Unterziele als Forschungsaspekte definiert worden, welche den konzeptionellen Rahmen dieser explorativen, Design-orientierten Arbeit aufspannen und nun ergebnisorientiert zusammengefasst werden.

#### 1. Entwicklung eines digitalen WIMs zur räumlich-semantischen Beschreibung von Wohnraum

Der erste an diese Arbeit gestellte Forschungsaspekt betrifft die Entwicklung eines zweckgebundenen Informationsmodells. Dieses fungiert sowohl zur gesamtheitlichen Beschreibung des situativ vorliegenden Wohnraumes als auch als Grundlage für die regelbasierte Prüfung anhand der geometrischen Anforderungen an eine altersgerechte Ausstattung. Dafür wurde ein generisches Wohnrauminformationsmodell (WIM) entwickelt, welches sämtliche Struktur- und Ausstattungselemente einschließlich deren Geometrie und Semantik in Form eines strukturierten Informationsverzeichnisses speichert. Aufgrund angelegter assoziativer Beziehungen werden auch topologische Beziehungen zwischen dem Wohnraum und untergeordneten Instanzen wie eine *Räumlichkeit* oder das atomare *räumlich-semantische Element (RSE)* abgebildet, wonach sich innerhalb des konzipierten WIM auch kumulative geometrische Anforderungen gemäß der definierten Zielsetzung prüfen lassen. Im Kontext des Building Information Modeling (BIM) lässt sich das WIM dem BIM Reifegrad Level 1 zuordnen, da es keine IFC-konforme und damit parametrische Modellierung enthält. Als alphanumerische und grafische Datenbasis ist dieses jedoch kompatibel mit sämtlichen vorgestellten Repräsentationsmodalitäten und folglich auch für verschiedene zukünftige innerhäusliche Anwendungsbereiche aus dem Bereich von Ambient Assisted Living (AAL) oder Digitalen Pflegeanwendungen (DiPA) einsetzbar. Die zugrundeliegende generische Struktur, welche im Rahmen der Arbeit nach ISO/IEC 15959-2:2012 OMG UML modelliert ist, ermöglicht darüber hinaus die Adaption der im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen funktionalen Erweiterungen. Hinsichtlich der zugrundeliegenden Forschungsmethodik nach Hevner et al. (2004) und Gregor et al. (2013) ist das konzipierte WIM als Software-Artefakt zu beschreiben. Da dieses als generisches Datenbankmodell entwickelt ist und darüber hinaus diverse funktionale Regeln inkorporiert, kann es als spezifisches Gestaltungsdesign betrachtet und folglich dem Level 1 mit Erweiterungsanspruch auf eine Design-Theorie höheren Abstraktionsgrades zugeordnet werden (vgl. Tabelle 1.1).

#### 2. Implementierung einer niederschwellig und für Mobilitätseingeschränkte nutzbaren Datenerfassungsanwendung auf Basis digitaler Technologien zur situativen Wohnraumdokumentation

Der zielführenden Umsetzung des zweiten Forschungsaspekts geht eine Evaluationsstudie voraus, welche verschiedene State-of-the-Art Verfahren zur 3D-Erfassung baulicher Anlagen unter Berücksichtigung messtechnischer und nutzungsrelevanter Merkmale bewertet. Die mit LiDAR-Sensorik ausgestatteten Verbraucherendgeräte von Apple Inc. (*iPhone 12+ Pro* und das *iPad Pro 2020+*) stellen im Kontext des angelegten Regelkatalogs einen hinreichend genauen 3D-Datensatz zur Verfügung und sind vergleichsweise benutzerfreundlich sowie intuitiv zu bedienen, weshalb sich diese als Plattform zur situativen 3D-Wohnraumdokumentation durch Mobilitätseingeschränkte, deren Verwandtschaft oder auch technisch nicht ausgebildeten Nutzergruppen qualifizieren. Darüber hinaus unterliegen diese Endgeräte im Vergleich zu professionellem Equipment einer hohen technischen Verfügbarkeit, welche sich angesichts des stetig wachsenden Bedarfs an einer altersgerechten



---

Wohnraumausstattungsbewertung zusätzlich als zielführender Indikator darstellt. Demzufolge wurde die iOS-App *Semantic Data Capture* entwickelt, welche den LiDAR-Scanner zur dreidimensionalen Digitalisierung des vorliegenden Wohnraumes verwendet. Um die Modellierung des erfassten Wohnraumes als intelligentes und zur regelbasierten Identifikation von altersgerechten Verbesserungsmaßnahmen befähigtes WIM zu vereinfachen, wird der Funktionsumfang erweitert und neben der reinen geometrischen Approximation auch eine semantische Echtzeit-Datenstrukturierung durch verschiedene Ansätze aus dem Bereich des Maschinellen Lernens (ML) implementiert. In dieser Arbeit wurden dazu unterschiedliche Verfahren vorgestellt und diskutiert. *Semantic Data Capture* stellt sich folglich als erste App vor, welche sowohl die Geometrie von innerhäuslichen Szenen dreidimensional vermaschen als auch das Mesh simultan semantisch segmentieren kann. Der resultierende Datensatz verfügt dementsprechend bereits über eine maschinell analysierbare Struktur, die vergleichbaren 3D-Daten aus anderen Apps semantisch deutlich überlegen und dementsprechend für die Anreicherung des WIMs prädestiniert ist. Die prototypisch entwickelte iOS-App stellt sich folglich als ein Software-Artefakt vom Level 1 dar, wobei das zugrundeliegende und im Rahmen dieser Arbeit vorgestellte Prinzip der simultanen 3D-Geometrieerfassung und semantischen Strukturierung auch für Problemstellungen aus fernerer Anwendungsdomänen einen Nutzen erzielen und damit nach Gregor et al. (2013) durchaus als aufsteigende Design-Theorie (Level 2) betrachtet werden kann.

### 3. Automatisierung der Identifikation von mobilitätsfördernden Verbesserungsmaßnahmen aus innerhäuslichen Barrieren in einem digitalen WIM

Durch den dritten Forschungsaspekt sollen Verbesserungsmaßnahmen aus mobilitätsreduzierenden Barrieren identifiziert werden, die zu einem altersgerechten Wohnraum und damit der Realisierung des *Ageing in Place* führen. Das erfolgt auf Grundlage des standardisierten bautechnischen Regelwerks für Wohnungen nach DIN 18040-2:2011-9 und setzt ein WIM voraus, welches, ausgehend von dem in zehn semantische Klassen strukturierten Datensatz aus der 3D-Datenerfassungsanwendung *Semantic Data Capture*, durch eine *Modellierungs- und Prüfanwendung* instanziiert wird. Aus dieser Routine gehen atomare *RSE* hervor, die jeweils individuell von einzelnen oder mehreren geometrischen Anforderungen adressiert und demnach mit einer Eignungsklassifikation belegt werden. Dazu werden entsprechende geometrische Dimensionen der *RSE* verwendet und mit den Mindestmaßen verglichen. Dieser Prozess erfolgt vollautomatisiert und mündet in einem diagnostischen Wohnraum-Eignungsbericht, welcher im Kontext einer individuellen Wohnraumanpassung sämtliche Verbesserungsmaßnahmen enthält und daraus die wohnraumbezogene Altersgerechtigkeit kumulativ ableitet. Darüber hinaus wird auch der 3D-Datensatz in Form der interoperabel austauschbaren Punktwolkenrepräsentation vorgehalten. Aufgrund der hierarchischen Struktur des WIMs können auch voneinander abhängige Verbesserungsmaßnahmen geschlussfolgert und als narrativ in direkte Handlungsempfehlungen überführt werden, welche dem Nutzer eine unmittelbare Rückmeldung zu den Schwachstellen des analysierten Wohnraumes gibt. Die Implementierung dieses Prozesses zur Adressierung des dritten Forschungsaspekts ist nach Gregor et al. (2013) vorrangig spezifischer Art und daher bislang ohne den Anspruch auf einen höheren Abstraktions- bzw. Reifegrad, weshalb der Beitrag dieses Software-Artefakts als Level 1 einzustufen ist (vgl. Tabelle 1.1).

Das aus der Zielsetzung dieser Arbeit abgeleitete Konzept folgt dem geschlossenen Prinzip des *Erfassen und Handeln*. Die Smartphone-gestützte 3D-Datenerfassung bildet darin das Rückgrat und

---

treibt die multimodale Eignungsklassifizierung an, welche den Anwendern als Grundlage für die Beseitigung identifizierter Verbesserungsmaßnahmen, respektive Barrieren, dient, die einer barrierefreien und mit dem Rollstuhl uneingeschränkt nutzbaren Wohnung entgegenstehen. Im Rahmen einer leistungsbezogenen Validierung wird sichergestellt, dass das entwickelte und prototypisch implementierte Konzept funktional in der Lage ist, den Wohnraum als Informationsmodell zu beschreiben und automatisiert mobilitätsfördernde Verbesserungsmaßnahmen zu diagnostizieren. Über den quantitativen Nachweis des anwendungsbezogenen Nutzens hinaus wird im Rahmen des hier erarbeiteten Beitrags auch der wissenschaftliche Mehrwert durch das synergetische, situativ einsetzbare Konzept aus Smartphone und existierenden, vortrainierten KI-Modellen demonstriert.

## 7.2 Abschließendes Fazit

Die hier vorgestellte Demonstratoranwendung *Progressive Home Care* basiert zu einem integralen Anteil auf der iOS-App *Semantic Data Capture*, mit welcher wohnraumbezogene Elemente geometrische wie auch semantisch identifiziert und so zur Prüfung von bautechnischen Anforderungen gemäß der altersgerechten Nutzbarkeit herangezogen werden können. Folglich kann der Demonstrator nach Rademaker (2021) als technische und soziale Innovation betrachtet werden, welcher sowohl die Prävention als auch das Selbstmanagement im Kontext des Verbleibes in der eigenen Wohnung fördert und darüber hinaus als Stufe auf dem Weg zu einem digitalisierten Gesundheitssystem betrachtet werden kann. Dabei präsentiert sich die Anwendung nicht als Expertensystem, sondern zielt mit einer zugrundeliegenden, digitalen DNA primär auf die vom *Ageing in Place* affektierten, mobilitäts-eingeschränkten Bevölkerungsteile ab. Darüber hinaus sind auch Entlastungseffekte hinsichtlich der fachpersonellen Wohnberatung zu erwarten, sollte sich der Demonstrator auch nach nutzerorientierten Studien als praxistaugliche Lösung erweisen. Das Konzept setzt zu einem integralen Teil auf LiDAR-ausgestattete Smartphones, deren ursprüngliche Intention darin besteht, spieletypische Augmented Reality (AR)-Erlebnisse zu optimieren. Im Rahmen dieser Arbeit wird darüberhinausgehend demonstriert, dass sich diese kostengünstige und technisch hochverfügbare Lösung auch für Produktiv- anwendungen eignet, sofern die Genauigkeitsanforderungen übereinstimmen. Das Smartphone und mit diesem in Verbindung stehenden Möglichkeiten zur Datenerfassung, unmittelbaren Auswertung und interoperablen Bereitstellung werden folglich unter dem Deckmantel von *mHealth* eine zentrale Rolle bei der Etablierung eines digitalen Gesundheitssystems spielen. Gemessen an dem Potenzial der hier vorgestellten und prototypisch fertig implementierten Lösung ist eine definitionstreue Ein-gruppierung in das Portfolio von Digitalen Gesundheits- (DiGA) bzw. Digitalen Pflegeanwendungen (DiPA) zukünftig durchaus denkbar. Die Codebasis der beiden Software-Artefakte von *Progressive Home Care (PHC)* ist verfügbar unter [gitlab.rlp.net/bastianplass/PHC](https://gitlab.rlp.net/bastianplass/PHC).

## 7.3 Weiterführende Überlegungen und Ausblick

Die technisch geleitete Unterstützung des Konzeptes *Ageing in Place* wird im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich unter dem Aspekt eines altersgerechten Wohnraumes betrachtet. Neben den geometrischen Anforderungen spielen auch weitere Bedingungen und technische Qualitäten, wie z. B.

---

rutschfeste Bodenbeläge, (strom-)versorgungstechnische Besonderheiten oder individuelle Anforderungen im Kontext multimorbider, physiologischer Konditionen, eine Rolle, welche mit dem hier vorgestellten Konzept nicht lösbar sind. Über den Wohnraum in mikrokosmischer Dimensionierung hinaus gilt es auch die Barrierefreiheit in Zusammenhang mit dem Gebäude oder gar mit Blick auf den ganzheitlichen Quartiersansatz zu bewerten, da für eine Maximierung des Verbleibs in dem gewohnten Umfeld auch die Erreichbarkeit von Versorgungseinrichtungen maßgeblich von Belang ist. Als dritter Aspekt sind darüber hinaus die gegebenen digitalen IT-Strukturen im Bereich der Gesundheitsverwaltungen zu nennen, welche eine Erweiterung erfahren dürfen, um in Zukunft auch mit den vom Smartphone oder vergleichbaren Sensoren generierten Daten arbeiten zu können. Die Anzeige von 3D-Punktwolken soll diesbezüglich als exemplarisches Beispiel dienen. Während im Rahmen dieser Arbeit lediglich Bestandswohnungen fokussiert werden, spielt auch bei Neubauten die Barrierefreiheit eine wichtige Rolle. Die hier entwickelte, regelbasierte Prüfroutine kann auch dabei Einsatz finden, sofern die dreidimensional, als BIM-Modell geplanten Neubauten als semantisch strukturierte Punktwolke der *Modellierungs- und Prüfanwendung* bereitgestellt werden.

Ein altersgerechter Wohnraum mit möglichst wenig mobilitätseinschränkenden Barrieren steht in untrennbarem Zusammenhang mit dem Wunsch vieler Menschen, bis ins hohe Alter selbstbestimmt in der eigenen Wohnung verbleiben zu können. In Deutschland besteht hinsichtlich barriere-reduzierten Wohnungen, die auch mit dem Rollstuhl uneingeschränkt nutzbar sind, allerdings eine beträchtliche Versorgungslücke, welche laut einem aktuellen Trendpapier des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW) gar als „*unterschätzte Herausforderung für Gesellschaft, Politik und Wirtschaft*“ bezeichnet wird (Deschermeier 2023, S. 115). In einvernehmlicher Zustimmung dazu kommt diese Arbeit letztlich zu der Schlussfolgerung, dass weiterführende Forschungsarbeiten dringend notwendig sind, um leistungsfähige und digitale Konzepte sowohl für den altersgerechten Wohnraum als auch das Konzept *Ageing in Place* zu erarbeiten. Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse beschreiben einen solchen Schritt innerhalb des kleinteiligen Kosmos *Wohnraum* und stellen somit einen wichtigen Baustein zur digitalen Transformation des Gesundheitssystems, der Pflege und dem selbstbestimmten Leben mobilitätseingeschränkter Menschen Zuhause dar.





---

# Anhang

---

## **A Darstellungen der 3D-Punktwolken einer Testräumlichkeit zur qualitativen Sensorevaluation**

## A.1 Trimble X7



(a) Draufsicht

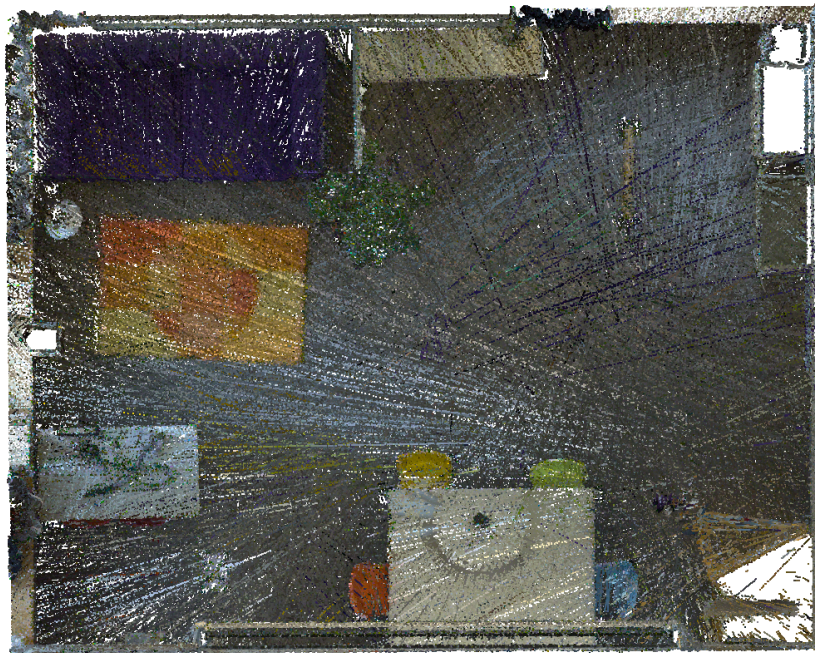


(b) Schnittansicht

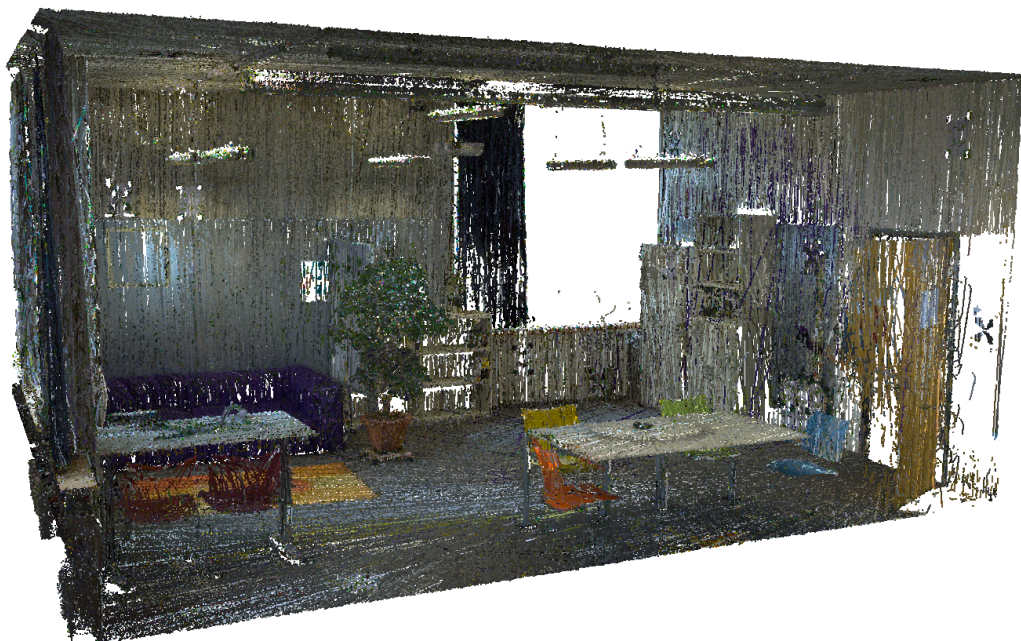
Abbildung A.1: Darstellungen der Referenzpunktvolke vom *Trimble X7* nach Datenhomogenisierung und -zuschnitt

---

## A.2 Leica BLK2GO



(a) Draufsicht

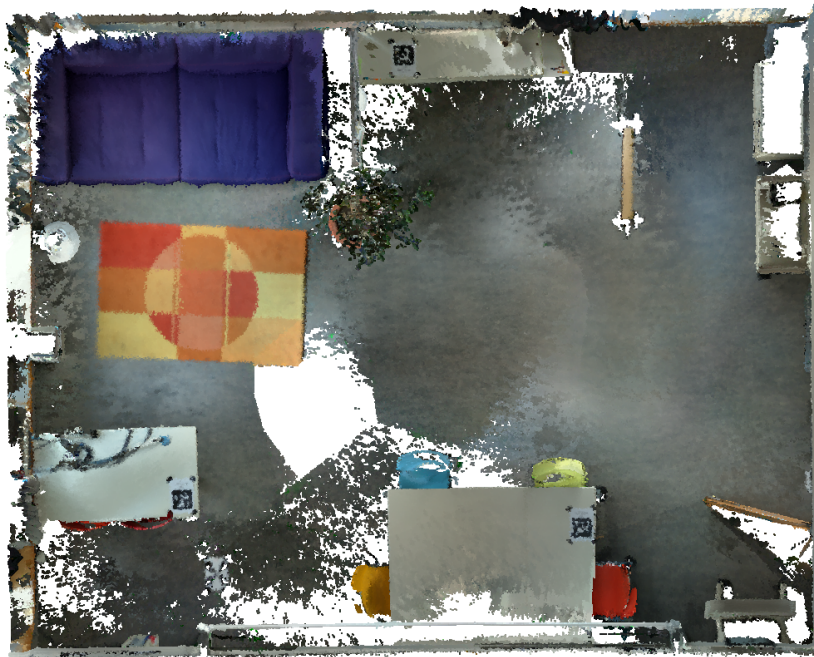


(b) Schnittansicht

Abbildung A.2: Darstellungen der 3D-Punktwolke vom *Leica BLK2GO* nach Datenhomogenisierung und -zuschnitt

---

### A.3 RealSense L515



(a) Draufsicht



(b) Schnittansicht

Abbildung A.3: Darstellungen der 3D-Punktwolke der *RealSense™ L515* nach Datenhomogenisierung und -zuschnitt



## A.4 Apple iPad Pro



(a) Draufsicht



(b) Schnittansicht

Abbildung A.4: Darstellungen der 3D-Punktwolke vom *Apple iPad Pro* nach Datenhomogenisierung und -zuschnitt

---

## A.5 Nikon D3200



(a) Draufsicht



(b) Schnittansicht

Abbildung A.5: Darstellungen der 3D-Punktwolke von der *Nikon D3200* nach Datenhomogenisierung und -zuschnitt

---

## **B Darstellungen der Flash-LiDAR-Punktwolken im Vergleich zur Referenzgeometrie zwecks Sensorspezifikation**

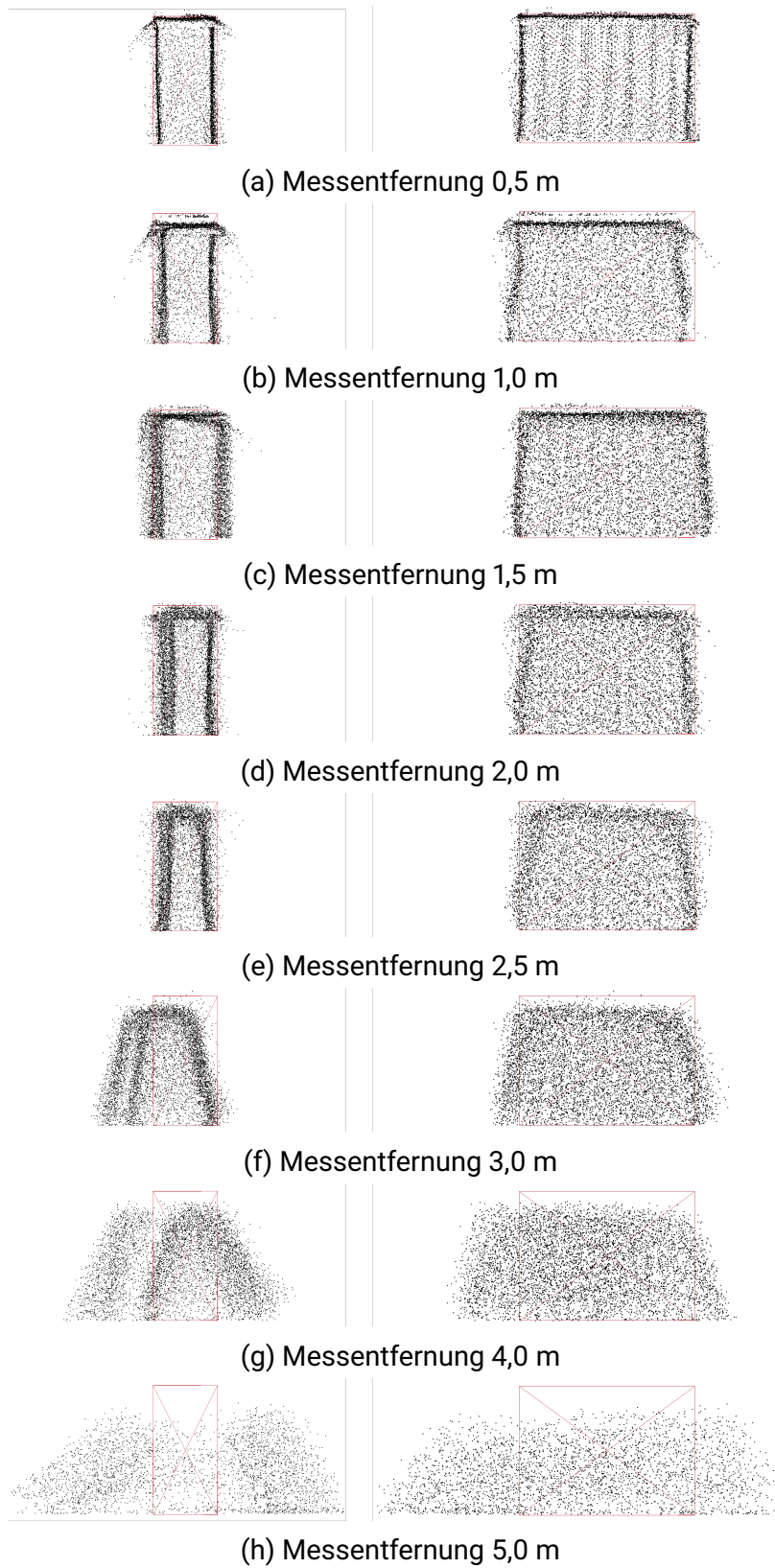


Abbildung B.1: Darstellungen der Flash-LiDAR-Punktwolken im Vergleich zur Referenzgeometrie

## C Evaluationsergebnisse der Demonstratoranwendung zur Bewertung von Räumlichkeiten auf altersgerechte Nutzbarkeit

### C.1 Räumlichkeiten der Nutzungsart Badezimmer

Tabelle C.1: Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Badezimmer, zur Visualisierung der Beispielszenen siehe Abbildung C.1

Fehlermaß	Beispiel (a)	Beispiel (b)	Beispiel (c)	Mittel
Datenmodellierung				
Absolutfehler <sub>Fläche</sub> <sup>*</sup> [m <sup>2</sup> ]	0,02	0,34	0,13	0,16
MAE <sub>Länge</sub> <sup>**</sup> [m]	0,04	0,04	0,02	0,03
Precision <sub>RSE</sub>	0,93	1,00	1,00	0,98
Recall <sub>RSE</sub>	0,93	1,00	0,92	0,95
F1-Score <sub>RSE</sub>	0,93	1,00	0,96	0,96
Datenprüfung				
Precision	0,51	0,89	0,87	0,75
Recall	0,60	0,73	0,40	0,58
F1-Score	0,55	0,80	0,54	0,63
Kumulierte Eignungsklassifizierung				
Overall Accuracy	1,00	1,00	1,00	1,00

<sup>\*</sup> bezogen auf die Grundfläche der *Räumlichkeit*, <sup>\*\*</sup> bezogen auf die Längen hinsichtlich der implementierten Regeln für die Klassen *Tür* (R-Nr. 3.1 – 3.2), *Toilette* (R-Nr. 4.2) und *Waschbecken* (R-Nr. 4.4) aus Tabelle 3.1

Gesamtelte Punktwolke aus  
*Semantic Data Capture*

Visualisierung des WIMs  
nach der Datenmodellierung

(Eignungs-)Klassifizierte  
Punktwolke

Wohnraum-  
Eignungsbericht

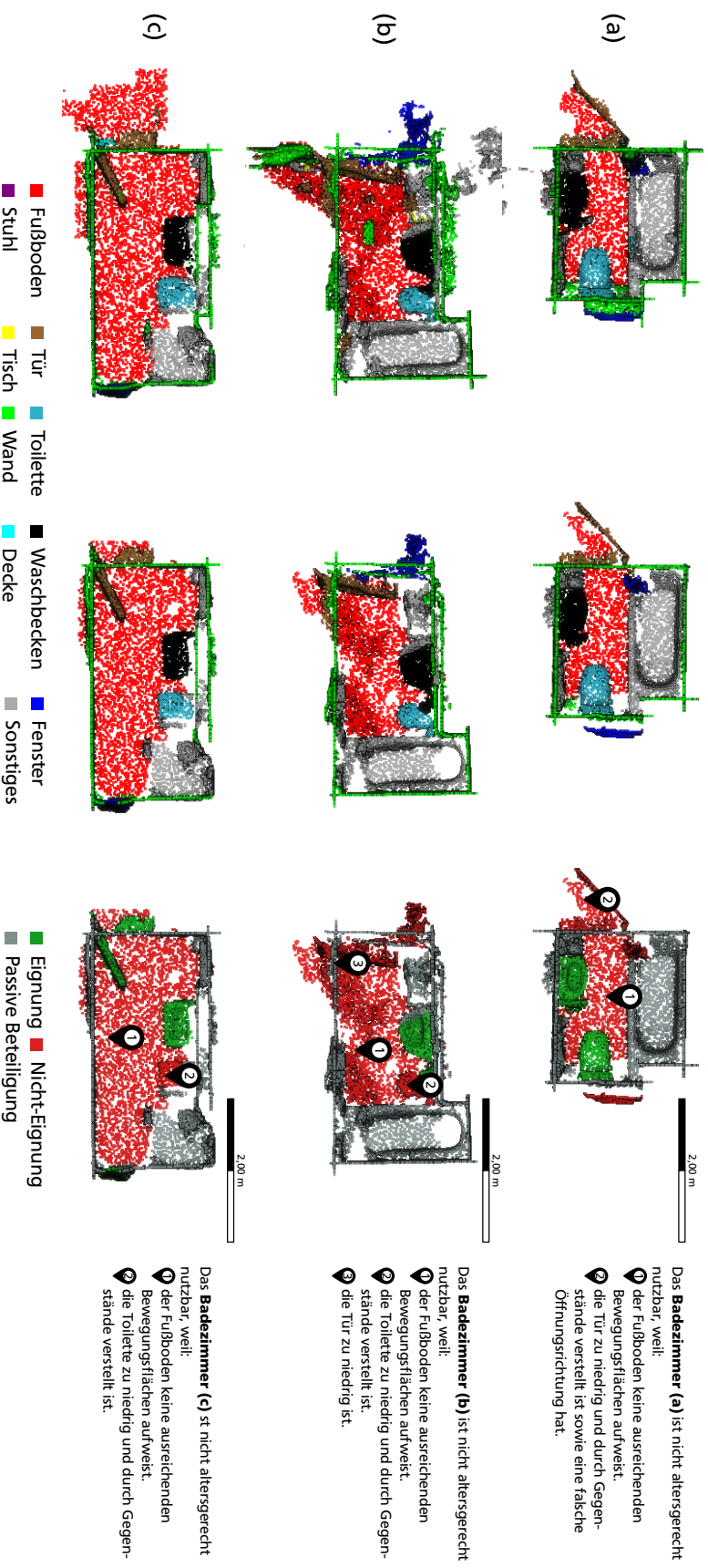


Abbildung C.1: Visualisierung der Ergebnisse von *Progressive Home Care* am Beispiel der Nutzungsart Badezimmer

## C.2 Räumlichkeiten der Nutzungsart Schlafzimmer

Tabelle C.2: Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Schlafzimmer, zur Visualisierung der Beispielszenen siehe Abbildung C.2

Fehlermaß	Beispiel (d)	Beispiel (e)	Beispiel (f)	Mittel
Datenmodellierung				
Absolutfehler <sub>Fläche</sub> * [m <sup>2</sup> ]	0,32	0,30	0,45	0,36
MAE <sub>Länge</sub> ** [m]	0,09	0,08	0,02	0,07
Precision <sub>RSE</sub>	0,75	0,85	1,00	0,87
Recall <sub>RSE</sub>	0,90	0,85	0,91	0,89
F1-Score <sub>RSE</sub>	0,82	0,85	0,95	0,87
Datenprüfung				
Precision	0,24	0,63	0,87	0,58
Recall	1,00	0,68	1,00	0,89
F1-Score	0,39	0,65	0,92	0,65
Kumulierte Eignungsklassifizierung				
Overall Accuracy	1,00	1,00	1,00	1,00

\* bezogen auf die Grundfläche der *Räumlichkeit*, \*\* bezogen auf die Längen hinsichtlich der implementierten Regeln für die Klasse *Tür* (R-Nr. 3.1 – 3.2) aus Tabelle 3.1

Gesamelte Punktwolke aus  
*Semantic Data Capture*

Visualisierung des WIMs  
nach der Datenmodellierung

(Eignungs-)Klassifizierte  
Punktwolke

Wohnraum-  
Eignungsbericht

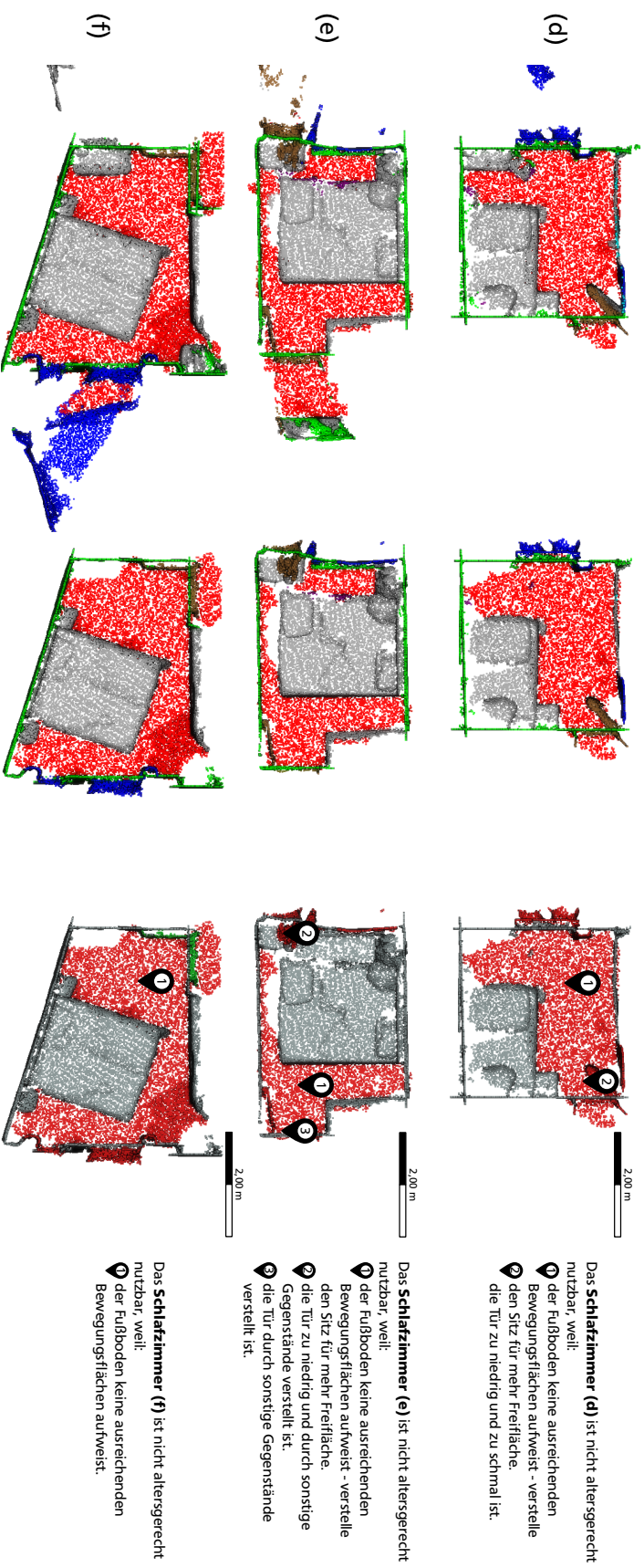


Abbildung C.2: Visualisierung der Ergebnisse von *Progressive Home Care* am Beispiel der Nutzungsart Schlafzimmer

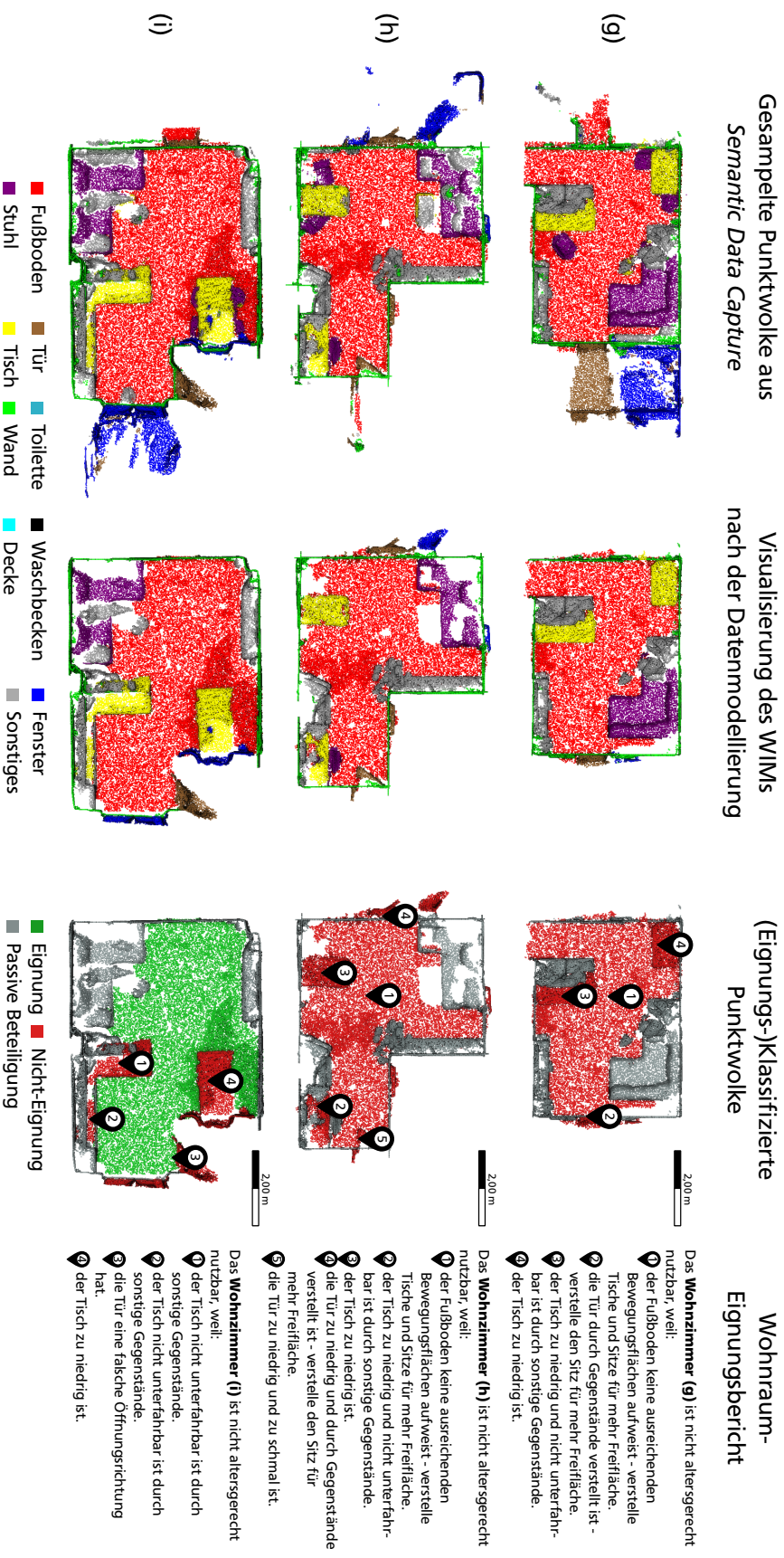


### C.3 Räumlichkeiten der Nutzungsart Wohnzimmer

Tabelle C.3: Evaluationsergebnisse für Nutzungsart Wohnzimmer, zur Visualisierung der Beispielszenen siehe Abbildung C.3

Fehlermaß	Beispiel (g)	Beispiel (h)	Beispiel (i)	Mittel
Datenmodellierung				
Absolutfehler <sub>Fläche</sub> * [m <sup>2</sup> ]	0,31	0,45	0,44	0,40
MAE <sub>Länge</sub> ** [m]	0,05	0,02	0,04	0,04
Precision <sub>RSE</sub>	1,00	1,00	1,00	1,00
Recall <sub>RSE</sub>	0,76	0,78	0,67	0,73
F1-Score <sub>RSE</sub>	0,86	0,88	0,80	0,85
Datenprüfung				
Precision	0,57	1,00	0,75	0,77
Recall	0,78	0,75	0,60	0,71
F1-Score	0,65	0,86	0,67	0,73
Kumulierte Eignungsklassifizierung				
Overall Accuracy	1,00	1,00	1,00	1,00

\* bezogen auf die Grundfläche der *Räumlichkeit*, \*\* bezogen auf die Längen hinsichtlich der implementierten Regeln für die Klassen *Tür* (R-Nr. 3.1 – 3.2), und *Tisch* (R-Nr. 5.3) aus Tabelle 3.1



- Fußboden
- Stuhl
- Tür
- Tisch
- Toilette
- Wand
- Waschbecken
- Decke
- Fenster
- Sonstiges

- Eignung
- Nicht-Eignung
- Passive Beteiligung

Abbildung C.3: Visualisierung der Ergebnisse von *Progressive Home Care* am Beispiel der Nutzungsart Wohnzimmer

---

# Literaturverzeichnis

---

- AAL Programme (o. J.). *Projects Archive - AAL Programme*. URL: <http://www.aal-europe.eu/projects/?co=germany&te=all&st=all&ar=health-care> (besucht am 15.02.2023).
- Aarts, Emile (2004). „Ambient intelligence: a multimedia perspective“. In: *IEEE Multimedia* 11.1, S. 12–19. ISSN: 1070-986X. DOI: 10.1109/MMUL.2004.1261101.
- Adami, Andrea; Scala, Barbara und Spezzoni, Anna (2017). „MODELLING AND ACCURACY IN A BIM ENVIRONMENT FOR PLANNED CONSERVATION: THE APARTMENT OF TROIA OF GIULIO ROMANO“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W3*, S. 17–23. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-17-2017.
- Alshamari, Majed und Mayhew, Pam (2009). „Technical Review: Current Issues of Usability Testing“. In: *IETE Technical Review* 26.6, S. 402. ISSN: 0256-4602. DOI: 10.4103/0256-4602.57825.
- Altenkrüger, Doris und Büttner, Winfried (1992). „Wissensbasierte Systeme“. In: *Wissensbasierte Systeme*. Hrsg. von Doris Altenkrüger und Winfried Büttner. Künstliche Intelligenz. Braunschweig und Wiesbaden: Vieweg, S. 1–5. ISBN: 978-3-528-05244-7. DOI: 10.1007/978-3-322-86811-4\_1.
- Althammer, Thomas (2019). „Datenschutz und IT-Sicherheit in Zeiten der Digitalisierung“. In: *Die digitale Transformation der Pflege*. Hrsg. von Arno Elmer; David Matusiewicz und Thomas Althammer. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft, S. 101–104. ISBN: 978-3-95466-449-8.
- Alzubaidi, Laith; Zhang, Jinglan; Humaidi, Amjad J.; Al-Dujaili, Ayad; Duan, Ye; Al-Shamma, Omran; Santamaría, J.; Fadhel, Mohammed A.; Al-Amidie, Muthana und Farhan, Laith (2021). „Review of deep learning: concepts, CNN architectures, challenges, applications, future directions“. In: *Journal of big data* 8.1, S. 53. ISSN: 2196-1115. DOI: 10.1186/s40537-021-00444-8.
- Ambarwari, Agus; Jafar Adrian, Qadhli und Herdiyeni, Yeni (2020). „Analysis of the Effect of Data Scaling on the Performance of the Machine Learning Algorithm for Plant Identification“. In: *Jurnal RESTI (Rekayasa Sistem dan Teknologi Informasi)* 4.1, S. 117–122. DOI: 10.29207/resti.v4i1.1517.
- Angelescu, Konstanze und Sauerland, Stefan (2019). „Mobile Gesundheitsanwendungen: Welche Evidenz ist nötig?“ In: *Deutsches Ärzteblatt* 116.21, S. 1057–1062. (Besucht am 09.02.2023).
- Apple Inc. (2020a). *Apple Developer: Worldwide Developers Conference (WWDC 2020): Explore ARKit 4*. URL: <https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2020/10611/?time=998> (besucht am 14.04.2023).
- (2020b). „Apple stellt neues iPad Pro mit fortschrittlichem LiDAR Scanner vor und bringt Trackpad-Unterstützung für iPadOS“. In: URL: <https://www.apple.com/de/newsroom/2020/03/a>

- 
- pple-unveils-new-ipad-pro-with-lidar-scanner-and-trackpad-support-in-ipados/ (besucht am 25.03.2023).
- Apple Inc. (2022). *Apple Developer: Worldwide Developers Conference (WWDC 2022): Create parametric 3D room scans with RoomPlan*. URL: <https://developer.apple.com/videos/play/wwdc2022/10127/> (besucht am 15.04.2023).
- (o. J.[a]). *Apple Developer Documentation: ARKit*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/arkit> (besucht am 27.04.2023).
  - (o. J.[b]). *Apple Developer Documentation: ARMeshClassification*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/arkit/armeshclassification#declaration> (besucht am 14.04.2023).
  - (o. J.[c]). *Apple Developer Documentation: Classification*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/arkit/armeshgeometry/3521393-classification> (besucht am 15.04.2023).
  - (o. J.[d]). *Apple Developer Documentation: Visualizing and Interacting with a Reconstructed Scene*. URL: [https://developer.apple.com/documentation/arkit/content\\_anchors/visualizing\\_and\\_interacting\\_with\\_a\\_reconstructed\\_scene](https://developer.apple.com/documentation/arkit/content_anchors/visualizing_and_interacting_with_a_reconstructed_scene) (besucht am 12.04.2023).
  - (o. J.[e]). *Apple Developer: Raycasting*. URL: <https://developer.apple.com/documentation/arkit/arsession/3132065-raycast> (besucht am 16.04.2023).
  - (o. J.[f]). *Apple Developer: RoomPlan*. URL: <https://developer.apple.com/augmented-reality/roomplan/> (besucht am 28.04.2023).
  - (o. J.[g]). *Develop: Material Design*. URL: <https://m2.material.io/develop/ios> (besucht am 25.04.2023).
- Arbeitsgruppe Hochbau im Arbeitskreis Digitalisiertes Bauen im Hauptverband der Deutschen Bauindustrie e.V. (2019). *BIM im Hochbau: Technisches Positionspapier*. URL: [https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Veroeffentlichungen/BIM\\_im\\_Hochbau\\_Position.pdf](https://www.bauindustrie.de/fileadmin/bauindustrie.de/Media/Veroeffentlichungen/BIM_im_Hochbau_Position.pdf) (besucht am 09.03.2023).
- Armeni, Iro; Sener, Ozan; Zamir, Amir R.; Jiang, Helen; Brilakis, Ioannis; Fischer, Martin und Savarese, Silvio (2016). „3D Semantic Parsing of Large-Scale Indoor Spaces“. In: *29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1534–1543. ISBN: 978-1-4673-8851-1. DOI: 10.1109/CVPR.2016.170.
- Barbosa, Margarida (2018). „As-built building information modeling (BIM) workflows: from point cloud data to BIM“. Dissertation. Lissabon: Universität Lissabon.
- Baruch, Gilad; Chen, Zhuoyuan; Dehghan, Afshin; Feigin, Yuri; Fu, Peter; Gebauer, Thomas; Kurz, Daniel; Dimry, Tal; Joffe, Brandon; Schwartz, Arik und Shulman, Elad (2022). „ARKitScenes: A Diverse Real-World Dataset For 3D Indoor Scene Understanding Using Mobile RGB-D Data“. In: *NeurIPS 2021 Datasets and Benchmarks Track (Round 1)*. URL: [https://openreview.net/forum?id=tjZjv\\_qh\\_CE](https://openreview.net/forum?id=tjZjv_qh_CE).
- Bassier, Maarten; Vergauwen, Maarten und van Genechten, Bjorn (2016). „STANDALONE TERRESTRIAL LASER SCANNING FOR EFFICIENTLY CAPTURING AEC BUILDINGS FOR AS-BUILT BIM“. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences III-6*, S. 49–55. DOI: 10.5194/isprsannals-III-6-49-2016.
- (2017). „AUTOMATED CLASSIFICATION OF HERITAGE BUILDINGS FOR AS-BUILT BIM USING MACHINE LEARNING TECHNIQUES“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing*

- 
- and *Spatial Information Sciences IV-2/W2*, S. 25–30. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W2-25-2017.
- Bassier, Maarten; Yousefzadeh, Meisam und van Genechten, Bjorn (2015). „Evaluation of data acquisition techniques and workflows for Scan to BIM“. In: *Geo Business*.
- Baumann, Felix und Funk, Manuel (o. J.). *Checkliste zum Altersgerechten Wohnen*. URL: <https://www.wohnen-im-alter.de/files-9975/Checkliste-altersgerechtes-Wohnen.pdf> (besucht am 18.02.2023).
- Baus, Ralf Thomas, Hrsg. (2006). *Sozialer Bundesstaat - ein Spannungsfeld: Sozialpolitik in föderalen Staaten: Tagungsband zum Workshop Sozialer Bundesstaat - ein Spannungsfeld Sozialpolitik in Föderalen Staaten, 23. März bis 26. März 2006, Cadenabbia*. Bd. 82. Zukunftsforum Politik. Sankt Augustin und Berlin: Konrad-Adenauer-Stiftung. ISBN: 978-3-939826-27-9.
- Becker, Denise und Klonowski, Jörg (2023). „Object Recognition of a GCP Design in UAS Imagery Using Deep Learning and Image Processing—Proof of Concept Study“. In: *Drones 7.2*, S. 94. DOI: 10.3390/drones7020094.
- Becker, Ralf; Falk, Viktoria; Hoenen, Sabrina; Loges, Sören; Stumm, Sven; Blankenbach, Jörg; Brell-Cokcan, Sigrid; Hildebrandt, Linda und Vallée, Dirk (2018). „BIM – Towards the entire lifecycle“. In: *International Journal of Sustainable Development and Planning* 13.01, S. 84–95. ISSN: 1743-7601. DOI: 10.2495/SDP-V13-N1-84-95.
- Becker, Ralf; Lublasser, Elisa; Martens, Jan; Wollenberg, Raymond; Zhang, Haowei; Brell-Cokcan, Sigrid und Blankenbach, Jörg (2019). „Enabling BIM for Property Management of Existing Buildings Based on Automated As-is Capturing“. In: *Proceedings of the 36th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. Hrsg. von Mohamed Al-Hussein. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC). DOI: 10.22260/ISARC2019/0028.
- Bentley, Jon Louis (1980). „Multidimensional divide-and-conquer“. In: *Communications of the ACM* 23.4, S. 214–229. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/358841.358850.
- Bernardini, F.; Mittleman, J.; Rushmeier, H.; Silva, C. und Taubin, G. (1999). „The ball-pivoting algorithm for surface reconstruction“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 5.4, S. 349–359. ISSN: 1077-2626. DOI: 10.1109/2945.817351.
- Besl, Paul J. und McKay, Neil D. (1992). „A method for registration of 3-D shapes“. In: *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence* 14.2, S. 239–256. ISSN: 0162-8828. DOI: 10.1109/34.121791.
- Bew, Mark und Richards, Mervyn (2008). *Bew-Richards BIM maturity model*. URL: <https://www.cdbb.cam.ac.uk/system/files/documents/BISBIMstrategyReport.pdf> (besucht am 10.03.2023).
- Bieber, Daniel (2010). *Wenn Technik auf Pflegedienstleistungen trifft: Dokumentation des Expertenworkshops: zur Anschlussfähigkeit von Technologien an Dienstleistungen*. Hrsg. von Stefan Nöst. URL: [http://www.dienstleistungundtechnik.de/pdfs-meta/doku\\_workshop\\_pflegetechnik.pdf](http://www.dienstleistungundtechnik.de/pdfs-meta/doku_workshop_pflegetechnik.pdf) (besucht am 23.01.2023).
- Bienstein, Christel (2019). *Pflege ist Rückgrat und tragende Säule des Gesundheitssystems - DBfK*. URL: <https://www.dbfk.de/de/presse/meldungen/2019/ind.php> (besucht am 04.02.2023).

- 
- BIM-Forum (2020). *LOD Spec 2020: For Building Information Models*. URL: [https://bimforum.org/wp-content/uploads/2022/06/BIMForum\\_LOD-Spec-2020.zip](https://bimforum.org/wp-content/uploads/2022/06/BIMForum_LOD-Spec-2020.zip) (besucht am 09.03.2023).
- Bishop, Christopher M. (2006). *Pattern recognition and machine learning*. Computer science. New York, NY: Springer. ISBN: 978-0387-31073-2. URL: <http://www.loc.gov/catdir/enhancements/fy0818/2006922522-d.html>.
- Blackman, Stephanie; Matlo, Claudine; Bobrovitskiy, Charisse; Waldoch, Ashley; Fang, Mei Lan; Jackson, Piper; Mihailidis, Alex; Nygård, Louise; Astell, Arlene und Sixsmith, Andrew (2016). „Ambient Assisted Living Technologies for Aging Well: A Scoping Review“. In: *Journal of Intelligent Systems* 25.1, S. 55–69. ISSN: 0334-1860. DOI: 10.1515/jisys-2014-0136.
- Blankenbach, Jörg (2015). „Bauwerksvermessung für BIM“. In: *Building Information Modeling*. Hrsg. von André Borrmann; Markus König; Christian Koch und Jakob Beetz. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 343–362. ISBN: 978-3-658-05605-6.
- (2017). *BIM im Bestand: 3D-Aufmaß und Modellierung für die as-built Dokumentation*. Berlin.
- Blankenbach, Jörg; Schwermann, Raimund und Becker, Ralf (2021). „Bauwerksvermessung und BIM“. In: *Building Information Modeling*. Hrsg. von André Borrmann; Markus König; Christian Koch und Jakob Beetz. VDI-Buch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN: 978-3-658-33360-7.
- Böhm, Karin (2010). „Demografischer Wandel als Chance für die Gesundheitswirtschaft“. In: *Bundesgesundheitsbl.* 53, S. 460–473. DOI: 10.1007/s00103-010-1042-y.
- Bonduel, Mathias; Bassier, Maarten; Vergauwen, Maarten; Pauwels, Pipaiwel und Klein, Ralf (2017). „SCAN-TO-BIM OUTPUT VALIDATION: TOWARDS A STANDARDIZED GEOMETRIC QUALITY ASSESSMENT OF BUILDING INFORMATION MODELS BASED ON POINT CLOUDS“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLII-2/W8, S. 45–52. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W8-45-2017.
- Bornholdt lee (o. J.). *Digitale Pflegeanwendungen (DiPA): Blogbeitrag*. URL: <https://www.bornholdtlee.de/blog/digitale-pflegeanwendungen-dipa> (besucht am 10.02.2023).
- Borrmann, André; König, Markus; Koch, Christian und Beetz, Jakob, Hrsg. (2015). *Building Information Modeling*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-05605-6. DOI: 10.1007/978-3-658-05606-3.
- (2021). „Die BIM-Methode im Überblick“. In: *Building Information Modeling*. Hrsg. von André Borrmann; Markus König; Christian Koch und Jakob Beetz. VDI-Buch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, S. 1–31. ISBN: 978-3-658-33360-7.
- Boulos, Maryana (o. J.). *OBJ - Wavefront Object*. URL: [https://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj\\_spec.pdf](https://www.cs.utah.edu/~boulos/cs3505/obj_spec.pdf) (besucht am 25.04.2023).
- Bourke, Paul (o. J.). *PLY - Polygon File Format*. URL: <http://paulbourke.net/dataformats/ply/> (besucht am 25.04.2023).
- Bradway, Meghan; Carrion, Carme; Vallespin, Bárbara; Saadatfard, Omid; Puigdomènech, Elisa; Espallargues, Mireia und Kotzeva, Anna (2017). „mHealth Assessment: Conceptualization of a Global Framework“. In: *JMIR mHealth and uHealth* 5.5, e60. ISSN: 2291-5222. DOI: 10.2196/mhealth.7291.
- Braun, Andreas; Kirchbuchner, Florian und Wichert, Reiner (2016). „Ambient Assisted Living“. In: *eHealth in Deutschland*. Hrsg. von Florian Fischer und Alexander Krämer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 203–222. ISBN: 978-3-662-49503-2.

- 
- Brazil, Garrick; Kumar, Abhinav; Straub, Julian; Ravi, Nikhila; Johnson, Justin und Gkioxari, Georgia (2023). „Omni3D: A Large Benchmark and Model for 3D Object Detection in the Wild“. In: *CVPR 2023, IEEE*.
- Budelmann, Jeannine; Bürger, Markus; Leitold, Domino; Autexier, Serge; Mandel, Christian; Hochbaum, Karin; Choudhury, Amit und Koch, Astrid (2020). „ModEst - Rollator-Modul zur Haltungsverkennung und Sturzprävention : Abschlussbericht“. In: *ModEst - Rollator-Modul zur Haltungsverkennung und Sturzprävention*. DOI: 10.2314/KXP:1760943649.
- buildingSMART International (o. J.). *Industry Foundation Classes (IFC)*. URL: <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc> (besucht am 10.03.2023).
- Bundesarbeitsgemeinschaft Wohnungsanpassung e.V. (o. J.[a]). *Wohnberatungsstellen*. URL: <https://www.wohnungsanpassung-bag.de/seite/259749/wohnberatungsstellen.html#Rheinland-Pfalz> (besucht am 22.02.2023).
- (o. J.[b]). *Zertifizierung - Wohnberater\*in für Ältere und Menschen mit Teilhabeeinschränkungen*. URL: <https://www.wohnungsanpassung-bag.de/seite/373095/kontakt.html>.
- Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (2022a). *Anträge zur Aufnahme in das Verzeichnis für digitale Pflegeanwendungen ab sofort möglich: Nummer 11/22 vom 09.12.2022*. URL: <https://www.bfarm.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2022/pm11-2022.html> (besucht am 10.02.2023).
- (2022b). *Das Fast-Track-Verfahren für digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA) nach § 139e SGB V: Ein Leitfaden für Hersteller, Leistungserbringer und Anwender: Version 3.1 vom 18.03.2022*.
- (2022c). *Das Verfahren für digitale Pflegeanwendungen (DiPA) nach § 78a SGB XI: Ein Leitfaden für Hersteller und Nutzende: Version 1.0 vom 02.12.2022*.
- (o. J.). *DiGA-Verzeichnis*. URL: <https://diga.bfarm.de/de/verzeichnis> (besucht am 09.02.2023).
- Bundesministerium der Finanzen, Hrsg. (2019). *Tragfähigkeitsbericht 2020: Fünfter Bericht zur Tragfähigkeit der öffentlichen Finanzen*.
- Bundesministerium der Justiz (2020). *Verordnung über das Verfahren und die Anforderungen zur Prüfung der Erstattungsfähigkeit digitaler Gesundheitsanwendungen in der gesetzlichen Krankenversicherung: Digitale Gesundheitsanwendungen-Verordnung (DiGAV)*. URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/digav/BJNR076800020.html> (besucht am 09.02.2023).
- (2022). *Verordnung zur Prüfung der Erstattungsfähigkeit digitaler Pflegeanwendungen nach dem Elften Buch Sozialgesetzbuch: Digitale Pflegeanwendungen-Verordnung (DiPAV)*. URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/dipav/> (besucht am 10.02.2023).
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2008). *AAL – Altersgerechte Assistenzsysteme für ein gesundes und unabhängiges Leben: Ambient Assisted Living*. Bonn, Berlin.
- (2014). *TECH4AGE — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/tech4age> (besucht am 20.05.2023).
- (2018). *KoBo34 — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/kobo34> (besucht am 20.05.2023).
- (2020a). *AdaMekoR — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/adamekor> (besucht am 20.05.2023).
- (2020b). *PeTRA — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/petra> (besucht am 20.05.2023).

- 
- Bundesministerium für Bildung und Forschung (2020c). *PfleKoRo — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/pflekoro> (besucht am 20.05.2023).
- (2020d). *Plug-In — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/plug-in> (besucht am 20.05.2023).
  - (2020e). *Projekte - Miteinander durch Innovation: ArNe: Assistenzrobotik für den pflegerischen Einsatz bei Menschen mit neuromuskulären Erkrankungen*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/arne> (besucht am 20.05.2023).
  - (2020f). *RoMi — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/romi> (besucht am 20.05.2023).
  - (2020g). *WINK — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/wink> (besucht am 20.05.2023).
  - (2021a). *RimA — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/rima> (besucht am 20.05.2023).
  - (2021b). *Teleskoop — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/teleskoop> (besucht am 20.05.2023).
  - (2022a). *KARE — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/kare> (besucht am 20.05.2023).
  - (2022b). *KIP-SDM — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/kip-sdm> (besucht am 20.05.2023).
  - (2022c). *PFLIP — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/pflip> (besucht am 20.05.2023).
  - (2022d). *PlexoMotion — Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte/plexomotion> (besucht am 20.05.2023).
  - (o. J.). *Projekte: Miteinander durch Innovation*. URL: <https://www.interaktive-technologien.de/projekte> (besucht am 15.02.2023).
- Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (2002). *Vierter Altenbericht zur Lage der älteren Generation in der Bundesrepublik Deutschland: Risiken, Lebensqualität und Versorgung Hochaltriger – unter besonderer Berücksichtigung demenzieller Erkrankungen*.
- (2008). *Wohnen im Alter: Bewährte Wege – Neue Herausforderungen: Ein Handlungsleitfaden für Kommunen*.
  - (2011). *Bundesfamilienministerium fördert selbstständiges Wohnen im Alter*. URL: <https://www.bmfsfj.de/bmfsfj/aktuelles/presse/pressemitteilungen/bundesfamilienministerium-foerdert-selbststaendiges-wohnen-im-alter-78058> (besucht am 26.01.2023).
  - (2016). *Siebter Altersbericht: Sorge und Mitverantwortung in der Kommune – Aufbau und Sicherung zukunftsfähiger Gemeinschaften*.
  - (2019). *Länger zuhause leben: Ein Wegweiser für das Wohnen im Alter*. URL: <https://www.bmfsfj.de/resource/blob/159704/3dab099fb5eb39d9fba72f6810676387/achter-altersbericht-aeltere-menschen-und-digitalisierung-data.pdf> (besucht am 26.01.2023).
  - (2020). *Modellprogramm "Leben wie gewohnt" startet*. URL: <https://www.bmfsfj.de/bmfsfj/aktuelles/alle-meldungen/modellprogramm-leben-wie-gewohnt-startet-161836> (besucht am 26.01.2023).



- 
- (2021). *Zuhause im Alter*. URL: <https://www.bmfsfj.de/bmfsfj/themen/aeltere-menschen/hilfe-und-pflege/zuhause-im-alter-75580> (besucht am 26.01.2023).
  - (2022). *Achter Altersbericht: Ältere Menschen und Digitalisierung*.
  - (o. J.). *Zuhause im Alter: Checkliste: Altersgerechte Wohnung*. URL: <https://www.serviceportal-zuhause-im-alter.de/wohnen/basiswissen-barrierefreies-wohnen/checkliste-altersgerechte-wohnung.html> (besucht am 26.01.2023).
- Bundesministerium für Gesundheit (2013). *Unterstützung Pflegebedürftiger durch technische Assistenzsysteme: Abschlussbericht zur Studie*.
- (2022a). *Digitalisierung im Gesundheitswesen*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/digitalisierung/digitalisierung-im-gesundheitswesen.html> (besucht am 05.02.2023).
  - (2022b). *Digitalisierungsstrategie*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/digitalisierung/digitalisierungsstrategie.html> (besucht am 09.01.2023).
  - (2022c). *E-Health*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/service/begriffe-von-a-z/e/e-health.html> (besucht am 08.02.2023).
  - (2022d). *Ratgeber Pflege*.
  - (2022e). *Wohnumfeldverbessernde Maßnahmen*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/leistungen-der-pflege/wohnumfeldverbessernde-massnahmen.html> (besucht am 16.02.2023).
  - (2023a). *Digitalisierung im Gesundheitswesen*. URL: <https://www.bundesgesundheitsministerium.de/themen/digitalisierung/digitalisierung-im-gesundheitswesen.html> (besucht am 16.03.2023).
  - (2023b). *Gemeinsam Digital: Digitalisierungsstrategie für das Gesundheitswesen und die Pflege*. URL: [https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3\\_Downloads/D/Digitalisierungsstrategie/BMG\\_Broschuere\\_Digitalisierungsstrategie\\_bf.pdf](https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/D/Digitalisierungsstrategie/BMG_Broschuere_Digitalisierungsstrategie_bf.pdf) (besucht am 15.03.2023).
- Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (2015). *Stufenplan Digitales Planen und Bauen: Einführung moderner, IT-gestützter Prozesse und Technologien bei Planung, Bau und Betrieb von Bauwerken*. URL: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/DG/stufenplan-digitales-bauen.pdf?__blob=publicationFile) (besucht am 08.03.2023).
- Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hrsg. (2011). *Wohnen im Alter: Marktprozesse und wohnungspolitischer Handlungsbedarf*. Bd. 147. Forschungen. Bonn: Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. ISBN: 978-3-87994-479-8. URL: [http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVB/Forschungen/2011/Heft147\\_DL.pdf;jsessionid=E1B03222FBB16C10D0027FA8436F1524.live1042?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](http://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/BMVB/Forschungen/2011/Heft147_DL.pdf;jsessionid=E1B03222FBB16C10D0027FA8436F1524.live1042?__blob=publicationFile&v=2).
- Bundesregierung (2021). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie 2021: Agenda 2030*. URL: <https://www.bundesregierung.de/resource/blob/998006/1873516/7c0614aff0f2c847f51c4d8e9646e610/2021-03-10-dns-2021-finale-langfassung-barrierefrei-data.pdf?download=1> (besucht am 26.01.2023).
- Buß, Tanja (2022). *Arbeitshilfe zur DIN 18040: Konsolidierte Fassung mit länderspezifischen Vorgaben aus Bauordnung und Technischen Baubestimmungen*. Hrsg. von Verlagsgesellschaft Rudolf Müller

- 
- GmbH & Co. KG. URL: <https://www.bfb-barrierefrei-bauen.de/kategorie/bauvorschriften/technische-baubestimmungen/> (besucht am 20.02.2023).
- Careloop (2020). „Pflegetotstand – Ursache, Ausblick und Lösungen“. In: *Careloop*. URL: [https://careloop.io/pflegetotstand/#pll\\_switcher](https://careloop.io/pflegetotstand/#pll_switcher) (besucht am 07.02.2023).
- Carranza-García, Manuel; Torres-Mateo, Jesús; Lara-Benítez, Pedro und García-Gutiérrez, Jorge (2021). „On the Performance of One-Stage and Two-Stage Object Detectors in Autonomous Vehicles Using Camera Data“. In: *Remote Sensing* 13.1, S. 89. DOI: 10.3390/rs13010089.
- Casando (o. J.). *Checkliste: Ist Ihre Wohnung altersgerecht?* URL: <https://www.casando.de/barrierefrei-wohnen-ratgeber/Fragebogen-Ist-Ihre-Wohnung-altersgerecht.pdf> (besucht am 18.02.2023).
- Chai, Jian; Chi, Hung-Lin; Wang, Xiangyu; Wu, Changzhi; Jung, Kwang Hyo und Lee, Jae Myung (2016). „Automatic as-built modeling for concurrent progress tracking of plant construction based on laser scanning“. In: *Concurrent Engineering* 24.4, S. 369–380. ISSN: 1063-293X. DOI: 10.1177/1063293X16670449.
- Chang, Angel X.; Funkhouser, Thomas; Guibas, Leonidas; Hanrahan, Pat; Huang, Qixing; Li, Zimo; Savarese, Silvio; Savva, Manolis; Song, Shuran; Su, Hao; Xiao, Jianxiong; Yi, Li und Yu, Fisher (2015). *ShapeNet: An Information-Rich 3D Model Repository*. URL: <http://arxiv.org/pdf/1512.03012v1>.
- Cignoni, Paolo; Rocchini, Claudio und Scopigno, Roberto (1998). „Metro: Measuring Error on Simplified Surfaces“. In: *Computer Graphics Forum* 17.2, S. 167–174. ISSN: 01677055. DOI: 10.1111/1467-8659.00236.
- Clemen, Christian und Ehrich, Robert (2014). „Geodesy goes BIM“. In: *allgemeine vermessungsnachrichten (avn)* 121.6, S. 231–237.
- Clementini, Eliseo und Di Felice, Paolino (1997). „Approximate topological relations“. In: *International Journal of Approximate Reasoning* 16.2, S. 173–204. ISSN: 0888613X. DOI: 10.1016/S0888-613X(96)00127-2.
- Cohn, Mike (2004). *User Stories Applied: For Agile Software Development*. Addison-Wesley signature series. Boston, Mass.: Addison-Wesley. ISBN: 9780321205681.
- Collins, Fiona C.; Mafipour, M. Saeed; Noichl, Florian; Pan, Yuandong und Vega, Miguel A. (2021). „Towards applicable Scan-to-BIM and Scan-to-Floorplan: An end-to-end experiment“. In: *32. Forum Bauinformatik*.
- Coupry, Corentin; Noblecourt, Sylvain; Richard, Paul; Baudry, David und Bigaud, David (2021). „BIM-Based Digital Twin and XR Devices to Improve Maintenance Procedures in Smart Buildings: A Literature Review“. In: *Applied Sciences* 11.15, S. 6810. DOI: 10.3390/app11156810.
- Dahm-Griess, Andreas (2013). „Private Haushalte als „dritter Gesundheitsstandort““. In: *Welt der Krankenversicherung* 9/2013, S. 218–221. URL: [https://hbsn-ag.de/assets/files/news/WdK-9\\_2013-BeitragDahm-Griess.pdf](https://hbsn-ag.de/assets/files/news/WdK-9_2013-BeitragDahm-Griess.pdf) (besucht am 19.01.2023).
- Dai, Angela; Chang, Angel X.; Savva, Manolis; Halber, Maciej; Funkhouser, Thomas und Niessner, Matthias (2017). „ScanNet: Richly-Annotated 3D Reconstructions of Indoor Scenes“. In: *Proc. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), IEEE*.
- Daum, Mario (2022). *Die Digitalisierung der Pflege in Deutschland: Status quo, digitale Transformation und Auswirkungen auf Arbeit, Beschäftigte und Qualifizierung : Follow-up-Studie*. Hamburg: DAA-Stiftung Bildung und Beruf. ISBN: 9783982329499. URL: <https://epub.sub.uni-hamburg.de/epub/volltexte/einzelplatz/2022/141427/>.

- 
- Debeunne, César und Vivet, Damien (2020). „A Review of Visual-LiDAR Fusion based Simultaneous Localization and Mapping“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20.7. DOI: 10.3390/s20072068.
- Deng, Jia; Dong, Wei; Socher, Richard; Li, Li-Jia; Li, Kai und Fei-Fei, Li (2009). „ImageNet: A large-scale hierarchical image database“. In: *2009 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 248–255. ISBN: 978-1-4244-3992-8. DOI: 10.1109/CVPR.2009.5206848.
- Deng, Min; Menassa, Carol C. und Kamat, Vineet R. (2021). „From BIM to digital twins: a systematic review of the evolution of intelligent building representations in the AEC-FM industry“. In: *Journal of Information Technology in Construction* 26, S. 58–83. DOI: 10.36680/j.itcon.2021.005.
- Deschermeier, Philipp (2023). „Altersgerechter Wohnraum“. In: *IW-Trends* 50.2, S. 115–134.
- Deubel, Maximilian (2020). „Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit von Building Information Modeling (BIM) in der Planungs- und Realisierungsphase von Bauprojekten“. Dissertation. Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie.
- Deutsche Telekom AG (2020a). *Digitalisierungsindex Mittelstand 2019/2020: Der Digitale Status Quo im Gesundheitswesen*.
- (2020b). *Digitalisierungsindex: Gesamtbereich 2020*. URL: <https://www.digital-x.eu/de/magazin/digitalisierungsindex/archiv>.
- Deutscher Bundestag (2015). *Gesetz für sichere digitale Kommunikation und Anwendungen im Gesundheitswesen: E-Health-Gesetz*. URL: <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-f%C3%BCr-sichere-digitale-kommunikation-und-anwendungen-im-gesundheitswesen-sowie/67134> (besucht am 08.02.2023).
- (2019). *Gesetz für eine bessere Versorgung durch Digitalisierung und Innovation: Digitale-Versorgung-Gesetz (DVG)*. URL: <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-f%C3%BCr-eine-bessere-versorgung-durch-digitalisierung-und-innovation-digitale-versorgung-gesetz/251761> (besucht am 08.02.2023).
- (2021a). *Entwurf eines Gesetzes zur digitalen Modernisierung von Versorgung und Pflege: Digitale-Versorgung-und-Pflege-Modernisierungs-Gesetz - DVPMG*. URL: [https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3\\_Downloads/Gesetze\\_und\\_Verordnungen/GuV/D/DVPMG\\_BT\\_bf.pdf](https://www.bundesgesundheitsministerium.de/fileadmin/Dateien/3_Downloads/Gesetze_und_Verordnungen/GuV/D/DVPMG_BT_bf.pdf) (besucht am 09.02.2023).
- (2021b). *Gesetz zur digitalen Modernisierung von Versorgung und Pflege: Digitale-Versorgung-und-Pflege-Modernisierungs-Gesetz (DVPMG)*. URL: <https://dip.bundestag.de/vorgang/gesetz-zur-digitalen-modernisierung-von-versorgung-und-pflege-digitale-versorgung-und-pflege-modernisierungs-gesetz/272822> (besucht am 08.02.2023).
- Deutsches Institut für Normung e. V. (2011). *DIN 18040-2:2011-09, Barrierefreies Bauen - Planungsgrundlagen - Teil 2: Wohnungen*. Berlin. DOI: 10.31030/1803049.
- (2019). *DIN EN ISO 19650-1:2019-08, Organisation und Digitalisierung von Informationen zu Bauwerken und Ingenieurleistungen, einschließlich Bauwerksinformationsmodellierung (BIM) - Informationsmanagement mit BIM - Teil 1: Begriffe und Grundsätze*. Berlin. DOI: 10.31030/3156460.
- Dijkstra, Edsger W. (1959). „A note on two problems in connexion with graphs“. In: *Numerische Mathematik* 1.1, S. 269–271. ISSN: 0029-599X. DOI: 10.1007/BF01386390.
- Doughty, Kevin; Cameron, Keith und Garner, Paul (1996). „Three generations of telecare of the elderly“. In: *Journal of Telemedicine and Telecare* 2.2, S. 71–80. ISSN: 1357633X. DOI: 10.1258/1357633961929826.

- 
- Duden (o. J.[a]). *App*. URL: <https://www.duden.de/node/7785/revision/1420240> (besucht am 09.02.2023).
- (o. J.[b]). *Data-Mining*. URL: [https://www.duden.de/rechtschreibung/Data\\_Mining](https://www.duden.de/rechtschreibung/Data_Mining) (besucht am 05.05.2023).
- (o. J.[c]). *Gerontologie*. URL: <https://www.duden.de/node/56357/revision/1453625> (besucht am 13.02.2023).
- (o. J.[d]). *Smart Home*. URL: <https://www.duden.de/node/167619/revision/1259889> (besucht am 13.02.2023).
- (o. J.[e]). *Wearable*. URL: <https://www.duden.de/node/202942/revision/1369731> (besucht am 13.02.2023).
- Eastman, Charles M.; Fisher, David; Lafue, Gilles; Lividini, Joseph; Stoker, Douglas und Yessios, Christos (1974). *An Outline of the Building Description System: Research Report No. 50*. Pittsburgh. Edelsbrunner, Herbert; Kirkpatrick, David und Seidel, Raimund G. (1983). „On the shape of a set of points in the plane“. In: *IEEE Transactions on Information Theory* 29.4, S. 551–559. ISSN: 0018-9448. DOI: 10.1109/TIT.1983.1056714.
- Egger, Martin; Hausknecht, Kerstin; Liebich, Thomas und Przybylo, Jakob (2013). *BIM-Leitfaden für Deutschland: Information und Ratgeber: Endbericht*. URL: [https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Anlage/DG/Digitales/bim-leitfaden-deu.pdf?__blob=publicationFile).
- Elich, Cathrin; Engelmann, Francis; Kontogianni, Theodora und Leibe, Bastian (2019). „3D Bird’s-Eye-View Instance Segmentation“. In: *Pattern Recognition*. Hrsg. von Gernot A. Fink; Simone Frintrop und Xiaoyi Jiang. Bd. 11824. Springer eBooks Computer Science. Cham: Springer, S. 48–61. ISBN: 978-3-030-33675-2. DOI: 10.1007/978-3-030-33676-9\_4.
- Elmer, Arno; Matusiewicz, David und Althammer, Thomas, Hrsg. (2019). *Die digitale Transformation der Pflege: Wandel. Innovation. Smart Services*. 1. Auflage. Berlin: Medizinisch Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft. ISBN: 978-3-95466-449-8. URL: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=5722346>.
- Encord (2023). *YOLOv8 for Object Detection Explained: [Practical Example]*. URL: <https://medium.com/cord-tech/yolov8-for-object-detection-explained-practical-example-23920f77f66a> (besucht am 16.04.2023).
- Eppstein, David; Paterson, Mervyn S. und Yao, F. Frances (1997). „On Nearest-Neighbor Graphs“. In: *Discrete & Computational Geometry* 17.3, S. 263–282. ISSN: 0179-5376. DOI: 10.1007/PL00009293.
- Esche, Andreas; Müller-Eiselt, Ralph; Petersen, Thieß und Steiner, Falk (2019). *Megatrend-Report #01: The Bigger Picture: Wie Globalisierung, Digitalisierung und demografischer Wandel uns herausfordern*. (Besucht am 05.02.2023).
- Ester, Martin; Kriegel, Hans-Peter; Sander, Jörg und Xu, Xiaowei (1996). „A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise“. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD-96)*.
- European Commission (2019). *eHealth: digital health and care*. Publications Office. DOI: 10.2818/419902. URL: <https://data.europa.eu/doi/10.2818/419902> (besucht am 08.02.2023).

- 
- Eurostat (2022). *Demography of Europe: An ageing population*. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/cache/digpub/demography/bloc-1c.html?lang=en> (besucht am 24.01.2023).
- Evans, Michaela und Becka, Denise (2020). „Pflege und Digitalisierung“. In: *Handbuch Digitalisierung in Staat und Verwaltung*. Hrsg. von Tanja Klenk; Frank Nullmeier und Göttrik Wewer. Springer eBook Collection. Wiesbaden: Springer VS, S. 1–12. ISBN: 978-3-658-23669-4. DOI: 10.1007/978-3-658-23669-4\_78-1.
- Everingham, Mark; van Gool, Luc; Williams, Christopher K. I.; Winn, John und Zisserman, Andrew (2010). „The Pascal Visual Object Classes (VOC) Challenge“. In: *International Journal of Computer Vision* 88.2, S. 303–338. ISSN: 0920-5691. DOI: 10.1007/s11263-009-0275-4.
- Fachinger, Uwe und Henke, Klaus-Dirk, Hrsg. (2010). *Der private Haushalt als Gesundheitsstandort: Theoretische und empirische Analysen*. 1. Auflage. Bd. 31. Europäische Schriften zu Staat und Wirtschaft. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. ISBN: 9783845225753. URL: <http://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:31-epflucht-1204529>.
- Fischler, Martin A. und Bolles, Robert C. (1981). „Random sample consensus“. In: *Communications of the ACM* 24.6, S. 381–395. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/358669.358692.
- Flade, Antje (2020). *Wohnen in der individualisierten Gesellschaft*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN: 978-3-658-29835-7. DOI: 10.1007/978-3-658-29836-4.
- Forschungszentrum Informatik (o. J.). *Wegweiser Smart Health*. URL: <https://www.wegweiserportal.de/> (besucht am 15.02.2023).
- Forsyth, David A. und Ponce, Jean (2012). *Computer Vision: A modern approach*. 2nd ed. Boston: Pearson. ISBN: 9780136085928.
- Franz, Steffen; Irmeler, Robert und Rüppel, Uwe (2018). „Real-time collaborative reconstruction of digital building models with mobile devices“. In: *Advanced Engineering Informatics* 38, S. 569–580. ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2018.08.012.
- Friedman, Jerome H.; Bentley, Jon Louis und Finkel, Raphael Ari (1977). „An Algorithm for Finding Best Matches in Logarithmic Expected Time“. In: *ACM Transactions on Mathematical Software* 3.3, S. 209–226. ISSN: 0098-3500. DOI: 10.1145/355744.355745.
- Gensun, Fang (1996). „Whittaker–Kotelnikov–Shannon Sampling Theorem and Aliasing Error“. In: *Journal of Approximation Theory* 85.2, S. 115–131. ISSN: 0021-9045. DOI: 10.1006/jath.1996.0033. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0021904596900337>.
- Georgieff, Peter (2008). *Ambient Assisted Living: Marktpotenziale IT-unterstützter Pflege für ein selbstbestimmtes Altern*. Bd. Band 17. FAZIT-Schriftenreihe: Forschung, Informations- und Medientechnologien in Baden-Württemberg. Stuttgart : MFG-Stiftung Baden-Württemberg. ISBN: 1861-5066.
- (2009). *Aktives Alter(n) und Technik: Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zur Erhaltung und Betreuung der Gesundheit älterer Menschen zu Hause*. Hrsg. von Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung. URL: <https://publica.fraunhofer.de/bitstreams/262350f0-3166-44ae-82e4-75b6c3e5e66f/download> (besucht am 23.01.2023).
- Gezawa, Abubakar Sulaiman; Zhang, Yan; Wang, Qicong und Yunqi, Lei (2020). „A Review on Deep Learning Approaches for 3D Data Representations in Retrieval and Classifications“. In: *IEEE Access* 8, S. 57566–57593. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2982196.

- 
- Ghorpade, Vijaya K.; Checchin, Paul; Malaterre, Laurent und Trassoudaine, Laurent (2017). „3D shape representation with spatial probabilistic distribution of intrinsic shape keypoints“. In: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2017.1. DOI: 10.1186/s13634-017-0483-y.
- GKV-Spitzenverband (2021). *Empfehlungen des GKV-Spitzenverbandes nach § 78 Abs. 2a SGB XI zu wohnumfeldverbessernden Maßnahmen in der Fassung vom 27.09.2021*.
- (2023). *Verzeichnis der wohnumfeldverbessernden Maßnahmen*. URL: [https://www.gkv-spitzenverband.de/pflegeversicherung/wum/wum\\_verzeichnis/verzeichnis\\_wum.jsp](https://www.gkv-spitzenverband.de/pflegeversicherung/wum/wum_verzeichnis/verzeichnis_wum.jsp) (besucht am 20.02.2023).
- (o. J.). *Hilfsmittelverzeichnis*. URL: <https://hilfsmittel.gkv-spitzenverband.de/home> (besucht am 14.02.2023).
- Göbl, Linda; Weis, Aline; Hoffmann, Mariell; Wiezorreck, Lars; Wensing, Michel; Szecsenyi, Joachim und Litke, Nicola (2022). „Eine explorative Querschnittsstudie zur Technikaffinität und Smartphone-Nutzung von Praxispersonal und PatientInnen – Entwicklung einer App für multimorbide PatientInnen in der allgemeinmedizinischen Versorgung“. In: *Zeitschrift für Evidenz, Fortbildung und Qualität im Gesundheitswesen* 169, S. 39–47. DOI: 10.1016/j.zefq.2021.11.002.
- Goodfellow, Ian; Bengio; Yoshua und Courville, Aaron (2016). *Deep Learning*. MIT Press. URL: <https://www.deeplearningbook.org/> (besucht am 14.03.2023).
- Gregor, Shirley und Hevner, Alan R. (2013). „Positioning and Presenting Design Science Research for Maximum Impact“. In: *MIS Quarterly* 37.2, S. 337–355. ISSN: 02767783. DOI: 10.25300/MISQ/2013/37.2.01.
- Grinblat, Roman (2022). „Sozialversicherungsrecht 2.0: Vom Update zum Upgrade – (digitale) Innovationsförderung in der gesetzlichen Krankenversicherung“. In: *Innovationen im Gesundheitswesen*. Hrsg. von Roman Grinblat; Daniela Etterer und Philipp Plugmann. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 3–32. ISBN: 978-3-658-33800-8. DOI: 10.1007/978-3-658-33801-5\_1.
- Grobecker, Claire; Krack-Roberg, Elle; Pöttsch, Olga und Sommer, Bettina (2021). *Datenreport 2021: Bevölkerung und Demografie*. Hrsg. von Statistisches Bundesamt. (Besucht am 23.01.2023).
- Grosch, Dorian; Hajinejad, Nassrin; Gumz, Jan Dennis; Tiemann, Jens und Goldacker, Gabriele (2021). *Das ÖFIT-Trendsonar Internet der Dinge*. Hrsg. von Kompetenzzentrum Öffentliche IT. URL: <https://www.oeffentliche-it.de/trendsonar-iot> (besucht am 09.03.2023).
- Groß, Dominik und Schmidt, Mathias (2018). „E-Health und Gesundheitsapps aus medizinethischer Sicht : Wollen wir alles, was wir können?“ In: *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 61.3, S. 349–357. DOI: 10.1007/s00103-018-2697-z.
- Gu, Jiuxiang; Wang, Zhenhua; Kuen, Jason; Ma, Lianyang; Shahroudy, Amir; Shuai, Bing; Liu, Ting; Wang, Xingxing; Wang, Gang; Cai, Jianfei und Chen, Tsuhan (2018). „Recent advances in convolutional neural networks“. In: *Pattern Recognition* 77, S. 354–377. ISSN: 0031-3203. DOI: 10.1016/j.patcog.2017.10.013. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0031320317304120>.
- Guhl, Tim (2015). „MAID - Mobilitätsassistent zur Unterstützung bewegungseingeschränkter Personen : Abschlussbericht zum Verbundvorhaben : Teilvorhaben: Entwicklung der Hardwareplattform inklusive autonomer Navigation“. In: *MAID - Mobilitätsassistent zur Unterstützung bewegungseingeschränkter Personen*. DOI: 10.2314/GBV:874383838.
- Günder, Alina (2022). *Ambient Assisted Living: 9 Tools für Senioren*. URL: <https://www.haus.de/smart-home/ambient-assisted-living-30037> (besucht am 12.02.2023).

- 
- Guo, Yulan; Wang, Hanyun; Hu, Qingyong; Liu, Hao; Liu, Li und Bennamoun, Mohammed (2021). „Deep Learning for 3D Point Clouds: A Survey“. In: *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 43.12, S. 4338–4364. ISSN: 1939-3539. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.3005434.
- Gyongy, Istvan; Dutton, Neale A. W. und Henderson, Robert K. (2022). „Direct Time-of-Flight Single-Photon Imaging“. In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 69.6, S. 2794–2805. DOI: 10.1109/TEDE.2021.3131430.
- Hajebi, Kiana; Abbasi-Yadkori, Yasin; Shahbazi, Hossein und Zhang, Hong (2011). „Fast approximate nearest-neighbor search with k-nearest neighbor graph“. In: *Twenty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence*.
- Hanrath, Stephanie (2011). „Selbstbestimmung in Gemeinschaft - Wohnungsund Sozialgenossenschaften als Zukunftsoption“. In: *Solidarität, Flexibilität, Selbsthilfe*. Hrsg. von Michaela Allgeier. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 121–136. ISBN: 978-3-531-17598-0. DOI: 10.1007/978-3-531-92814-2\_7.
- Hans Böckler Stiftung (2022). *Arbeitsbedingungen in der Pflege*. URL: <https://www.boeckler.de/de/auf-einen-blick-17945-zahlen-und-studien-zum-pflegenotstand-und-wege-hinaus-17962.htm> (besucht am 07.02.2023).
- Hansen, Marit; Hansen, Markus; Häuser, Marita; Janneck, Kai; Krasemann, Henry; Meints, Martin; Meissner, Sebastian; Raguse, Maren; Rost, Martin und Schallaböck, Jan (2007). *Verkettung digitaler Identitäten: Gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung im Rahmen der Innovations- und Technikanalyse*. Hrsg. von Marit Hansen und Sebastian Meissner. Kiel.
- Harrefors, Christina; Sävenstedt, Stefan und Axelsson, Karin (2009). „Elderly people’s perceptions of how they want to be cared for: an interview study with healthy elderly couples in Northern Sweden“. In: *Scandinavian journal of caring sciences* 23.2, S. 353–360. DOI: 10.1111/j.1471-6712.2008.00629.x.
- Hartl, Eva (2021). *Ambient Assisted Living (AAL): ein Milliardenmarkt*. URL: <https://www.excubate.de/de/insights/ambient-assisted-living-aal-ein-milliardenmarkt/> (besucht am 13.02.2023).
- Heinze, Rolf G. und Naegele, Gerhard (2010). „Intelligente Technik und „personal health“ als Wachstumsfaktoren für die Seniorenwirtschaft“. In: *Der private Haushalt als Gesundheitsstandort*. Hrsg. von Uwe Fachinger und Klaus-Dirk Henke. Europäische Schriften zu Staat und Wirtschaft. Baden-Baden: Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG, S. 109–134. ISBN: 9783845225753.
- Heipke, Christian (2017). „Photogrammetrie und Fernerkundung – eine Einführung“. In: *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Hrsg. von Christian Heipke. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 2–23. ISBN: 978-3-662-47093-0.
- Heitz, Jeremy; Gould, Stephen; Saxena, Ashutosh und Koller, Daphne (2008). „Cascaded classification models: Combining models for holistic scene understanding“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 21 (NIPS 2008)*. URL: [https://proceedings.neurips.cc/paper\\_files/paper/2008/file/072b030ba126b2f4b2374f342be9ed44-Paper.pdf](https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2008/file/072b030ba126b2f4b2374f342be9ed44-Paper.pdf).
- Hellgardt, Ernst; Welker, Lorenz; Hamm, Katja und Ziegler, Edda (2013). *Weisheit und Wissenschaft: Festschrift zum 25-jährigen Bestehen des Seniorenstudiums an der LMU*. München: Herbert Utz. ISBN: 9783831642564. URL: <https://books.google.de/books?id=a6qo5b9oLrcC> (besucht am 26.01.2023).

- 
- Hevner, Alan R.; March, Salvatore T.; Park, Jinsoo und Ram, Sudha (2004). „Design Science in Information Systems Research“. In: *MIS Quarterly* 28.1, S. 75. ISSN: 02767783. DOI: 10.2307/25148625.
- Hichri, Nouha; Stefani, Chiara; Luca, Livio de; Veron, Philippe und Hamon, Gaël (2013). „FROM POINT CLOUD TO BIM: A SURVEY OF EXISTING APPROACHES“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XL-5/W2, S. 343–348. DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-5-W2-343-2013.
- Higgins, Sean (2020). *6 Gründe, warum die NavVis-Software die besten Punktwolken liefert*. URL: <https://www.navvis.com/de/blog/6-ways-navvis-post-processing-software-ensures-ultimate-point-cloud-quality> (besucht am 04.05.2023).
- Hillesheim, Inga; Friedemann, Jan und Druba, Henriette (2021). *Neue Wege bei der Finanzierung der Sozialversicherung: Schlaglichter der Wirtschaftspolitik*. Hrsg. von Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2021/2021-03-neue-wege-bei-der-finanzierung-der-sozialversicherung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Monatsbericht/Monatsbericht-Themen/2021/2021-03-neue-wege-bei-der-finanzierung-der-sozialversicherung.pdf?__blob=publicationFile&v=8) (besucht am 04.02.2023).
- Hochschule Pforzheim (2021). *Intelligent Systems Research Group Projects: Komo3D*. URL: <https://www.h-ka.de/isrg/projects/komo3d> (besucht am 16.02.2023).
- Hoffmann, Elke; Romeu Gordo, Laura; Nowossadeck, Sonja und Simonson, Julia & Tesch-Römer, Clemens (2017). *Lebenssituation älterer Menschen in Deutschland: DZA-Fact Sheet*.
- Hoffmann, Sarah (2016). *Förderungsangebote für Ambient Assisted Living*. URL: <https://www.aal-deutschland.de/deutschland/bekanntmachung-altersgerechte-assistenzsysteme> (besucht am 15.02.2023).
- Hopf, Sonja (o. J.). *nullbarriere.de: Haustechnik, AAL*. URL: <https://nullbarriere.de/haustechnik.htm> (besucht am 15.02.2023).
- Humanrights (2020). *Menschenrechte im Alter - Dossier: Begriffserklärung und Diskriminierungsproblematik*. URL: <https://www.humanrights.ch/de/ipf/menschenrechte/alter/dossier/problematik/> (besucht am 17.02.2023).
- ImageNet (2014). *ImageNet Large Scale Visual Recognition Challenge 2014 (ILSVRC2014)*. URL: <https://image-net.org/challenges/LSVRC/2014/> (besucht am 16.04.2023).
- (o. J.). *ImageNet 1000 Class List*. URL: <https://deeplearning.cms.waikato.ac.nz/user-guide/class-maps/IMAGENET/> (besucht am 16.04.2023).
- Imhof, Arthur Erwin (1994). *Lebenserwartungen in Deutschland, Norwegen und Schweden im 19. und 20. Jahrhundert*. Reprint 2018. Berlin: Akademie Verlag. ISBN: 9783050069616. DOI: 10.1515/9783050069616.
- International Organization for Standardization (2011). *ISO/IEC 25010:2011, Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE), System and software quality models*.
- Jacobs, Klaus; Kuhlmeier, Adelheid; Greß, Stefan; Klauber, Jürgen und Schwinger, Antje, Hrsg. (2019). *Pflege-Report 2019: Mehr Personal in der Langzeitpflege - aber woher?* Bd. 2019. Springer eBook Collection. Berlin, Heidelberg: Springer. ISBN: 9783662589359. DOI: 10.1007/978-3-662-58935-9.
- Jazz, Andy (2020). *ARKit 911 — Scene Reconstruction with a LiDAR Scanner*. URL: <https://medium.com/macoclock/arkit-911-scene-reconstruction-with-a-lidar-scanner-57ff0a8b247e> (besucht am 17.04.2023).



- 
- Jenoptik (o. J.). *Innovative LiDAR-Technologien: optische Module und Komponenten für LiDAR-Sensoren: LiDAR Verfahren im Überblick*. URL: <https://www.jenoptik.de/produkte/lidar-sensoren-technologien> (besucht am 18.03.2023).
- Joo, Bohye (2018). „Politik der altersgerechten Wohnungsanpassung und Wohnberatung für einen möglichst langen Verbleib in vertrauter Häuslichkeit: Anschluss an die Konzepte des Wohlfahrtsmarktes und der sozialen Innovation“. Dissertation. Dortmund: Technische Universität Dortmund.
- Jorzig, Alexandra und Sarangi, Frank (2020). *Digitalisierung im Gesundheitswesen: Ein kompakter Streifzug durch Recht, Technik und Ethik*. Berlin und Heidelberg: Springer. ISBN: 3662583054.
- Kaiser, Heinz Jürgen (2012). „Automobilität“. In: *Angewandte Gerontologie*. Hrsg. von Hans-Werner Wahl; Clemens Tesch-Römer und Jochen Philipp Ziegelmann. Stuttgart: Kohlhammer, S. 261–267.
- Kaltenborn, Markus (1998). „Die Sozialgesetzgebung des Reichskanzlers Fürst Otto von Bismarck“. In: *JuristenZeitung* 53.15/16, S. 770–773. URL: <https://www.jstor.org/stable/20824554>.
- Kamps, Norbert (2009). *Grundlagen der Hilfsmittel- und Pflegehilfsmittelversorgung: Arbeitshilfe zum SGB V und SGB XI; Einführung in das Hilfsmittelverzeichnis*. 1. Aufl. Hilfsmittel-Experte. Regensburg: Walhalla und Praetoria. ISBN: 9783802974021. URL: <http://www.socialnet.de/rezensionen/isbn.php?isbn=978-3-8029-7402-1>.
- Kantar (2023). *Marktanteil des iPhones am Absatz von Smartphones in Deutschland von Januar 2012 bis Dezember 2022*. Hrsg. von Statista. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/251737/umfrage/marktanteil-des-apple-iphone-am-smartphone-absatz-in-deutschland/> (besucht am 28.03.2023).
- Kazhdan, Michael; Bolitho, Matthew und Hoppe, Hugues (2006). „Poisson surface reconstruction“. In: *Eurographics Symposium on Geometry Processing*.
- Kern, Fredie (2003). *Automatisierte Modellierung von Bauwerksgeometrien aus 3D-Laserscanner-Daten: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2002*. Bd. 19. Geodätische Schriftenreihe der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig: Inst. für Geodäsie und Photogrammetrie TU. ISBN: 3926146141.
- Klauer, Thomas und Plaß, Bastian (2021). „Point Cloud Capturing and AI-based Classification for as-built BIM using Augmented Reality“. In: *Artificial Intelligence – Application in Life Sciences and Beyond*. Hrsg. von Karl-Herbert Schäfer und Franz Quint, S. 158–166.
- Klie, Thomas, Hrsg. (2009). *Praktische Theologie des Alterns*. Bd. 4. Praktische Theologie im Wissenschaftsdiskurs. Berlin: De Gruyter. ISBN: 978-3110203745. URL: [http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc\\_library=BVB01&doc\\_number=016997630&line\\_number=0002&func\\_code=DB\\_RECORDS&service\\_type=MEDIA](http://bvbr.bib-bvb.de:8991/F?func=service&doc_library=BVB01&doc_number=016997630&line_number=0002&func_code=DB_RECORDS&service_type=MEDIA).
- Köcher, Renate und Sommer, Michael (2017). *Generali Altersstudie 2017: Wie ältere Menschen in Deutschland denken und leben: Repräsentative Studie des Instituts für Demoskopie*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-50394-2. DOI: 10.1007/978-3-662-50395-9.
- Kraft, Marc; Krüger, Jörg; Schauer, Thomas; Thüning, Manfred und Leiss, Regina (2017). „Schlussbericht zum Verbundprojekt BeMobil - Bewegungsfähigkeit und Mobilität wiedererlangen : Teilvorhaben der TU Berlin: Nutzerzentrierte Entwicklung technischer Methoden für eine optimale Mensch-Technik-Interaktion in der Bewegungsrehabilitation : Laufzeit des Vorhabens: 01.08.2014-31.12.2017“. In: *Schlussbericht zum Verbundprojekt BeMobil - Bewegungsfähigkeit und Mobilität wiedererlangen*. DOI: 10.2314/GBV:1031414274.

- 
- Krizhevsky, Alex; Sutskever, Ilya und Hinton, Geoffrey E. (2012). „ImageNet Classification with Deep Convolutional Neural Networks“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems 25 (NIPS 2012)* 25.
- Kuhlmann, Heiner und Holst, Christoph (2016). „Flächenhafte Abtastung mit Laserscanning“. In: *Handbuch der Geodäsie*. Hrsg. von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–46. ISBN: 978-3-662-46900-2. DOI: 10.1007/978-3-662-46900-2\_35-1.
- Kutterer, Handjörg; Pfaffenholz, Jens-André und Vennegeerts, Harald (2009). „Kinematisches terrestrisches Laserscanning“. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 134.2/2009.
- Lehr, Ursula (2013). „Der demografische Wandel – eine Herausforderung für Länder und Kommunen“. In: *Soziale Gerontologie in gesellschaftlicher Verantwortung*. Hrsg. von Gerhard Bäcker und Rolf G. Heinze. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 145–155. ISBN: 978-3-658-01571-8. DOI: 10.1007/978-3-658-01572-5\_10.
- Lehtola, Ville; Kaartinen, Harri; Nüchter, Andreas; Kaijaluoto, Risto; Kukko, Antero; Litkey, Paula; Honkavaara, Eija; Rosnell, Tomi; Vaaja, Matti; Virtanen, Juho-Pekka; Kurkela, Matti; El Issaoui, Aimad; Zhu, Lingli; Jaakkola, Anttoni und Hyypä, Juha (2017). „Comparison of the Selected State-Of-The-Art 3D Indoor Scanning and Point Cloud Generation Methods“. In: *Remote Sensing* 9.8, S. 796. DOI: 10.3390/rs9080796.
- Lemke, Oliver und Keller, Bettina (2018). „Common Nearest Neighbor Clustering—A Benchmark“. In: *Algorithms* 11.2, S. 19. DOI: 10.3390/a11020019.
- Leoni, Christina; Ferrarese, Stefano; Wahbeh, Wissam und Nardinocchi, Carla (2019). „EXTRACTION OF MAIN LEVELS OF A BUILDING FROM A LARGE POINT CLOUD“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-5/W2*, S. 41–47. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-5-W2-41-2019.
- Li, Ying; Ma, Lingfei; Zhong, Zilong; Liu, Fei; Chapman, Michael A.; Cao, Dongpu und Li, Jonathan (2021). „Deep Learning for LiDAR Point Clouds in Autonomous Driving: A Review“. In: *IEEE transactions on neural networks and learning systems* 32.8, S. 3412–3432. DOI: 10.1109/TNNLS.2020.3015992.
- Li, You und Ibanez-Guzman, Javier (2020). „Lidar for Autonomous Driving: The Principles, Challenges, and Trends for Automotive Lidar and Perception Systems“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 37.4, S. 50–61. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/MSP.2020.2973615.
- Lin, Tsung-Yi; Maire, Michael; Belongie, Serge; Hays, James; Perona, Pietro; Ramanan, Deva; Dollár, Piotr und Zitnick, C. Lawrence (2014). „Microsoft COCO: Common Objects in Context“. In: *Computer vision - ECCV 2014*. Hrsg. von David Fleet; Tomas Pajdla; Bernt Schiele und Tinne Tuytelaars. Bd. 8693. Lecture Notes in Computer Science. Cham: Springer, S. 740–755. ISBN: 978-3-319-10601-4. DOI: 10.1007/978-3-319-10602-1\_48.
- Lin, Zhi-Hao; Huang, Sheng-Yu und Wang, Yu-Chiang Frank (2020). „Convolution in the Cloud: Learning Deformable Kernels in 3D Graph Convolution Networks for Point Cloud Analysis“. In: *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, S. 1800–1809. URL: [https://openaccess.thecvf.com/content\\_CVPR\\_2020/html/Lin\\_Convolution\\_in\\_the\\_Cloud\\_Learning\\_Deformable\\_Kernels\\_in\\_3D\\_Graph\\_CVPR\\_2020\\_paper.html](https://openaccess.thecvf.com/content_CVPR_2020/html/Lin_Convolution_in_the_Cloud_Learning_Deformable_Kernels_in_3D_Graph_CVPR_2020_paper.html).

- 
- Liu, Jingyun; Sun, Qiao; Fan, Zhe und Jia, Yudong (2018). „TOF Lidar Development in Autonomous Vehicle“. In: *2018 the 3rd Optoelectronics Global Conference (OGC 2018)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 185–190. ISBN: 978-1-5386-7399-7. DOI: 10.1109/OGC.2018.8529992.
- Lloyd, Stuart P. (1982). „Least squares quantization in PCM“. In: *IEEE Trans. Inf. Theory* 28.2, S. 129–136. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Least-squares-quantization-in-PCM-Lloyd/9241ea3d8cb85633d314ecb74b31567b8e73f6af>.
- Lohia, Aditya; Kadam, Kalyani Dhananjay; Joshi, Rahul Raghvendra und Bongale, Anupkumar M. (2021). „Bibliometric Analysis of One-stage and Two-stage Object Detection“. In: *Library Philosophy and Practice (e-journal)* 4910. URL: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=9123&context=libphilprac>.
- López Iglesias, Julen; Díaz Severiano, Jose Andrés; Lizcano Amorocho, Piedad Eliana; Del Manchado Val, Cristina; Gómez-Jáuregui, Valentín; Fernández García, Olmo; Preciados Royano, Adrian und Otero González, César (2020). „Revision of Automation Methods for Scan to BIM“. In: *Advances in Design Engineering*. Hrsg. von Francisco Cavas-Martínez; Félix Sanz-Adan; Paz Morer Camo; Ruben Lostado Lorza und Jacinto Santamaría Peña. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Cham: Springer International Publishing, S. 482–490. ISBN: 978-3-030-41199-2. DOI: 10.1007/978-3-030-41200-5\_53.
- Lu, Qiuchen; Parlikad, Ajith Kumar; Woodall, Philip; Don Ranasinghe, Gishan; Xie, Xiang; Liang, Zhenglin; Konstantinou, Eirini; Heaton, James und Schooling, Jennifer (2020). „Developing a Digital Twin at Building and City Levels: Case Study of West Cambridge Campus“. In: *Journal of Management in Engineering* 36.3, S. 05020004. ISSN: 0742-597X. DOI: 10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000763. URL: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%5C%28ASCE%5C%29ME.1943-5479.0000763>.
- Luetzenburg, Gregor; Kroon, Aart und Bjørk, Anders A. (2021). „Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences“. In: *Scientific reports* 11.1, S. 22221. DOI: 10.1038/s41598-021-01763-9.
- Luhmann, Thomas (2018). *Nahbereichsphotogrammetrie: Grundlagen - Methoden -Beispiele*. 4., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin und Offenbach: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-641-3. URL: <http://www.vde-verlag.de/buecher/537640/nahbereichsphotogrammetrie.html>.
- Macher, Helene; Landes, Tania und Grussenmeyer, Pierre (2015). „Point clouds segmentation as base for as-built BIM creation“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* II-5/W3, S. 191–197. DOI: 10.5194/isprsannals-II-5-W3-191-2015.
- MacQueen, James B. (1967). *Some methods for classification and analysis of multivariate observations*. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Some-methods-for-classification-and-analysis-of-MacQueen/ac8ab51a86f1a9ae74dd0e4576d1a019f5e654ed>.
- Mahourvand, Mahrokh; Nerkamp, Arne; Örtülü, Asli und Tran, Tolga (2014). „Webbasierte Plattform für barrierefreie Systeme“. Projektarbeit. Frankfurt: Frankfurt University of Applied Sciences. URL: [http://www.fh-basys.de/dokuwiki/de:wpbs#fn\\_2](http://www.fh-basys.de/dokuwiki/de:wpbs#fn_2) (besucht am 10.03.2023).
- Maier, Markus; Hein, Matthias und Luxburg, Ulrike von (2007). *Cluster Identification in Nearest-Neighbor Graphs: Technical Report No. TR-163*.

- 
- Marbs, Andreas; Boochs, Frank; Ben Hmida, Helmi und Truong, Hung Quoc (2010). „Wissensbasierte Objekterkennung in 3D-Punktwolken und Bildern: 3-Ländertagung D-A-CH“. In: *DGPF-Tagungsband 2010*.
- Marckmann, Georg (2016). „Ethische Aspekte von eHealth“. In: *eHealth in Deutschland*. Hrsg. von Florian Fischer und Alexander Krämer. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN: 978-3-662-49503-2.
- Martens, Jan und Blankenbach, Jörg (2021). „VOX2BIM : A Fast Method for Automated Point Cloud Segmentation“. In: *EG-ICE 2021 Workshop on Intelligent Computing in Engineering*. Universitätsverlag der TU Berlin, S. 442–450.
- (2023). „VOX2BIM+ - A Fast and Robust Approach for Automated Indoor Point Cloud Segmentation and Building Model Generation“. In: *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 91.4, S. 273–294. ISSN: 2512-2789. DOI: 10.1007/s41064-023-00243-1.
- Martin, Robert C. (2017). *Clean Architecture: A craftsman’s guide to software structure and design*. Robert C. Martin series. Harlow: Pearson Education. ISBN: 9780134494333.
- Maturana, Daniel und Scherer, Sebastian (2015). „VoxNet: A 3D Convolutional Neural Network for real-time object recognition“. In: *2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, S. 922–928. DOI: 10.1109/IROS.2015.7353481.
- Menning, Sonja und Hoffmann, Elke (2009). „Funktionale Gesundheit und Pflegebedürftigkeit“. In: *Gesundheit und Krankheit im Alter: Eine gemeinsame Veröffentlichung des Statistischen Bundesamtes, des Deutschen Zentrums für Altersfragen und des Robert Koch-Instituts*. Hrsg. von Karin Böhm; Clemens Tesch-Römer und Thomas Ziese. Berlin, S. 62–78.
- Mildenhall, Ben; Srinivasan, Pratul P.; Tancik, Matthew; Barron, Jonathan T.; Ramamoorthi, Ravi und Ng, Ren (2022). „NeRF“. In: *Communications of the ACM* 65.1, S. 99–106. ISSN: 0001-0782. DOI: 10.1145/3503250.
- Ministerium für Arbeit, Gesundheit und Soziales des Landes Nordrhein-Westfalen (2008). *Sicher und bequem zu Hause wohnen: Wohnberatung für ältere und behinderte Menschen*.
- Ministerium für Arbeit, Soziales, Transformation und Digitalisierung (o. J.). *Begutachtung*. URL: <https://mastd.rlp.de/de/unsere-themen/pflege/pflegeversicherung/begutachtung/> (besucht am 26. 02. 2023).
- Möller, Claudia und Popa, Andrea (2019). „Herausforderung Zukunft: Das deutsche Gesundheitswesen im Wandel“. In: *Digitale Dienstleistungsinnovationen*. Hrsg. von Volker Stich; Jan Hendrik Schumann; Daniel Beverungen; Gerhard Gudergan und Philipp Jussen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 511–522. ISBN: 978-3-662-59516-9.
- Müntinga (2021). *Altersgerecht wohnen: in 5 Schritten zur barrierefreien Wohnung*. (Besucht am 18. 02. 2023).
- Nagel, Claus; Stadler, Alexandra und Kolbe, Thomas H. (2009). „Conceptual requirements for the automatic reconstruction of building information models from uninterpreted 3D models“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 34.
- NATSPEC (2013). *BIM and LOD: Building Information Modelling and Level of Development: BIM Paper NBP 001*. URL: [https://bim.natspec.org/images/NATSPEC\\_Documents/NATSPEC\\_BIM\\_LOD\\_Paper\\_131115.pdf](https://bim.natspec.org/images/NATSPEC_Documents/NATSPEC_BIM_LOD_Paper_131115.pdf) (besucht am 09. 03. 2023).
- Neitzel, Frank; Gordon, Bianca und Wujanz, Daniel (2014). „Verfahren zur standardisierten Überprüfung von terrestrischen Laserscannern (TLS)“. In: *DVW-Merkblatt 7-2014*. URL: <https://d>

- 
- vw.de/veroeffentlichungen/standpunkte/1149-verfahren-zur-standardisierten-ueberpruefung-von-terrestrischen-laserscannern-tls (besucht am 21.03.2023).
- Ngo, Tuan Duc; Hua, Binh-Son und Nguyen, Khoi (2023). *ISBNet: a 3D Point Cloud Instance Segmentation Network with Instance-aware Sampling and Box-aware Dynamic Convolution*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2303.00246>.
- Niclass, Cristiano L.; Shpunt, Alexander; Agranov, Gennadiy A.; Waldon, Matthew C.; Rezk, Mina A. und Oggier, Thierry (2020). „Imaging system with synchronized scan and sensing“. 010795001B2. URL: <https://patents.google.com/patent/US10795001B2/en>.
- Niclass, Cristiano L.; Soga, Mineki und Charbon, Edoardo (2007). „3D Imaging based on Single Photon Detectors“. In: *2nd Symposium on Range Imaging (RIM'07), Zurich, September, 2007*. URL: <https://infoscience.epfl.ch/record/125188>.
- Niepel, Thomas (2004). „Wohnberatung für ältere Menschen“. In: *Das Handbuch der Beratung*. Hrsg. von Frank Nestmann; Frank Engel und Ursel Sickendiek. Tübingen: dgvt-Verl., S. 1173–1187. ISBN: 3-87159-049-5.
- Nikoohemat, Shayan; Diakité, Abdoulaye A.; Zlatanova, Sisi und Vosselman, George (2020). „Indoor 3D reconstruction from point clouds for optimal routing in complex buildings to support disaster management“. In: *Automation in Construction* 113, S. 103109. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2020.103109.
- Nour El-Din, Mohamed; Pereira, Pedro F.; Poças Martins, João und Ramos, Nuno M. M. (2022). „Digital Twins for Construction Assets Using BIM Standard Specifications“. In: *Buildings* 12.12, S. 2155. DOI: 10.3390/buildings12122155.
- Nullmeier, Frank (2021). „Sozialstaat“. In: *Handwörterbuch des politischen Systems der Bundesrepublik Deutschland*. Hrsg. von Uwe Andersen; Jörg Bogumil; Stefan Marschall und Wichard Woyke. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 836–842. ISBN: 978-3-658-23665-6. DOI: 10.1007/978-3-658-23666-3\_195.
- Object Management Group (2013). *Business Process Model and Notation (BPMN): Version 2.0.2*. URL: <https://www.omg.org/spec/BPMN/> (besucht am 08.03.2023).
- (2017). *OMG<sup>®</sup> Unified Modeling Language<sup>®</sup> (OMG UML<sup>®</sup>): Version 2.5.1*. URL: <https://www.omg.org/spec/UML> (besucht am 22.02.2023).
- Obrock, Lars S. und Gülch, Eberhard (2020). „Automatisierte semantische Modellierung von Innenräumen aus Bildern und abgeleiteten Punktwolken basierend auf Deep Learning Methoden“. In: *40. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF* 29, S. 358–372.
- Ochmann, Sebastian; Vock, Richard; Wessel, Raoul; Tamke, Martin und Klein, Reinhard (2014). „Automatic Generation of Structural Building Descriptions from 3D Point Cloud Scans“. In: *Proceedings of the 9th International Conference on Computer Graphics Theory and Applications*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, S. 120–127. ISBN: 978-989-758-002-4. DOI: 10.5220/0004689601200127.
- Paassen, Georg (2018). *Smarte Altenpflege*. URL: <https://www.pflegegrad.info/nachrichten/rss/2018-iv/2018-10-05.php> (besucht am 15.02.2023).
- Padmanabhan, Preethi; Zhang, Chao und Charbon, Edoardo (2019). „Modeling and Analysis of a Direct Time-of-Flight Sensor Architecture for LiDAR Applications“. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 19.24. DOI: 10.3390/s19245464.

- 
- Papers with Code (2023). *ScanNet Dataset*. URL: <https://paperswithcode.com/dataset/scannet> (besucht am 13.04.2023).
- Pătrăucean, Viorica; Armeni, Iro; Nahangi, Mohammad; Yeung, Jamie; Brilakis, Ioannis und Haas, Carl (2015). „State of research in automatic as-built modelling“. In: *Advanced Engineering Informatics* 29.2, S. 162–171. ISSN: 14740346. DOI: 10.1016/j.aei.2015.01.001.
- Pattee, Aaron (2016). „Photogrammetric Procedure for Modeling Castles and Ceramics“. In: DOI: 10.11588/propylaeumdok.00003217.
- Perrig-Chiello, Pasqualina; Dubach, Martina und Altwegg, Jürg, Hrsg. (2012). *Brüchiger Generationenkitt? Generationenbeziehungen im Umbau*. 1. Aufl. Zürich: vdf Hochschulverlag AG. ISBN: 9783728135070. URL: <https://content-select.com/portal/media/view/55102343-3878-4127-8b48-0f44b0dd2d03>.
- Petzold, Frank und Rechenberg, Benedict (2021). „BIM und Bauen im Bestand“. In: *Building Information Modeling*. Hrsg. von André Borrmann; Markus König; Christian Koch und Jakob Beetz. VDI-Buch. Wiesbaden und Heidelberg: Springer Vieweg, S. 507–532. ISBN: 978-3-658-33360-7.
- Pfeifer, Norbert; Mandlbürger, Gottfried und Glira, Philipp (2017). „Laserscanning“. In: *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Hrsg. von Christian Heipke. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 432–479. ISBN: 978-3-662-47093-0.
- Pfister, Verena und Steiner, Barbara (2016). „PATRONUS - Personalisiertes Assistenzsystem mit bedarfsoptimiertem Akteurs-Netzwerk zur häuslichen Unterstützung und automatischen Situationserkennung. Teilprojekt: Koordination, Nutzereinbindung, Bedarfsanalyse und Praxiserprobung für ein personalisiertes Assistenzsystem : Schlussbericht 2015 - BruderhausDiakonie : Laufzeit des Vorhabens von: 01.10.2012 bis: 31.12.2015“. In: *PATRONUS - Personalisiertes Assistenzsystem mit bedarfsoptimiertem Akteurs-Netzwerk zur häuslichen Unterstützung und automatischen Situationserkennung. Teilprojekt: Koordination, Nutzereinbindung, Bedarfsanalyse und Praxiserprobung für ein personalisiertes Assistenzsystem : Schlussbericht 2015 - BruderhausDiakonie : Laufzeit des Vorhabens von: 01.10.2012 bis: 31.12.2015*. DOI: 10.2314/GBV:875838243.
- Pläß, Bastian; Emrich, Jan; Götz, Selina; Kernstock, David und Klauer, Thomas (2021). „Evaluation of point cloud data acquisition techniques for Scan-to-BIM workflows in Healthcare“. In: *Smart surveyors for land and water management - challenges in a new reality*. Copenhagen: International Federation of Surveyors FIG, S. 1–13. ISBN: 978-87-92853-65-3.
- Pläß, Bastian und Klauer, Thomas (2022a). „Digital Flash LiDAR Punktwolken – Consumer-Produkt oder geodätische Zukunftstechnologie?“ In: *Terrestrisches Laserscanning 2022 (TLS 2022)*. Hrsg. von DVW e. V. Augsburg: Wißner-Verlag, S. 151–168.
- (2022b). „Next Generation Scan-to-BIM: Ein neuer Ansatz zur strukturierten Datenerfassung für as-built Indoor-Modelle“. In: *Leitfaden Geodäsie und BIM*. Hrsg. von DVW e. V. und Runder Tisch GIS e. V. Buhl/München, S. 173–175.
- Pläß, Bastian; Prudhomme, Claire und Ponciano, Jean-Jacques (2021). „BIM ON ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR DECISION SUPPORT IN E-HEALTH“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2021*, S. 207–214. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-207-2021.
- PocketGamer.biz (2023). *Anteil der Apps im App Store nach den Top-20-Kategorien in den USA im Januar 2023*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/166976/umfrage/beliebteste-kategorien-im-app-store/> (besucht am 26.03.2023).

- 
- Ponciano, Jean-Jacques (2019). „Object detection in unstructured 3D data sets using explicit semantics“. Dissertation. Saint-Étienne: Universität Jean Monnet Saint-Etienne.
- Ponciano, Jean-Jacques; Boochs, Frank und Trémeau, Alain (2017). „Knowledge-based object recognition in point clouds and image data sets“. In: *gis.Science - Die Zeitschrift für Geoinformatik*. URL: <https://hal.science/hal-02047375>.
- Poux, Florent (2019). „The Smart Point Cloud: Structuring 3D intelligent point data“. Dissertation. Lüttich: Universität Lüttich.
- (2021). „How to automate 3D point cloud segmentation and clustering with Python“. In: *Towards Data Science*. URL: <https://towardsdatascience.com/how-to-automate-3d-point-cloud-segmentation-and-clustering-with-python-343c9039e4f5> (besucht am 31.03.2022).
- Poux, Florent und Billen, Roland (2019). „Voxel-based 3D Point Cloud Semantic Segmentation: Unsupervised Geometric and Relationship Featuring vs Deep Learning Methods“. In: *ISPRS International Journal of Geo-Information* 8,5, S. 213. DOI: 10.3390/ijgi8050213.
- Poux, Florent; Neuville, Romain; Hallot, Pierre und Billen, Roland (2017). „MODEL FOR SEMANTICALLY RICH POINT CLOUD DATA“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-4/W5*, S. 107–115. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-4-W5-107-2017.
- Poux, Florent; Neuville, Romain; Nys, Gilles-Antoine und Billen, Roland (2018). „3D Point Cloud Semantic Modelling: Integrated Framework for Indoor Spaces and Furniture“. In: *Remote Sensing* 10,9, S. 1412. DOI: 10.3390/rs10091412.
- Poux, Florent und Ponciano, Jean-Jacques (2020). „SELF-LEARNING ONTOLOGY FOR INSTANCE SEGMENTATION OF 3D INDOOR POINT CLOUD“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2020*, S. 309–316. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-309-2020.
- Qi, Charles R.; Litany, Or; He, Kaiming und Guibas, Leonidas J. (2019). „Deep Hough Voting for 3D Object Detection in Point Clouds“. In: S. 9277–9286.
- Qi, Charles R.; Su, Hao; Mo, Kaichun und Guibas, Leonidas J. (2017). „PointNet: Deep Learning on Point Sets for 3D Classification and Segmentation“. In: *Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR) 2017*.
- Qi, Charles R.; Yi, Li; Su, Hao und Guibas, Leonidas J. (2017). „PointNet++: Deep Hierarchical Feature Learning on Point Sets in a Metric Space“. In: *Proceedings of the 31st International Conference on Neural Information Processing Systems*. NIPS’17. Red Hook, NY, USA: Curran Associates Inc, S. 5105–5114. ISBN: 9781510860964.
- Quintana, Blanca; Prieto, Samuel A.; Adan, Antonio und Bosché, Frédéric (2017). „Scan-To-BIM for Small Building Components“. In: *Lean and Computing in Construction Congress - Volume 1: Proceedings of the Joint Conference on Computing in Construction*. Edinburgh: Heriot-Watt University, S. 29–36. ISBN: 978-0-9565951-6-4. DOI: 10.24928/JC3-2017/0139.
- Rademaker, Maike (2021). *Wachsender Pflegenotstand: Sechs Millionen Pflegebedürftige und viel zu wenig Personal*. URL: <https://www.deutschlandfunk.de/wachsender-pflegenotstand-personal-technik-praevention-100.html> (besucht am 07.02.2023).
- Redmon, Joseph; Divvala, Santosh; Girshick, Ross und Farhadi, Ali (2016). „You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection“. In: *29th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern*

- 
- Recognition. Piscataway, NJ: IEEE, S. 779–788. ISBN: 978-1-4673-8851-1. DOI: 10.1109/CVPR.2016.91.
- Redmon, Joseph und Farhadi, Ali (2018). *YOLOv3: An Incremental Improvement*.
- Ren, Shaoqing; He, Kaiming; Girshick, Ross und Sun, Jian (2015). „Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks“. In: *Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 2015)* 28.
- Research and Markets, Hrsg. (2022). *3D Scanning Market By Type, Services, Range, and Application: Global Opportunity Analysis and Industry Forecast, 2021-2030*. URL: <https://www.researchandmarkets.com/reports/5578314> (besucht am 17.03.2023).
- Rexroth, Frank (2005). „Armenhäuser - eine neue Institution der sozialen Fürsorge im späten Mittelalter“. In: *Funktions- und Strukturwandel spätmittelalterlicher Hospitäler im europäischen Vergleich*. Hrsg. von Michael Matheus. Geschichtliche Landeskunde. Stuttgart: Steiner, S. 1–14. ISBN: 3515082336.
- Rocha, Gustavo; Mateus, Luís; Fernández, Jorge und Ferreira, Victor (2020). „A Scan-to-BIM Methodology Applied to Heritage Buildings“. In: *Heritage* 3.1, S. 47–67. DOI: 10.3390/heritage3010004.
- Rodenburg, Oliver B. P. M.; Verbree, Edward und Zlatanova, Sisi (2016). „INDOOR A\* PATHFINDING THROUGH AN OCTREE REPRESENTATION OF A POINT CLOUD“. In: *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences IV-2/W1*, S. 249–255. DOI: 10.5194/isprs-annals-IV-2-W1-249-2016.
- Romero-Jarén, Rocio; Arranz, Jose Juan; Navas-Sánchez, L.; Erduran, E.; Martínez-Cuevas, S. und Benito, B. (2021). „AUTOMATIC SEGMENTATION OF POINT CLOUDS IN THE ARCHITECTURE ENVIRONMENT“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLIII-B2-2021*, S. 215–221. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2021-215-2021.
- Rommel, Alexander; Kottner, Jan; Suhr, Ralf und Lahmann, Nils (2019). „Häufigkeit von Stürzen unter Klienten ambulanter Pflegedienste. Die Bedeutung pflegerischer und sozialer Risikofaktoren“. In: *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie* 52.1, S. 3–9. DOI: 10.1007/s00391-017-1215-5.
- Rosenberg, Charles E. (1987). *The care of strangers: The rise of America's hospital system*. New York, NY: Basic Books. ISBN: 9780465008773.
- Rosenberg, Martina (2023). *Digitale Apps für die Pflege & Gesundheit*. URL: <https://www.pflege.de/hilfsmittel/digitale-pflege-gesundheits-apps/> (besucht am 16.02.2023).
- Rösler, Ulrike; Schmidt, Kristina; Merda, Meiko und Melzer, Marlen (2018). *Digitalisierung in der Pflege: Wie intelligente Technologien die Arbeit professionell Pflegender verändern*. Hrsg. von Geschäftsstelle der Initiative Neue Qualität der Arbeit. Berlin.
- Rossignol, Joe (2023). „iPhone 15 Pro Models Again Rumored to Feature Improved LiDAR Scanner“. In: *MacRumors*. URL: <https://www.macrumors.com/2023/03/08/iphone-15-pro-new-lidar-scanner-rumor/> (besucht am 01.04.2023).
- Russakovsky, Olga; Deng, Jia; Huang, Zhiheng; Berg, Alexander C. und Fei-Fei, Li (2013). „Detecting Avocados to Zucchini: What Have We Done, and Where Are We Going?“. In: *International Conference on Computer Vision (ICCV)*.
- Sachverständigenrat zur Begutachtung der Entwicklung im Gesundheitswesen (2021). *Digitalisierung für Gesundheit: Ziele und Rahmenbedingungen eines dynamisch lernenden Gesundheitssystems*. URL:



- 
- [https://www.svr-gesundheit.de/fileadmin/Gutachten/Gutachten\\_2021/SVR\\_Gutachten\\_2021.pdf](https://www.svr-gesundheit.de/fileadmin/Gutachten/Gutachten_2021/SVR_Gutachten_2021.pdf) (besucht am 24. 02. 2023).
- Samet, Hanan (2006). *Foundations of multidimensional and metric data structures*. The Morgan Kaufmann series in data management systems. Amsterdam und Heidelberg: Elsevier. ISBN: 0123694469.
- Schatz, Kristian und Westphal, Tim (2021). *BIM Fachwissen Modellinhalte: Was bedeutet LOD / LOI?* Berlin. URL: <https://www.baunetzwissen.de/bim/fachwissen/modellinhalte/was-bedeutet-lod-loi-5285890> (besucht am 26. 07. 2021).
- Schuhen, Michael (2020). *Das Alter spielt bei digitaler Kompetenz eine geringere Rolle als gedacht*. URL: <https://www.uni-siegen.de/start/news/oeffentlichkeit/896358.html> (besucht am 22. 02. 2023).
- Schult, Jonas; Engelmann, Francis; Hermans, Alexander; Litany, Or; Tang, Siyu und Leibe, Bastian (2022). *Mask3D: Mask Transformer for 3D Semantic Instance Segmentation*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2210.03105>.
- Schulz, Anika (2018). „Statt bisher drei jetzt vier Lebensphasen“. In: *DIA – Deutsches Institut für Altersvorsorge*. URL: <https://www.dia-vorsorge.de/demographie/statt-bisher-drei-jetzt-vier-lebensphasen/> (besucht am 06. 05. 2023).
- Schwarz, Willfried und Hennes, Maria (2016). „Qualitätsbewertungen in der Ingenieurgeodäsie“. In: *Handbuch der Geodäsie*. Hrsg. von Willi Freeden und Reiner Rummel. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, S. 1–32. ISBN: 978-3-662-46900-2.
- SDK-Stiftung (2014). *Blickpunkte: Pflegefall Zukunft - sind wir reif für die Pflege?*
- Selge, Rouven (2017). *Barrierefreiheit im Wohnungsbau: Barrierefrei-Anforderungen im Bauordnungsrecht: VDI-Statusreport 2017*. Hrsg. von VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik.
- Seliger, Walter (2022). *5. Bericht des GKV-Spitzenverbandes gemäß § 139 Absatz 9 Satz 3 SGB V zur Fortschreibung des Hilfsmittelverzeichnisses: Berichtszeitraum: 01.03.2021 – 28.02.2022*. Hrsg. von GKV-Spitzenverband.
- Shafto, Mike; Conroy, Mike; Doyle, Rich; Glaessgen, Ed; Kemp, Chris; LeMoigne, Jacqueline und Wang, Lui (2010). *Modeling, Simulation, Information Technology & Processing Roadmap*.
- Shin, Daeyun; Fowlkes, Charless C. und Hoiem, Derek (2018). „Pixels, Voxels, and Views: A Study of Shape Representations for Single View 3D Object Shape Prediction“. In: *2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, S. 3061–3069. ISBN: 2575-7075. DOI: 10.1109/CVPR.2018.00323.
- Silberman, Nathan und Fergus, Rob (2011). „Indoor Scene Segmentation using a Structured Light Sensor“. In: *Proceedings of the International Conference on Computer Vision - Workshop on 3D Representation and Recognition*.
- Silberman, Nathan; Kohli, Pushmeet; Hoiem, Derek und Fergus, Rob (2012). „Indoor Segmentation and Support Inference from RGBD Images“. In: *ECCV 2012*.
- Sixsmith, Andrew; Carrillo, Maria; Phillips, David; Lansley, Peter und Woolrych, Ryan (2013). „International Initiatives in Technology and Aging“. In: *Technologies for active aging*. Hrsg. von Andrew Sixsmith und Gloria Gutman. International perspectives on aging. New York, NY u. a.: Springer, S. 201–221. ISBN: 9781441983480.
- Son, Hyojoo; Kim, Changwan und Turkan, Yelda (2015). „Scan-to-BIM – An Overview of the Current State of the Art and a Look Ahead“. In: *Proceedings of the 32nd International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining (ISARC 2015)*. Hrsg. von Mikko Malaska

- 
- und Rauno Heikkilä. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC). DOI: 10.22260/ISARC2015/0050.
- Song, Shuran; Lichtenberg, Samuel P. und Xiao, Jianxiong (2015). „SUN RGB-D: A RGB-D scene understanding benchmark suite“. In: *2015 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2015)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 567–576. ISBN: 978-1-4673-6964-0. DOI: 10.1109/CVPR.2015.7298655.
- Spillner, Andreas und Linz, Tilo (2019). *Basiswissen Softwaretest: Aus- und Weiterbildung zum Certified Tester – Foundation Level nach ISTQB®-Standard*. 6., überarbeitete und aktualisierte Auflage. Heidelberg: dpunkt.verlag. ISBN: 9783960885016. URL: <https://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&scope=site&db=nlebk&db=nlabk&AN=2151604>.
- Stark, Jeannette (2018). *Wir schaffen Begriffsklarheit in der E-Health-Domäne*. URL: <https://tu-dresden.de/bu/wirtschaft/winf/digital-health/die-forschungsgruppe/news/wir-schaffen-begriffsklarheit-in-der-ehealth-domaene> (besucht am 13.02.2023).
- Statistisches Bundesamt (2016). *Ältere Menschen in Deutschland und der EU*. Wiesbaden.
- (2020a). *Bevölkerung: Haushalte und Familien in Deutschland: Ergebnisse des Mikrozensus*. URL: [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/\\_inhalt.html#sprg229090](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/_inhalt.html#sprg229090) (besucht am 24.01.2023).
  - (2020b). *Gesundheitliche Situation älterer Menschen: Datenquelle: Leben in Europa (EU-SILC)*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/Aeltere-Menschen/gesundheits-aeltere.html> (besucht am 24.01.2023).
  - (2021). *Fast 6 Millionen ältere Menschen leben allein: Pressemitteilung Nr. N 057 vom 29. September 2021*. URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/09/PD21\\_N057\\_12411.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2021/09/PD21_N057_12411.html) (besucht am 28.01.2023).
  - (2022a). *15. koordinierte Bevölkerungsvorausberechnung*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Bevoelkerungsvorausberechnung/begleitheft.html?nn=208696#vorbemerkung> (besucht am 24.01.2023).
  - (2022b). *5 Millionen Pflegebedürftige zum Jahresende 2021: Pressemitteilung Nr. 554 vom 21. Dezember 2022*. URL: [https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22\\_554\\_224.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_554_224.html) (besucht am 06.02.2023).
  - (2022c). *Anzahl von Pflegeheimen und ambulanten Pflegediensten in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2021*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2729/umfrage/anzahl-der-pflegeheime-und-ambulanten-pflegedienste-seit-1999/> (besucht am 07.02.2023).
  - (2022d). *Personal in Pflegeheimen und ambulanten Pflegediensten*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Pflege/Tabellen/personal-pflegeeinrichtungen.html> (besucht am 06.02.2023).
  - (2022e). *Private Haushalte mit älteren Menschen*. URL: <https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/Aeltere-Menschen/private-haushalte.html> (besucht am 25.01.2023).
- Steiner, Barbara und Pfister, Verena (2013). „Sensorbetreutes Wohnen - sens[at]home : Schlussbericht Teilvorhaben - Bruderhaus Diakonie; Laufzeit des Vorhabens von: 01.08.2009 bis: 31.09.2012“. In: *Sensorbetreutes Wohnen - sens[at]home*. DOI: 10.2314/GBV:773367764.

- 
- Strube, Jens (2022). „Fachkräftemangel: Verband warnt vor Zusammenbruch des Pflegesystems“. In: *RedaktionsNetzwerk Deutschland*. URL: <https://www.rnd.de/politik/fachkraeftemangel-verband-warnt-vor-zusammenbruch-des-pflegesystems-JJJY374E4VCOPAE2VILNWNZK7U.html> (besucht am 08.02.2023).
- Strupeit, Steve; Buss, Arne und Dassen, Theo (2013). „Patientenedukation bei älteren Menschen mit Mobilitätseinschränkungen : Konzeption und Evaluation von Bedarfen während und nach der Entlassung aus dem klinisch-geriatrischen Setting“. In: *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie* 46,8, S. 748–755. DOI: 10.1007/s00391-013-0505-9.
- Stula, Sabrina (2012). *Living in Old Age in Europe - Current Developments and Challenges: Working Paper No. 7 of the Observatory for Sociopolitical Developments in Europe*. URL: [http://www.sociopolitical-observatory.eu/uploads/tx\\_aebgppublications/AP\\_7\\_EN.pdf](http://www.sociopolitical-observatory.eu/uploads/tx_aebgppublications/AP_7_EN.pdf) (besucht am 19.01.2021).
- Stumm, Sven; Schwan, Philipp; Becker, Ralf; Lublasser, Elisa; Blankenbach, Jörg; Vallée, Dirk; Hildebrand, Linda und Brell-Cokcan, Sigrid (2017). „Towards Life Cycle Complete BIM“. In: *Proceedings of the 34th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*. Hrsg. von Min-Yuan Cheng; Hung-Ming Chen und Kuan Chang Chiu. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). Tribun EU, s.r.o., Brno. DOI: 10.22260/ISARC2017/0088.
- Stutzer, Franziska; Militzer-Horstmann, Carsta; Schuppmann, Susann Cathleen und Höpfner, Thomas (2020). „Digitale Gesundheits- und Pflegeanwendungen – Chancen, Voraussetzungen und Hemmnisse der Digitalisierung für das Gesundheitswesen und die Pflege“. In: *Krankenkassen- und Pflegekassenmanagement*. Hrsg. von Hans-R. Hartweg; Franz Knieps und Karin Agor. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, S. 1–22. ISBN: 978-3-658-31244-2. DOI: 10.1007/978-3-658-31244-2\_79-1.
- Su, Hang; Maji, Subhransu; Kalogerakis, Evangelos und Learned-Miller, Erik (2015). „Multi-view Convolutional Neural Networks for 3D Shape Recognition“. In: *2015 IEEE International Conference on Computer Vision*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 945–953. ISBN: 978-1-4673-8391-2. DOI: 10.1109/ICCV.2015.114.
- Sun, Hong; Florio, Vincenzo de; Gui, Ning und Blondia, Chris (2009). „Promises and Challenges of Ambient Assisted Living Systems“. In: *2009 Sixth International Conference on Information Technology: New Generations*. Hrsg. von IEEE Staff. IEEE, S. 1201–1207. ISBN: 978-1-4244-3770-2. DOI: 10.1109/ITNG.2009.169.
- Szeliski, Richard (2022). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. 2nd Edition. Springer. URL: <https://szeliski.org/Book/>.
- Tackenberg, Peter; Knüppel, Johanna; Wagner, Franz und Olschewski, Ulrike (2009). *Wie sieht es im Pflegealltag wirklich aus? - Fakten zum Pflegekollaps: Ausgewählte Ergebnisse der DBfK-Meinungsumfrage 2008/09*. Hrsg. von Deutscher Berufsverband für Pflegeberufe. Berlin. URL: [https://www.pflegegesellschaft-rlp.de/fileadmin/pflegesellschaft/Dokumente/DbfK\\_-\\_Pflegealltag\\_-\\_Abschlussbericht.pdf](https://www.pflegegesellschaft-rlp.de/fileadmin/pflegesellschaft/Dokumente/DbfK_-_Pflegealltag_-_Abschlussbericht.pdf) (besucht am 07.02.2023).
- Tagliabue, Lavinia Chiara; Cecconi, Fulvio Re; Maltese, Sebastiano; Rinaldi, Stefano; Ciribini, Angelo Luigi Camillo und Flammini, Alessandra (2021). „Leveraging Digital Twin for Sustainability Assessment of an Educational Building“. In: *Sustainability* 13,2, S. 480. DOI: 10.3390/su13020480.

- 
- Tamajo, Alberto; Plaß, Bastian und Klauer, Thomas (2022). *Shrinking unit: a Graph Convolution-Based Unit for CNN-like 3D Point Cloud Feature Extractors*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2209.12770>.
- Tang, Pingbo; Huber, Daniel; Akinci, Burcu; Lipman, Robert und Lytle, Alan (2010). „Automatic reconstruction of as-built building information models from laser-scanned point clouds: A review of related techniques“. In: *Automation in Construction* 19.7, S. 829–843. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2010.06.007.
- Tews, Hans Peter (1993). „Neue und alte Aspekte des Strukturwandels des Alters“. In: *Lebenslagen im Strukturwandel des Alters*. Hrsg. von Gerhard Naegele und Hans Peter Tews. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, S. 15–42. ISBN: 978-3-531-12394-3. DOI: 10.1007/978-3-322-99987-0\_1.
- Theussig, Sören (2012). „AAL für ALLE? Nutzerakzeptanz-Steigerung von altersgerechten Assistenzsystemen (AAL) durch den Ansatz des Universal Design und Nutzerintegration“. Masterarbeit.
- Thomson, Charles und Boehm, Jan (2015). „Automatic Geometry Generation from Point Clouds for BIM“. In: *Remote Sensing* 7.9, S. 11753–11775. DOI: 10.3390/rs70911753.
- Thomson, Charles Patrick Hugo (2016). „From Point Cloud to Building Information Model: Capturing and Processing Survey Data Towards Automation for High Quality 3D Models to Aid a BIM Process“. Dissertation. London: University College London.
- Tommasi, Cinzia; Achille, Cristiana und Fassi, Francesco (2016). „FROM POINT CLOUD TO BIM: A MODELLING CHALLENGE IN THE CULTURAL HERITAGE FIELD“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* XLI-B5, S. 429–436. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B5-429-2016.
- Turk, Greg und Levoy, Marc (1994). „Zippered polygon meshes from range images“. In: *Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. Hrsg. von Dino Schweitzer. ACM Conferences. New York, NY: ACM, S. 311–318. ISBN: 0897916670. DOI: 10.1145/192161.192241.
- Ultralytics (2023). *YOLOv8 GitHub Repository*. URL: <https://github.com/ultralytics/ultralytics> (besucht am 16.04.2023).
- USIBD (2019). *Level of Accuracy (LOA) Specification Guide: Version 3.0*. URL: [https://cdn.ymas.com/www.nysapls.org/resource/resmgr/2019\\_conference/handouts/hale-g\\_bim\\_loa\\_guide\\_c120\\_v2.pdf](https://cdn.ymas.com/www.nysapls.org/resource/resmgr/2019_conference/handouts/hale-g_bim_loa_guide_c120_v2.pdf) (besucht am 09.03.2023).
- Usmani, Abdul Rahman Ahsan; Elshafey, Abdalrahman; Gheisari, Masoud; Chai, Changsaar; Aminudin, Eeydzah Binti und Tan, Cher Siang (2020). „A scan to as-built building information modeling workflow: a case study in Malaysia“. In: *Journal of Engineering, Design and Technology* 18.4, S. 923–940. ISSN: 1726-0531. DOI: 10.1108/JEDT-07-2019-0182.
- Valero, Enrique; Adan, Antonio; Huber, Daniel und Cerrada, Carlos (2011). „Detection, Modeling and Classification of Moldings for Automated Reverse Engineering of Buildings from 3D Data“. In: *28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2011)*. Hrsg. von Soonwook Kwon. Proceedings of the International Symposium on Automation and Robotics in Construction (IAARC). International Association for Automation and Robotics in Construction (IAARC). DOI: 10.22260/ISARC2011/0099.
- Valero, Enrique; Adán, Antonio und Bosché, Frédéric (2016). „Semantic 3D Reconstruction of Furnished Interiors Using Laser Scanning and RFID Technology“. In: *Journal of Computing in Civil Engineering* 30.4. ISSN: 0887-3801. DOI: 10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000525.

- 
- van Nederveen, G. A. und Tolman, F. P. (1992). „Modelling multiple views on buildings“. In: *Automation in Construction* 1.3, S. 215–224. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/0926-5805(92)90014-B. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/092658059290014B>.
- Verbraucherzentrale Rheinland-Pfalz (o. J.). *Landesberatungsstelle Barrierefrei Bauen und Wohnen*. URL: <https://www.verbraucherzentrale-rlp.de/barrierefreiheit> (besucht am 14.03.2023).
- Verein Deutscher Ingenieure e. V. (2012). *VDI-Richtlinie VDI 6008, Barrierefreie Lebensräume: Barrierefreie Lebensräume*. Düsseldorf.
- (2022). *VDI-Richtlinie 2552 Blatt 2, Building Information Modeling - Begriffe: Building Information Modeling - Begriffe*.
- Volk, Rebekka; Stengel, Julian und Schultmann, Frank (2014). „Building Information Modeling (BIM) for existing buildings — Literature review and future needs“. In: *Automation in Construction* 38, S. 109–127. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2013.10.023.
- vom Brocke, Jan; Hevner, Alan und Maedche, Alexander (2020). „Introduction to Design Science Research“. In: *Design Science Research. Cases*. Hrsg. von Jan vom Brocke; Alan Hevner und Alexander Maedche. Progress in IS. Cham: Springer International Publishing, S. 1–13. ISBN: 978-3-030-46780-7. DOI: 10.1007/978-3-030-46781-4\_1.
- von Grätz, Philipp Grätzel (2019). *Digitale Versorgung Gesetz: Der Rundumschlag*. Hrsg. von E-Health-Com. URL: <https://e-health-com.de/details-news/digitale-versorgung-gesetz-der-rundumschlag/> (besucht am 08.02.2023).
- Wang, Haiyang; Ding, Lihe; Dong, Shaocong; Shi, Shaoshuai; Li, Aoxue; Li, Jianan; Li, Zhenguo und Wang, Liwei (2022). *CAGroup3D: Class-Aware Grouping for 3D Object Detection on Point Clouds*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2210.04264>.
- Wehmann, Wolfried; van Zyl, Christopher; Kramer, Holger; Widiger, Daniel und Zimmermann, Ronny (2007). „Einrichtung eines Prüffeldes zur Genauigkeitsbestimmung von Laserscannern und Untersuchung des Scanners LMS-Z360i der Firma Riegl in diesem Testfeld“. In: *zfv – Zeitschrift für Geodäsie, Geoinformation und Landmanagement* 132.3/2007.
- Wendel, Mariella (2020). *Smart Home für Senioren: Was ist Ambient Assisted Living (AAL)?* URL: <https://www.homeandsmart.de/ambient-assisted-living-aal> (besucht am 10.02.2023).
- Wichansky, Anna M. (2000). „Usability testing in 2000 and beyond“. In: *Ergonomics* 43.7, S. 998–1006. ISSN: 0014-0139. DOI: 10.1080/001401300409170.
- Wichert, Reiner und Norgall, Thomas (2010). *Alliance for AAL and Personal Health*. Hrsg. von Fraunhofer Alliance Ambient Assisted Living. URL: [https://www.aal.fraunhofer.de/de/publikationen/jcr:content/contentPar/sectioncomponent/sectionParsys/linklist/linklistParsys/downloadcomponent\\_40491850/file.res/2010\\_flyer\\_fraunhofer\\_alliance\\_ambient\\_assisted\\_living\\_aal\\_personel\\_health\\_en.pdf](https://www.aal.fraunhofer.de/de/publikationen/jcr:content/contentPar/sectioncomponent/sectionParsys/linklist/linklistParsys/downloadcomponent_40491850/file.res/2010_flyer_fraunhofer_alliance_ambient_assisted_living_aal_personel_health_en.pdf) (besucht am 10.02.2023).
- Wiles, Janine L.; Leibing, Annette; Guberman, Nancy; Reeve, Jeanne und Allen, Ruth E. S. (2012). „The meaning of “aging in place“ to older people“. In: *The Gerontologist* 52.3, S. 357–366. DOI: 10.1093/geront/gnr098.

- 
- Witte, Bertold; Sparla, Peter und Blankenbach, Jörg (2020). *Vermessungskunde für das Bauwesen mit Grundlagen des Building Information Modeling (BIM) und der Statistik*. 9., neu bearbeitete und erweiterte Auflage. Berlin und Offenbach: Wichmann. ISBN: 978-3-87907-658-1.
- Wollenberg, Raymond (2018). „BIM für das Bestandsimmobilienmanagement“. In: 30. *Forum Bauinformatik*. Bauhaus-Universität Weimar, S. 77–85.
- Woratschka, Rainer (2021). „Düsteres Szenario für 2030: Weit mehr Pflegebedürftige als angenommen“. In: *Der Tagesspiegel*. URL: <https://www.tagesspiegel.de/wirtschaft/weit-mehr-pflegebeduerftige-als-angenommen-3372964.html> (besucht am 08.02.2023).
- World Health Organization (o. J.). *eHealth*. URL: <https://www.emro.who.int/health-topics/ehealth/> (besucht am 08.02.2023).
- Wu, Hangbin; Yang, Huimin; Huang, Shengyu; Zeng, Doudou; Liu, Chun; Zhang, Hao; Guo, Chi und Chen, Long (2020). „Classification of Point Clouds for Indoor Components Using Few Labeled Samples“. In: *Remote Sensing* 12.14, S. 2181. DOI: 10.3390/rs12142181.
- Wu, Zhirong; Song, Shuran; Khosla, Aditya; Yu, Fisher; Linguang, Zhang; Tang, Xiaoou und Xiao, Jianxiong (2015). „3D ShapeNets: A Deep Representation for Volumetric Shapes“. In: *Proceedings of 28th IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR2015)*.
- Wujan, Daniel; Lipkowski, Susanne; Studnicka, Nikolaus und Gordon, Bianca (2022). *TLS-Punktwolkenregistrierung: DVW-Merkblatt*.
- Xiao, Yun-Peng; Lai, Yu-Kun; Zhang, Fang-Lue; Li, Chunpeng und Gao, Lin (2020). „A survey on deep geometry learning: From a representation perspective“. In: *Computational Visual Media* 6.2, S. 113–133. ISSN: 2096-0433. DOI: 10.1007/s41095-020-0174-8.
- Xie, Yuxing; Tian, Jiaojiao und Zhu, Xiao Xiang (2020). „Linking Points With Labels in 3D: A Review of Point Cloud Semantic Segmentation“. In: *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. DOI: 10.1109/MGRS.2019.2937630.
- Xiong, Xuehan; Adan, Antonio; Akinci, Burcu und Huber, Daniel (2013). „Automatic creation of semantically rich 3D building models from laser scanner data“. In: *Automation in Construction* 31, S. 325–337. ISSN: 09265805. DOI: 10.1016/j.autcon.2012.10.006.
- Yang, Michael Ying; Rosenhahn, Bodo und Murino, Vittorio (2019). „Introduction to Multimodal Scene Understanding“. In: *Multimodal Scene Understanding*. Elsevier, S. 1–7. ISBN: 9780128173589. DOI: 10.1016/B978-0-12-817358-9.00007-X.
- Yang, Xiucheng; Koehl, Mathieu und Grussenmeyer, Pierre (2017). „PARAMETRIC MODELLING OF AS-BUILT BEAM FRAMED STRUCTURE IN BIM ENVIRONMENT“. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences XLII-2/W3*, S. 651–657. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-W3-651-2017.
- Yao, Jian; Fidler, Sanja und Urtasun, Rachel (2012). „Describing the scene as a whole: Joint object detection, scene classification and semantic segmentation“. In: *2012 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2012)*. Piscataway, NJ: IEEE, S. 702–709. ISBN: 978-1-4673-1228-8. DOI: 10.1109/CVPR.2012.6247739.
- Yoshida, Junko (2020). *Breaking Down iPad Pro 11's LiDAR Scanner*. URL: <https://www.eetimes.com/breaking-down-ipad-pro-11s-lidar-scanner/> (besucht am 07.10.2022).
- Yuksel, Cem (2015). „Sample Elimination for Generating Poisson Disk Sample Sets“. In: *Computer Graphics Forum* 34.2, S. 25–32. ISSN: 01677055. DOI: 10.1111/cgf.12538.
- Zhang, Chao; Lindner, Scott; Antolovic, Ivan Michel; Mata Pavia, Juan; Wolf, Martin und Charbon, Edoardo (2019). „A 30-frames/s, 252×144 SPAD Flash LiDAR With 1728 Dual-Clock 48.8-ps

- 
- TDCs, and Pixel-Wise Integrated Histogramming“. In: *IEEE Journal of Solid-State Circuits* 54.4, S. 1137–1151. ISSN: 0018-9200. DOI: 10.1109/JSSC.2018.2883720.
- Zhang, Jiaming; Liu, Huayao; Yang, Kailun; Hu, Xinxin; Liu, Ruiping und Stiefelhagen, Rainer (2023). *CMX: Cross-Modal Fusion for RGB-X Semantic Segmentation with Transformers*. URL: <https://arxiv.org/pdf/2203.04838>.
- Zimmermann, Markus; Görres, Stefan und Schmitt, Svenja (2012). „Soziale und technische Bewältigungsstrategien von Wohnen im Alter“. In: *Versorgungs-Report 2012*. Hrsg. von Christian Günster; Joachim Klose und Norbert Schmacke. Stuttgart: Schattauer, S. 207–217. ISBN: 978-3-7945-2850-5.