

Bachelorarbeit

Tomasz Ludyga

Matrikelnummer: 4713329

Entwicklung und Untersuchung eines Konzepts zur Nutzung von Indoor-Positioning-Technologie in Systemen für adaptive, mobile Informationsbereitstellung

Datum der Abgabe: 18. Oktober 2021

Betreuer: Dr.-Ing. Karsten Wendt

Zweitgutachter: Dr.-Ing. Sebastian Götz

Abstract

Die dynamische Entwicklung mobiler Systeme macht es erforderlich, adaptive Informationen auf der Grundlage der Position von Objekten bereitzustellen. Im Anwendungsgebiet der Indoor Positioning, bei dem die Signale des globalen Navigationssatellitensystems nicht erreichbar sind, existiert bisher keine Standardlösung für die optimale Umsetzung. Im Rahmen dieser Arbeit wird die Umsetzung anhand von realen und abstrakten Systemen für die adaptive und mobile Bereitstellung von Informationen analysiert und in Bezug auf den medizinischen Bereich vertieft. Dementsprechend wird die Integration mehrerer Positionierungsverfahren in ein System zur Nutzung von Smart Glasses implementiert. Der Entwurf- und Implementierungsprozess basiert auf einer Analyse aktueller Lösungen und Methoden. Abschließend ist das Konzept mit Hilfe einer Anforderungsanalyse, einer Evaluationsstrategie und einer Simulationsumgebung untersucht worden.

The dynamic evolution of mobile systems makes it necessary to provide adaptive information according to the position of objects. In the application area of indoor positioning, where the signals of the global navigation satellite system are not accessible, no standard solution for the optimal implementation exists so far. In this thesis, the problem is analyzed based on real and abstract systems for adaptive, mobile information provision and deepened in relation to the medical field. Accordingly, the integration of several positioning methods into a system for the use of smart glasses is implemented. The design and implementation process is based on an analysis of current solutions and methods. Finally, the concept has been investigated with the help of a requirements analysis, an evaluation strategy and a simulation environment.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich in der Erarbeitung dieser Bachelorarbeit unterstützt haben.

Zuerst gebührt mein Dank Herr Dr.-Ing. Karsten Wendt, der mir die Möglichkeit gab, an diesem spannenden Projekt mitzuarbeiten und der mir hilfreiche Anregungen bei der Betreuung dieser Arbeit gegeben hat.

Ich bedanke mich bei der Firma Linxens Germany GmbH für die Bereitstellung von Hardware-Komponenten zum Aufbau der Simulationsumgebung.



Aufgabenstellung für die Anfertigung einer Bachelor-Arbeit

Name: Ludyga, Tomasz
Matrikelnummer: 4713329
Immatrikulationsjahr: 2017
Titel: **Entwicklung und Untersuchung eines Konzepts zur Nutzung von Indoor-Positioning-Technologie in Systemen für adaptive, mobile Informationsbereitstellung**

Ziele der Arbeit

Motivation: Adaptive, Mobile Informationsbereitstellung (Adaptive, Mobile Information Provision (AMIP)) für den beruflichen als auch für den normalen Alltag gewinnt immer mehr an Bedeutung. In den Bereichen Medizin, Industrie, Personenverkehr, Intra-Logistik, Unterhaltung oder Bildung sind viele Anwendungsfälle denkbar, wie z.B. Informationsbereitstellung über unmittelbare Umgebung, Warnung vor Gefahren oder anderen relevanten Ereignissen oder Orten, Aufbereitung von aktuell benötigten Informationen abh. von Ort und Kontext, Navigation oder Detektion von Zielen, sowie Tracking von Bewegungen und Vorgängen. Insgesamt soll dadurch die Effizienz oder Qualität der aktuellen Tätigkeiten gesteigert werden, neue Interaktionspotentiale erschlossen oder die Sicherheit oder Nachvollziehbarkeit erhöht werden.

Geeignete technologische Plattformen sind bereits verfügbar und verbreitet bzw. in der Entwicklung: Smarte Brillen, Mobiltelefone, Tablets oder Augmented-Reality-Systeme. Um die Funktions- und Informationsbereitstellung durch diese Geräte effizient zu gewährleisten, ist Kontextsensitivität, bzw. -adaption erforderlich. Ein wichtiger Aspekt dieses Gebiets ist das sog. Indoor-Positioning (IPos), um den Nutzer innerhalb von Gebäude möglichst genau zu verorten.

Übliche Lokalisierungstechniken, wie GPS ist innerhalb von Bauwerken technologisch nicht möglich oder zu ungenau, weswegen sich unterschiedliche IPos-Sensortechniken mit verschiedenen Vor- und Nachteilen etabliert haben. Die gelieferten Informationen dieser Sensoren müssen abh. von Kontext und Anwendungsfall verschieden interpretiert werden und basieren auf heterogenen Domänenmodellen aus potentiell unterschiedlichen Quellen.

Durch den Aufwand IPos-Technologie einsetzen und zu integrieren ist daher eine möglichst starke Entkopplung vom Anwendungsfall, d.h. von den Domänenmodellen und Signalinterpretationen anzustreben, um die Wartbarkeit, Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Softwaresysteme zu erhöhen. Weiterhin muss davon ausgegangen werden, dass verschiedene IPos-Technologie gleichzeitig oder redundant eingesetzt werden können, bzw. ausgetauscht werden muss.

- Abstraktion der IPos-Technologie, technologieunabh. Anbindung und Interpretation
- Bereitstellung allgemeiner Funktionen (Umrechnen von Signalen, Interpretation)
- leichte Austauschbarkeit, Übertragbarkeit

Zielsetzung: Ziel der Arbeit ist daher die Erstellung eines Softwarekonzepts zur Integration und Nutzung von IPos-Technologie für verschiedene AMIP-Systeme. Das beinhaltet die Abstraktion



- der IPos-Technologien/-signale zu allgemeinen Positionsinformationen (Existenz, Nähe, 2D, 3D, Richtung)
- der Anbindung von Domänenmodellen zur anwendungsabhängigen Interpretation der Positionsinformationen
- von unabhängigen Funktionen zu Ortbestimmung

Das Konzept soll danach an verschiedene AMIP-Systeme anbindbar sein. Im Rahmen der Arbeit sollen Anwendungsfälle aus dem Bereich Digital Health basierend auf Smart Glasses untersucht werden.

Stand der Forschung:

- Stand Smart Glasses [2]
- IPos-Technologien, Grenzen, Eigenschaften [1, 3]
- Software-Framework für IPos-Technologie-Anbindung, e.g. [4]

Anforderungen und Untersuchungsaspekte: Für die oben beschriebenen Anforderungen an AMIP-Systeme soll folgendes untersucht, bzw. erstellt werden:

- Anforderungsanalyse und Design eines allgemeinen Software-Konzepts für IPos-Integration basierend auf:
 - Integration von Sensordaten, Sensortechnologie
 - Anbindung von Geometriedaten, Labeling der Positionsinformationen
 - Anpassung/Anbindung an Anwendungsfall / AMIP-System
- Funktionale Anforderungen:
 - Anbinden von verschiedenen IPos-Technologien (QR-Code, NFC, BLE-Beacons) über allgemeine Schnittstellen
 - Import und Abstraktion / Vereinheitlichung der Sensordaten zu allgemeinen Positionsdaten
 - Erstellung, Anbindung, Management und Wartung eines geometrisches Modells / eines Annotationsmodells für die Sensordaten über allgemeine Schnittstellen
 - Steuerung der IPos-Funktionen durch AMIP / Anwendungsfälle über Schnittstellen oder eine API
- Qualitative Anforderungen:
 - Technologieunabhängigkeit
 - Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsfälle
 - Robustheit, d.h. Fallback-Funktionen, wenn Sensorwerte ausfallen
 - Quality of Service
 - Wartbarkeit und Erweiterbarkeit



Literaturverzeichnis

- [1] Ramon F Brena, Juan Pablo García-Vázquez, Carlos E Galván-Tejada, David Muñoz-Rodríguez, Cesar Vargas-Rosales, and James Fangmeyer. Evolution of indoor positioning technologies: A survey. *Journal of Sensors*, 2017, 2017.
- [2] Stefan Mitrasinovic, Elvis Camacho, Nirali Trivedi, Julia Logan, Colson Campbell, Robert Zilinyi, Bryan Lieber, Eliza Bruce, Blake Taylor, David Martineau, et al. Clinical and surgical applications of smart glasses. *Technology and Health Care*, 23(4):381–401, 2015.
- [3] Francesco Potortì, Sangjoon Park, Antonio Ramon Jimenez Ruiz, Paolo Barsocchi, Michele Girolami, Antonino Crivello, So Yeon Lee, Jae Hyun Lim, Joaquín Torres-Sospedra, Fernando Seco, et al. Comparing the performance of indoor localization systems through the eval framework. *Sensors*, 17(10):2327, 2017.
- [4] Fei Tao, Fangyuan Sui, Ang Liu, Qinglin Qi, Meng Zhang, Boyang Song, Zirong Guo, Stephen C-Y Lu, and Andrew YC Nee. Digital twin-driven product design framework. *International Journal of Production Research*, 57(12):3935–3953, 2019.

Schwerpunkte der Arbeit

- Anforderungsanalyse auf Basis der Beschreibung von medizinischen Anwendungsfälle
- Recherche zum Stand der Forschung
- Entwicklung eines allgemeinen Software-Konzepts für IPos-Integration unter Berücksichtigung von:
 - State-of-the-Art Technologie für IPos und Annotationsmodellierung
 - Schnittstellenbeschreibung
 - Anbindung an einen medizinischen AMIP-Prototypen (Smart Glasses)
 - Anpassung an ausgewählte Use-Cases
- Erstellung der Evaluationsstrategie (qualitativ)
 - Auswahl wichtiger Softwarequalitäten, Festlegung der Metriken
 - Vorgehen zur Untersuchung des allg. Konzepts anhand spezifischer medizinischer Use-Cases
 - Umsetzung einer prototypischen Simulationsumgebung zur Entwicklung, Validierung und Testung des allg. Konzepts
 - Definition der Test-Szenarios
- Entwurf und Umsetzung eines Prototyps
- Durchführung der Evaluation
- Diskussion der Ergebnisse und weiterführende Strategie

Betreuer: Dr.-Ing. Karsten Wendt

Ausgehändigt am: 2. August 2021

Einzureichen am: 18. Oktober 2021

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation.....	1
1.2. Zielsetzung	2
1.3. Verwandte Studien.....	2
1.4. Inhaltlicher Aufbau der Arbeit.....	3
2. Adaptive, mobile Informationsbereitstellung	5
2.1. Begriffsklärung	5
2.2. Stand der Technik.....	6
2.2.1. Smartphones	6
2.2.2. Smart Glasses	7
2.2.3. Andere Geräte.....	8
3. Indoor Positioning	10
3.1. Begriffsklärung	10
3.1.1. Indoor Positioning	10
3.1.2. Definitionen der wichtigsten Parameter	10
3.1.3. Globales Navigationssatellitensystem	10
3.1.4. Received signal strength indication (RSSI).....	11
3.1.5. Line-of-Sight	11
3.1.6. Ankerpunkt, Beacon.....	11
3.1.7. Point of Interest	11
3.2. Methoden	11
3.2.1. Cell of Origin.....	12
3.2.2. Lateration.....	12
3.2.3. Andere Methoden	14
3.3. Technologien	15
3.3.1. Wireless Local Area Network	15
3.3.2. Bluetooth	16
3.3.3. Kameras.....	16
3.3.4. Radio Frequency Identification	16
4. Analyse	18
4.1. Methodik.....	18
4.2. Anforderungen.....	19

4.2.1. Funktionale Anforderungen	19
4.2.2. Qualitative Anforderungen	20
4.3. Konzeptaufbau	20
4.3.1. Problem der Speicherstelle des Kartenmodells	21
4.3.2. Bestimmung der Schnittstellen	22
4.3.3. Aufbau eines medizinischen AMIP-Systems	23
5. Design und Realisierung	25
5.1. Grundlegende Designentscheidungen	25
5.2. Kartenmodell	25
5.3. Sensorik	26
5.3.1. QR Codes	29
5.3.2. NFC Tags	30
5.3.3. BLE Beacons	31
5.4. Berechnungsinstanz	32
6. Evaluation	33
6.1. Simulationsumgebung	33
6.2. Testszzenarien	33
6.2.1. Installation	33
6.2.2. Umschalten zwischen den Technologien	34
6.2.3. Bewegung und Scannen innerhalb der Umgebung	34
6.2.4. Umgestaltung von Ankerpunkten	34
6.2.5. Umgestaltung von Betten	35
6.2.6. Patientenmeldung	35
6.2.7. Ausfall der Kommunikation	35
6.2.8. Mehrere Nutzer gleichzeitig	35
6.2.9. Zusammenfassung der Testszzenarien	35
7. Diskussion und Fazit	36
7.1. Diskussion der Resultate	36
7.2. Übertragung auf andere mögliche Anwendungsfälle	38
7.2.1. Mobile, adaptive Überwachung einer Produktion	38
7.2.2. Intelligentes Parksystem	39
7.3. Fazit	39
Literaturverzeichnis	41
Abbildungsverzeichnis	46
Tabellenverzeichnis	47

1. Einleitung

Mit der starken Verbreitung der Mobilität ist die Positionierung ein Schlüsselfaktor der Anpassungsfähigkeit von vielen Systemen wie autonome Fahrzeuge, Mobiltelefone oder intelligente Gegenstände geworden. Die wachsende Verfügbarkeit des Internets, weite Verbreitung von mobilen Geräten und zunehmende Automatisierung im Alltag erzeugen einen wachsenden Bedarf für die adaptive Informationsbereitstellung. Innerhalb von Gebäuden ist das Spektrum der Anwendungen, der realisierbaren Indoor Positioning Technologien und der Endgeräte besonders komplex.

Near-To-Eye-Display-Geräte sind heutzutage in vielen Arbeitsgebieten eingesetzt, um die Effizienz der Arbeit zu steigern. Dazu gehören auch Smart Glasses. Im Gesundheitswesen, bei dem ein großes Interesse am schnellen Empfang von Gesundheitsinformationen besteht, verbessert die Nutzung dieser Geräte die Verpflegung von Patienten und senkt Kosten der Behandlung. Dies ermöglichen zahlreiche Funktionen, wie zum Beispiel Telekommunikation, Aufnahme von Videos mit angebundener Kamera, Objekterkennung oder schneller Empfang von Notfallmeldungen [1]. Um den Effizienzfaktor zu erhöhen, kann ein Ortungssystem zur schnellen Identifizierung von Patienten eingebunden werden. Eine Problematik, die dabei auftritt, ist die Suche nach dem optimalen Positionierungsverfahren. Während die übliche Lokalisierung mit einem globalen Navigationssatellitensystem (GNSS) für den Nutzer kostengünstig und für vielen Anwendungen hervorragend ist, scheitert sie innerhalb von Gebäuden.

Eine adaptive Software, welche die Position von Objekten zur Entscheidungsunterstützung nutzt, kann je nach Anwendungsfall eine andere Technologie optimaler betrachten. Im Fall der adaptiven, mobilen Systemen zur Nutzung in Innenräumen handelt es sich um die sogenannte Indoor Positioning Technologie. Die Auswahl von Ortungsmethoden und Speicherstellen für Datenbanken, die Interpretation von Signalen, der Berechnungsprozess, die Kopplungsarten und eine Menge anderer Parameter machen die individuelle Anpassung komplex. Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Konzept vorgezeigt, welches als Basis für die komplexe Anpassung von Indoor Positioning dient.

1.1. Motivation

Sowohl im beruflichen als auch im täglichen Alltag gewinnt die adaptive und mobile Informationsbereitstellung (AMIP¹) immer mehr an Bedeutung. Die globale Anzahl von mobilen Geräten wächst kontinuierlich und nach Angaben von CISCO (2020) wird sie im Jahr 2022 auf 12,3 Milliarden Stück ansteigen [2], [3]. Verschiedene kontextsensitive und adaptive Plattformen sind bereits verfügbar und verbreitet. Es wächst die Verbreitung von sogenannten intelligenten Lösungen, wie Smart Home, Virtual Reality Systemen, Smartphones, Smart TVs oder Smart Glasses. Die Anzahl der Smartphone-Nutzer hat sich in Jahren 2012-2020 laut Statista verdoppelt [4]. Einigen Studien zufolge werden Smart Glasses das nächste führende mobile Gerät nach Smartphones sein [5], [6]. Sowohl diese Brillen als auch alle hier erwähnte Geräte verfügen über eine kontextadaptive Funktionsweise.

¹ AMIP - Aus dem Englischen „Adaptive, mobile Information Provision“

Dementsprechend ist die Bereitstellung von adaptiven mobilen Informationen eine wichtige Herausforderung in der digitalen Technik geworden. Verschiedene Anwendungen sind in der modernen Industrie und im Dienstleistungssektor denkbar. Dazu gehören beispielsweise die Bereitstellung von Informationen über die unmittelbare Umgebung, relevante Orte oder Ereignisse, Detektion und Navigation von Zielen, Warnung vor Gefahren, Aufbereitung von aktuell benötigten Informationen je nach Ort und Kontext oder Verfolgung von Bewegungen und Vorgängen. Vorbildlich ist die Nutzung heute schon in den Bereichen Logistik, Personenverkehr, Medizin, Unterhaltung oder Bildung, wo die Anpassungsfähigkeit berufsspezifische kontextabhängige Entscheidungen unterstützt. Damit steigt die Effizienz oder Qualität der aktuellen Tätigkeiten und zudem erschließen sich neue Interaktionspotentiale bzw. es erhöhen sich die Sicherheit und Nachvollziehbarkeit.

Ein Schlüsselaspekt der Kontextadaption ist das sogenannte Indoor Positioning, die es ermöglicht, den Nutzer innerhalb von Gebäuden zu verorten. Die übliche Lokalisierungstechnologie, also das GPS, ist technologisch nur in Räumen mit ausreichender Signalverfügbarkeit von globalen Navigationssatelliten nutzbar. Diese Eigenschaft stellt im Bezug zu der Fähigkeit der Positionierung in allen Umgebungen ein Flaschenhals-Effekt dar. Dieses Effekt kann durch den Einsatz von diversen Indoor Positioning Technologien, die unterschiedliche Vor- und Nachteile erweisen, vervollständigt werden. Somit ergibt sich eine große Marktchance.

1.2. Zielsetzung

Das Ziel dieser Arbeit ist es, ein Softwarekonzept zur Integration und Nutzung von Indoor Positioning Technologie für verschiedene Systeme zur adaptiven und mobilen Informationsbereitstellung zu entwickeln und zu untersuchen. Dabei soll das Konzept durch eine Abstraktion von Methoden der Ortbestimmung, Ausgabeinformationen der Sensoren und deren Integration realisiert werden. Wegen des Aufwands, der mit der Anpassung von Indoor Positioning Technologie verbunden ist, wird angestrebt, diese so weit wie möglich vom Anwendungsfall zu entkoppeln, um die Wartbarkeit, Erweiterbarkeit und Übertragbarkeit der Software zu erhöhen. Für die Studie wird eine Anwendung aus dem Bereich Digital Health untersucht, bei der die Ärzte in einem Krankenhaus persönliche Smart Glasses tragen und positionsabhängige Daten von Patienten angezeigt bekommen. Ein prototypisches System für den Einsatz von Smart Glasses „*tooz DevKit*“ [7] steht für die Implementierung und Untersuchung bereit. Die Sensortechnologie soll mittels persönlicher Smartphones mit dem Android-Betriebssystem realisiert werden. Für dieses System sollen eine Integration von mehreren Indoor Positioning Technologien, eine Evaluation, Bewertung und schließlich eine Untersuchung der Ableitung auf eine Abstraktionsebene durchgeführt werden. Es soll überprüft werden, welche Technologie die höchste Effektivität des Einsatzes gewährleistet und welche Probleme bzw. technische oder physikalische Begrenzungen bei der Entwicklung des Konzepts auftreten. Zudem wird betrachtet wie hoch die Kosten sind und inwieweit das Konzept anwendbar und erweiterbar ist.

1.3. Verwandte Studien

Es wurden mehrere Forschungen und Frameworks zur Analyse, Design, Evaluation und Integration ausgewählter Indoor Positioning Technologien erstellt [8]–[12]. Manche wissenschaftliche Arbeiten,

wie bei Song et al. (2018) oder Restrepo (2013), beinhalten eine Realisierung für Smartphones mit dem Betriebssystem Android [13], [14]. Das Thema der Einbindung von Indoor Positioning an verschiedene AMIP-Systeme wurde auch mehrfach in wissenschaftlichen Arbeiten behandelt [12], [15], [16]. Die Arbeiten sind jedoch entweder in Bezug auf eine Technologie, eine konkrete Umgebung oder einen Anwendungsfall beschränkt, stellen die Entwicklungskonzepte nur oberflächlich dar oder entsprechen wegen ihres Alters nicht mehr dem heutigen Stand der Technik.

Brena et al. (2017) haben eine breite technologische Übersicht und die Evaluation von Ansätzen zur Indoor Positioning aufgezeigt [12]. Darin wird der bisherige Stand der Technik analysiert und die Lösungen in einem strukturierten Vergleich der Technologien im Hinblick auf verschiedene Anforderungsebenen vorgestellt.

Potorti et al. (2017) schlagen einen Benchmarking-Evaluationskonzept vor, das auf einem strengen Vergleich von Indoor Positioning Technologien basiert [11]. Das Vorgehen kommt vom „Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) Competition“-Wettbewerb von 2016.

Mautz (2012) stellt ein Kompendium von Techniken für Indoor Positioning in 13 Kategorien mit detaillierten Beschreibungen in einer sequentiellen Reihenfolge vor [16]. Zusätzlich dazu werden Anwendungen vorgezeigt, von denen einige mit mobilen und adaptiven Systemen zusammenhängen.

Mitrasinovic et al. (2015) haben die wichtigste Verwendungszwecke von Smart Glasses im Gesundheitswesen betrachtet [1]. Dabei wurden Begrenzungen, Eigenschaften, mögliche Funktionen und thematische Anwendungen ermittelt. Ein System für mobile, adaptive Bereitstellung von Informationen im Gesundheitswesen unter Beteiligung von Smartphones, jedoch ohne Funktionen der Indoor Positioning, wurde von Setiawan et al. (2019) entwickelt [17]. Eine Diskussion zum Thema der Positionierung in adaptiven, mobilen Systemen wurde von Krüger et al. (2007) zusammengefasst [15].

Basierend auf der Literatur ist es schwierig, klare Standardlösungen zu finden. Die größte Herausforderung bei der Indoor Positioning ist die gleichzeitige Erbringung aller Parameter auf hohem Niveau. Die Vielfalt der Bewertungskriterien, die in der Literatur zum Vergleich von Technologien angewandt werden, weist auf einen dynamisch evaluierten Stand der Technik in diesem Bereich und eine Breite der Vorgehensmöglichkeiten der Realisierung auf. Für die Positionierung von Smartphones waren in den letzten Jahren häufig Bluetooth und WLAN die bevorzugten Technologien.

1.4. Inhaltlicher Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich in sieben Bestandteile, wobei der erste Teil die Einleitung ist. Der zweite und der dritte Abschnitt der Arbeit bilden den theoretischen Teil. Darin werden die Begriffsklärungen, Grundlagen der Forschung und der Stand der Technik beschrieben. Das zweite Kapitel befasst sich mit dem Thema der adaptiven, mobilen Informationsbereitstellung. Das dritte Kapitel befasst sich mit dem Thema der Indoor Positioning.

Im vierten Abschnitt wird eine Analyse hinsichtlich der Konzeptentwicklung vorgestellt. Basierend auf den Ergebnissen aus dem vierten Teil, wird im fünften Kapitel ein Prototyp einer Software zur adaptiven

Nutzung von Smart Glasses entworfen und implementiert. Im sechsten Abschnitt der Arbeit wird eine Evaluationsstrategie für die Software erstellt und angewendet. Schließlich werden im siebten Kapitel die Ergebnisse bewertet und zusammengefasst.

2. Adaptive, mobile Informationsbereitstellung

Der folgende Abschnitt beschreibt die Grundlagen von AMIP und gibt einen Überblick über den aktuellen Stand der Technik.

2.1. Begriffsklärung

Unter Bereitstellung von Informationen versteht man das Erzeugen/Erfassen und die entsprechende Ausgabe von Daten. Die Mobilität einer Informationsbereitstellung bezieht sich auf die Eigenschaft der physischen Beweglichkeit von der Komponente, die sie realisiert. Die Adaptivität, auch als Anpassungsfähigkeit bekannt, ist die Fähigkeit, das eigene Verhalten auf der Grundlage von Informationen des Benutzers und der Umgebung anzupassen. Die AMIP, also die adaptive mobile Informationsbereitstellung, ist somit ein Prozess, der durch die Mobilität und Adaptivität bestimmter Objekte Informationen zur Unterstützung von Entscheidungen bereitstellt [18]–[20].

Eine Art von Geräten, die eine adaptive mobile Ausgabe von Informationen auf einem digitalen Endgerät ermöglichen, sind *Near-To-Eye-Displays*, auch bekannt als *Head-mounted Displays*². Dieser Begriff beschreibt ein tragbares Gerät, das ein virtuelles Bild im Sichtfeld eines oder beider Augen erzeugt. Dazu gehören neben den Smart Glasses beispielsweise auch Videobrillen oder Virtual Reality-Headsets, die im Gegensatz zu den Smart Glasses das gesamte Sichtfeld des Nutzers abdecken [21].

Als *Smart Glasses*, *Datenbrille* oder *Augmented-Reality-Brille*, sind Near-To-Eye-Display-Geräte definiert, die dem Blickfeld des Nutzers Informationen hinzufügen und eine erweiterte Realität schaffen [22]. Neben den typischen Leistungsmerkmalen und der optischen Anzeige unterscheiden sich die einzelnen Modelle in Gewicht, Größe, Form, Interaktionsmöglichkeiten, Sensortechnologie und anderen integrierten Komponenten. Auf dem Markt gibt es Geräte die mit Tasten, Touchpad, Kamera, Tonsender, Mikrophon, GPS, Beschleunigungsmesser, Gyroskop, Magnetometer, Kompass, Lichtsensor, Augen-Tracker, WLAN und Bluetooth ausgestattet sind [1], [6].

Smartphone ist die Bezeichnung für moderne Mobiltelefone, die über die umfangreichen Funktionen eines Rechners und eines Kommunikationsnetzes verfügen.

Computation Offloading ist ein Verfahren der Übertragung von Rechenoperationen mit hohem Ressourcenaufwand auf einen externen Rechner. Dies kann zur Beschleunigung von Aufgaben wie Bildwiedergabe und mathematischen Berechnungen verwendet werden [23].

² *Head-mounted Display*: wörtlich „am Kopf befestigte Anzeige“

2.2. Stand der Technik

Geeignete kontextsensitive Plattformen zur adaptiven mobilen Informationsbereitstellung sind bereits im beruflichen und täglichen Alltag verfügbar und verbreitet. Der Stand zu den wichtigsten davon wurde in diesem Kapitel beschrieben.

2.2.1. Smartphones

Laut Cisco Annual Internet Report (2020) wird die weltweite Zahl der nutzbaren Smartphones zwischen 2018 und 2023 von 4,9 Milliarden auf 6,7 Milliarden steigen [3]. Dementsprechend wird ein globales Wachstum von 66% auf 71% der Mobilfunkteilnehmer als Prozentsatz der Weltbevölkerung im Jahr 2023 prognostiziert. Die führenden Betriebssysteme für Smartphones zum Stand von 2021 sind: Android mit einem Anteil von etwa 84% am weltweiten Smartphone-Markt und iOS mit 16%. Hingegen sind die Hersteller mit dem größten Marktanteil Samsung (mit dem Modell Galaxy A215 als seinen meistverkauftem im Januar 2021), Xiaomi (mit dem populärsten Redmi 9A) und Apple (iPhone 12). Zusammen besitzen diese drei Hersteller ca. 50% des Marktanteils [24]–[26].

Zur Ausstattung eines Smartphones gehören in der Regel:

- Ein Touchscreen (berührungssensitiver Bildschirm), Batterie, Kabelanschlüsse
- Telefon Ein/Aus-Schalter, Lauter- und Leiser-Taste
- Kommunikationstechnologien: WLAN, Bluetooth, GPS, NFC, Radio, Telefonnetz³.
- Vordere und hintere Kameras
- Lautsprecher, Mikrofon
- Beschleunigungsmesser, Gyroskop, Magnetometer

Die reichhaltige Sensorik ermöglicht viele kontextadaptive Funktionalitäten, wie zum Beispiel erweiterte Realität (siehe Abbildung 2.1) zu nutzen. Zudem eignen sich die Smartphones, aufgrund ihrer geeigneten physikalischen Parameter und ihrer hohen Verfügbarkeit, für die Realisierung von Indoor Positioning.

Android ist das populärste Betriebssystem für mobile Geräte und wurde speziell für mobile Geräte mit Touchscreen auf der Grundlage einer modifizierten Version des Linux-Kernels entwickelt. Heutzutage werden die Applikationen hauptsächlich in der Programmiersprache Kotlin oder Java implementiert. Die geeignete IDE⁴ dafür ist *Android Studio* [27].

Das alternative Betriebssystem, iOS, wurde von Apple Inc. entwickelt und läuft auf dem Smartphone iPhone. Die App-Entwicklung erfolgt vor allem in der Sprache Swift mit der IDE *Xcode*. Im Vergleich zu Android gilt iOS als sicherere Plattform, jedoch mit mehreren Einschränkungen bei der Funktionalität, beispielsweise im Bereich der Nutzung von Near Field Communication (NFC) im Hintergrund [28].

³ Im Jahr 2020 wurden die ersten Smartphones mit 5G-Geschwindigkeitsnetz angekündigt

⁴ IDE - Integrierte Entwicklungsumgebung, aus dem Englischen „Integrated Development Environment“



Abbildung 2.1. Adaptive mobile Informationsbereitstellung auf dem Smartphone am Beispiel des Spiels *Pokémon Go*⁵

2.2.2. Smart Glasses

Due (2015) definiert drei Kategorien der Einsatzmöglichkeiten von Smart Glasses [30]:

1. Berufsbezogene Anwendungen – zum Beispiel die Anzeige von Bedienungsanleitungen und anderen arbeitsplatzspezifischen Ressourcen
2. Aufgabenbezogene Anwendungen – zum Beispiel Unterstützung sportlicher Aktivitäten oder Dokumentation wichtiger Lebensereignisse
3. Lebensstilbezogene Anwendungen – Anwendungen, die darauf abzielen, das Nutzerverhalten gemäß den Anforderungen des so genannten *Quantified Self*⁶ zu quantifizieren

Laut Due werden Smart Glasses zunächst in institutionellen Kontexten wie zum Beispiel im Gesundheitswesen verfügbar sein, bevor sie zum Alltag übergehen. In der Gesundheitspflege sind bereits Foto- und Videodokumentationen, Analysen elektronischer Krankenakten, Schnelldiagnosen, Prozesskontrollen, Digitalisieren von Patientendaten, Telemedizin, Live-Übertragung und die Visualisierung von Körperteilen bekannt [1], [30], [31].

Im Jahr 2014 wurde das Modell Google Glass von Google LLC mit der Intention auf den Markt gebracht, es im Arbeitsalltag einzusetzen. Ausgestattet mit einer Kamera, Touchpad, Bluetooth und Android-Betriebssystem ermöglichen die Brillen viele Funktionen von üblichen Android Geräten freihändig zu nutzen [32] (siehe Abbildung 2.2). Das Modell Glass Enterprise Edition 2 verfügt über einen Beschleunigungsmesser, ein Gyroskop und einen Magnetometer, die zur direkten Bereitstellung adaptiver Informationen verwendet werden können. Darüber hinaus besteht das System aus [33]:

- Ein-Chip-System Qualcomm Snapdragon XR1,
- Betriebssystem Android Open Source Project 8.1 (Oreo),
- WLAN, Bluetooth 5.0

⁵ Bildquelle: The Straits Times, 2021 [29]

⁶ Quantified Self - ein Lebensstil-Konzept, bei dem digitale Geräte verschiedene Daten bereitstellen, um das menschliche Verhalten, Leistungs- und Gesundheitskontrolle zu verbessern

- Mikrofonen, Lautsprecher, Touchpad
- Bildschirm 640 x 360 RGB-Pixel
- Batterie 800 mA·h
- USB-Porte zum Aufladen und Datenübertragung

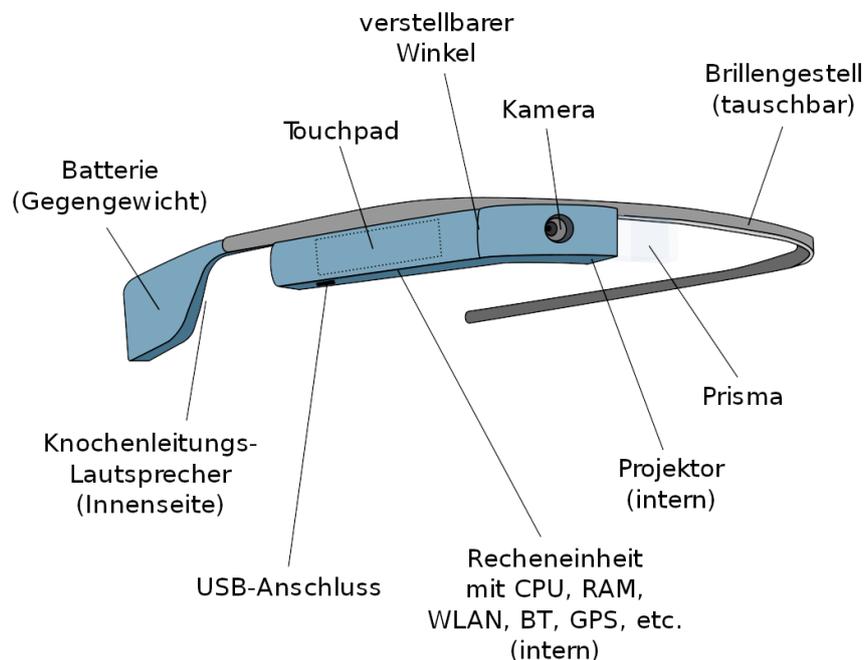


Abbildung 2.2. Schematische Darstellung der Hauptkomponenten von Google Glass [34]

2.2.3. Andere Geräte

Tablets sind tragbare Rechner mit einem breiten Anwendungsspektrum, deren Hauptmerkmal ein großer Touchscreen ist. Zu den populärsten Betriebssystemen gehören Android, iOS, iPadOS⁷ und Windows 10. Laut IDC Worldwide Quarterly PCD Tracker hatte das iPad von Apple im Jahr 2020 mit 36,5 % den größten Anteil am Tablet-Markt [35].

VR-Headsets⁸ sind Near-To-Eye-Display Geräte, die vor allem zum Spielen verwendet werden. Durch die Abdeckung des gesamten Sichtfelds des Benutzers sind sie außerdem für Schulungen, Anschauen von Filmen, Videokonferenzen und andere Simulationen geeignet [36].

Smartwatch ist eine elektronische Armbanduhr, die über umfangreiche Zusatzfunktionen und Sensoren verfügt [37]. Die Anwendungsbereiche betreffen vor allem die Unterstützung beim Sport oder die Bereitstellung von Gesundheitsinformationen (zum Beispiel durch Pulsmessung). Weitere wichtige Funktionen sind auch Benachrichtigungen, Erinnerungsfunktionen, Aktivitätserkennung, Zeiterfassung und Zeitablesung. Manchmal werden ähnliche Geräte mit Sport-Apps auch als Smartbands oder Activity Tracker bezeichnet.

⁷ Existiert seit 2019, als umbenannte Variante des bisherigen iOS für iPad

⁸ Auch bekannt als *Virtual-Reality-Brille* oder *Virtual-Reality-Helmet*

Andere Produkte mit besonderen AMIP-bezogenen Funktionen sind Smart Clothes⁹, also Textilien die mit elektronischen Mechanismen ausgestattet sind. Bekannte Anwendungsgebiete sind die Gesundheitsüberwachung, die Aktivitätserkennung und die Unterstützung von menschlichen Bewegungen. Smart Clothes können sowohl die Funktionen der Bereitstellung (Sensorik) als auch die Funktionen der Nutzung (durch Bewegungsunterstützung) von adaptiven mobilen Informationen besitzen [38], [39].



Abbildung 2.3. Beispielsmodelle der kontextsensitiven Plattformen. Von links: ein Tablet, ein VR-Headset und eine Smartwatch¹⁰

Die Verwendung von adaptiven mobilen Informationsbereitstellung trifft also auf unterschiedliche Arten und Anwendungsbereiche. Über die Hälfte der Weltbevölkerung besitzt bereits ein Smartphone. Die Smart Glasses sind eine zukunftsweisende kontextsensitive Plattform mit zunehmender Beliebtheit in der berufsbezogenen Nutzung. Verschiedene andere Geräten für AMIP sind im heutigen Alltag bekannt. Abbildung 2.3 stellt die ausgewählten Plattformen dar.

⁹ Smart Clothes, auch Smart Textiles oder E-Textiles genannt – aus dem Englischen „schlaue Kleidungsstücke“

¹⁰ Bildquellen: Intel 2021 [40] (Lizenz: CC BY-ND 2.0 [41]), Palmero 2015 [42] und Dambräns 2013 [43] (beide CC BY 2.0 [44])

3. Indoor Positioning

Die Positionierung in Innenräumen stellt heute eine komplexe technische Herausforderung dar. Trotz der großen Menge an fähigen Sensortechnologien, die jeweils unterschiedliche Stärken und Schwächen aufweisen, gibt es dennoch für viele Anwendungsbedürfnisse keine ausreichende Lösung. Im Vergleich zur Positionierung im Außenräumen gibt es einerseits eine Anzahl von Schwierigkeiten, wie zum Beispiel die Häufigkeit unzugänglicher Lines-of-Sight, andererseits gibt es Erleichterungen, wie zum Beispiel kleine Wittereinflüsse. Allerdings bietet bisher kein Indoor Positioning System eine vergleichbar gute Leistung in Bezug auf Genauigkeit, Latenzzeit, Erfassungsbereich, Verfügbarkeit und Nutzerkosten wie das globale Navigationssatellitensystem (GNSS) in seinem funktionalen Bereich [12], [16].

3.1. Begriffsklärung

3.1.1. Indoor Positioning

Mit dem Begriff *Indoor Positioning*, *Indoor Locating* bzw. *Positionierung in Innenräumen* ist im Rahmen dieser Arbeit ein Mechanismus zur Bestimmung der Position eines Objekts mittels Sensoren und Kommunikationstechnologien in Räumen, in denen GNSS scheitert, zu verstehen. Obwohl der wortwörtliche Sinn des Begriffs auf Innenräumen (*indoor* vom Englischen *Innenbereich*) verweist, wird in der Regel die Definition in der Literatur auch auf die Positionierung in anderen schwer zugänglichen Umgebungen, wie beispielsweise dichten Wäldern, erweitert [12], [16]. Als *Indoor Positioning Technologie* sind spezifische Methoden definiert, die zur Analyse von physikalischen Signalen verwendet werden, um die Ziele eines Indoor Positioning Systems zu realisieren.

Der Begriff *Navigation* bedeutet, je nach Kontext, eine Bestimmung von Position, Geschwindigkeit und Richtung eines Objektes, eine Suche nach einem optimalen Weg oder eine Führung entlang eines vorgegebenen Weges.

3.1.2. Definitionen der wichtigsten Parameter

Genauigkeit oder *Messunsicherheit* ist in Bezug auf Indoor Positioning die Differenz zwischen der angegebenen und der tatsächlichen Position.

Erfassungsbereich ist der räumliche Bereich oder die Reichweite, innerhalb derer ein einzelner Knoten des Systems (üblicherweise ein Beacon) ein Objekt lokalisieren kann.

Als *Kosten* definiert ist die Summe der Zeitkosten für die Installation und Administration des Systems, der Investitionskosten, der Instandhaltungskosten und der Kosten der Platzbelegung.

3.1.3. Globales Navigationssatellitensystem

Ein globales Satellitennavigationssystem (GNSS) ist ein System, das Weltraumsatelliten für Navigationszwecke nutzt. Dazu gehört das am weitesten verbreitete *Global Positioning System (GPS)*,

welches vom US-Verteidigungsministerium entwickelt wurde und seit Mitte der 1990er-Jahre voll funktionsfähig ist [45]. Heute dient es unter anderem zur Positionierung der meisten Mobiltelefone.

3.1.4. Received signal strength indication (RSSI)

Das RSSI, also *Received signal strength indication*¹¹, ist ein Indikator für die Stärke (nicht die Qualität) eines empfangenen Signals in einer drahtlosen Umgebung. Es kann zur Bestimmung der relativen Entfernung zwischen dem Sender und dem Empfänger verwendet werden. Die am meisten verwendete Einheit ist Dezibel Milliwatt (dBm) [46, S. 160].

3.1.5. Line-of-Sight

Mit dem Begriff *Line-of-Sight*¹² ist eine gerade Linie zwischen einem Signalsender und einem Signalempfänger (üblicherweise durch die Luft) gemeint, die eine Kommunikation auf direktem Weg ermöglicht. Lines-of-Sight sind hauptsächlich bei kamerabasierten Positionierungstechniken relevant.

3.1.6. Ankerpunkt, Beacon

Mit dem Begriff *Ankerpunkt*¹³ wird im Kontext der Indoor Positioning eine bekannte, feste Position bezeichnet. In der Regel werden diese Punkte physisch durch Markierungen oder Geräte dargestellt und an einer konkreten Stelle platziert. Der Begriff *Beacon* bezieht sich an Ankerpunkte, die Signale an ein Positionierungssystem senden.

3.1.7. Point of Interest

Ein *Point of Interest* ist ein Punkt im Raum, der nützlich oder bemerkenswert ist. Es kann zum Beispiel ein Zimmer, ein Bett, ein Parkplatz, ein Berggipfel oder eine gefährliche Stelle auf einer Autostrecke sein. Unter der Annahme, dass sich die Points of Interest in einer festen Position befinden, können sie als eine Art von Ankerpunkten betrachtet werden.

3.2. Methoden

Der gesamte Prozess der Indoor Positioning kann in drei Phasen unterteilt werden [12]:

1. Evidenz – bei dem die beteiligten Geräte die Eigenschaften des Eingangssignals messen
2. Entfernungsschätzung - bei der die Distanzen zwischen Signalsender und Signalempfänger berechnet werden
3. Positionsbestimmung – bei der die Position berechnet und bestimmt wird

Im folgenden Abschnitt werden, basierend auf der Literatur [12], [16], die wichtigsten Prinzipien der dritten Phase erläutert. Die Positionsbestimmung kann nach mehreren dieser Prinzipien gleichzeitig erfolgen.

¹¹ Direkte Übersetzung aus dem Englischen: *Indikator der empfangenen Signalstärke*

¹² Direkte Übersetzung aus dem Englischen: *Sichtlinie*

¹³ In englischsprachiger Literatur: *Anchor Node*

3.2.1. Cell of Origin

Die *Cell of Origin* ist eine triviale Positionierungsmethode bei der ermittelt wird, welchem der Ankerpunkte ein mobiles Objekt am nächsten ist. Das Prinzip dient dazu, die Anwesenheit eines Geräts innerhalb eines bestimmten Bereichs, zum Beispiel innerhalb einer Zimmerfläche, zu identifizieren. Die Genauigkeit der Methode hängt von der Dichte der Ankerpunkte ab. Im 2D-Raum bildet die Verteilung der Ankerpunkte eine Zellenstruktur, bei der jede Zelle mit genau einem Ankerpunkt in Beziehung steht. Die Zellen stellen Bereiche dar, in denen der Ankerpunkt aus der Beziehung der nächstgelegene Ankerpunkt ist. Die Zellen werden gemäß der Mittelsenkrechten der Strecken zwischen den Ankerpunkten bestimmt. Ein Beispiel solcher Bestimmung ist in Abbildung 3.1 dargestellt.

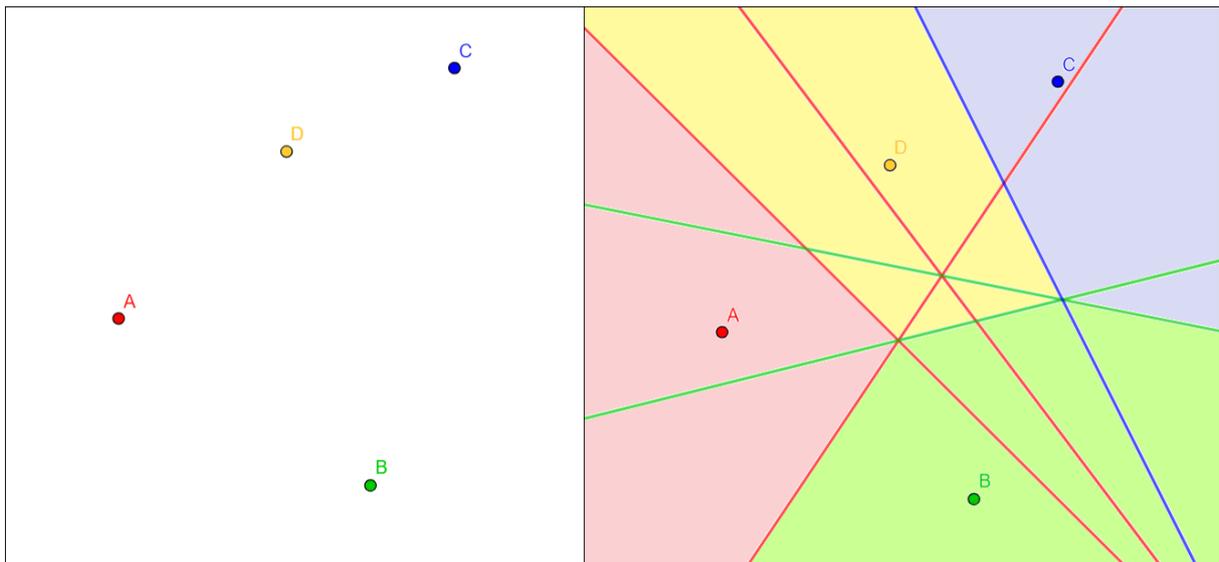


Abbildung 3.1. Bestimmung von vier Cell of Origin-Zellen auf einer Ebene in Bezug auf die Ankerpunkte A, B, C und D

3.2.2. Lateration

Unter Lateration versteht man die Positionsbestimmung anhand einer geschätzten Entfernung zu mehreren Ankerpunkten. Im 2D-Raum lässt sich die Position aus geometrischer Sicht durch die Kenntnis von drei dieser Abstände eindeutig bestimmen. Im 3D-Raum müssen die Entfernungen zu vier Ankerpunkten bekannt sein. Deswegen werden die Verfahren alternativ auch als *Trilateration* bzw. *Multilateration* bezeichnet.

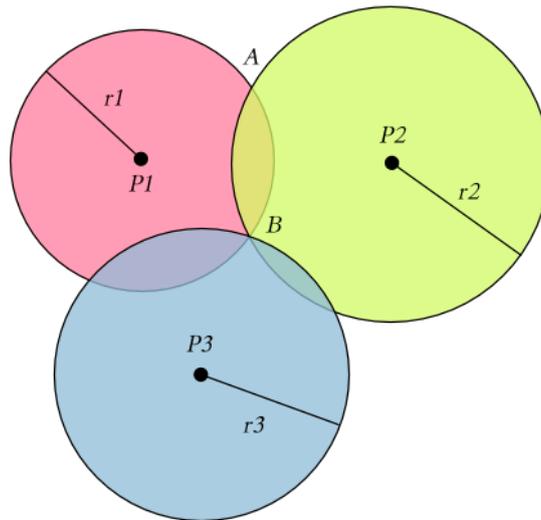


Abbildung 3.2. Trilateration auf einer Ebene [47]

Das Prinzip der Positionierungsmethode ist in der Abbildung 3.2 dargestellt. Darin sind mit P_1, P_2, P_3 Beacons und mit r_1, r_2, r_3 die entsprechende Entfernungen von ihnen zur gesuchten Position im 2D-Raum gekennzeichnet. Die Kenntnis des Wertes r_1 beschränkt die mögliche Position zum roten Umkreis. Zusätzliche Kenntnis des Wertes r_2 beschränkt ihn auf die Menge $\{A, B\}$. Letztendlich die zusätzliche Kenntnis des Wertes r_3 ermöglicht es, den Punkt B eindeutig als die gesuchte Position zu identifizieren.

Seien die Ankerpunkte $P_1 = (a, b)$, $P_2 = (c, d)$, $P_3 = (e, f)$ sowie deren Entfernungen r_1, r_2, r_3 in einem 2D-Koordinatensystem bekannt, dann ist der gesuchte Punkt (x, y) algebraisch durch ein Gleichungssystem (Formel 3.1) lösbar.

$$\begin{cases} (x - a)^2 + (y - b)^2 = r_1^2 \\ (x - c)^2 + (y - d)^2 = r_2^2 \\ (x - e)^2 + (y - f)^2 = r_3^2 \end{cases}$$

Formel 3.1. Gleichungssystem zur Berechnung der Position (x, y) durch Trilateration

Wenn im 3D-Raum die gesuchte Position nicht auf der durch P_1, P_2, P_3 erzeugten Fläche liegt, reicht die Kenntnis der Werte r_1, r_2, r_3 ist nicht aus, um eine Position eindeutig zu bestimmen. Die Lösung wird stattdessen auf zwei mögliche Punkte begrenzt. Geometrisch gesehen beschränkt jedes Beacon die potenzielle Lösung auf eine Sphäre. Mehrere Sphären erzeugen im Schnitt Kreise, die ihrerseits als Schnitt zwei Punkte bilden (siehe Abbildung 3.3).

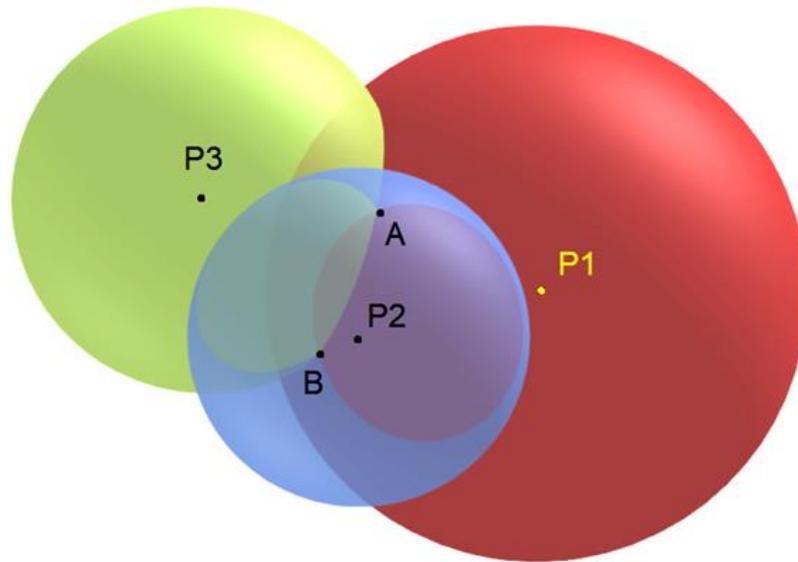


Abbildung 3.3. Lateration im 3D-Raum, Ermittlung der Menge $\{A, B\}$ anhand der bekannten Entfernung zu den Beacons $P1, P2, P3$

Seien die Beacons $P1 = (a, b, c)$, $P2 = (d, e, f)$, $P3 = (g, h, i)$ sowie deren Entfernungen $r1, r2, r3$ im 3D-Koordinatensystem bekannt, dann ist die Menge der zwei Punkten (x, y, z) algebraisch durch ein Gleichungssystem (Formel 3.2) ermittelbar.

$$\begin{cases} (x - a)^2 + (y - b)^2 + (z - c)^2 = r1^2 \\ (x - d)^2 + (y - e)^2 + (z - f)^2 = r2^2 \\ (x - g)^2 + (y - h)^2 + (z - i)^2 = r3^2 \end{cases}$$

Formel 3.2. Gleichungssystem zur Ermittlung der Menge von zwei potenziellen Positionen (x, y, z) durch Trilateration im 3D-Raum

3.2.3. Andere Methoden

Je nach Anwendungsfall sind verschiedene andere Methoden der Positionsbestimmung verbreitet. *Angle of Departure* ist eine Positionierung durch Analyse von dem Winkel, unter dem die Signale den Sensor erreichen. *Centroid Determination* ist eine Annäherung an eine Position, bei der der Mittelpunkt des durch die erreichbaren Beacons gebildeten Polygons berechnet wird. *Polar Point Method* basiert auf der gleichzeitigen Messung von Entfernung und Winkel, um die Position eines Objekts mittels einer oder mehrerer Stationen zu bestimmen.

Dead Reckoning realisiert Positionsbestimmung anhand der Kenntnis der vorherigen Positionen, der Geschwindigkeit und Richtung. Als Hauptsensor wird da ein Trägheitsnavigationssystem verwendet. Sollte es notwendig sein, Messrauschen und Signalausbreitungsstörungen zu kompensieren, wird ein adaptiver Filteralgorithmus wie zum Beispiel das Kalman-Filter verwendet.

3.3. Technologien

Im folgenden Kapitel wird zunächst ein Überblick über die Kategorisierung und die Merkmale der wichtigsten Indoor Positioning Technologien gegeben, gefolgt von der Beschreibung der ausgewählten Technologien auf Basis der Literatur [12], [16].

Es gibt keine universellen Lösungen für ein Indoor Positioning System zur allgemeinen Verwendung. Je nach Anwendung können verschiedene Techniken und Geräte mit besserer Leistung eingesetzt werden. Tabelle 3.1 fasst die bekanntesten Indoor Positioning Technologien gemäß [10]–[12], [16], [48] zusammen. Um die Technologiebreite zu strukturieren, schlagen Brena et al. (2017) [12] eine Klassifizierung von Indoor Positioning Technologien nach der Art des verwendeten Signals in vier Kategorien vor:

1. Funkfrequenzsignale – die gängigste Kategorie der Technologien, die sich auf die Frequenz von Funksignalen, hauptsächlich zwischen 2 und 5 GHz, bezieht. Beispiele für Technologien sind WLAN, Bluetooth und ZigBee.
2. Lichtsignale – optische Technologien in Form von elektromagnetischer Strahlung. Seine Besonderheit ist die Funktionseinschränkung aufgrund von Lines-of-Sight.
3. Schallsignale – Technologien, die Schallsignale verwenden. Der Schall breitet sich langsamer aus als elektromagnetische Signale, so dass sich die Laufzeit einfacher messen lässt.
4. Passive Technologien – Technologien, die sich auf natürlich vorkommende Signale beziehen, wie z. B. auf magnetische Felder.

Technologie	Genauigkeit	Erfassungsbereich	Kosten	Kategorie
WLAN	1 - 2 m	ein Gebäude	kleine	Funkfrequenzsignale
Bluetooth	30 - 300 cm	ein Gebäude	kleine	Funkfrequenzsignale
ZigBee	25 cm	ein Gebäude	kleine Installationskosten, hohe Endnutzerkosten	Funkfrequenzsignale
RFID	10 - 500 cm	ein Zimmer	hohe Installationskosten, kleine Endnutzerkosten	Funkfrequenzsignale
UWB	12 cm	ein Gebäude	große	Funkfrequenzsignale
akustischer Klang	1 cm - 1 m	ein Zimmer	mehrere Stufen	Schallsignale
Pseudolites	5 - 10 cm	10 – 1000 m	große	Funkfrequenzsignale
Trägheits- navigation	1 - 2 m	–	kleine	Passive Technologien

Tabelle 3.1. Ausgewählte Indoor Positioning Technologien und ihre typischen Parameterwerte

3.3.1. Wireless Local Area Network

Wireless Local Area Network (WLAN) ist eine Technologie für eine Kommunikation mittels elektromagnetischer Wellen. WLAN-basierte Indoor Positioning ist das am weitesten verbreitete

System für Indoor Positioning. WLAN-Zugangspunkte sind in vielen Innenräumen leicht zugänglich und bieten kabellose Konnektivität innerhalb von ca. 50 m, was vorteilhaft beispielsweise im Vergleich zu Bluetooth oder RFID Technologien ist. Eine häufig verwendete Methode ist die Entfernungsmessung mittels RSSI.

3.3.2. Bluetooth

Bluetooth ist ein Standard für drahtlose persönliche Netzwerke, der von der Bluetooth Special Interest Group verwaltet wird. Die Vorteile der Verwendung von Bluetooth für Indoor Positioning sind geringe Kosten, niedriger Stromverbrauch, geringe Größe von Hardware und hohe Kommunikationssicherheit.

Bluetooth Low Energy (BLE) ist ein Standard, der im Vergleich zum klassischen Bluetooth einen deutlich geringeren Stromverbrauch und damit niedrigere Kosten bei gleicher Reichweite der Kommunikation bietet. Diese Fähigkeit ermöglicht eine effiziente Positionierung mit Beacons. Die angewandten Methoden sind die Erkennung von Präsenz (Cell of Origin), Annäherung, Richtung (Angle of Departure) oder Signalankunftszeit [49].

3.3.3. Kameras

Kamerabasierte Ansätze zur optischen Innenraumortung decken ein breites Spektrum von Anwendungen auf allen Genauigkeitsniveaus ab. Ein Vorgehen davon befasst sich mit der Erkennung von Bildern und dem Abgleich dieser Objekte mit einer Gebäudedatenbank. Der Hauptvorteil dieser Lösung besteht darin, dass keine lokale Infrastruktur, wie zum Beispiel die Aufstellung von Beacons, installiert werden muss. Zur Unterstützung der Objekterkennung und Kamerakalibration verwendet man verschiedene Marker (Abbildung 3.4).



Abbildung 3.4. Drei Beispiele für Indoor Positioning Marker (Mautz, 2012 [16, S. 37]).
In der Mitte befindet sich ein QR Code¹⁴

3.3.4. Radio Frequency Identification

Ein Radio Frequency Identification (RFID) System besteht aus einem Lesegerät, das mit passiven (batterielosen) oder aktiven RFID-Tags über Radiowellen kommuniziert. Die Radiowellen können durch einige Feststoffe durchdringen, so dass die Tags unter einem Teppich oder in einer Wand versteckt werden können. Auch beim RFID ist eine Entfernungsschätzung mittels RSSI geeignet. Ein auf der RFID-Technologie basierender Standard für die Datenübertragung ist das *Near Field Communication*¹⁵

¹⁴ *QR* steht für *Quick Response*, aus dem Englischen *schnelle Antwort*

¹⁵ Auch Nahfeldkommunikation genannt

(NFC). Diese Variante von RFID nutzt passive Tags¹⁶ für die Kommunikation, eine Frequenz von 13,5 MHz und bietet eine kleine Reichweite bis ungefähr 20 cm an. NFC ist in letzten Jahren eine wichtige Technologie geworden, weil sie in zahlreiche Smartphones integriert wurde und als Möglichkeit für sichere mobile Zahlungen und Authentifizierung vorgeschlagen ist [12].

¹⁶ Passiver NFC Tag heißt, dass das Smartphone als NFC Reader ein elektromagnetisches Feld erzeugt und der NFC Tag mit einer Modulation dieses Feldes ohne eigene Stromversorgung reagiert [50]

4. Analyse

In diesem Kapitel werden die Methodik, die Anforderungen und die Analyse der Probleme hinsichtlich der Konzeptentwicklung zur Nutzung von Indoor Positioning Technologie für adaptive mobile Informationsbereitstellung besprochen. Der Aufbau eines geeigneten Systems wird zunächst auf abstrakter Ebene, dann im Hinblick auf eine konkrete medizinische Anwendung vorgestellt.

4.1. Methodik

Die Konzeptentwicklung ist anhand einer Fallstudie durchgeführt worden, die durch Literaturrecherche und Beobachtungen begleitet wurde. Die Literaturrecherche zum Stand der Technik, aktuellen Lösungen und angewandten Methoden diente dazu, allgemeine Softwareschnittstellen und die Integration der Positionierung in AMIP-Systeme auf der höchstmöglichen Abstraktionsebene zu bestimmen. Die anwendungsspezifischen Nutzeranforderungen an das Indoor Positioning Technologie wurden anhand von Funktionalität und Qualität nach dem Modell von Mautz (2012) erfasst (Abbildung 4.1). Die Anforderungen an das Konzept hinsichtlich Integration, Leistungsfähigkeit und grundsätzlichen Merkmalen der Software ergeben sich aus Brainstorming-Sitzungen und der Analyse von Literatur [1], [11]–[13], [51].

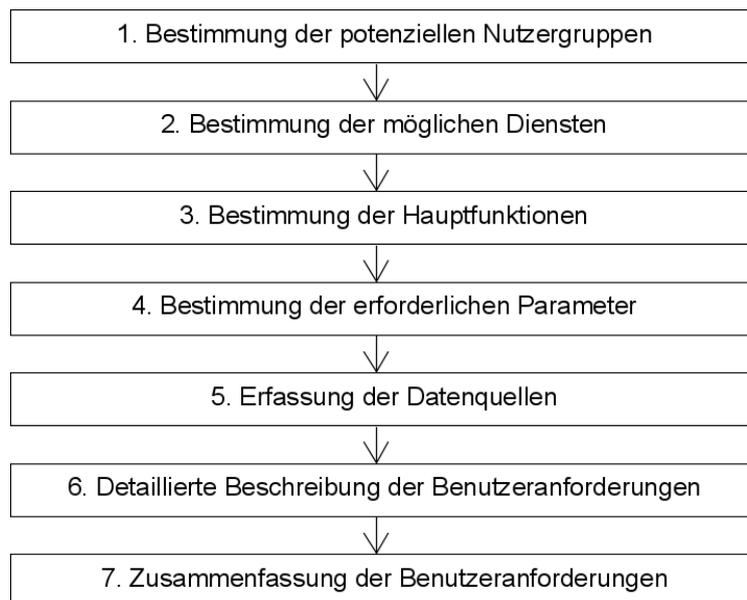


Abbildung 4.1. Erfassung der Benutzeranforderungen nach Mautz [16, S. 21]

Für die Realisierung des Prototyps wurde bereits existierendes AMIP-System zur Nutzung von Smart Glasses verwendet. Die Positionierung wurde auf der Grundlage einer qualitativen Analyse der Literatur, Besonderheiten bei medizinischer Anwendung und verfügbaren Werkzeugen (Fallstudie) entwickelt. Das Design wurde mit Methoden des Software-Engineerings auf der Basis einer nutzwertorientierten Analyse und einer argumentativen Bewertung entschieden und entworfen. Die Evaluation wurde mittels Testszenarien in einer prototypischen medizinischen Simulationsumgebung durchgeführt. Mithilfe der Testszenarien wurden die bedeutsamen Qualitäten, Metriken und die

Erfüllung der Anforderungen untersucht. Zusammenfassend wird auf der Grundlage der Ergebnisse ein Verweis zu einem allgemeinen Konzept vorgezeigt. Zu diesem Zweck wurden ausgewählte Anwendungsfälle der Nutzung von Indoor Positioning Technologie in Systemen zur adaptiven mobilen Informationsbereitstellung beschrieben.

4.2. Anforderungen

Basierend auf der Literatur [1], [11]–[13], [16], [51] und den im vorherigen Kapitel genannten Methoden wurden entsprechende funktionale und qualitative Anforderungen an das Konzept erfasst.

4.2.1. Funktionale Anforderungen

Für die Analyse der funktionalen Anforderungen wurden bestimmte Anwendungsszenarien vorgeführt.

Darstellung einer Position

Der Nutzer des Endgeräts eines AMIP-Systems soll dessen aktuelle Position ablesen können, wenn es in Betrieb ist. Anforderungen an das System sind:

- Empfang der Signale durch Sensoren, Ermittlung der Distanzen zu den Ankerpunkten und Berechnung/Ermittlung der Position
- Vereinheitlichung der Sensordaten
- Transformation der Positionsdaten in eine geeignete Form z.B. als Koordinatendarstellung, Zimmernummer oder interaktive Grafik

Umschalten zwischen den Technologien

Es soll möglich werden, dass ein Bereich mehrere Indoor Positioning Technologien gleichzeitig anbietet. Um eine optimale Effizienz der Positionierung zu erreichen, soll der Nutzer in der Lage sein, die verwendete Technologie entweder manuell oder automatisch durch eine Infrastrukturerkennung zu ändern. Zur Ressourceneinsparung sollte dem Nutzer auch eine Ein-/Ausschaltfunktion für die Positionierung zur Verfügung gestellt werden. Gefordert sind daher:

- Steuerung der Indoor Positioning Funktionen durch das AMIP-System
- Möglichkeit des automatischen oder manuellen Wechsels der momentan benutzten Technologie
- Möglichkeit der Unterbrechung der Sensoraktivität

Umgestaltung der physikalischen Umgebung

Wenn eine neue Erstellung, Umgestaltung oder Wartung der physikalischen Umgebung passiert, zum Beispiel durch Umbenennung eines Bereiches oder Anlegung von Beacon auf anderen Platz, dann muss dies entsprechend durch das System wahrgenommen werden:

- Effiziente Aktualisierbarkeit des Kartenmodells

Erweiterbarkeit des Systems

Um eine Erweiterung des Systems, zum Beispiel um neue Hardware, zu ermöglichen, wird Folgendes angefordert:

- Abstrakte Schnittstellen der allgemeinen Softwarefunktionalitäten
- Möglichkeit der Anbindung beliebiger Positionierungstechnologien und Methoden

4.2.2. Qualitative Anforderungen

Im Folgenden werden die Anforderungen aufgelistet, die qualitative und andere nicht-funktionale Merkmale des Konzepts beschreiben.

- Benutzerfreundlichkeit der Nutzung
- Robustheit, Bedienung potenziellen Ausfällen der Sensorwerten
- Technologieunabhängige Anbindung der Indoor Positioning an AMIP-System
- Leichte Übertragbarkeit auf verschiedene Anwendungsfälle

Außerdem ist eine an die Anwendung angepasste Qualität der Indoor Positioning Technologie erforderlich in Bezug auf:

- Genauigkeit/Messunsicherheit
- Erfassungsbereich
- Kosten (Zeitkosten, Investitionskosten, Instandhaltungskosten, Kosten der Platzbelegung)
- Ausgabedaten (z. B. Koordinaten, Position-ID, 2D, 3D, Richtung, Geschwindigkeit)
- Rate der Datenausgabe (feste Frequenz, on-Event)
- Datenschutz (Verschlüsselung der Kommunikation, lokale/globale Datenablage)
- Skalierbarkeit
- Anzahl der Nutzer

Eine grundlegende Anforderung an die Software ist die Erfüllung der Qualitätsmerkmale gemäß ISO 25010 [51]. Auf der obersten Abstraktionsebene sind dies Funktionalität, Zuverlässigkeit, Benutzbarkeit, Effizienz, Wartbarkeit, Sicherheit, Kompatibilität und Portabilität. Die Zuverlässigkeit lässt sich in diesem Kontext aus der Genauigkeit, dem Erfassungsbereich, der Datenausgaberate, der Robustheit und der Optimalität der Berechnungsmethoden der Indoor Positioning Technologie ableiten.

4.3. Konzeptaufbau

Zu den Komponenten eines AMIP gehören eine Sensorik, eine Berechnungsinstanz und ein Darsteller der Informationen. Die Verbindungen zwischen den Komponenten sind in Abbildung 4.2 gezeigt. Zusätzlich dazu benötigen Indoor Positioning Technologien eine Komponente zur Haltung von Datenbanken. Die Aufteilung der Aufgaben der Positionierungsphasen (siehe Kapitel 3.2) auf physische Systemkomponenten ist ein Designproblem und hängt davon ab, wo welche Datenbanken gespeichert werden. Die Entscheidung kann je nach Anwendungsfall und Prioritäten unterschiedliche Vor- und Nachteile haben.

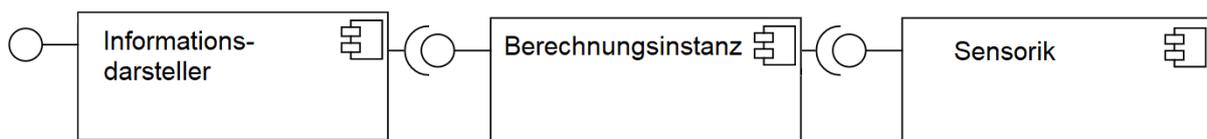


Abbildung 4.2. Komponentendiagramm eines AMIP-Systems

4.3.1. Problem der Speicherstelle des Kartenmodells

Die für die Realisierung von Indoor Positioning erforderlichen Daten sind:

1. *Areas* – Datenbank mit der Lage der Points of Interest
2. *Anchor Points* – Datenbank mit der Lage der übrigen Ankerpunkte

Und optional:

3. *Info* – Datenbank mit den Zusatzinformationen über den identifizierbaren Positionsbereichen

Zusammen bilden diese Datenbanken das Kartenmodell. Wenn das AMIP-System über einen zentralen Rechner verfügt, stellt sich die Frage, bei welchen physischen Geräten die Datenbanken gespeichert werden sollen. Die zwei wesentlichen Lösungen sind:

- Bei der Sensorik – das Halten des Kartenmodells an der Stelle der Geräte, die für den Empfang der Positionssignale zuständig sind
- Beim zentralen Rechner – das Halten des Kartenmodells auf einem zentralen, möglicherweise stationären Rechner

Die Wahl der Speicherstelle ist unter Berücksichtigung der spezifischen Parameter des Anwendungsfalles zu entscheiden. Um dies zu veranschaulichen, wurden in Tabelle 4.1 die Vor- und Nachteile der Speicherung des kompletten Kartenmodells an einem der beiden Standorte erfasst.

Speicherstelle	Vorteile	Nachteile
Bei der Sensorik	Die vollständige Positionierung erfolgt auf dem Sensorik-Gerät erleichterte Debugging, geringe Komplexität des Systems, höhere Zuverlässigkeit	Die Aktualisierung des Kartenmodells muss für jeden Nutzer einzeln auf seinem Gerät durchgeführt werden Die Speicherbelastung der Karte betrifft jedes Sensorik-Gerät
Beim zentralen Rechner	Vorteile der <i>Computation Offloading</i> , also bessere Leistung durch Berechnung der Positionen auf einem stationären Rechner Datenschutz – die Datenbanken werden den mobilen Geräten nicht mitgeteilt	Keine positionsabhängige Interaktion der Sensorik-Geräte möglich Abhängigkeit der Positionierung vom zentralen Rechner Potenzielle Schwierigkeiten bei der Kommunikation. Die Sensorik-Geräte werden nicht in der Lage, ihre Ergebnisse selbständig zu verarbeiten und müssen daher lange rohe Nachrichten an die Berechnungsinstanz senden, z. B. IDs und Distanzen aller erreichbaren Beacons anstatt einer bearbeiteten Koordinatenposition-Form Die Ermittlung der Echtzeitposition kann eine größere Verzögerung aufweisen

Tabelle 4.1. Erfassung der Vor- und Nachteile der zwei Speicherorten des Kartenmodells

Vorteilhaft kann dabei sein, die zum Kartenmodell gehörenden Datenbanken an verschiedenen Stellen zu halten. Zum Beispiel die *Info*- und *Areas*-Datenbank beim zentralen Rechner und die *Anchor Points* Datenbank bei der Sensorik. Dann entfällt der Nachteil der langen Nachrichten mit den Sensordaten (die Koordinatenposition wird nach Empfang der Positionssignale auf demselben Gerät berechnet) und die Aufgabe der Identifizierung des Positionsbereichs wird dem zentralen Rechner zugewiesen.

4.3.2. Bestimmung der Schnittstellen

Auf einer abstrakten Ebene, unabhängig von Indoor Positioning Technologie, sind folgende Schnittstellen zwischen den Komponenten des Indoor Positioning Systems definierbar.

Sensorik (Sensors)

- Ausgabe der Sensordaten
- Start eines Scanvorgangs
- Beendigung eines Scanvorgangs

Kartenmodell (Map model)

- Ausgabe der Position eines Ankerpunktes
- Ausgabe der Position der Points of Interest
- Ausgabe der Informationen zu einem Point of Interest

Berechnungsinstanz (Calculation entity)

Die Berechnungsinstanz ist die Komponente, die Sensordaten verwendet, um unter Verwendung des Kartenmodells die Position zu berechnen und sie an die Empfangsstelle zu senden.

- Positionsberechnung basierend auf Sensordaten und der ID der Indoor Positioning Technologie
- Ausgabe der Position in geeigneter Form, z. B. als nächstgelegenen Point of Interest

Empfangsstelle (Information provider)

- Empfang und Darstellung der positionsadaptiver Information

Gemäß der Schnittstellenbeschreibung lässt sich ein AMIP-System mit den Funktionen der Indoor Positioning erweitern. Die Abbildung 4.3 stellt dafür den erweiterten Komponentendiagramm mit der Bezeichnung der Schnittstellen und der übertragenen Daten zwischen den Komponenten dar.

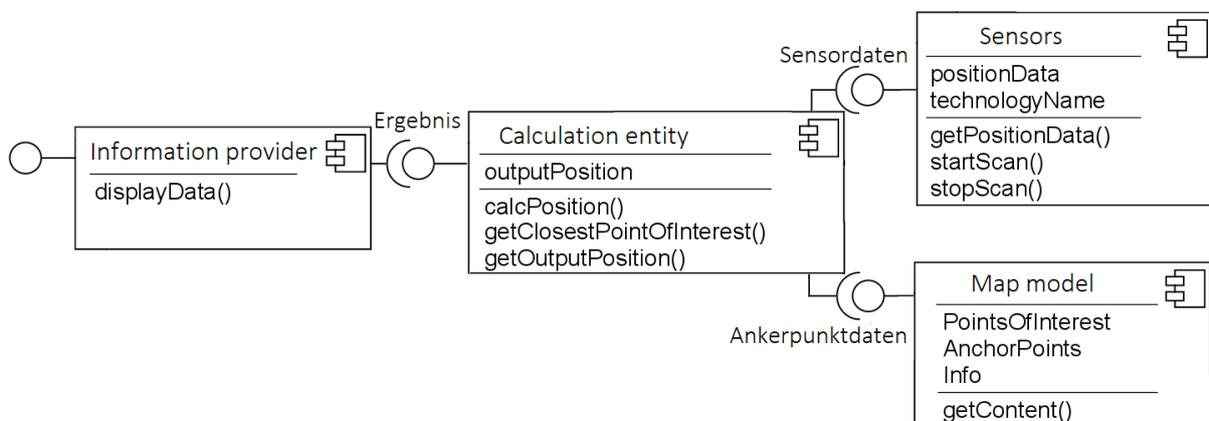


Abbildung 4.3. Komponentendiagramm des Indoor Positioning Systems mit Schnittstellendefinition

Ein Prozess der Indoor Positioning, vom Empfang eines Signals durch die Sensorik bis zur Anzeige der positionsadaptiver Information auf dem Endgerät, besteht aus mehreren Schritten der Datenübertragung. Abbildung 4.4 zeigt die Übertragung zwischen den Komponenten im Rahmen dieses Prozesses.

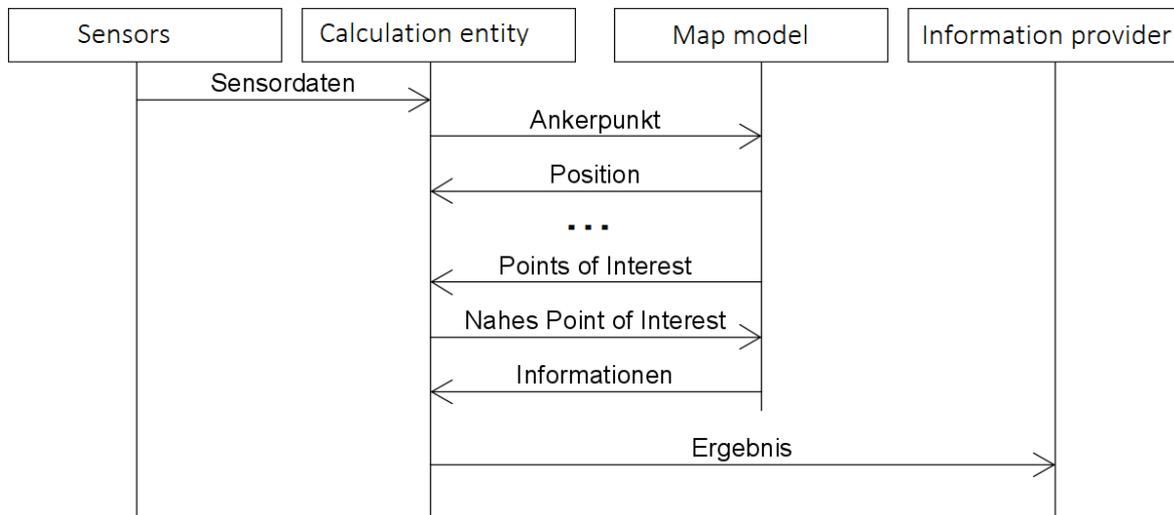


Abbildung 4.4. Datenübertragung im Rahmen eines Indoor Positioning Prozesses

4.3.3. Aufbau eines medizinischen AMIP-Systems

Ein prototypisches System „AR-Support in Medical Environments“ zur mobilen adaptiven Nutzung von Smart Glasses im Bereich der Digital Health wurde bereits entwickelt und besteht aus:

- 1) Smart Glasses, also persönlichen Anbieter von adaptiven Informationen, der diese auf seinem Display anzeigt
- 2) Einem zentralen, stationären Rechner mit webbasiertem Service, der eine Verwaltung der Datenübertragung zur Smart Glasses gewährleistet
- 3) Smartphones, also persönlichen Geräten für eine webbasierte Kommunikation über den WebSocket¹⁷ mit dem Service und eine Bluetooth-basierte Kommunikation mit den Smart Glasses. Außer der Funktion der Verbindungsbrücke ermöglichen die Smartphones die Nutzung der in ihnen eingebauten Sensorik.

Die Software auf dem Rechner und dem Smartphone basiert auf der Programmiersprache Java. Das Web-Service ist ein lokales Webserver, der das Framework Spring verwendet. Die Smartphones verfügen über eine Android-App mit minimaler Version des Betriebssystem Android 8.0 Oreo¹⁸. Das Modell der Smart Glasses ist „*tooz DevKit*“ [7]. Die Anwendungsfälle des Systems betreffen den Einsatz der Smart Glasses im Krankenhaus, indem dem Benutzern positionsabhängige Daten auf der Brille angezeigt werden. Bei den Benutzern handelt es sich um Ärzte. Die Anforderung, bei der Verwendung von Brillen die Hände frei zu haben, wird als wichtig angesehen, um eine hohe Effizienz

¹⁷ WebSocket – ein Netzwerkprotokoll zur Unterstützung einer bidirektionalen Verbindung zwischen einer Web-Anwendung und einem Webserver.

¹⁸ Entspricht dem API Level 26, die mit *minSdkVersion 16* in der build.gradle Datei der App spezifiziert ist.

bei der Patientenversorgung zu gewährleisten. Eine besondere Bedeutung kommt auch der Robustheit zu, da eventuelle Fehlfunktionen bei der Pflege von Menschen ein Risiko von Gesundheitsschäden mit sich bringen.

5. Design und Realisierung

Im vorherigen Kapitel wurden allgemeine Anforderungen und Probleme einer adaptiven mobilen Informationsbereitstellung spezifiziert. Zudem wurde ein Überblick über ein bestehendes medizinisches System vorgestellt. In diesem Abschnitt wird dieses AMIP-System um Indoor Positioning mittels QR Codes, NFC Tags und BLE Beacons durch eine prototypische Umsetzung erweitert.

5.1. Grundlegende Designentscheidungen

Zu Beginn des Designs werden grundlegende Entscheidungen getroffen, die von globaler Bedeutung für mehreren Komponenten des AMIP-Systems sind. Das Indoor Positioning System wird eine Kamera, NFC- und Bluetooth-Sensoren eines Smartphones verwenden. Während der Nutzung wird die zuvor auf dem Smartphone ausgewählte Sensortechnologie im Einsatz. Die Sensordaten und die Positionierungsmethoden werden über eine abstrakte Schnittstelle vereinheitlicht, die auf dem *Template method* Entwurfsmuster von Gamma et al. [52] basiert. Das Kartenmodell wird als eine externe Datei in das System einsetzbar. Auf den Smart Glasses, dem Endgerät, werden Patienteninformationen entsprechend dem nächstgelegenen Bett (Point of Interest) angezeigt.

Die Frequenz, mit der die Sensordaten von Smartphones an die Berechnungsinstanz gesendet werden, wird mit einer Standardeinstellung von 1/3 Hz entworfen. Je höher die Frequenz wäre, desto häufiger würde die Aktualisierung der Position auf dem Endgerät stattfinden, allerdings auf Kosten der Rechenbelastung und potenziellen Unlesbarkeit aufgrund des schnellen Informationssprungs auf der Smart Glasses. Alternativ zur Frequenzbestimmung könnten auch sensorabhängige Bedingungen zur Auslösung der Datenübertragung definiert werden. Bei QR Codes und NFC Technologien, die an Mustererkennung basieren, ist eine optimale Lösung die Übertragung von Sensordaten nach einer Erkennung eines Musters.

5.2. Kartenmodell

Das Kartenmodell für die medizinische Anwendung muss die Patientendaten, die Betten als Points of Interest und diverse Ankerpunktdaten je nach Indoor Positioning Technologie enthalten. Da die Smart Glasses auf einem stationären Rechner verwaltet sind, kommen sowohl dieser Rechner als auch die Smartphones als mögliche Speicherstellen für das Kartenmodell in Frage. Für die Auswahl wurden die allgemeinen Vor- und Nachteile entsprechend Abschnitt 4.3.1 sowie die anwendungsspezifischen Kriterien herangezogen:

- Bearbeitung – Einfachheit der Aktualisierungen, also Operationen wie Austausch von Betten oder das Hinzufügen eines Ankerpunkts.
- Robustheit gegenüber Fehlfunktionen – dazu gehört eine klare Zuteilung der Funktionen, geringe Systemkomplexität, Zuverlässigkeit, Marktreife der Lösungen.
- Leistung – bei diesem Kriterium geht es um die Entlastung des Smartphones. Durch die Platzierung von Datenbanken außerhalb der Smartphones lassen sich die Berechnungen auf die

Stelle des zentralen, stationären Rechners verschieben. Die Ressourcen, die Akkulaufzeit und der Speicher sind auf mobilen Geräten im Vergleich zu einem stationären Rechner geringer.

- Datenschutz – die Patientendaten sind sensibel. Im Falle von Krankenhausbereichen, zu denen Unbefugte keinen Zugang haben, sind auch für die Daten über Ankerpunkten und Points of Interest sensibel. Wenn Daten nicht auf dem Smartphone gespeichert werden, verringert sich das Risiko von Datenlecks¹⁹.

Anhand einer am Scoring-Modell [53] orientierten Analyse wurde die zentrale Speicherung des Kartenmodells auf dem stationären Rechner als Entscheidung für die Umsetzung angenommen. Die Vorteile im Bereich der Bearbeitung, Leistung und Datenschutz überwinden den Nachteil von kleinerer Robustheit. Dementsprechend befindet sich auch die Berechnungsinstanz auf dem stationären Rechner, weil erst von dort das Kartenmodell abgefragt werden kann. Das Kartenmodell wird in Form einer XML-Datei zum Webservice hochgeladen und mithilfe der Funktionen der *XStream*-Bibliothek [54] in Java-Objekte konvertiert. Die Parameter der XML-Datei werden in englischer Sprache spezifiziert.

Die Abbildung 5.1 gibt einen Überblick über die Verteilung der Systemkomponenten auf die physischen Geräte. Der zentrale Rechner (PC²⁰) enthält das Kartenmodell (Map modell), das von einem Administrator über einen Webbrowser hochgeladen werden kann. Die Berechnungsinstanz (Calculation entity) nutzt das Kartenmodell innerhalb eines Webservers auf dem zentralen PC. Der Webserver kommuniziert mit dem Smartphone über WebSocket-Nachrichten über einen freien Port in der Firewall. Die Smartphones realisieren die Sensorik und dienen als Verbindungsbrücke zwischen dem stationären Rechner und der Smart Glasses.

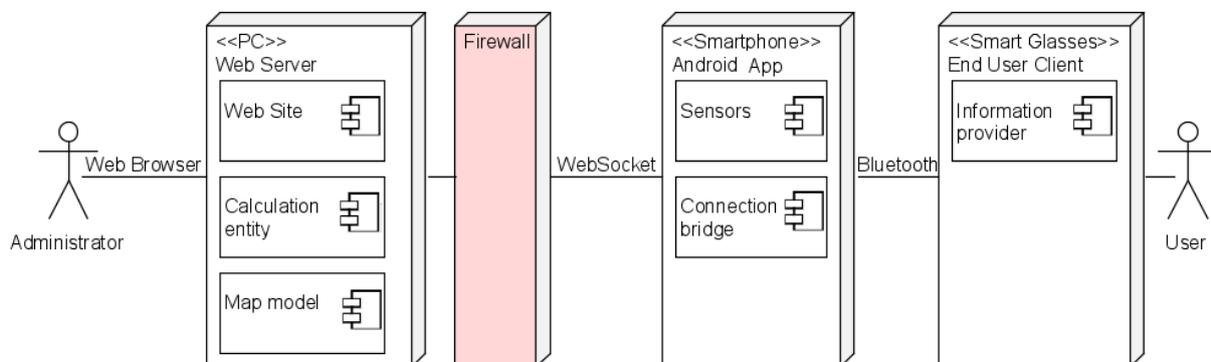


Abbildung 5.1. Verteilungsdiagramm der realisierten Umsetzung

5.3. Sensorik

Als Sensorgeräte für die Indoor Positioning werden Smartphones verwendet. Die dafür geeignete Infrastruktur besteht aus identifizierbaren BLE Beacons, NFC Tags und QR Codes als Ankerpunkte des Systems. Zum Empfang der Signale verwenden die Smartphones integrierte Bluetooth-, Kamera- und NFC-Sensoren.

¹⁹ Datenleck – ein Vorfall, bei dem unberechtigte Nutzer Zugriff auf eine Datensammlung erhalten.

²⁰ PC steht für *Personal Computer*, aus dem Englischen *persönlicher Rechner*

Abbildung 5.2 stellt das Klassendiagramm der Android-Applikation zur Erfassung der Sensordaten dar. Eine Activity²¹-Klasse *ClientActivity* instanziiert ein Objekt des Datentyps *IndoorPositioning*, das mit den Basisfunktionen der Indoor Positioning Technologien definiert ist. Zu diesen Basisfunktionen gehören die Ausgabe von Sensordaten, die Freischaltung des Scannens, die Ausschaltung des Scannens und die Ausgabe des Scanstatus. Alle konkrete Klassen der Indoor Positioning Technologien erben von der Schnittstelle *IndoorPositioning*. Die abstrakte Klasse *BeaconPositioning* erweitert sie um die Funktionen zur Verwaltung über Beacons. Um die Messfehler beim Abtasten von Beacons zu minimieren, verwendet *BeaconPositioning* eine FIFO-Schlange²² und gibt den Median seiner Werte als Messergebnis aus.

²¹ Activity – Repräsentation einer Bildschirm-Seite (Screen) in einer Android-Applikation. Activity enthält in der Regel Elemente der Benutzeroberfläche wie Knöpfe, Listen oder Eingabefelder für Texte [55].

²² FIFO (First In – First Out) ist eine Speichermethode, bei denen die Objekte, die zuerst gespeichert wurden, zunächst aus dem Speicher entfernt werden, wenn der Speicher völlig besetzt wird.

5.3.1. QR Codes

Die optische Ortung mit QR Codes nutzt die Technik der Mustererkennung und der Zuweisung von Position nach dem Cell of Origin-Prinzip. Die Infrastruktur besteht aus QR Codes als Ankerpunkte, die mit der Kamera eines Smartphones gescannt werden.

Da es einen Vorteil von freien Händen bzw. einer unkomplizierten Bedienung des Smartphones während der Nutzung von Smart Glasses gibt, kann der Scanvorgang entweder permanent, durch Schütteln des Smartphones oder durch das Drücken einer Taste aktiviert werden. Jede der drei Aktivierungsmethoden hat unterschiedliche Schwachstellen. Der permanente Scanvorgang erhöht den Akkuverbrauch. Für die Erkennung des Schüttelns sind das im Smartphone integrierte Gyroskop und eine anspruchsvolle Kalibrierung erforderlich. Die Aktivierung per Tastendruck erfüllt wiederum die Anforderung an eine unkomplizierte Bedienung des Smartphones nicht optimal. Das Java-Code (Listing 5.1) überschreibt die Methode *onKeyDown()* der Klasse *androidx.appcompat.app.AppCompatActivity* und aktiviert somit den Scanvorgang, wenn der Benutzer die Lautstärketaste des Smartphones drückt.

```
@Override
public boolean onKeyDown(int keyCode, KeyEvent event) {
    if (positioningSubject instanceof QrCodePositioning &&
        (keyCode == KeyEvent.KEYCODE_VOLUME_DOWN)) {
        QrCodePositioning qrIPos = (QrCodePositioning) positioningSubject;
        qrIPos.onScanTrigger(this);
        return true;
    }
    return super.onKeyDown(keyCode, event);
}
```

Listing 5.1. Code zur Aktivierung des Scanvorgangs durch Drücken der Leiser-Taste des Smartphones

Der Scanvorgang findet auf einer externen Activity statt und das Scan-Ergebnis wird über die Methode *FragmentActivity.onActivityResult()* zurückgegeben. Die Auslösung des Scanvorgangs, zum Beispiel mit der Barcode Scanner App von ZXing Team [56], wird wie in Listing 5.2 vorgestellt implementiert.

```
public void onScanTrigger(Activity sensorActivity){
    try {
        Intent intent = new Intent("com.google.zxing.client.android.SCAN");
        intent.putExtra("SCAN_MODE", "QR_CODE_MODE");
        sensorActivity.startActivityForResult(intent, QR_SCAN_REQUEST);
    } catch (ActivityNotFoundException e) {
        Uri marketUri =
Uri.parse("market://details?id=com.google.zxing.client.android");
        Intent marketIntent = new Intent(Intent.ACTION_VIEW,marketUri);
        sensorActivity.startActivity(marketIntent);
    }
}
```

Listing 5.2. Code zur Auslösung der Activity der Barcode Scanner App von ZXing Team [56]

QR Codes werden im Einsatzgebiet als Ankerpunkte aufgeklebt, wobei ein QR Code genau einem Point of Interest, also einem Bett, entspricht. Damit die Codes ordnungsgemäß identifiziert werden, bestehen

sie aus einem Präfix und seinem Identifikator im Textformat. Ein QR Code kann zum Beispiel den Text *ipos_0001* beinhalten, wobei der Präfix „*ipos*“ und der Identifikator des Ankerpunktes „*0001*“ sind (Abbildung 5.3).



Abbildung 5.3. QR Code-Ankerpunkt mit dem Text *ipos_0001*

5.3.2. NFC Tags

Die Positionierung mittels Near Field Communication Tags verwendet, ähnlich wie bei QR Codes, die Technik der Erkennung eines Musters und Zuordnung des Muster-Ankerpunkts zu den Betten nach der Cell of Origin-Prinzip. Die Infrastruktur besteht aus NFC Tags, die an einer festen Position an der Wand bzw. am Bett aufgehängt werden. Im Gegenteil zu QR Codes kann ein NFC-Scanvorgang mit maximalem Abstand von nur 20 cm zwischen dem Smartphone und dem Tag erfolgen. Das NFC Tag kann einen Mikroprozessor enthalten. Dies ermöglicht eine verschlüsselte Kommunikation und Authentifizierung des Nutzers, was Einsatzmöglichkeiten wie eine Identifizierung und ein sicheres Zugriff auf vertrauliche Patientendaten bietet [57]. Außerdem sind die Kosten relativ gering, die Ankerpunkte brauchen keine externe Stromversorgung (sie nutzen die Energie des Smartphones für ihre Funktionsweise) und die Technologie ist robust. NFC-Wellen können einige Feststoffe durchqueren, so dass ihre Verdeckung, zum Beispiel in der Wand, realisierbar ist.

Zur Umsetzung werden ISO 14443-4 kompatible Tags verwendet. Die Identifizierung der Ankerpunkte erfolgt durch Auslesen der UID²³ mit der Methode *getId()* der Klasse *android.nfc.Tag*²⁴. Damit die NFC-Tags durch die Android-Applikation im Vordergrund gescannt werden können, wurden die Funktionen *enableForegroundDispatch()* und *disableForegroundDispatch()* der Klasse *android.nfc.NfcAdapter*²⁵ in der Funktionen *onResume()* und *onPause()* der Activity²⁶ aufgerufen.

Es wird angenommen, dass alle im Anwendungsgebiet verfügbaren Tags zum Indoor Positioning System gehören. Andernfalls wäre die sensorseitige Anerkennung der Zugehörigkeit zum System durch die Implementierung geeigneter Funktionen auf den NFC Tags, z. B. mittels einem Java Card Applet, erweiterbar. Diese Funktionen könnten vom Smartphone im Kommunikationsprozess über APDU²⁷-Befehlen erreicht werden [58]. Um zu vermeiden, dass die IDs der Ankerpunkte öffentlich zugänglich sind, kann die Kommunikation zwischen dem Tag und dem Smartphone mittels Secure Channel

²³ UID – ein nur lesbarer eindeutiger Identifikator des NFC Tags

²⁴ Dokumentation: <https://developer.android.com/reference/android/nfc/Tag>

²⁵ Dokumentation: <https://developer.android.com/reference/android/nfc/NfcAdapter>

²⁶ Dokumentation: <https://developer.android.com/reference/android/app/Activity>

²⁷ APDU (Application Protocol Data Unit) – ein Standard eines Kommunikationsprotokolls zwischen dem NFC Tag und NFC Reader

verschlüsselt werden [57], [59]. In diesem Fall wären die IDs der erstellten Ankerpunkte nicht identisch mit den UIDs der NFC Tags.

5.3.3. BLE Beacons

Die Bluetooth Low Energy Technologie ermöglicht es, mehrere Ankerpunkte gleichzeitig zu erfassen und mit Hilfe der zweidimensionalen Trilateration eine genaue Koordinatenposition des Nutzers zu bestimmen. Die Infrastruktur besteht aus fest positionierten Bluetooth Low Energy Beacons, die mittels der Bluetooth Technologie des Smartphones gescannt werden. Der Hauptvorteil besteht darin, dass der Nutzer die Hände frei hat, d.h. er muss außer seiner Bewegung keine weitere Interaktion ausführen, um lokalisiert zu werden. Die Kommunikation ist verschlüsselt und der Erfassungsbereich eines Beacons beträgt ca. 30 Meter [12], [16].

Für die Kommunikation wurden das Eddystone-Profil [60] der BLE Beacons und die Android-Bibliothek *android-beacon-library 2.19 API*²⁸ verwendet. Die Entfernungsmessung erfolgt durch die Analyse des RSSI-Parameters des Signals. Die Beacons wurden mit MAC-Adressen identifiziert und durch ein Präfix in der InstanceID der Eddystone-UID-Frame [60] dem System zugewiesen. Der Scanvorgang wird in der *onResume()* Funktion einer Activity gestartet und in *onPause()* gestoppt. Die Entfernungen werden jede Sekunde ermittelt und in einer FIFO-Schlange des Datentyps:

```
org.apache.commons.collections4.queue.CircularFifoQueue<Map<String, Double>>
```

temporär gespeichert²⁹. Die FIFO-Schlange wurde auf fünf Elemente von Entfernungsmessungen des Typs *Map<String, Double>* begrenzt. Beim Übertragen der Daten an die Berechnungsinstanz wird der Median von fünf Beacon-Entfernungen ermittelt. Dieses Verfahren verzögert zwar die Bereitstellung der Informationen, sorgt aber dafür, dass extreme RSSI-Messfehler ignoriert werden. Weitere Berechnungen erfolgen auf dem Webservice nach dem Prinzip der *Computation Offloading* [23].

Technologie	Sensoren	Ankerpunkte	Verfahren	Positionsformat
Zuordnung von QR-Codes	Kamera	QR Codes	Mustererkennung, Cell of Origin	ID der Bereichzelle
Near Field Communication	NFC	NFC Tags	Mustererkennung, Cell of Origin	ID der Bereichzelle
Bluetooth Low Energy Beacons	Bluetooth	BLE Beacons	2D-Trilateration	Koordinatenposition im 2D Raum

Tabelle 5.1. Zusammenfassung der Umsetzung

²⁸ Dokumentation: <https://altbeacon.github.io/android-beacon-library/javadoc/index.html>

²⁹ Dokumentation: <https://commons.apache.org/proper/commons-collections/apidocs/org/apache/commons/collections4/queue/CircularFifoQueue.html>

5.4. Berechnungsinstanz

Nachdem die ID des Ankerpunktes oder eine Liste der Entfernungen zwischen dem Arzt und den Beacons an die zentrale Berechnungsinstanz gesendet wurde, wird die Position anhand des Kartenmodells berechnet. Basierend auf dem Identifikator der Indoor Positioning Technologie, wird zunächst die Positionierungsmethode festgestellt. Im Fall der Cell Of Origin-Methode wird die ID des Ankerpunktes im Kartenmodell abgefragt und ein Point of Interest ermittelt.

Im Fall der Trilateration werden zunächst die drei nächstliegenden Beacons, deren Positionen und Entfernungen festgestellt. Danach wird anhand dieser Daten und mathematischer Funktionen mit Hilfe der Java-Bibliothek *com.lemmingapex.trilateration*³⁰ die geschätzte zweidimensionale Koordinatenposition des Nutzers berechnet. Werden weniger als drei Beacons von den Sensoren erkannt, wird die Position als unbekannt markiert. Ansonsten wird das nächstgelegene Bett, also der nächstgelegene Point of Interest, im Kartenmodell gesucht. Die Entfernung des Nutzers von den Betten wird nach dem Satz des Pythagoras berechnet. Wenn die berechnete Entfernung zum zweitnächsten Bett nicht mehr als 105% der Entfernung zum nächstgelegenen Bett beträgt, wird auf neue Eingabe von Sensordaten gewartet. Durch diese Toleranz sollen nur sichere Ermittlungen der Position wahrgenommen werden. Schließlich werden der Name, das Alter und die gesundheitlichen Informationen des Patienten, der am nächsten Bett liegt, festgestellt und zur Anzeige an die Smart Glasses übermittelt.

³⁰ Dokumentation:

<https://www.mvndoc.com/c/com.lemmingapex.trilateration/trilateration/com/lemmingapex/trilateration/TrilaterationFunction.html>

6. Evaluation

In diesem Kapitel werden die erhobenen Metriken des Prototyps gegenüber den Anforderungen (siehe Kapitel 4.2) dargestellt. Hierbei wurde für jede Funktionalität ein Test in der Simulationsumgebung entwickelt.

6.1. Simulationsumgebung

Die prototypische Simulationsumgebung wurde in einem Wohngebäude entworfen und besteht aus zwei unterschiedlichen Zimmern, die nebeneinander liegen und durch eine Wand getrennt sind. Das erste Zimmer ist größer und besteht aus vier Betten auf einer Fläche von etwa 60 Quadratmetern. Das zweite Zimmer besteht aus zwei nahe beieinander stehenden Betten auf einer Fläche von 20 Quadratmeter (siehe Abbildung 6.1). Die Installation der Positionierungsinfrastruktur in der Umgebung wird im Kapitel 6.2.1 erläutert.

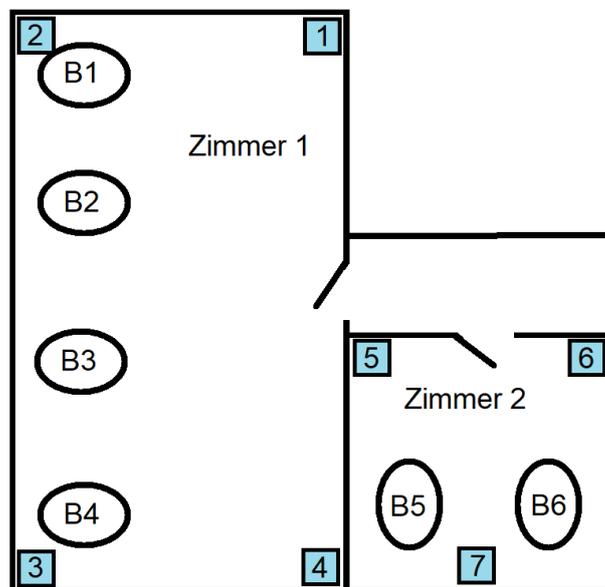


Abbildung 6.1. Entwurf der Simulationsumgebung. B1-B6 sind Betten, die blauen Rechtecke 1-7 sind Stellplätze für Beacons

6.2. Testszenarien

6.2.1. Installation

Sechs QR Codes wurden mithilfe eines online Generators erzeugt, ausgedruckt und sichtbar auf jedes Bett eingeklebt. Ihr Inhalt besteht aus den Texten *ipos_0001*, *ipos_0002*, *ipos_0003*, *ipos_0004*, *ipos_0005* und *ipos_0006*. In ähnlicher Weise wurden sechs NFC Tags, deren UIDs bekannt sind, an der Wand jedes Bettes in einer Höhe von einem Meter befestigt. Vier BLE Beacons im ersten Zimmer und drei Beacons im zweiten Zimmer wurden in den Ecken (siehe Abbildung 6.1) auf der Höhe von 1,5 Meter befestigt und mit vollen Batterien ausgestattet. Das InstanceID in dem Eddystone-UID-Frame

jedes Beacons wurde mit einer dedizierten Software um zwei Bytes *0x1705*³¹ im Präfix erweitert. Entsprechend zu den Ankerpunkten wurde ein Kartenmodell im XML-Format erstellt und in den Webservice hochgeladen. Der Nutzer wurde mit *tooz DevKit*-Smart Glasses und einem *Samsung Galaxy S8*- Smartphone ausgestattet. Die Smart Glasses wurden angezogen und das Smartphone wurde in eine Tasche der Arztkleidung des Nutzers gelegt.

6.2.2. Umschalten zwischen den Technologien

Der Wechsel einer Technologie erfolgt über eine geeignete Activity in der Smartphone-App. Beim Umschalten auf BLE Beacons Technologie muss im größeren Zimmer ca. 10-15 Sekunden und im kleineren Zimmer ca. 10-20 Sekunden abgewartet werden, bevor ein Point of Interest erkannt wird. Beim Umschalten auf NFC oder QR Codes Technologie wird die Position als unbekannt markiert, bis ein erster Scan erfolgt.

6.2.3. Bewegung und Scannen innerhalb der Umgebung

Innerhalb der Simulationsumgebung wurden mehrere Ortswechsel simuliert. Während der Nutzung von QR Codes oder NFC-basierter Indoor Positioning Technologie erfolgt keine Aktion, solange kein Ankerpunkt gescannt wird. Der optische Scanvorgang startet nach einem Klick auf die eingebaute Lautstärke des Smartphones und erfolgt durch Erfassen eines QR Codes mit der Kamera. Die Tätigkeit ist mit einer Hand durchführbar. Die Erkennung des QR Codes erfolgt schnell und aus beliebiger Entfernung. Der NFC-Scanvorgang findet durch Annäherung des Smartphones an den NFC Tag statt. Die Tätigkeit erfordert außer dem Halten des Smartphones an den NFC Tag keine zusätzlichen Aktionen. Bei beiden Technologien beträgt die Dauer vom Scannen bis zur Informationsdarstellung auf Smart Glasses 5-6 Sekunden. Jeder erfolgreiche Scan wird auf dem Smartphone mit einer Toast³²-Meldung bestätigt.

Auf der anderen Seite erfolgt die Verwendung der BLE Beacons Technologie völlig freihändig, da bei der Lokalisierung das Telefon nicht aus der Tasche genommen werden muss. Bei der Bewegung von einem Bett zum anderen Bett beträgt die Verzögerung bis zur Anzeige der adaptiven Informationen unter Berücksichtigung der Standardgeschwindigkeit 9-17 Sekunden. Die genaue Dauer ist abhängig von der Bettnummer bzw. den temporären Gegebenheiten. Fehlkennungen der nächstgelegenen Betten treten bei etwa 3% der Standortwechsel auf, werden aber in der Regel nach bis zu 7 Sekunden korrigiert. Line-of-Sights zwischen dem Nutzer und den Beacons waren immer präsent.

6.2.4. Umgestaltung von Ankerpunkten

Die Ankerpunkte der Positionierungsinfrastruktur (QR Codes, NFC Tags und BLE Beacons) wurden durch neue ersetzt. Da sich ihre IDs von den vorherigen unterscheiden, musste das Kartenmodell bearbeitet und erneut hochgeladen werden. Das gleiche Verfahren wird angewandt, wenn existierende Ankerpunkte auf neue Positionen verschoben werden. In einem Zustand in dem das Kartenmodell nicht mit der Anwendungsumgebung übereinstimmt, werden falsche Informationen bereitgestellt.

³¹ *1705* steht für das Akronym *IPOS*, also Indoor Positioning

³² Toast ist in Android einfaches Feedback in einem kleinen Pop-up-Fenster [61].

6.2.5. Umgestaltung von Betten

Die Umgestaltung von Krankenhausbetten erfordert eine Bearbeitung der Position des Point of Interest. Zusätzlich müssen die QR Codes und NFC Tags neugestaltet werden. Die Änderungen müssen im Kartenmodell wahrgenommen und in den Webservice hochgeladen werden.

6.2.6. Patientenmeldung

Die Anmeldung eines Patienten am Krankenbett erfordert eine Bearbeitung von Informationen zu Points of Interest und ein erneutes Hochladen des Kartenmodells.

6.2.7. Ausfall der Kommunikation

Eine Beschädigung von QR Codes oder NFC Tags bzw. des NFC-Sensors oder der Kamera des Smartphones wurde vom Nutzer durch kein Erscheinen der Toast-Meldung erkannt. Die Erkennung eines Funktionsausfalls von BLE Beacons, zum Beispiel bei einer Batterieentladung, muss durch regelmäßige Wartungen und Testen erfolgen. Im Fall einer Unterbrechung der Kommunikation zwischen den Komponenten Sensorik – Berechnungsinstanz – Kartenmodell – Empfangsstelle, wird die Position als unbekannt auf die Brille übermittelt.

6.2.8. Mehrere Nutzer gleichzeitig

Zwei Nutzer wurden gleichzeitig mit ähnlichen Smart Glasses und Smartphones ausgestattet und mit dem System verbunden. Alle Testszenarien wurden mit dem gleichen Ergebnis abgeschlossen wie bei der Überprüfung durch eine Person.

6.2.9. Zusammenfassung der Testszenarien

Im Analysekapitel wurden die allgemeinen funktionalen Anforderungen ermittelt. Tabelle 6.1 stellt die Ergebnisse der Testszenarien in Bezug auf die Anforderungen zusammen.

Funktionale Anforderung	Ergebnis der Evaluation	Beschreibung
Darstellung einer Position	erfüllt	Dem Endgerät wurde mittels drei Technologien der nächstgelegene Point of Interest in der Textform übermittelt
Umschaltung der Technologie	nur manuelle Umschaltung umgesetzt	Feste Frequenz der Datenübertragung zwischen Sensorik und Berechnungsinstanz; vom Nutzer einstellbare Auswahl der Indoor Positioning Technologie
Umgestaltung der Infrastruktur	erfüllt	Globale Aktualisierung von Kartenmodell durch Hochladen neuer XML-Datei auf die Webseite
Erweiterbarkeit des Systems	erfüllt	Möglichkeit der Anbindung neuer Technologien und Positionierungsmethoden durch abstrakte Software-Schnittstellen

Tabelle 6.1. Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen mit den Ergebnissen der Evaluation

7. Diskussion und Fazit

7.1. Diskussion der Resultate

Das Ziel war es, das Konzept zur Nutzung von Indoor Positioning Technologie in Systemen für adaptive, mobile Informationsbereitstellung basierend auf einer Fallstudie zu entwickeln. Der vorliegende Prototyp, welcher drei Technologien integriert, erfüllt sowohl die allgemeinen (siehe Kapitel 4.2.2) als auch die anwendungsspezifischen (Kapitel 4.3.3) Anforderungen in akzeptabler Weise. Dieser Prototyp ist eine Erweiterung eines auf Smart Glasses basierenden AMIP-Medizinsystems um Funktionen der Indoor Positioning. Realisierte Verfahren sind die optische Positionierung mittels Kamera und QR Codes, das Einscannen von Near Field Communication Tags und die Analyse des RSSI der Signale von Bluetooth Low Energy Beacons. Die technologisch unabhängige Anbindung wurde durch abstrakte Schnittstellen zwischen der Sensorik und der Berechnungsinstanz realisiert. Die Genauigkeiten, Erfassungsbereiche und Rate der Informationsausgabe in Form eines Point of Interests sind für die Patientenerkennung ausreichend. Die Anzahl der Nutzer ist softwareseitig unbegrenzt. Die genauen Kosten, der Datenschutz, die Benutzerfreundlichkeit und die Robustheit der Lösungen hängen von der jeweiligen Technologie ab. Jede der drei implementierten Indoor Positioning Technologien weisen unterschiedliche Schwachstellen auf (siehe Tabelle 7.1).

Technologie	Stärken	Schwächen
QR Codes	einfache Erstellung der Infrastruktur, hohes Verbesserungspotenzial	geringe Robustheit, Sicherheitsmängel, geringe Bequemlichkeit des Scannens
NFC Tags	geringe Kosten, unsichtbare Infrastruktur, wenig Wartung erforderlich	geringe Bequemlichkeit des Scannens
BLE Beacons	freihändige Nutzung, flexible Anpassung ans Kartenmodell, großes Erfassungsbereich, hohes Erweiterungspotenzial	begrenzte Genauigkeit, verzögerte Datenausgabe, Stromversorgung für Beacons erforderlich

Tabelle 7.1. Kurzfassung der Evaluation der eingesetzten Indoor Positioning Technologien

Die QR Codes können in beliebiger Weise gedruckt und im Anwendungsbereich installiert werden. Bei der Evaluation wurden zum Beispiel ein Blatt Papier und Klebeband verwendet, wodurch die Installations- und Investitionskosten sehr niedrig waren. Um die Ankerpunkte stets lesbar zu halten, müssen die Wartungskosten berücksichtigt werden. Wesentlich in Bezug auf die Akkulaufzeit des Smartphones sind die erhöhten Energiekosten durch den Einsatz der Kamera des Smartphones. Der Erhalt des Identifikators eines Ankerpunktes erfolgt ohne Authentifizierung. Die QR Codes können leicht von einer unbefugten Person geklont werden, um eine unwahre Benutzerposition zu simulieren. Dies weist auf eine Schwachstelle beim Schutz der Patientendaten hin. Die Anforderung an die Benutzerfreundlichkeit wurde nicht vollständig erfüllt, da der Scanvorgang durch manuelles Drücken

einer Taste gestartet werden muss. Eine Verbesserungsmöglichkeit ist eine automatische Auslösung des Scannens, wenn das Gyroskop eine Erschütterung erkennt. Die QR Codes benötigen keine Stromversorgung. Die Robustheit hängt jedoch vor allem von der Qualität der QR Codes und der Zuverlässigkeit der Kamera ab. Häufige Wartung ist notwendig, da die QR Codes nicht verschmutzt oder verzerrt sein dürfen.

Die Near Field Communication Technologie zeichnet sich durch niedrige Kosten, kleinräumige Infrastruktur und Möglichkeit der verschlüsselten Kommunikation aus. Die einfachsten ISO 14443-4 kompatiblen NFC Tags kosten weniger als 1 € pro Stück, die Installation ist unkompliziert und Instandhaltungskosten liegen nahe bei Null. Das Scannen erfolgt durch Annäherung des Smartphones an einen NFC Tag, was mit einer Hand machbar ist. Ein NFC Tag kann jeweils nur von einer Person gescannt werden. Ein Scan eines unbekanntes NFC Tags führt dazu, dass die Position als unbekannt dem Nutzer dargestellt wird. Da die NFC Tags passiv sind, benötigen sie keine Batterien oder Stromversorgung über die Infrastruktur. Für die Instandhaltung wird kein besonderes Verfahren benötigt, was die Robustheit auf einem hohen Niveau hält.

Die Bluetooth Low Energy Technologie nutzt die Messung des RSSI der Beacons-Signale, um Positionierung mittels Trilateration zu realisieren. Die Investitionskosten liegen bei mindestens drei Beacons pro Zimmer, wobei eine höhere Anzahl von Beacons die Zuverlässigkeit und die Genauigkeit des Systems erhöht. Die Installationskosten sind gering und Instandhaltungskosten beschränken sich auf den Austausch der Batterien und regelmäßige Tests. Eine Erhöhung der Anzahl der Points of Interest im Erfassungsbereich bewirkt keine Kostensteigerung. Die Patientendaten sind dank verschlüsselter Kommunikation geschützt. Vorteilhaft ist die Benutzerfreundlichkeit durch die automatische Positionierung mit freien Händen. Außerdem erfordert eine Umgestaltung der Positionen von Points of Interest nicht unbedingt eine Umgestaltung der Beacon-Infrastruktur. Nachteilig ist die Verzögerung von ca. 13 Sekunden nach Eintreffen am Patientenbett. Die Verzögerungszeit kann vom Arzt in der Praxis genutzt werden, um den Patienten zu begrüßen und ein kurzes Gespräch zu führen. Die Beacons müssen regelmäßig hinsichtlich des korrekten Betriebs und der Stromversorgung getestet werden. Die BLE-Technologie ermöglicht die Ermittlung der Position in Koordinatenform und eine Skalierbarkeit des Erfassungsbereiches mit unwesentlich höherer Anzahl von Beacons. Diese Eigenschaften favorisieren die Nutzung von BLE Beacons in großen Räumen.

Die gesamte Softwarearchitektur ist auf drei Arten von physischen Geräten verteilt: einen zentralen Rechner, den Smartphones und den Smart Glasses. Der stationäre zentrale Rechner verfügt über einen webbasierten Dienst mit den Berechnungsfunktionen gemäß dem Kartenmodell. Dort werden die Sensordaten als Eingabe genommen und das nächstgelegene Point of Interest wird als Ausgabe geliefert. Die Methoden zur Berechnung der Position weisen keine Fehlfunktionen oder merkliche Verzögerungen auf. Im Fall eines Ausfalls der Kommunikation mit der Sensorik wird die Position als unbekannt an die Smart Glasses weitergeleitet. Im Fall eines Kommunikationsausfalls zwischen dem stationären Rechner und der Smart Glasses werden dem Nutzer keine positionsadaptive Information dargestellt. Das Kartenmodell ist intuitiv und ohne Informatikkenntnisse erstellbar. Die Parameter des Modells sind in Form einer XML-Datei mit einfachen Begriffen in englischer Sprache zu spezifizieren. Das Hochladen

erfolgt über eine prototypische Webseite. Jedes Hochladen einer neuen Version des Kartenmodells erfordert eine Unterbrechung und einen Neustart des Rechenbetriebs.

Von jedem Nutzer von Smart Glasses muss ein Smartphone getragen werden, um die Informationen über seine Umgebung zu erfassen. Diese Sensorgeräte lassen sich bequem in der Tasche eines Ärztemantels tragen. Die Interaktion mit dem Smartphone während des Einsatzes beschränkt sich auf das manuelle Umschalten der aktiven Indoor Positioning Technologie, das Scannen von NFC Tags oder das Scannen von QR Codes. Die Ausgabe der Sensordaten an den stationären Rechner erfolgt mit einer festen Frequenz von 1/3 Hz und weist keine Fehlfunktionen auf. Somit wird verhindert, dass die auf der Smart Glasses angezeigten Informationen schnell umspringen. Gleichzeitig kann nur eine Indoor Positioning Technologie aktiv werden und die Ausgabe von Sensordaten betrifft ausschließlich die Information der aktiven Technologie. Eine positionsadaptive Funktionsweise des Smartphones ist nicht möglich. Die Funktionen der Sensoren sind auf einer abstrakten Struktur erbaut, wodurch eine leichte und effiziente Erweiterung mit neuen Technologien möglich ist. Sowohl die Kommunikation zwischen dem Smartphone und dem stationären Rechner über WebSocket als auch zwischen dem stationären Rechner und den Smart Glasses über Bluetooth weist keine spürbare Verzögerungen oder Fehlfunktionen auf.

7.2. Übertragung auf andere mögliche Anwendungsfälle

Der vorliegende Software-Prototyp wurde im Rahmen der Fallstudie zur medizinischen Anwendung für die Nutzung in den Krankenhäusern vorbereitet. Allerdings sind Anwendungen von Indoor Positioning Technologien in Systemen für die adaptive, mobile Informationsbereitstellung auch in der Logistik, im Personenverkehr, in der Unterhaltung, in der Bildung, in der Wohnung und anderen Sektoren von Dienstleistungen und Industrie denkbar. Die Systemkomponenten, Schnittstellen der Software, Funktionen und Anforderungen an die Software wurden bereits im Kapitel 4 auf einer abstrakten Ebene definiert. Im Folgenden sind zwei ausgewählte Anwendungsfälle für den Einsatz von Indoor Positioning in AMIP-Systemen anhand einer Einbindung zu den Schnittstellen des Konzepts untersucht worden.

7.2.1. Mobile, adaptive Überwachung einer Produktion

Die Nutzung von Smart Glasses im Krankenhaus hat viele Gemeinsamkeiten mit Anwendungen in anderen Gebieten. In einer Produktion kann der Betrieb von Maschinen leichter überwacht werden, indem Maschinendaten auf Smart Glasses angezeigt werden. Der Nutzer, ausgestattet mit Smart Glasses und einem Smartphone, soll Informationen über dem Zustand der nächstgelegenen Maschine einsehen können. Zu den Besonderheiten des Anwendungsfalls gehört, dass die Maschinendaten unabhängig von der Indoor Positioning durch separate Sensorik erfasst werden und dass sich die Maschinen oft permanent an einer festen Position befinden. Dabei ist die Verzögerung bei der Bereitstellung von Informationen nachteiliger und eine positionsadaptive Interaktion des Nutzers mit dem Smartphone vorteilhafter als der Einsatz im Krankenhaus. Aus dem letztgenannten Grund ist eine Speicherung des Kartenmodells bei der Sensorik vorstellbar (siehe Tabelle 4.1). In dem Fall kann die Position des Nutzers lokal auf dem Smartphone berechnet werden. Sonstige Designentscheidungen können nach dem gleichen Konzept wie in der medizinischen Fallstudie entworfen werden. Wegen der Latenzzeiten

können die Bluetooth Low Energy Beacons in einigen Einsatzszenarien nicht akzeptabel werden. Die Positionierung mit QR Codes sind an staubigen Arbeitsplätzen, an denen ein hohes Risiko der Unlesbarkeit besteht, nicht anwendbar.

7.2.2. Intelligentes Parksystem

In den letzten Jahren ist das intelligente Parken in den Fokus gerückt. Zwei Hauptaufgaben der Systeme in Parkhäusern sind die Erkennung der Belegung von Parkplätzen und die Navigation. Eine Straßenführung von Fahrzeugen kann mit Kameras ohne zusätzliche Sensorik des Fahrzeugs realisiert werden. Die Kameras können als Sensoren ein Auto anhand seiner Kennzeichen erkennen und lokalisieren. Die adaptive Information über den nächstgelegenen freien Parkplatz kann dem Autofahrer auf einem Bildschirm außerhalb des Fahrzeugs oder auf seinem mobilen Gerät bereitgestellt werden. Zu den Komponenten des AMIP gehören Kameras (Sensorik), ein Rechner (Berechnungsinstanz), das Parkplatzmodell (Kartenmodell) und ein Endgerät (Empfangsstelle). Die Kamerapositionen sind in diesem Modell Ankerpunkte. Parkplätze gehören zu den Points of Interest und sind durch ihre Position und aktuelle Belegung definierbar. Zusätzlich sind die Straßen für die Navigation zu verwalten. Anwendungsspezifische Anforderungen sind die Aktualisierung des Kartenmodells in der Echtzeit ohne Funktionsausfall und eine Rate der Informationsbereitstellung von mindestens 1 Hz. Wegen der häufigen Aktualisierung des Kartenmodells und der Vielzahl der Nutzer sollte das Kartenmodell global gespeichert werden. Die Schnittstellen der Systemkomponenten aus Kapitel 4.3.2 müssten um Navigationsfunktionalitäten erweitert werden. Das Kartenmodell müsste zusätzlich um die Funktionen der Bearbeitbarkeit von Point of Interest-Informationen in der Laufzeit, basierend auf den Sensordaten, erweitert werden.

7.3. Fazit

Die Arbeit zeigte, dass die Nutzung von Indoor Positioning Technologien für mehrere Anwendungsfälle praktisch und konzeptionell realisierbar ist. Um die Abstraktion von Technologien und Sensordaten zu gewährleisten, basiert die vorgeschlagene Software auf dem *Template Method*-Entwurfsmuster. Aufgrund der Komplexität von Merkmalen der Technologien und der Besonderheiten der jeweiligen Anwendungsfälle ist die allgemeingültige Bestimmung der optimalen Technologie nicht möglich. Die im Rahmen dieser Arbeit realisierte Software ermöglicht die Nutzung von QR Codes, NFC Tags und BLE Beacons Technologien. Es wurde entschieden, die positionierungsbezogenen Datenbanken zentral auf einem stationären Rechner zu speichern. Die Implementierung der drei Technologien in einem System für adaptive mobile Informationsbereitstellung und Nutzung in einer medizinischen Simulationsumgebung hat unterschiedliche technologische Stärken und Schwächen. Eine Gemeinsamkeit der drei Techniken sind die geringen Investitions- und Installationskosten. Die Bluetooth Low Energy Beacons Technologie ist dabei die attraktivste Lösung, weil sie die Bestimmung einer Koordinatenposition mittels 2D-Lateration ohne redundante Interaktion des Nutzers ermöglicht. Andererseits erfordern die BLE Beacons höhere Wartungskosten und weisen eine Ungenauigkeit auf, die eine Mehrfachmessung erfordert und zu Verzögerungen bei der Positionsbestimmung von mehreren Sekunden führt. Für die Anzeige von Patientendaten auf der Smart Glasses ist die Leistung jedoch

ausreichend. Die Eignung bestimmter Indoor Positioning Technologien ist stark mit dem jeweiligen Anwendungsfall verknüpft.

Indoor Positioning Technologien basieren im ersten Schritt auf einer geeigneten Sensorik, welche die Signale über die Umgebung wahrnimmt. Der entwickelte Software-Prototyp nutzt die eingebauten Sensoren eines Smartphones mit Android-Betriebssystem, die mittels einer App abgefragt werden. Die Phase der Positionsberechnung erfolgt auf einer stationären Berechnungsinstanz, die Zugriff auf das globale Kartenmodell des Anwendungsbereichs besitzt. Basierend auf den Sensordaten und dem Kartenmodell ist die Nutzerposition an der Berechnungsinstanz mathematisch lösbar. Gängige Methoden, wie die Lateration oder das Cell of Origin-Prinzip, wurden im Rahmen der Fallstudie eingesetzt und positiv anhand der Evaluation in der medizinischen Simulationsumgebung bewertet. Schließlich wird die Position auf der Smart Glasses angezeigt. Die Kommunikation zwischen den Systemkomponenten erfolgt über Bluetooth und WebSocket. In Analogie zu den in dieser Arbeit erwähnten Anwendungen ist das Konzept an unterschiedliche Systeme für adaptive, mobile Informationsbereitstellung ableitbar. Zu den Erweiterungspotenzialen des Konzepts gehören: Sprachinteraktion, gyroskopbezogene Funktionsweise des Smartphones, Befestigung des Smartphones an die Kleidung des Trägers, Anzeige für schwache Batterie, Einbindung kleinerer Sensoren, Einbindung anderer Technologien, Ortungsmethoden und Endgeräten.

Literaturverzeichnis

- [1] S. Mitrasinovic u. a., „Clinical and surgical applications of smart glasses“, *Technol. Health Care*, Bd. 23, Nr. 4, S. 381–401, 2015.
- [2] A. Ometov u. a., „An Overview on Blockchain for Smartphones: State-of-the-Art, Consensus, Implementation, Challenges and Future Trends“, *IEEE Access*, Bd. 8, S. 103994–104015, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2998951.
- [3] „Cisco Annual Internet Report - Cisco Annual Internet Report (2018–2023) White Paper“, *Cisco*. <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/executive-perspectives/annual-internet-report/white-paper-c11-741490.html> (zugegriffen Sep. 04, 2021).
- [4] „Number of smartphone users in Germany 2009-2020“, *Statista*. <https://www.statista.com/statistics/461801/number-of-smartphone-users-in-germany/> (zugegriffen Aug. 31, 2021).
- [5] IQUII, „From Augmented Reality to Mobile Reality: it’s the smartphone that drives augmented reality“, *IQUII*, Jan. 04, 2018. <https://medium.com/iquii/from-augmented-reality-to-mobile-reality-its-the-smartphone-that-drives-augmented-reality-31ae65b44958> (zugegriffen Sep. 03, 2021).
- [6] L.-H. Lee und P. Hui, „Interaction Methods for Smart Glasses: A Survey“, *IEEE Access*, Bd. 6, S. 28712–28732, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2831081.
- [7] „tooz DevKit — Smart Glasses for Developers“, *tooz.com*. <https://tooz.com/product/tooz-devkit/> (zugegriffen Okt. 03, 2021).
- [8] A. Noertjahyana, I. A. Wijayanto, und J. Andjarwirawan, „Development of Mobile Indoor Positioning System Application Using Android and Bluetooth Low Energy with Trilateration Method“, in *2017 International Conference on Soft Computing, Intelligent System and Information Technology (ICSIT)*, Sep. 2017, S. 185–189. doi: 10.1109/ICSIT.2017.64.
- [9] R. Dasgupta, „Real-Time Locating System: A Measurement Study of BLE Beacon and Geometric Adjustment Scheme Based on Bluetooth Low Energy Beacon Network“, Juli 2019.
- [10] T. Dryjański, „Embedded device for indoor positioning of mobile terminals in ISM 2.4 GHz frequency band integrated with ESPAR antenna“, *MOST Wiedzy - portal z wiedzą dla Ciebie*, 2018. <https://mostwiedzy.pl/pl/publication/embedded-device-for-indoor-positioning-of-mobile-terminals-in-ism-2-4-ghz-frequency-band-integrated-,202007171443289966851-0> (zugegriffen Aug. 30, 2021).
- [11] F. Potorti u. a., „Comparing the performance of indoor localization systems through the EvAAL framework“, *Sensors*, Bd. 17, Nr. 10, S. 2327, 2017.

- [12] R. F. Brena, J. P. García-Vázquez, C. E. Galván-Tejada, D. Muñoz-Rodríguez, C. Vargas-Rosales, und J. Fangmeyer, „Evolution of indoor positioning technologies: A survey“, *J. Sens.*, Bd. 2017, 2017.
- [13] W. Song, H. Lee, S.-H. Lee, M.-H. Choi, und M. Hong, „Implementation of Android Application for Indoor Positioning System with Estimote BLE Beacons“, *J. Internet Technol.*, Bd. 19, Nr. 3, Art. Nr. 3, Mai 2018.
- [14] R. I. L. Restrepo, „A Location-based Mobile Application for the Police on the Beat“, S. 43.
- [15] A. Krüger, J. Baus, D. Heckmann, M. Kruppa, und R. Wasinger, „Adaptive Mobile Guides“, in *The Adaptive Web: Methods and Strategies of Web Personalization*, P. Brusilovsky, A. Kobsa, und W. Nejdl, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer, 2007, S. 521–549. doi: 10.1007/978-3-540-72079-9_17.
- [16] R. Mautz, „Indoor positioning technologies“, 2012.
- [17] I. M. A. Setiawan *u. a.*, „An adaptive mobile health system to support self-management for persons with chronic conditions and disabilities: usability and feasibility studies“, *JMIR Form. Res.*, Bd. 3, Nr. 2, S. e12982, 2019.
- [18] „The Three Pillars of Empiricism (Scrum)“, *Scrum.org*. <https://www.scrum.org/resources/blog/three-pillars-empiricism-scrum> (zugegriffen Aug. 31, 2021).
- [19] K. S. Narendra und A. M. Annaswamy, *Stable Adaptive Systems*. Courier Corporation, 2012.
- [20] O. Fouial, A. Katia, I. Fadel, und I. Demeure, „Adaptive service provision in mobile computing environments“, Jan. 2002.
- [21] „DLP Technology for Near Eye Display“, *TechOnline*. <https://www.techonline.com/tech-papers/dlp-technology-for-near-eye-display/> (zugegriffen Aug. 31, 2021).
- [22] „Quantigraphic camera promises HDR eyesight from Father of AR“, *SlashGear*, Sep. 12, 2012. <https://www.slashgear.com/quantigraphic-camera-promises-hdr-eyesight-from-father-of-ar-12246941/> (zugegriffen Aug. 31, 2021).
- [23] K. Kumar, J. Liu, Y.-H. Lu, und B. Bhargava, „A Survey of Computation Offloading for Mobile Systems“, *Mob. Netw. Appl.*, Bd. 18, Nr. 1, S. 129–140, Feb. 2013, doi: 10.1007/s11036-012-0368-0.
- [24] „IDC - Smartphone Market Share - Market Share“, *IDC: The premier global market intelligence company*. <https://www.idc.com/promo/smartphone-market-share> (zugegriffen Sep. 04, 2021).
- [25] „Global Smartphone Market Share: By Quarter“, *Counterpoint Research*, Aug. 05, 2021. <https://www.counterpointresearch.com/global-smartphone-share/> (zugegriffen Sep. 04, 2021).

- [26] „Apple Takes 6 Spots in Top 10 Best-selling Models’ List for Jan“, *Counterpoint Research*, Apr. 09, 2021. <https://www.counterpointresearch.com/top-10-best-selling-smartphone-models-jan/> (zugegriffen Sep. 04, 2021).
- [27] „Android Developers“, *Android Developers*. <https://developer.android.com/> (zugegriffen Sep. 04, 2021).
- [28] M. Taleby Ahvanooy, Q. Li, M. Rabbani, und A. Rajput, „A Survey on Smartphones Security: Software Vulnerabilities, Malware, and Attacks“, *Int. J. Adv. Comput. Sci. Appl.*, Bd. 8, S. 30, Okt. 2017, doi: 10.14569/IJACSA.2017.081005.
- [29] „Nintendo teams with Pokémon Go studio Niantic on AR apps“, *The Straits Times*, Singapore, März 23, 2021. Zugegriffen: Sep. 26, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.straitstimes.com/business/companies-markets/nintendo-teams-with-pokemon-go-studio-niantic-on-ar-apps>
- [30] B. Due, *The future of smart glasses: an essay about challenges and possibilities with smart glasses*. 2015.
- [31] K. Klinker u. a., „Structure for innovations: A use case taxonomy for smart glasses in service processes“, S. 12.
- [32] „Provisioning and configuration | Glass Enterprise Edition 2“, *Google Developers*. <https://developers.google.com/glass-enterprise/guides/provisioning-and-configuration> (zugegriffen Sep. 02, 2021).
- [33] „Tech Specs“, *Glass*. <https://www.google.com/glass/tech-specs/> (zugegriffen Sep. 02, 2021).
- [34] - MovGP0, *Deutsch: schematische Darstellung von Google Glass*. 2013. Zugegriffen: Aug. 31, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Google_Glass.svg
- [35] „Worldwide Tablet Shipments Return to Growth in 2020, Fueled by Unprecedented Demand, According to IDC“, *IDC: The premier global market intelligence company*. <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=prUS47423721> (zugegriffen Sep. 04, 2021).
- [36] S. Gunkel, H. Stokking, M. Prins, O. Niamut, E. Siahaan, und P. Cesar, „Experiencing Virtual Reality Together: Social VR Use Case Study“, in *Proceedings of the 2018 ACM International Conference on Interactive Experiences for TV and Online Video*, New York, NY, USA, Juni 2018, S. 233–238. doi: 10.1145/3210825.3213566.
- [37] P. D. O. Bendel, „Definition: Smartwatch“, <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/smartwatch-54075>. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/smartwatch-54075> (zugegriffen Sep. 05, 2021).
- [38] A. Lymberis und R. Paradiso, „Smart Fabrics and Interactive Textile Enabling Wearable Personal Applications: R&D State of the Art and Future Challenges“, *Conf. Proc. Annu. Int. Conf.*

IEEE Eng. Med. Biol. Soc. IEEE Eng. Med. Biol. Soc. Conf., Bd. 2008, S. 5270–3, Aug. 2008, doi: 10.1109/IEMBS.2008.4650403.

[39] H. Probst, F. Lohse, J. Mersch, R. Hickmann, A. Nocke, und C. Cherif, „P013_0486_ Interactive fiberbased material approaches for smart textile structures“, in *Proceedings of the 19th World Textile Conference-Autex 2019*, 2019, S. 3–3.

[40] Intel in Deutschland, *Latitude 10 Tablet*. 2012. Zugegriffen: Sep. 26, 2021. [Online]. Verfügbar unter: https://www.flickr.com/photos/intel_de/8121770037/

[41] „Creative Commons — Attribution-NoDerivs 2.0 Generic — CC BY-ND 2.0“. <https://creativecommons.org/licenses/by-nd/2.0/> (zugegriffen Sep. 26, 2021).

[42] N. Palmero, *Woman Using a Samsung VR Headset at SXSW*. 2015. Zugegriffen: Sep. 26, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.flickr.com/photos/nanpalmero/16237219524/>

[43] K. Dambräns, *Samsung Galaxy Gear smartwatch*. 2013. Zugegriffen: Sep. 26, 2021. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.flickr.com/photos/janitors/10289750076/>

[44] „Creative Commons — Attribution 2.0 Generic — CC BY 2.0“. <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/> (zugegriffen Sep. 26, 2021).

[45] „GPS Fully Operational Statement of 1995“. <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=global> (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[46] M. Sauter, *From GSM to LTE: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. John Wiley & Sons, 2010.

[47] „Datei:Trilateration.png – Wikipedia“. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Trilateration.png> (zugegriffen Sep. 07, 2021).

[48] N. Samama, *Indoor Positioning: Technologies and Performance*. John Wiley & Sons, 2019.

[49] „Bluetooth Technology Overview“, *Bluetooth® Technology Website*. <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/> (zugegriffen Sep. 08, 2021).

[50] E. Haselsteiner und K. Breitfuß, „Security in Near Field Communication (NFC)“, S. 12.

[51] „ISO 25010“. <https://iso25000.com/index.php/en/iso-25000-standards/iso-25010> (zugegriffen Sep. 09, 2021).

[52] E. Gamma, R. Helm, R. Johnson, J. Vlissides, und D. Patterns, *Elements of reusable object-oriented software*, Bd. 99. Addison-Wesley Reading, Massachusetts, 1995.

[53] D. R. Bartmann und J. A. Pope, „Ein Scoring-Modell bei mehrfacher Zielsetzung mit unsicheren oder fehlenden Daten und abhängigen Zielen“, *Z. Für Oper. Res.*, Bd. 24, Nr. 2, S. B29–B45, März 1980, doi: 10.1007/BF01922043.

[54] „XStream - About XStream“. <https://x-stream.github.io/> (zugegriffen Sep. 18, 2021).

- [55] „Introduction to Activities“, *Android Developers*.
<https://developer.android.com/guide/components/activities/intro-activities> (zugegriffen Okt. 03, 2021).
- [56] „Barcode Scanner - Apps on Google Play“.
https://play.google.com/store/apps/details?id=com.google.zxing.client.android&hl=en_US&gl=US
(zugegriffen Okt. 03, 2021).
- [57] D. Sethia, D. Gupta, T. Mittal, U. Arora, und H. Saran, „NFC based secure mobile healthcare system“, in *2014 Sixth International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, Jan. 2014, S. 1–6. doi: 10.1109/COMSNETS.2014.6734919.
- [58] Z. Chen, *Java Card Technology for Smart Cards: Architecture and Programmer's Guide*. Addison-Wesley Professional, 2000.
- [59] „Secure Channel Protocol ,03‘ - Amendment D v1.2 | GPC_SPE_014“, *GlobalPlatform*.
<https://globalplatform.wpengine.com/specs-library/secure-channel-protocol-03-amendment-d-v1-2/>
(zugegriffen Sep. 22, 2021).
- [60] *Eddystone*. Google, 2021. Zugegriffen: Okt. 05, 2021. [Online]. Verfügbar unter:
<https://github.com/google/edystone/blob/bb8738d7ddac0ddd3dfa70e594d011a0475e763d/protocol-specification.md>
- [61] „Toasts overview“, *Android Developers*.
<https://developer.android.com/guide/topics/ui/notifiers/toasts> (zugegriffen Sep. 20, 2021).

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1. Adaptive mobile Informationsbereitstellung auf dem Smartphone am Beispiel des Spiels <i>Pokémon Go</i>	7
Abbildung 2.2. Schematische Darstellung der Hauptkomponenten von Google Glass.....	8
Abbildung 2.3. Beispielsmodelle der kontextsensitiven Plattformen. Von links: ein Tablet, ein VR-Headset und eine Smartwatch	9
Abbildung 3.1. Bestimmung von vier Cell of Origin-Zellen auf einer Ebene in Bezug auf die Ankerpunkte A, B, C und D.....	12
Abbildung 3.2. Trilateration auf einer Ebene.....	13
Abbildung 3.3. Lateration im 3D-Raum, Ermittlung der Menge $\{A, B\}$ anhand der bekannten Entfernung zu den Beacons $P1, P2, P3$	14
Abbildung 3.4. Drei Beispiele für Indoor Positioning Marker	16
Abbildung 4.1. Erfassung der Benutzeranforderungen.....	18
Abbildung 4.2. Komponentendiagramm eines AMIP-Systems.....	20
Abbildung 4.3. Komponentendiagramm des Indoor Positioning Systems mit Schnittstellendefinition	22
Abbildung 4.4. Datenübertragung im Rahmen eines Indoor Positioning Prozesses.....	23
Abbildung 5.1. Verteilungsdiagramm realisierten Umsetzung.....	26
Abbildung 5.2. Klassendiagramm der Android-App zur Realisierung der Sensorik.....	28
Abbildung 5.3. QR Code-Ankerpunkt mit dem Text <i>ipos_0001</i>	30
Abbildung 6.1. Entwurf der Simulationsumgebung	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1. Ausgewählte Indoor Positioning Technologien und ihre typischen Parameterwerte.....	15
Tabelle 4.1. Erfassung der Vor- und Nachteile der zwei Speicherorten des Kartenmodells	21
Tabelle 5.1. Zusammenfassung der Umsetzung	31
Tabelle 6.1. Zusammenstellung der funktionalen Anforderungen mit den Ergebnissen der Evaluation	35

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Tomasz Ludyga, die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als der von mir angegebenen Quellen angefertigt zu haben. Alle aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche gekennzeichnet.

Die Arbeit wurde noch keiner Prüfungsbehörde in gleicher oder ähnlicher Form vorgelegt.

Dresden, 18.10.2021

.....

Tomasz Ludyga