

Praxistaugliche Indoor-Navigation für Smartphones auf Grundlage einer messtechnischen Untersuchung

Practical Indoor Navigation for Smartphones Based on a Metrological Investigation

Cedric Roussel¹, Svenja Ruthmann¹, Thomas Klauer¹, Renate Czommer¹

¹3mainz – Hochschule Mainz · cedric.roussel@hs-mainz.de

Zusammenfassung: Indoor-Positionierung und Navigation für bestimmte Gebäude, z. B. im öffentlichen Bereich, ist eine aktuelle Anforderung an viele Gebäudebetreiber. Da satellitenbasierte Technologie, die unter freiem Himmel langjährig erforscht, erprobt und praktisch eingesetzt ist, im Gebäudeinneren praktisch nicht zu Verfügung steht, werden schon seit einigen Jahren andere technologische Herangehensweisen analysiert und prototypisch eingesetzt. Der am häufigsten verwendete Ansatz ist der Einsatz von Bluetooth Beacons. Dieser Beitrag zeigt auf Basis einer messtechnischen Untersuchung Schwächen dieser Methodik und schlägt einen alternativen Ansatz mithilfe des Pedestrian Dead Reckoning, unterstützt durch Bluetooth Beacons und das verwendete Navigationsmodell vor. Die Ergebnisse werden in einem prototypischen Indoor-Navigationssystem gezeigt. Ferner wird ein Ausblick gegeben, wie Methode und Technologie weiter verbessert werden können.

Schlüsselwörter: Indoor-Navigation, Positionsbestimmung, Mobile Applikation, Bluetooth, Genauigkeitsanalyse, Pedestrian Dead Reckoning, Navigationsmodell, Sensor Fusion

Abstract: *Indoor positioning and navigation for specific buildings, e. g. in the public sector, is a current requirement for many building operators. Since satellite-based technology, which has been researched, tested and used practically outdoors for many years, is not available inside buildings, other technological approaches have been analyzed and prototyped for several years. The most widely used approach is the use of Bluetooth beacons. This paper shows weaknesses of this methodology based on a metrological investigation and proposes an alternative approach using Pedestrian Dead Reckoning, supported by Bluetooth Beacons and the navigation model used. The results are shown in a prototypical indoor navigation system. Furthermore, an outlook is given on how method and technology can be further improved.*

Keywords: *Indoor navigation, bluetooth, mobile app, measurement analysis, pedestrian dead reckoning, navigation model, sensor fusion*

1 Motivation und Stand der Technik

Die Indoor-Positionierung und Navigation (IPIN – Indoor Positioning and Indoor Navigation) ist ein seit einigen Jahren existierender und stetig anwachsender Bedarf seitens Gebäudebetreiber und -nutzer. Analysten und Marktforscher sehen in der IPIN einen Multi-Milliardenmarkt (z. B. AlliedMarketResearch, 2018; IndustryARC, 2019; Bluetooth SIG, 2020) mit Anwendern aus u. a. der Gesundheitsbranche, Handel, Produktion, Reisebranche und Logistik in Büro- und in öffentlichen Gebäuden.

Wie in dem mit IPIN abgekürzten, verwendeten Begriff bereits zu entnehmen ist, ist methodisch und technologisch zwischen zwei Aspekten zu trennen: Die reine Positionsbestimmung und die Navigation bzw. Wegführung auf einem definierten Graphen. Die Navigation sorgt

für die Steuerung zum gewünschten Zielpunkt, die Wegführung wird hierbei durch den gangbaren Weg zwischen Start und Ziel definiert. Während die Wegführung mit zahlreichen Methoden und Technologien sowohl drinnen als auch draußen gut funktioniert und auch die Positionsbestimmung unter freiem Himmel seit mehreren Jahrzehnten auf Basis der Satellitentechnologie weltweit eingesetzt wird, gibt es bei der Positionsbestimmung im Gebäude Herausforderungen, die aktuell noch Gegenstand der Forschung sind.

Hier ist die Satellitentechnologie nicht bzw. sehr eingeschränkt nutzbar, sodass seit einigen Jahren nach Alternativen gesucht wird. Folgende haben sich – teilweise auch in Kombination in Form einer „Sensor Fusion“ hierbei als vielversprechend erwiesen (vgl. auch Zafari et al., 2019 oder Ehrlich, 2018):

- Funktechnologien
 - WIFI
 - Bluetooth (Low Energy)
 - Ultra Wide Band (UWB)
 - Andere (z. B. Zigbee, Radio Frequency Identification Device (RFID))
- Optische Technologien
 - Computer Vision (CV)/Augmented Reality (AR)
 - Barcode-/QR-Code-Erkennung
 - Visible Light Communication (VLC) (z. B. Nakajima et al., 2013)
- Akustische Technologien (z. B. Wendeborg et al., 2013)
- (Smartphone-)Sensorik (Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer)

Das hier vorgestellte Vorhaben hat die Aufgabe, in einem Praxistest eine geeignete Indoor-Navigation in einem öffentlichen Gebäude zu konzipieren, hierfür geeignete Technologien und Methoden zu evaluieren und prototypisch zu implementieren. Es wurde eine einfache Verwendung in Form einer Smartphone-App hinsichtlich sowohl der Gebäudebetreiber als auch der Nutzer als grundlegendes Ziel definiert und daraus folgende Anforderungen an ein praxistaugliches Indoor-Navigationssystem abgeleitet:

- Optimale Nutzung vorhandener Infrastruktur bzw. geringstmögliche Infrastruktur-Anpassungen, wie z. B. die Montage von Hardware-Elementen;
- Gebrauchstauglichkeit für Gebäudebetreiber und beliebige Nutzer;
- Positionsgenauigkeit auf „Raumniveau“, d. h. von ca. zwei Metern;
- Positionsbestimmung in Echtzeit bzw. nahe Echtzeit;
- Kostenoptimierte Installation, Konfiguration und insbesondere Wartung.

Zur Erfüllung dieser Anforderungen wurden die verfügbaren Technologien reduziert auf solche, die auf Standard-Smartphones nutzbar sind, da diese als „Personal Device“ nahezu immer mitgeführt werden. Um den ebenfalls genannten Infrastruktur-Aspekt und der Gebrauchstauglichkeit Rechnung zu tragen, wurden die auswählbaren Technologien bzw. Verfahren vorab weiter konsolidiert, bis schließlich WIFI, Bluetooth, Smartphone-Sensorik und CV/AR als gut geeignet erachtet wurden. Bei WIFI und Bluetooth sind auch infrastrukturelle Maßnahmen (Router, Beacons etc.) erforderlich, jedoch in vertretbarem Umfang. Bei Computer Vision für die AR-Navigation ist ggf. noch die Implementierung von Künstlicher Intelligenz (KI) -Verfahren erforderlich, um die Erkennung der Position aus Bild-Trainingsdaten und mit geeignetem Verfahren zu ermitteln.

In diesem Beitrag wird zuerst die Bluetooth-Technologie näher untersucht, da diese bei der Durchführung des Vorhabens im geschilderten, konkreten Anwendungsfall – Navigation im

Gebäude unserer Institution – zunächst die naheliegende Wahl darstellte: Die vorhandenen WIFI-Router waren nicht für die Positionsbestimmung ausgerüstet, sodass diese hier nicht infrage kamen. Die Variante der Bilderkennung mit anschließender AR-Navigation ist aktuell noch Gegenstand der Forschung, erste Scans des hier betrachteten Gebäudes wurden bereits durchgeführt. Zur Nutzung der Bluetooth-Variante wurden kostengünstige Beacons exemplarisch in Teilbereichen des Gebäudes montiert. Aufgrund der Corona-Pandemie war in Teilen dieses 6-monatigen Vorhabens leider nur ein begrenzter Zugang zum Gebäude möglich, sodass Tests nicht im erforderlichen und gewünschten Umfang möglich waren – dennoch zeigen sich klare Tendenzen, die hier vorgestellt werden.

Wie sich im weiteren Verlauf herausstellen wird, hat die Bluetooth-Technologie einige Nachteile bzw. Schwächen hinsichtlich der gestellten Anforderungen. Daher wurde als alternativer Ansatz die Smartphone-Sensorik mit der Methode Pedestrian Dead Reckoning (PDR) implementiert und einem Praxistest unterzogen. Die Bluetooth Technologie diente dabei – nur noch – zur Unterstützung bzw. Verbesserung bei der Positionsbestimmung, genauso wie geometrische Gegebenheiten, die auf dem Navigationsmodell beruhen. Optional können zusätzlich an Räumen angebrachte QR-Codes zu Hilfe genommen werden.

2 Methodik

2.1 Gebäudeplan und Navigationsmodell

Als Kartengrundlage zur IPIN wurde zunächst ein 2D-Modell des betrachteten, öffentlich zugänglichen Gebäudes in einem GI-System modelliert. Es wurde von vorhandenen digitalen 2D-CAD-Plänen des Test-Gebäudes für jedes Stockwerk abgeleitet und hat eine für die Navigation taugliche Genauigkeit.

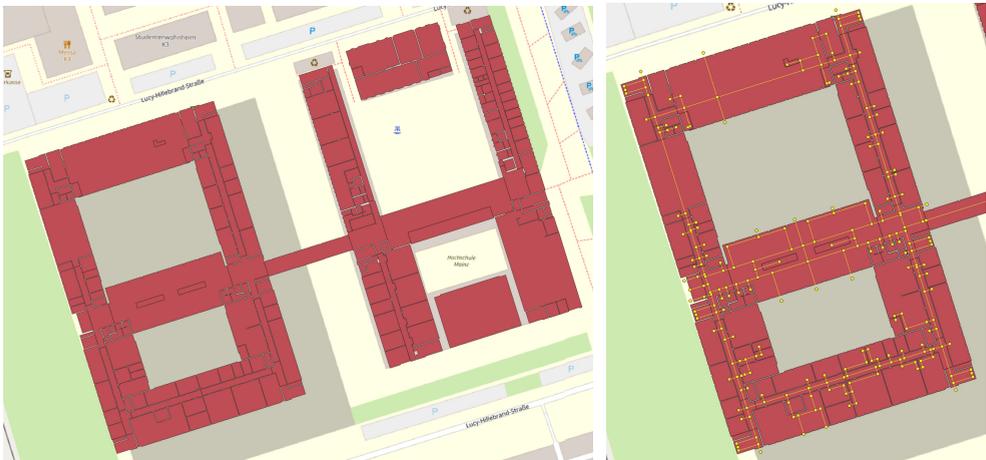


Abb. 1: Grundrisse des Erdgeschosses. Rechts mit Kanten und Knoten

Es existieren bereits Ansätze, ein 3D-BIM-Modell als Grundlage zu nutzen (z. B. Rüppel et al., 2015), dies wurde hier jedoch aus Gründen der Einfachheit – es lag kein BIM-Modell vor

und die Erstellung hätte ein schlechtes Aufwand-/Nutzen-Verhältnis – nicht weiterverfolgt. Das Modell ist Raum-basiert, d. h. Informationen zu den Räumen des Gebäudes, wie z. B. die Raumnummer oder die Funktion liegen vor (und sind bei Bedarf erweiterbar). Im nächsten Schritt wurde ein Wegenetz mit Kanten und Konten im GIS für jedes Stockwerk inkl. Stockwerksübergang als Navigationsmodell in Form eines navigierbaren Graphen manuell im GIS erzeugt. Dieses wurde in die mobile App übertragen und auf dessen Basis später die Routenberechnung durchgeführt. An den Kanten ist in Abbildung 1 zu sehen, dass diese nur wenig in die Räume hineinragen. Der Grund dafür ist, dass das Ziel der Navigation darin besteht, den gewünschten Raum zu finden. Von diesem Raum gibt es nur in seltenen Fällen die Möglichkeit, einen weiteren Raum zu betreten. Aus diesem Grund wurden die Beacons ausschließlich auf den Gängen und im Treppenhaus angebracht. Um eine möglichst genaue Lokalisierung der Beacon-Positionen zu bestimmen, wurden diese abwechselnd an beiden Seiten des Ganges über der Tür montiert. Da die Positionen der Tür in der Karte dargestellt sind, war es dadurch mit einfachen Messwerkzeugen möglich, die Position der Beacons zu bestimmen und anschließend durch Punktattribute im Navigationsmodell zu hinterlegen. Indem die Beacons auf beiden Seiten des Ganges angebracht wurden, liegen sie nicht auf einer Linie, wodurch experimentell ein besseres Ergebnis der geschätzten Position erreicht wurde. Um die Kartengrundlage zu erzeugen, war ein Zeitaufwand von durchschnittlich drei Stunden pro Stockwerk bei vier Stockwerken im Gebäude notwendig.

2.2 Positionsbestimmung mit Bluetooth Beacons

Für die Positionsbestimmung wurden zunächst Bluetooth Beacons vom Hersteller Kontakt.io (Kontakt.io 2020) verwendet. Bei dem Modell SB16-2 lässt sich die Signalstärke konfigurieren, sodass sich dadurch die Entfernung, in der das Signal wahrgenommen wird und die Batteriebenszeit steuern ließen. Als Batteriebensdauer wurde bei mittlerer Signalstärke zwei Jahre angegeben, wodurch sich die Wartung der Beacons begrenzen ließe. Beim entwickelten Prototyp wurde iBeacon und zum Auszulesen der Daten wurde die Bibliothek Android Beacon Library (Radius Networks 2020) verwendet. Bei dieser konnten ausreichend kleine Abtastintervalle konfiguriert werden.

Die Beacons übertragen hierbei die drei Werte UUID (Universally Unique Identifier), Major und Minor – zur Identifikation eines Beacons, die Received Signal Strength Indication (RSSI) – eine Verhältniszahl mit der Aussage über die empfangene Qualität des Signals in Dezibel – sowie die gemessene Signalstärke.

Um die Position aus diesen Informationen zu bestimmen, gibt es verschiedene Methoden, die dafür verwendet werden können, hier wurde sich für die Multilateration entschieden. Dabei werden die verschiedenen Distanzen der Beacons zu dem Empfänger berechnet und daraus die Position geschätzt. Aus der empfangenen Signalstärke und der RSSI lässt sich die Entfernung des Beacons vom Signalempfänger bestimmen. Aufgrund schlechter Resultate mit der verwendeten Bibliothek im Testgebäude wurde auf Basis von Formel 1 (IOTBY-MUKUND, 2016) eine manuelle Schätzung durchgeführt.

$$\text{Distanz} = 10 \cdot \left(\frac{\text{Signalstärke} - \text{RSSI}}{10 \cdot N} \right) \text{ mit } N = [2; 4]$$

Formel 1: Schätzung der Entfernung nach (Iotbymukund, 2016)

Welche Zahl für N eingesetzt wird, ist dabei vom Gebäude abhängig, im betrachteten Testgebäude ergab eine Versuchsreihe für $N = 2$ das beste Ergebnis. In den Versuchen dieses Projekts wurde jedoch schnell ersichtlich, dass die Beacons nicht gleiche Werte liefern, z. B. gab es unterschiedlich stark empfangene Signale bei gleichen Versuchskonstellationen (s. u.). Ob dies an den verwendeten Beacons lag, konnte nicht abschließend bestimmt werden. Letztendlich war es nicht möglich, eine zuverlässige Distanz – teilweise bei größeren Entfernungen, aber auch schon im Nahbereich – zu schätzen. Auch die Reduktion der Signalstärke im Gebäude brachte keine entscheidenden Verbesserungen, genauso wenig wie eine Überbestimmung mit mehr als drei für eine Trilateration benötigten Beacons mit anschließender Ausgleichung. Die Multilateration wurde mit der JAVA-Bibliothek „Apache Commons Mathematics Library“ (The Apache Software Foundation, 2018) durchgeführt, um die aktuelle Position zu bestimmen. Als Ausgleichung wurde dabei der Levenberg-Marquardt-Algorithmus (Gavin, 2020) verwendet, welcher eine Kombination aus dem Gradientenabstieg und der Gauss-Newton-Methode darstellt. Ein weiterer Versuch, bessere Ergebnisse zu erhalten, war, die letzten acht berechneten Koordinaten zu mitteln, damit die Koordinaten der zu bestimmenden Position geglättet und weniger fluktuierend waren. Aber auch das brachte nicht die gewünschte Genauigkeit. Vielmehr wurde festgestellt, dass es offensichtlich erhebliche Einflüsse von Elementen des Gebäudes gab: Sowohl Interferenzen von anderen Elektronikbauteilen (IT-Infrastruktur) als auch metallische Bauteile störten die Abstandsbestimmung zwischen Beacons und Smartphones teilweise erheblich, wie Messanalysen zeigten.

2.3 Genauigkeitsanalyse der Positionsbestimmung mit Bluetooth Beacons

Zur Genauigkeitsanalyse wurde in mehreren Testreihen über einen Zeitraum von jeweils zwei Minuten eine Positionsbestimmung auf einem festen Standort durchgeführt. Nachdem bei ca. der Hälfte der Standpunkte gute Ergebnisse mit Abweichungen von durchschnittlich 2 m ermittelt wurden, war bei anderen Standpunkten eine deutliche Abweichung der Messwerte (blaue Punkte in Abb. 2 links) vom Sollwert (orange) festzustellen.

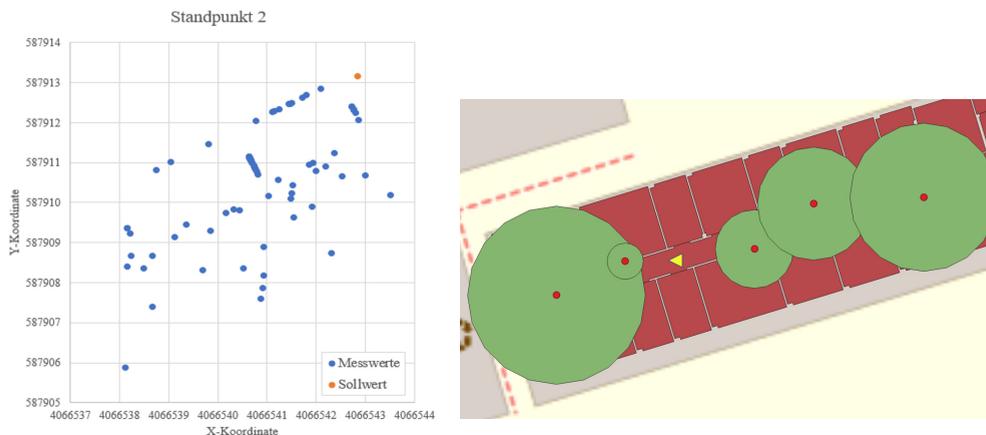


Abb. 2: Genauigkeitsanalysen der Positionsbestimmung

Beim Standpunkt im Diagramm links in Abbildung 2 betrug der maximale Wert 9,9 Meter und der Mittelwert 4,0 Meter. Das beobachtete Verhalten ist für die Navigation deutlich im

nicht akzeptablen Bereich und entspricht nicht den Anforderungen. Das gelbe Dreieck in der kartenbasierten Visualisierung der berechneten Distanzen stellt die Position des Smartphones an einem Standpunkt während der Messung dar. Jeder Beacon wird mit einem orangenen Punkt gekennzeichnet, um den ein grüner Kreis zu sehen ist. Der Radius des Kreises stellt die ermittelte Distanz dar. Im optimalen Fall würde die Umrandung der Kreise auf das gelbe Dreieck der Position treffen. Wie oben beschrieben waren die Schwankungen der empfangenen Signale groß und somit auch die ermittelten Distanzen unterschiedlich. Alle geschätzten Entfernungen waren zu kurz. Die daraus resultierende geschätzte Position wich in einem solchen Fall durchschnittlich vier Meter von der tatsächlichen Position ab.

Durch praktische Versuche mit der Positionsbestimmung konnte festgestellt werden, dass an manchen Orten im Gebäude gute Ergebnisse, an verhältnismäßig vielen Orten jedoch wie oben beschrieben unbrauchbare Ergebnisse erzielt wurden. Letzteres ist vor allem an Orten zu bemerken, an denen sich viel Elektronik befindet, wie z. B. bei einem Technikraum. Da das betrachtete Gebäude – wie viele andere auch – über eine große technische Ausstattung verfügt, war es nicht möglich, mit Beacons als Haupttechnologie eine gute Positionsbestimmung durchzuführen.

Daher wurde die Bluetooth-Technologie hier nicht als die geeignete Basis-Technologie bzw. Methode erachtet und eine Alternative analysiert:

2.4 Positionsbestimmung mit Pedestrian Dead Reckoning

Beim Pedestrian Dead Reckoning (PDR) handelt es sich um ein Verfahren, das Smartphone-Sensoren wie Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer verwendet, um eine (neue) Position zu schätzen (Kuntho et al., 2020). Dead Reckoning bedeutet übersetzt so viel wie kuppeln oder verbinden. Die Sensorwerte werden hierbei so miteinander verbunden, dass sich anhand einer Anfangsposition die neue Position schätzen lässt. Das Grundprinzip der Technologie besteht darin, die Schritte des Anwenders zu erkennen und die Position um eine Schrittlänge in die Bewegungsrichtung zu aktualisieren. Deshalb ist es nicht möglich, PDR durchzuführen, wenn zuvor keine Initial-Position bekannt ist. Außerdem vergrößert sich der Fehler der Position mit jedem Schritt, sodass regelmäßig eine Aktualisierung der Position durch andere Technologien bzw. Methoden erfolgen muss. Trotz dieses Nachteils schien PDR in diesem Projekt interessant, da die benötigten Sensoren im Smartphone integriert sind und es keiner besonderen Infrastruktur bedarf.

Um eine Position zu schätzen, werden eine Schritterkennung, eine Schrittlängenerkennung sowie die Bewegungsrichtung benötigt.

Die Schritterkennung war dabei am einfachsten zu lösen, da es für Smartphones schon implementierte Algorithmen gibt. Für den Prototyp wurde der Step Counter des Sensor Managers von Android verwendet (Android Developers 2020). Er funktionierte zuverlässig, sobald eine Person in Bewegung ist. Das nächste zu lösende Problem war die Bewegungsrichtung. Um diese zu ermitteln, wurde ein „Attitude and Heading Reference System“ (AHRS, Madgwick, 2010) verwendet. Es verwendet Accelerometer, Gyroskop und Magnetometer, um eine Orientierung relativ zur Richtung der Schwerkraft und des Erdmagnetfeldes zu ermitteln (Madgwick, 2010). Madgwick entwickelte dafür einen Filter, der die Orientierung mittels Quaternionen dargestellt, welche mithilfe einer Bibliothek in Euler-Winkel umgerechnet werden können, um die Orientierung des Anwenders zu beschreiben. Gerade bei Anwendungen mit begrenzter Leistung und Ressourcen wie einem Smartphone ist das AHRS von Mad-

gwick geeignet (Madgwick, 2010). Allerdings gibt es grundsätzlich eine Winkelabweichung zwischen der Orientierung, die die Messeinheit erkennt und der wahren Orientierung (Kiran, 2017, p. 2). Die Abweichung kann durch eine unzureichende Anfangsorientierung und durch technische Abweichungen wie Sensorrauschen, Kalibrierungsfehler oder Störquellen im Gebäude zustande kommen, aber auch durch den Anwender selbst, wenn z. B. das Smartphone rotiert gehalten wird.

Bei der Schrittlängenerkennung wurde auf zusätzliche Sensoren (z. B. Kiran, 2017 oder Kuntho et al., 2020) gemäß der gestellten Anforderungen verzichtet und eine durchschnittliche Schrittlänge von 72 Zentimetern verwendet (Kiran, 2017). Nach jedem erkannten Schritt wurde nun die Bewegungsrichtung abgefragt und die Position durch eine feste Schrittlänge angepasst.

Das PDR hat in einer ersten Reihe von ca. 20 Tests Ergebnisse mit Abweichungen zwischen 4 m und 5 m ähnliche Ergebnisse wie die Bluetooth-Technologie erzielt. Durch bessere Anpassungen der Schrittlänge an den jeweiligen Benutzer konnten diese Abweichungen allerdings reduziert werden. Auch bei der PDR wurde im Umfeld elektromagnetischer Felder, z. B. an einem Verteilerraum, festgestellt, dass der Magnetometer verfälschte Sensordaten liefert und es deshalb zu einer falschen Bewegungsrichtung der Person kommt. Hierdurch und durch die Ungenauigkeit durch die konstant angenommene Schrittlänge kam es bei längeren Gängen zu Fehlerfortpflanzungen unterschiedlicher Größenordnungen.

Aufgrund der Erkenntnisse der Messung der Positionsgenauigkeit bei Bluetooth Beacons und PDR wurde eine Kombination von beiden Verfahren prototypisch getestet. Die Beacons wurden nur gezielt an Orten eingesetzt, an denen keine Störung zu vermuten war, beispielsweise Kreuzungen von Gängen, in Bereichen ohne Technikraum oder in Treppenhäusern. Diese Stellen wurden genutzt, um die oben beschriebenen Abweichungen bei der PDR wieder zu korrigieren. Eine detaillierte Auswertung der Ergebnisse steht hier noch aus. Im Bereich technischer Installationen zeigten sich beide Verfahren als nicht gut geeignet, sodass es hier weiterhin zu Sprüngen in den Positionsbestimmungen kam.

2.5 Weitere Methoden zur Verbesserung der Positionsbestimmung

Neben der Ergänzung der PDR durch Bluetooth wurde die im Navigationsmodell hinterlegte Gebäudegeometrie hinzugenommen, um die Navigation zu verbessern. Die später auch zur Routenberechnung verwendeten Knoten und Kanten wurden deshalb zusätzlich zur Verbesserung der Position genutzt: Sobald die Position mit PDR und/oder Bluetooth berechnet wurde, wird diese auf die nächste Kante mithilfe einfacher Linienprojektion übertragen („Map Matching“). Auf diese Weise konnte erreicht werden, dass die Position bei Bewegung stabiler auf der berechneten Route angezeigt wird.

Bei der Indoor-Navigation mit einer Smartphone-App lag es nahe, auch QR-Codes als Hilfsmittel zur Positionsbestimmung zu testen. Im betrachteten Gebäude waren ohnehin QR-Codes an viele Räumen zur Belegungsplanung und ähnlichen Gründen angebracht. Hinter einem QR-Code wurden Raumnummern – und damit indirekt Koordinaten – hinterlegt, sodass nach einem Scan mit dem Smartphone eine ausreichend genaue Position – insbesondere der Startpunkt – des Anwenders ermittelt und die Qualität der Positionsbestimmung im Bereich technischer Installationen verbessert werden kann, falls die anderen oben beschriebenen Verfahren eine offensichtlich ungenaue oder unsichere Position liefern.

2.6 Routenberechnung

Um nun die Routen zur Navigation bzw. Wegführung zu berechnen, wurde das Navigationsmodell mit seinen Knoten und Kanten verwendet. Mithilfe des Dijkstra-Algorithmus (Dijkstra, 1959) wird die kürzeste Route berechnet. Um die Besonderheit des Stockwerkübergangs in der Berechnung der Routen zu berücksichtigen, wurden in Treppenhäusern und Aufzügen Kanten modelliert, die mit Knoten in mehreren Stockwerken verbunden sind. Eine Schwierigkeit im betrachteten Gebäude war, dass das Treppenhaus im Testgebäude durch Türen von den Gängen getrennt ist. Die Signale der Beacons im Gang konnten dadurch nicht im Treppenhaus empfangen werden, sodass zusätzliche Beacons in den Treppenhäusern angebracht wurden. Jeder Beacon enthielt die Information, in welchem Stockwerk er sich befindet und sendete diese nur über eine sehr geringe Distanz aus. Sobald der Beacon passiert wurde, konnte das jeweilige Stockwerk identifiziert werden. Die der vorgestellten PDR zugrunde liegende Auswertung der Smartphone Sensorik wurde hier wiederverwendet, um die Bewegungsrichtung des Zielsuchenden in Form einer Pfeildarstellung zu ermitteln und zu visualisieren.

3 Prototyp

Der Prototyp wurde als Android-App implementiert, eine Portierung auf iOS wird als einfach umsetzbar eingeschätzt. Die Visualisierung in der Anwendung basiert auf einer kartografischen Darstellung des Navigationsmodells mit den Stockwerken des Gebäudes (Abb. 3), die als Layer vorlagen und mithilfe der Bibliothek „osmdroid“ (osmdroid, 2021) implementiert wurden. Der Wechsel zwischen Stockwerken und die Navigation erfolgt durch Bedienelemente der App. So können über eine Auswahl von Gebäudeteil, Stockwerk und Raumnummer auch Start- und Zielraum ausgewählt werden (Abb. 3 rechtes Bild). Sobald Start- und Zielraum festgelegt sind, wird die Route berechnet (Abb. 3 mittleres Bild) und die Navigation mit Beacons und PDR kann gestartet werden. Hierbei zoomt die Karte auf die aktuelle Position und rotiert sich zur Orientierung in die Richtung des Anwenders.

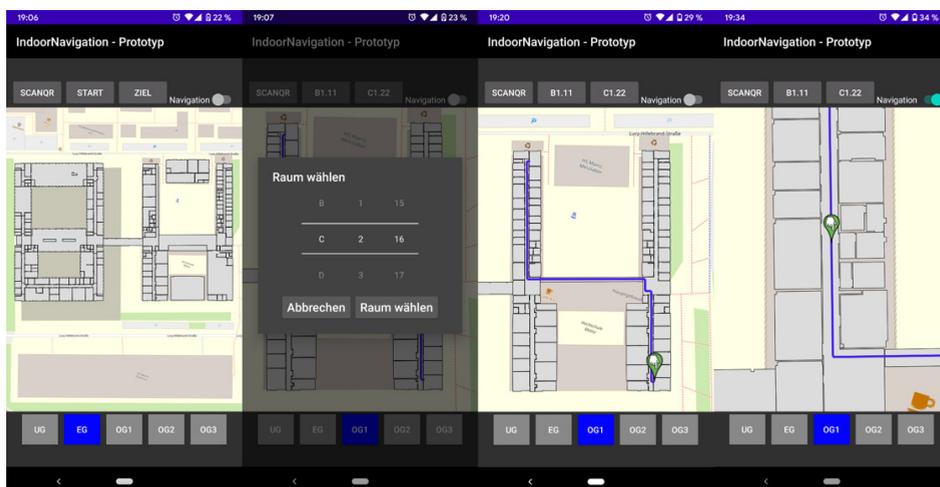


Abb. 3: Prototyp der Smartphone-App

4 Fazit und Ausblick

In diesem Beitrag wurden mögliche Implementierungs-Szenarien für ein praxistaugliches Indoor-Navigationssystem evaluiert. Anforderungen waren hierbei u. a. ein möglichst geringer Aufwand hinsichtlich erforderlicher zusätzlicher Hardware-Infrastruktur, Nutzung auf Standard-Smartphones und eine für die Indoor-Positionsbestimmung und -Navigation zu Räumen passende Genauigkeit. Zur Umsetzung dieser Anforderungen wurde zunächst eine Bluetooth-basierte Positionsbestimmung erprobt. Messtechnische Analysen ergaben, dass die Methode der Positionsbestimmung mit Bluetooth-Beacons allerdings die Genauigkeitsanforderungen nicht ausreichend erfüllt. Daher wurde das Pedestrian Dead Reckoning analysiert, das sich auf die Smartphone Sensorik stützt. Da dieses nur geänderte Positionen bestimmen kann und auf korrekte, individuelle Schrittlängen angewiesen ist, wurden gezielt Bluetooth Beacons zur initialen Positionsbestimmung und ggf. -korrektur genutzt. Auch hiermit konnten die Genauigkeitsanforderungen nicht ganzheitlich erfüllt werden. Eine zusätzliche Verbesserung lieferten daher noch Informationen über die Gebäudegeometrie aus dem eigens erstellten Navigationsmodell. Diese Ergänzung ermöglichte in ersten Tests gute Ergebnisse bei der Positionsbestimmung, sodass hierfür ein Prototyp einer Smartphone-App implementiert und getestet wurde. Bei selbst erkannten Unsicherheiten können als „Fallback-Lösung“ an den Räumen vorhandene QR-Codes gescannt werden, um die aktuelle Position zu bestimmen.

Weitere Verbesserungen sind zahlreich vorstellbar und Gegenstand weiterer Analysen. So können weitere Verfahren zur Fehlerkorrektur bzw. -minimierung eingesetzt werden, wie z. B. Kalman Filter oder Partikel-Filter. Ebenfalls wird die Untersuchung anderer Bluetooth Beacons angedacht, sowie Optimierungen der PDR-Methode. Hier kann es auch hilfreich sein, Aktualisierungen der Bewegungsrichtung auf die Kanten des Navigationsmodells zu projizieren und die angesetzte Schrittlänge z. B. mithilfe eines Lern-Algorithmus aus Maßstabsbestimmungen zu optimieren.

Eine Verbesserung der Nutzerinteraktion mithilfe von Usability Expertise ist erforderlich, insbesondere um die jeweils aktuelle Qualität der Positionsbestimmung zu visualisieren und Verbesserungsmöglichkeiten (z. B. die Nutzung der QR-Codes) zu empfehlen. Auch das Erproben von grafisch-interaktiven Verfahren, insbesondere mittels Augmented Reality ist anvisiert. Software-technisch wird noch eine Portierung auf iOS in Betracht gezogen, um möglichst allen Smartphone (und Gebäude-) Nutzern die Applikation zur Verfügung stellen zu können.

Literatur

- AlliedMarketResearch (2018). *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN) Market Outlook: 2025* [Zusammenfassung]. Retrieved Jan 18, 2021, from <https://www.alliedmarketresearch.com/indoor-positioning-and-indoor-navigation-ipin-market>.
- Android Developers (2020). *SensorAndroid Developers*. Retrieved Jan 30, 2021, from https://developer.android.com/reference/android/hardware/Sensor#STRING_TYPE_STEP_COUNTER.
- Bluetooth SIG (2020). *Market Update 2020*. Retrieved Jan 18, 2021, from <https://www.bluetooth.com/bluetooth-resources/2020-bmu/>.

- Dijkstra, E. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1, 269–271.
- Ehrlich, C (2018). *Echtzeit-Positionierung für Fußgänger innerhalb von Gebäuden auf Basis von Smartphone-Sensoren*, Dissertation, RWTH Aachen.
- Gavin, H. P. (2020). *The Levenberg-Marquardt algorithm for nonlinear least squares curve-fitting problems*. Retrieved Jan 26, 2021, from <http://people.duke.edu/~hpgavin/ce281/lm.pdf>.
- IndustryARC (2019). *Indoor Positioning and Navigation Market – Forecast (2021 – 2026)*. Retrieved Jan 18, 2021, from <https://www.industryarc.com/Report/43/global-indoor-positioning-navigation-market.html>.
- Iotbymukund (2016). *How to Calculate Distance from the RSSI value of the BLE Beacon*. Retrieved Jan 26, 2021, from <https://iotandelectronics.wordpress.com/2016/10/07/how-to-calculate-distance-from-the-rssi-value-of-the-ble-beacon/>.
- Kiran, D. (2017). *Dead reckoning methods for pedestrian navigation*. Masterarbeit. Chalmers University of Technology, Göteborg. <https://odr.chalmers.se/handle/20.500.12380/252179>.
- Kontakt.io Support (2021). *Calibrating your Beacons*. Retrieved Jan 26, 2021, from <https://support.kontakt.io/hc/en-gb/articles/115000091764-Calibrating-your-Beacons>.
- Kunthoth, J., Karkar, A., Al-Maadeed, S., & Al-Ali, A. (2020). Indoor positioning and way-finding systems: a survey. *Human-centric Computing and Information Sciences*, 10(1), p. 18. doi:10.1186/s13673-020-00222-0.
- Madgwick, SS O.H. (2010). *An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays*. Retrieved Jan 30, 2021, from https://www.x-io.co.uk/res/doc/madgwick_internal_report.pdf.
- Nakajima, M., & Haruyama, S. (2013). New indoor navigation system for visually impaired people using visible light communication. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2013(1).
- osmdroid (2021). *osmdroid/osmdroid*, Retrieved Jan 17, 2021, from <https://github.com/osmdroid/osmdroid>.
- Radius Networks (2020). *Android Beacon Library*, Retrieved Jan 26, 2021, from <https://altbeacon.github.io/android-beacon-library/>.
- Rüppel, U., Zwinger, U., & Kreger, M. (2015). BIM und Sensorik im Brandschutz. [Buchkapitel] in *Building Information Modeling* (pp. 397–406). Berlin/Heidelberg: Springer. doi:10.1007/978-3-658-05606-3_26.
- The Apache Software Foundation (2018). *Math – Commons Math: The Apache Commons Mathematics Library*. Retrieved Jan 26, 2021, from <https://commons.apache.org/proper/commons-math/>.
- Wendeberg, J., Höflinger, F., Schindelbauer, C., & Reindl, L. (2013). Calibration-free TDOA self-localisation. *Journal of Location Based Services*, 7(2), 121–144. DOI: 10.1080/17489725.2013.796410.
- Zafari, F., Gkielas, A., & Leung, K. (2019). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, V31(3), 2568–2599.