



Lehrstuhl für Subsurface Engineering

Masterarbeit

Beitrag zu einem optimierten Einsatz
technologiebasierter Erfahrungswelten
zwischen militärischen Stäben und
Betreibern untertägiger Infrastruktur

Alexandros Evangelatos, BSc

September 2022



EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu "Gute wissenschaftliche Praxis" gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 12.09.2022

Unterschrift Verfasser/in
Alexandros Evangelatos

Danksagungen

Mein erster Dank gilt meinem Betreuer und Lehrstuhlleiter, Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Robert Galler, welcher mir wegweisend bei Seite stand und mir half die richtige gedankliche Strukturierung zu finden.

Bedanken möchte ich mich besonders bei meinem Mitbetreuer, Herrn Dipl.-Ing. Robert Wenighofer, für die Aufnahme als Diplomand. Durch sein stets an mich geschenktes Vertrauen gab er mir Mut auch die eigenen Ideen zu entwickeln.

Auch bedanken möchte ich mich bei Herrn OberstdG Mag. Dr. Peter Hofer, meinem Mentor. Durch seine unermüdete Affinität an den Projekten konnte auch ich angesteckt und von der Arbeit begeistert werden.

Ein herzliches Danke auch an alle Projektpartner, die mich entgegenkommend in die Geschehnisse mit aufnahmen. Besonderer Dank gilt dabei den Kollegen von BLUETRACK, für die Hilfsbereitschaft und bereitwillige Verleihung eures Pis.

An dieser Stelle gilt auch ein Danke an meinen Bruder für den zweiten Pi des Autors, welcher verlässlicher lief als der eigene.

Nicht vergessen darf ich die beiden Herren, Julian Eder und Lukas Hager. Vielen lieben Dank für eure durchgängige Unterstützung, auch bereits lange vor dem Wiedersehen im Juli, sowie für eure Nachsicht bei Anliegen mit der Software.

Ein großes Danke auch an meine Partnerin, für die Geduld, meine Belangen und Fragen zu beantworten, und für die Unterstützung im Leben.

Abschließend gilt der Dank meiner Mutter, welche mir, wenn auch meist nur aus weiter Ferne, stets die Unterstützung gab, die ich brauchte.

Gleichheitsgrundsatz

Aus Gründen der Lesbarkeit wurde in dieser Arbeit darauf verzichtet, geschlechtsspezifische Formulierungen zu verwenden, die bei Personen verwendeten maskulinen Formen sind für alle Geschlechter zu verstehen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich vorerst allgemein mit Fragen zur Lokalisierung von Personen in unterirdischen Strukturen, wie Tunnelanlagen. Aktuelle Projekte der sogenannten Forschungsgruppe NIKE, welche sich mit ähnlichen Themen zur Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen und komplexen Anlagen beschäftigen, sowie weitere relevante Untersuchungen wurden während untertägiger Tests am Zentrum am Berg begleitet. Zusätzlich werden aktuelle Produkte zur Personenerfassung und Lokalisierung in untertägigen Anlagen von unterschiedlichen Unternehmen eruiert. Aus den beobachteten Einschränkungen vorhandener Forschungsprojekte ging die Idee hervor, ein System zu entwickeln, welches Personen detektieren und lokalisieren kann, ohne diese vorher mit einem gesonderten Gerät ausstatten zu müssen.

Da der weltweite Anteil von Smartphone-Nutzern stetig steigt und in manchen Ländern wie Österreich und Deutschland bei nahezu 90 % liegt, könnte demnach ein System, welches fähig ist diese Geräte zu detektieren, eine gute Abschätzung der Anzahl tatsächlicher, in einer gewissen Umgebung befindlicher, Personen abgeben. Da WLAN-fähige Geräte, wie Smartphones, zur Aufrechterhaltung eines stabilen Netzwerkes kontinuierlich, im Durchschnitt etwa einmal pro Minute, sogenannte Probe Requests aussenden, wurden verschiedene Möglichkeiten erhoben, ein System zur Personenerfassung darauf basierend zu entwickeln. Erste Ausführungen konnten dann mittels eines kleinen Computers, eines sogenannten Raspberry Pi, als Signalempfänger sowie einer darauf installierten öffentlich zugänglichen Software durchgeführt werden.

Es folgten Versuche zur Reichweite sowie der Signalabschwächung durch unterschiedliche Umgebungssituationen in der Anlage des Tunnelforschungszentrums am ZaB. Im selben Zentrum fand anschließend ein Großversuch der Forschungsgruppe NIKE statt, an welchem neben weiteren Forschungsunternehmungen auch das Pilotprojekt dieser Diplomarbeit teilnehmen konnte. Dabei wurden über mehrere Tage verschiedene Szenarien durchgeführt, an welchen Einheiten der Gruben- und Feuerwehr, sowie militärischen Truppen, an unterschiedlichen Trainings und Brandsimulationen beteiligt waren. Die gewonnenen Erkenntnisse, vor allem aus der erstmalig gemeinsamen Ausführung der zahlreichen Forschungsprojekte, wurden im Anschluss auch an einer Konferenz präsentiert.

Besonders für das Projekt dieser Arbeit war die Teilnahme bedeutend und instruktiv, da infolge der durchaus erfolgreichen Ausführungen die Rahmenbedingungen der Einsatzfähigkeit festgestellt werden konnten. Weiterführende Ideen und Verbesserungsvorschläge, sowie alternative Anwendungen wurden abschließend behandelt, stets mit dem Ziel, Einsatzkräfte im Falle eines Ereignisses gezielt mit zusätzlichen Informationen zu unterstützen.

Abstract

The present work deals in general with questions concerning the localisation of persons in underground structures, such as tunnels. Current projects of the so-called NIKE research group, which deal with similar topics to increase safety in underground and complex facilities, as well as other relevant investigations were accompanied during underground tests at the ZaB (Zentrum am Berg). In addition, current products for the detection and positioning of persons in underground facilities from various companies are being investigated. From the observed limitations of existing research projects, the idea emerged to develop a system that can detect and position persons without having to equip them with a specific device beforehand.

Since the worldwide percentage of smartphone users is constantly increasing and in some countries such as Austria and Germany is close to 90 %, a system that is able to detect these devices could therefore provide a good estimate of the number of people actually present in a certain environment. Since WLAN capable devices, such as smartphones, continuously send out so-called probe requests to maintain a stable network, on average about once a minute, various possibilities were investigated for basing a system for detecting people on them. The first implementations were then carried out using a small computer, a so-called Raspberry Pi, as a signal receiver and open-source software installed on it.

This was followed by tests on the range and signal attenuation due to different environmental situations in the facility of the Tunnel Research Centre at ZaB. A major experiment by the NIKE research group then took place in the same centre, in which the project of this master thesis was able to participate along with other research undertakings. Various scenarios were carried out over several days in which units of the mine rescue and fire brigades, as well as military troops, were involved in possible training and fire simulations. The knowledge gained, especially from the joint execution of the numerous research projects for the first time, was also presented at a conference afterwards.

The participation was particularly important and instructive for the project of this work, since the framework conditions of the operational capability could be determined as a result of the successful executions. Further ideas and suggestions for improvement, as well as alternative applications, were discussed in conclusion, always with the aim of supporting emergency services with additional information in the event of an incident.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Problemstellung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Grundlagen	4
2.1 Erfassungsmethoden	4
2.1.1 Funktechnik	7
2.1.2 Bildverarbeitung	14
2.1.3 Weitere Methoden	18
2.2 Ausführungsunterstützung	20
2.2.1 Virtual Reality	20
2.2.2 Augmented Reality	21
3 Stand der Technik	22
4 Pilotprojekt RasPos am ZaB	28
4.1 Entstehung	28
4.2 Hardware und Software	31
4.3 Versuche zur Reichweite	33
4.4 Implementierung in SOMT	47
4.5 Weitere laufende Forschungsprojekte	49
4.5.1 NIKE FTMT	49
4.5.2 NIKE SOMT	50
4.5.3 NIKE BLUETRACK	50
4.5.4 NIKE SUBMOVECON	52
4.5.5 NIKE DHQ-RADIV	53
4.5.6 NIKE MED	53
4.5.7 Mobile Wettertore	54
4.6 Integration von RasPos in den laufenden Projekten	55
5 Ergebnisse	58
6 Diskussion	63
6.1 Ergebnisbewertung	63
6.2 Ausblick	64
7 Zusammenfassung	65
8 Verzeichnisse	67
8.1 Literatur	67
8.2 Abkürzungen	77
8.3 Abbildungen	79

Anhang	I
RasPos Programmcode	I
Regelquerschnitt Straßentunnel am ZaB	VIII
Regelquerschnitt Eisenbahntunnel am ZaB	IX

1 Einleitung

1.1 Problemstellung

Tunnelbauwerke sind ein essenzieller Bestandteil des Schienen- und Straßenverkehrsnetzes und damit eine handelspolitisch sowie wirtschaftlich bedeutsame Komponente unserer Gesellschaft. Ein Ausfall nur einer Anlage kann aufgrund der Flaschenhalswirkung zu Leistungsverlusten großflächiger Netze und zu einem damit verbundenen volkswirtschaftlichen Schaden führen [43]. Ein Bericht des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK) nennt durchschnittlich fast 400 Ereignisse mit Personen- sowie Sachschaden und Bränden bei Tunnelanlagen ab einer Länge von 500 m auf Autobahnen und Schnellstraßen pro Jahr, in dem berücksichtigten Zeitraum von 2006 bis 2019. Der Anteil mit Sachschaden beläuft sich auf etwas über 75 %, Unfälle mit Personenschaden liegen bei etwa 22 % und Brände kamen vergleichsweise selten mit 2,4 % vor, was etwa 9 Brandereignissen pro Jahr entspricht [70]. Die vorgegebenen Fluchtwege zur Selbstrettung sowie die nur eingeschränkten Zugangsmöglichkeiten für Hilfs- und Rettungskräfte erhöhen wesentlich die Auswirkungen eines Ereignisses, besonders im Falle eines Brandes, da dichter Rauch und hohe Temperaturen zusätzlich lebensgefährliche Umstände bilden [101]. Daher kann schon ein kleiner Zwischenfall in einem Tunnel katastrophale Auswirkungen haben, weshalb im Sinne des Bundesministeriums für Inneres Tunnelbrände auch als technische Katastrophe verstanden werden können [10].

Vor allem die folgenschweren Tunnelbrände um die Jahrtausendwende führten zu einem Umdenken in der Fachwelt [25], weshalb in Folge die Europäische Union eine Richtlinie über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz herausgab. Diese ist für alle Tunnel mit einer Länge von mehr als 500 m einzuhalten und gilt unabhängig davon, ob diese sich in Betrieb, im Bau oder in der Planungsphase befinden [17]. In Österreich werden zusätzlich bauliche Anlagen, wie beispielsweise Pannenbuchten, Nischen und Rettungswege in den Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen (RVS) sowie Betriebs- und Sicherheitseinrichtungen, die Tunnelausrüstung, mit unter anderem Notrufeinrichtungen, Gefahrenmeldeanlagen sowie Einrichtungen zur Verkehrsüberwachung, Brandmeldung und Luftgütemessung, geregelt [65, 64]. Um das Risiko eines Ereignisses zu reduzieren und den sicheren Betrieb aufrecht zu erhalten sollen diese Anlagen und Einrichtungen Vorfälle verhindern sowie deren Ausmaß mindern, die Selbstrettung ermöglichen und die Fremdrettung sicherstellen [101].

Neben den Faktoren, welche das Verhalten von Tunnelnutzern in einem Ereignisfall beeinflussen, wie etwa das Vorwissen für richtiges Handeln und über Sicherheitseinrichtungen, kann das Risiko für eine technische Katastrophe vor allem von Seiten der Tunnelbetreiber und Einsatzkräfte gesteuert werden. Verhaltensweisen bei Betreibern, wie etwa mangelhafte Koordination und Kommunikation sowie unzureichende Information bezüglich des Ereignisses, wurden beobachtet und könnten beispielsweise mittels Trainings, Schulungen, optimierter Ausstattung sowie vordefinierter Prozessabläufe deutlich verbessert werden [48].

Da mit steigenden Mobilitätsanforderungen einer wachsenden Bevölkerung unterirdische Strukturen für moderne Gesellschaften an Bedeutung gewinnen, wie etwa für öffentliche Verkehrsmittel, steigen auch die Wahrscheinlichkeit von Einsätzen und damit die Anforderungen für Betriebszentralen und Sicherheitskräften zur Gefahrenabwehr [35]. Daher wurde die Forschungs-

gruppe Nachhaltige Interdisziplinarität bei Komplexen Einsätzen unter Tage (NIKE) gegründet, um durch gezielte Trainings und Beratung für Führungskräfte, im Zusammenhang mit der Entwicklung einer interaktiven Umgebung in der Virtuellen Realität (Virtual Reality, VR), eine Optimierung der Einsatzplanung und Durchführung sowie Ausbildung erzielen zu können [32].

1.2 Zielsetzung

Die Forschungsgruppe NIKE am Institut für Offiziersweiterbildung der Theresianischen Militärakademie führt mehrere Projekte mit ihren Forschungspartnern, zu welchen unter anderem die Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH, die OHB Digital Solutions GmbH, das Unternehmen REALSIM, das Institut für Informations- und Kommunikationstechnologien der JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH, das Institut für Geodäsie der Technischen Universität Graz sowie das Zentrum am Berg (ZaB) bzw. der Lehrstuhl für Subsurface Engineering an der Montanuniversität Leoben zählen [88].

Diese einzelnen Projekte beinhalten verschiedene Systeme und Möglichkeiten zur Erfassung und Lokalisierung von Einsatzkräften und zivilen Personen sowie die Verwendung von Applikationen zur schnellen Erstellung von 3D-Modellen und der Einsatzplanung in einer VR-Umgebung. Die Systeme wurden erstmals an einem bestehenden Bauwerk, dem ZaB, in Kombination ausgeführt, wobei auf eine optimierte Verknüpfung der einzelnen Informationsströme geachtet wurde [87]. Erkenntnisse daraus sollen Einsatzkräfte und Betreiber untertägiger Anlagen unterstützen und somit zu einer verbesserten Sicherheit und Gefahrenabwehr beitragen, zusätzlich wurden die Ergebnisse im Rahmen der darauffolgenden Urban Operation Expert Talks (UOET) 2022 präsentiert.

Ziel dieser Arbeit ist daher einerseits die einzelnen Forschungsprojekte im Detail vorzustellen und vor allem deren Einsatz in Kombination zu dokumentieren sowie an deren Präsentation und anschließenden Diskussionen an den UOET 2022 teilzunehmen. Zusätzlich sollen grundlegend verschiedene Methoden und Möglichkeiten zur Personenerfassung in untertägigen Anlagen eruiert, sowie diesbezüglich der Stand der Technik erfasst werden.

Ergänzend zu den bereits bestehenden Forschungsprojekten der NIKE wurde im Zuge dieser Masterarbeit ein neues System, genannt RasPos, entwickelt, welches unterstützend zur Erfassung ziviler Personen eingesetzt werden soll. RasPos kann Personen über deren WLAN-fähige Geräte lokalisieren und findet vor allem bei den limitierenden Eigenschaften bereits vorhandener NIKE Projekte gezielte Verwendung. Dieses System soll ebenfalls im Detail vorgestellt, dessen Anwendung und Eignung erforscht sowie darauf aufbauende, mögliche Weiterentwicklungen eruiert werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Zu Beginn werden in Kapitel [2](#) die Grundlagen verschiedener Erfassungsmethoden für den Innenraum sowie für untertägige Strukturen vorgestellt, wobei auf relevante und erfolgreiche Ansätze, unterteilt in deren Signalarten, genauer eingegangen wird. Auch erörtert werden zwei etablierte Arten der digitalen Visualisierung, da sie in späterer Folge für die Anwendung der Forschungsprojekte von zentraler Bedeutung sind.

In Kapitel [3](#) wird auf den Stand der Technik eingegangen, in welchem verschiedene aktuelle Produkte unterschiedlicher Unternehmen zur Personen- sowie Fahrzeugpositionierung vorgestellt werden. Dabei wird bereits auf die Spezialisierung im Tunnelbau bzw. Bergbau untertage geachtet, wobei auch Lösungsansätze von Betreibern untertägiger Infrastruktur berücksichtigt werden. Außerdem wird für eine bessere Übersichtlichkeit allgemein in Anwendungen für die Betriebs- bzw. Bauphase unterschieden.

Den Kern dieser Diplomarbeit stellt das in Kapitel [4](#) präsentierte Pilotprojekt RasPos dar, wobei vorerst auf die Entstehung und in weiterer Folge auf die verwendete Hardware und Software eingegangen wird. Auch werden erste Versuche zur möglichen Reichweite dieser Methode beschrieben und aus Gründen der Lesbarkeit auch in selbigem Kapitel ausgewertet. Weiters werden aktuelle Forschungsprojekte vorgestellt, da sie im Rahmen der am ZaB durchgeführten Großversuche auch für die Anwendung von RasPos entscheidend sind, darunter vor allem jene der Forschungsgruppe NIKE. Zusammenfassend wird die Integration des eigenen Projektes in die Ausführung der bereits vorhandenen Systeme geschildert sowie weiterführende Tätigkeiten wiedergegeben.

Alle Ergebnisse des eigenen Projektes, sowie die Resultate anderer laufender Forschungen, welche aus den gemeinsamen Großversuchen am ZaB erhalten wurden, sind in Kapitel [5](#) zusammengeführt.

Kapitel [6](#) erlaubt eine grobe Bewertung der bereits vorgestellten Ergebnisse, wobei eine Diskussion über Beeinträchtigungen sowie Verbesserungsvorschläge vor allem für das Projekt entsteht. Überdies werden zukünftige Herausforderungen aufgezählt und weiterführende Maßnahmen behandelt.

Abschließend werden die wichtigsten Erkenntnisse und Schlussfolgerungen dieser Diplomarbeit in Kapitel [7](#) zusammengefasst.

2 Grundlagen

2.1 Erfassungsmethoden

Da die Fähigkeit, Objekte und Personen im Inneren von Gebäuden zu orten, nach wie vor einen Engpass für eine nahtlose Positionierung in allen Umgebungen darstellt, haben sich, vor allem nach den Erfolgen der satellitengestützten Ortungsdienste für die Anwendung im Freien, die Herausforderungen und das damit verbundene Potenzial für Unternehmen in den Innenbereich verlegt. Prinzipiell können dieselben Ortungs- bzw. Erfassungssysteme sowohl in Innenräumen als auch im Freien eingesetzt werden, jedoch unterscheiden sich die jeweiligen Leistungsmerkmale erheblich, da diese an die unterschiedlichen Umgebungen entsprechend angepasst werden [58]. Zu den Gründen, welche die Erfassung von Objekten und Personen im Inneren von Gebäuden erschweren, zählen unter anderem die hohe Anzahl voneinander getrennter Räumlichkeiten sowie für die Funktechnik relevante Ausbreitungsmechanismen, welche aufgrund der größeren Dichte von Hindernissen zu hohen Dämpfungen und Signalstreuungen führen [84].

Kurz soll erwähnt sein, Begriffe wie Standortbestimmung, Position, Lokalisation, Erfassung und Ortung, welche durchaus unterschiedliche Bedeutungen haben, wurden in dieser Arbeit aus Gründen der Lesbarkeit, ohne Rücksicht auf deren Unterschiede, passend im Text verwendet.

Um die ansonsten unübersichtlichen Arten verschiedener Technologien zur Positionierung zu strukturieren, ist folgende Klassifizierung ratsam. Die erste Einordnung erfolgt in der Unterscheidung der Signalarten, in Radiofrequenzsignale (RF), Lichtsignale, wobei der sichtbare sowie infrarote Bereich berücksichtigt ist, akustische Signale, sowohl hörbar als auch im Ultraschallbereich, und abschließend mittels magnetischer Felder. Das zweite Kriterium unterscheidet, ob ein tragbares Gerät, über welches die Person detektiert und lokalisiert werden kann, Signale aussendet oder nur empfängt. Erfolgt die Positionierung über eine Signalausstrahlung an die Umgebung mit installierter Infrastruktur, wird das System als aktiv bezeichnet. Im passiven Ansatz erfolgt die Positionsbestimmung an den tragbaren Geräten aus der Berechnung empfangener Signale der Umgebung, weshalb diese Methode vorteilhaft im Sinne des Schutzes der Privatsphäre betrachtet wird. Im dritten Kriterium wird noch unterschieden, ob im ausgestrahlten Signal bewusst integrierte Information mitgesendet wird, wie es unter anderem bei Verfahren mittels Wi-Fi-Signale der Fall ist [7].

Die verschiedenen Signalarten unterscheiden sich in deren physikalischen Eigenschaften, welche wiederum Auswirkungen auf die Reichweite und Genauigkeit der jeweiligen Technologie aufweisen. In Abbildung [1] werden die Anwendungsmöglichkeiten verschiedener Technologien zur Positionierung in Innenräumen in Abhängigkeit von ihrer Reichweite und Genauigkeit dargestellt, welche in der Referenz [58] zudem genauer beschrieben werden. *Tactile and Combined Polar Systems* bezieht sich auf hochpräzise Tastsysteme, welche meist für Werkzeugmaschinen verwendet werden, und unter polaren Systemen fallen unter anderem Laser Scanner und Totalstationen. Auf die Anwendung von Kameras im optischen Bereich sowie im Infrarotbereich wird in Unterkapitel [2.1.2] genauer eingegangen. Auch können akustische Systeme mit Verwendung von Schallwellen zur Positionierung in Innenräumen eingesetzt werden, welche Bestandteil des Unterkapitels [2.1.3] sind. Die umfangreichen Methoden, welche auf der Funktechnik basieren, wie die Verwendung von drahtlosen lokalen Netzwerken, engl. Wireless Local Area

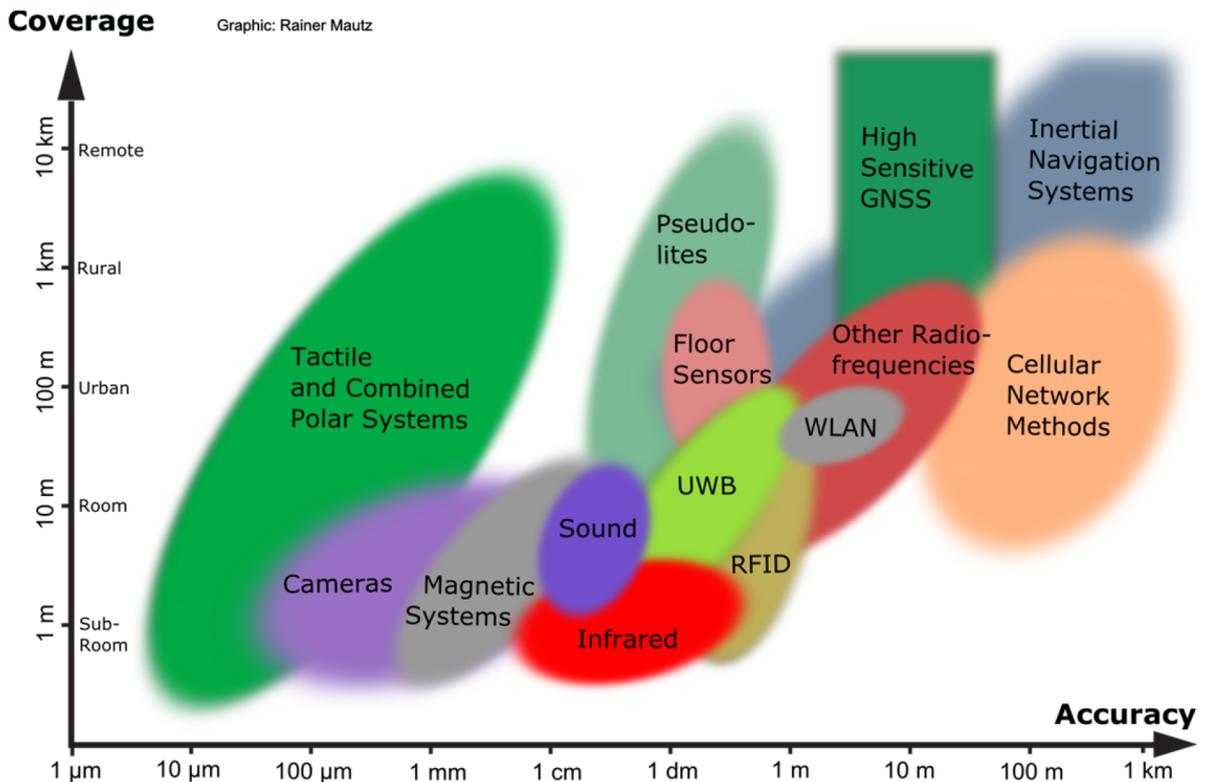


Abbildung 1: Übersicht der Technologien in Abhängigkeit der Reichweite und Genauigkeit [58]

Networks (WLANs), Radiofrequenz Identifikation, engl. Radio-frequency identification (RFID), Ultrabreitband, engl. Ultra-wideband (UWB), sowie anderen Radiofrequenzen, werden detaillierter in Unterkapitel 2.1.1 behandelt. Unter Bodensensoren sind beispielsweise ganze Fliesen zu verstehen, welche das Auftreten einer Person erkennen können, diese werden jedoch in dieser Arbeit nicht genauer behandelt. Der Begriff *Pseudolite* ist eine anerkannte Kurzform für Pseudo-Satelliten, welche am Boden angebracht die Signale der globalen Navigationssysteme (GNSS) verstärkt weiterleiten, wird jedoch in dieser Arbeit ebenfalls nicht genauer eruiert. Die Positionierung kann auch über die Implementierung der Signale des Mobilfunknetzes, engl. Cellular Network, erfolgen, welche sich auf die drahtlose Telefontechnologie, das *Global System for Mobile Communication* (GSM) sowie die Weiterentwicklungen *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) und *Long Term Evolution* (LTE) stützen. Dieser Ansatz wird in Unterkapitel 2.1.3 genauer vorgestellt. Ein hochempfindliches GNSS, engl. High Sensitive, beinhaltet einen Ansatz, bei welchem der Empfang vorhandener Satellitensignale durch eine deutlich erhöhte Empfangszeit, und damit eine Integration mehrerer Signalintervalle, zu verbesserter Positionierung in Gebäuden führen soll [16]. Die meisten Anforderungen können jedoch in tiefen Innenräumen nicht erfüllt werden, weshalb auch diese Methode nicht genauer behandelt wird. Abschließend kann ein inertiales Navigationssystem, oder auch Trägheitsnavigationssystem genannt, engl. Inertial Navigation System (INS), basierend auf einer inertialen Messeinheit, engl. inertial measurement unit (IMU), verwendet werden, welches in Unterkapitel 2.1.3 genauer behandelt wird.

Aufschlussreich ist jedoch nicht nur eine Betrachtung der verschiedenen Methoden und unterschiedlichen Signalarten zur Positionierung in Innenräumen, sondern auch eine Gruppierung aus der Sicht der möglichen Anwendungsbereiche, in Sektoren mit selbigem Nutzen bzw. Diensten und dementsprechend ungleichen Ansprüchen. In Abbildung 2 sind diese Sektoren in Abhängigkeit von den jeweilig benötigten Anforderungen an Reichweite und Genauigkeit für die Positionierung in Innenräumen dargestellt. Den höchsten Anspruch an die Genauigkeit stellen dabei die Maschinenindustrie sowie der Robotik-Sektor im Mikrometerbereich dar. Dieser in Abb. 2 mit Farbe markierte Bereich deckt sich zu einem großen Teil mit den in Abb. 1 vorgestellten *Tactile and Combined Polar Systems*, folglich mit hochpräzisen Tastsystemen, wie sie unter anderem in dieser Branche Verwendung finden. Andere Bereiche der genannten Technologien, wie etwa Infrarot in Abb. 1, decken sich mit keinem der in Abb. 2 dargestellten Anforderungen eines Sektors. Dies schließt die Verwendung einer Technologie jedoch nicht aus, da einerseits eine höhere Präzision als erfordert eingesetzt werden kann und andererseits unterschiedliche Umgebungen Einfluss auf die Reichweite der Technologien aufweisen. Erneut am Beispiel der Thermal-Technologie, wird für die Reichweite in Abb. 1 etwa statt des Inneren eines Gebäudes ein Tunnel in Betracht gezogen, so könnte die Reichweite, sofern freie Sicht vorhanden ist, deutlich erhöht werden [58].

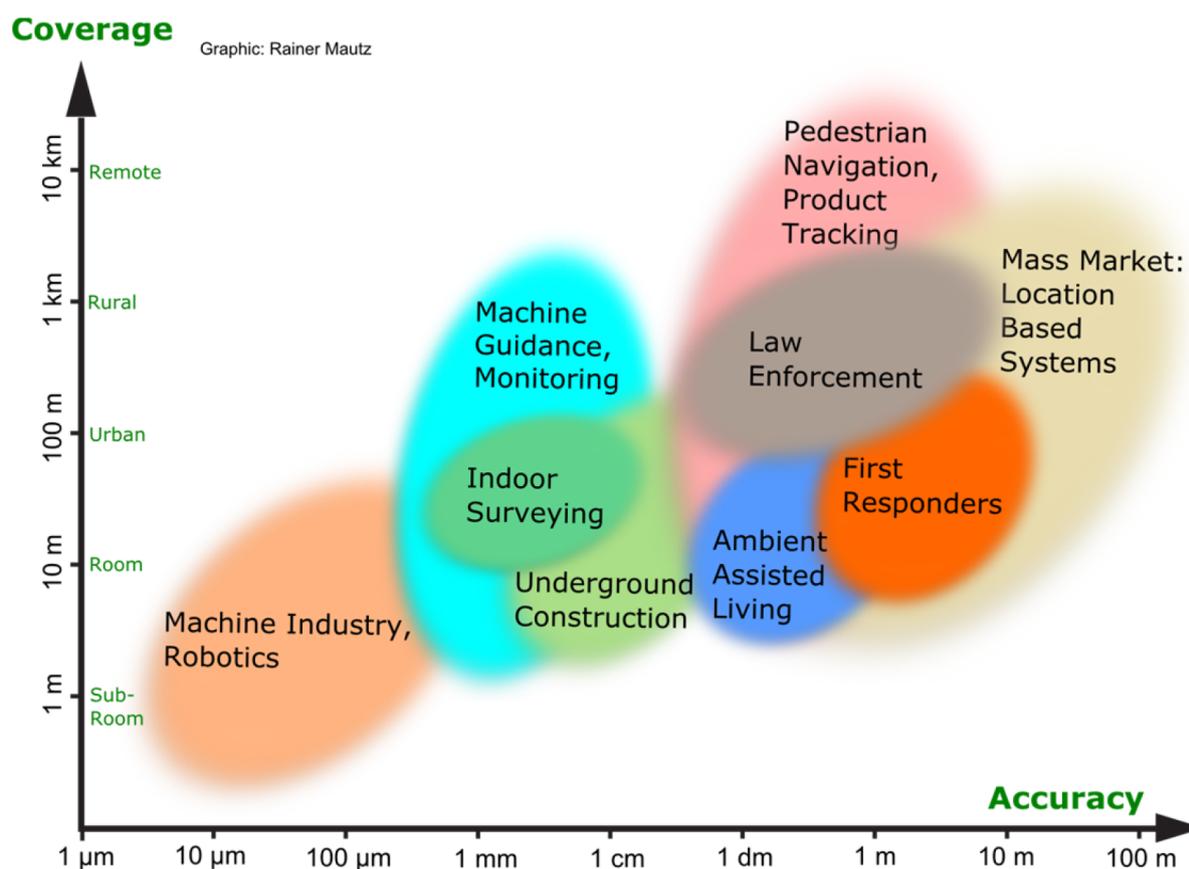


Abbildung 2: Übersicht der Anforderungen an Reichweite und Genauigkeit [58]

Im Interesse dieser Arbeit stehen vor allem die Anforderungen der Sektoren Sicherheitskräfte, engl. Law Enforcement, sowie Ersthelfer und Rettungsdienste, engl. First Responders. Neben der Positionierungsgenauigkeit und Reichweite sollten weitere Kriterien, wie etwa eine hohe Aktualisierungsrate für eine permanente Erreichbarkeit, eine geringe Latenzzeit, was einer möglichst kurzen Verzögerung der Informationsankunft entspricht, sowie ein geringes Gewicht im Falle eines tragbaren Gerätes, berücksichtigt werden [71]. Auch sollte das gewählte System physische Robustheit, Kompatibilität mit anderen Informationsquellen, Kartenerstellung in Echtzeit und Benutzerfreundlichkeit aufweisen. Erläuterungen aller weiteren Bereiche mit ihren jeweiligen Anforderungen aus Abbildung 2 können in der Referenz [58] nachgelesen werden.

2.1.1 Funktechnik

Die Standortbestimmung mittels mobiler Funkgeräte hat ihren Ursprung mit den ersten Radaranwendungen zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts und wurde während des Zweiten Weltkriegs zur Ortung von Luft-, See- und Bodenzielen weiterentwickelt. In den 1970er-Jahren initiierte das US-Verteidigungsministerium die Entwicklung des Global Positioning System (GPS) mit dem Ziel, jederzeit und überall auf der Erde zuverlässige Zeitinformationen zur Positionierung zu liefern. Gegenwärtig existieren weitere GNSS, darunter auch Galileo der Europäischen Union [67].

Während GNSS in Außenbereichen die Grundlage zur Positionierung bilden, können diese im Inneren von Gebäuden nicht zur Bereitstellung eines Ortungsdienstes Anwendung finden, da die Funksignale der Satelliten diese nicht ausreichend durchdringen können. Um die Ortung zur Fußgänger-Navigation zu verbessern, wurden GNSS, vor allem GPS, insbesondere mit dem Aufkommen von Smartphones, durch die Implementierung lokaler WLANs, basierend auf der Grundlage von Wi-Fi, ergänzt [46].

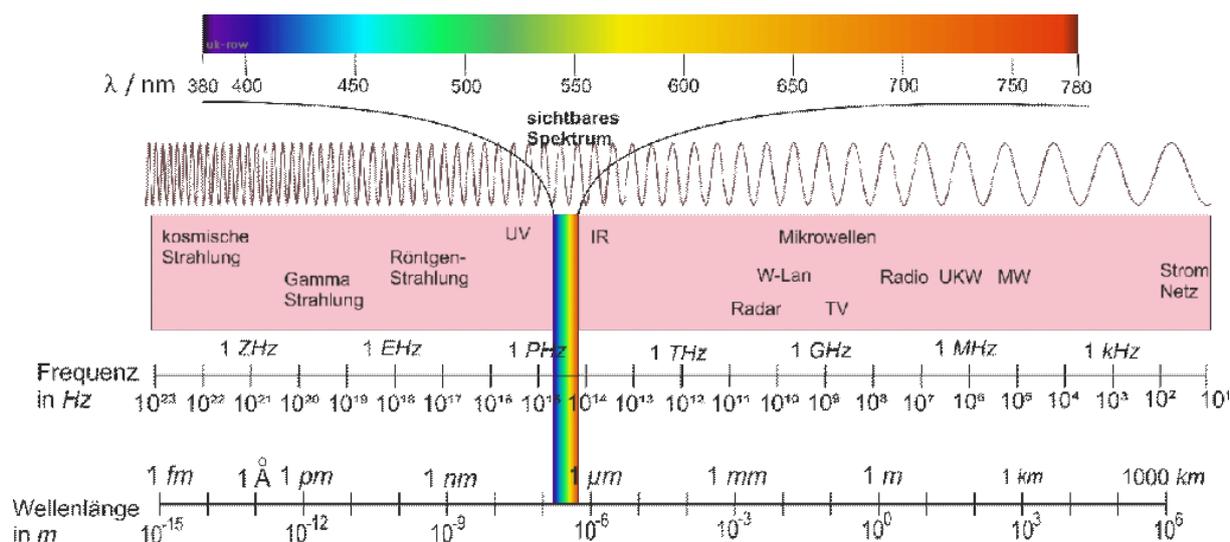


Abbildung 3: Spektrum der elektromagnetischen Strahlung [45]

Wie für Abbildung 1 bereits erwähnt, können verschiedene Frequenzen im elektromagnetischen Feld, je nach gewünschten physikalischen Eigenschaften, genutzt werden. Eine ausführliche Darstellung des Spektrums der elektromagnetischen Strahlung kann in Abbildung 3 betrachtet werden, wobei logarithmische Skalen für die Wellenlängen und Frequenzen gewählt wurden, demzufolge zwischen zwei Teilstrichen jeweils eine Zehnerpotenz liegt [45]. In der Grafik ersichtlich sind, von links nach rechts genannt, inklusive der Ultraviolettstrahlung, die hochenergetischen Strahlen, auch als ionisierende Strahlung bezeichnet, welche aufgrund ihrer schädlichen Wirkung für die Positionsbestimmung von Personen ungeeignet sind. Die optische Strahlung, dessen Bestandteile das sichtbare Spektrum sowie den infraroten Bereich beinhalten, in der Abbildung mit IR abgekürzt, kommt hauptsächlich für Überwachungskameras in Verwendung, über welche wiederum mittels Bildverarbeitung auf die Position von Personen geschlossen werden kann. Im nachstehenden Unterkapitel 2.1.2 wird genauer auf Verfahren dieser Art eingegangen. Nach der infraroten Strahlung folgen im Bereich von etwa 300 MHz bis 300 GHz, mit dementsprechend einer Wellenlänge zwischen 1 m und 1 mm, die Mikrowellen, welche den Großteil, der in diesem Unterkapitel mit Funktechnik bezeichnet zusammengefassten Arten zur Lokalisierung mit unterschiedlichen Frequenzen beinhalten. Das Spektrum der Mikrowellen wird unter anderem für UWB, WLAN, GNSS sowie GSM verwendet. Sogar manche RFID-Tags verwenden die Mikrowellen-Frequenzen, da diese Transponder höhere Lesegeschwindigkeiten aufweisen, welche für Fahrzeuganwendungen benötigt werden [80]. Die meisten RFID-Systeme verwenden jedoch Frequenzen, welche im nächststehenden elektromagnetischen Bereich, den Radiowellen, liegen. Abschließend existieren Systeme zur Lokalisierung mittels magnetischer Felder, diese verwenden Radiofrequenzen mit wenigen MHz und geringer, wobei die Felder mittels Permanentmagneten oder durch Stromfluss in Spulen induktiv erzeugt werden können.

Messparameter

Prinzipiell können Positionsbestimmungen mittels elektromagnetischer Wellen unabhängig von der gewählten Frequenz auf unterschiedlicher Art, anhand verschiedener Messparameter, erfolgen. Zu den grundlegenden Theoremen zur Messung von Funksignalen für Systeme zur Lokalisierung in Innenräumen gehören der *Received Signal Strength Indicator* (RSSI), die Ankunftszeit, engl. *Time of Arrival* (TOA) sowie der *Angle of Arrival* (AOA) oder auch *Direction of Arrival* (DOA) genannt. Wie in Abbildung 4 ersichtlich, können diese Parameter in richtungs- und entfernungsbezogene Systeme unterschieden werden, wobei letzteres erneut in Methoden basierend auf dem Signal oder der Zeit unterteilt werden kann.

Der RSSI (*received signal strength indicator*) ist der gemessene Wert einer Signalstärke und wird häufig für eine Schätzung der Entfernung zwischen einem Sender und dem Empfänger verwendet, ohne auf komplizierte Berechnungen zurückgreifen zu müssen. Die Schätzung erfolgt rein anhand des gemessenen Leistungsverlustes, welcher sich mit zunehmender Entfernung immer stärker auswirkt. Zur genaueren Positionsbestimmung kann durch den Einsatz mehrerer Empfänger eine RSSI-basierte Trilaterationsmethode angewandt werden. Diese Methode kann jedoch bereits mit nur wenigen Empfängern arbeiten und eine Entfernungsschätzung wiedergeben [13]. Ein RSSI-basierter Algorithmus benötigt nur die empfangene Signalstärke und ist damit deutlich weniger komplex als beispielsweise Methoden, welche eine Zeitsynchronisation benötigen.

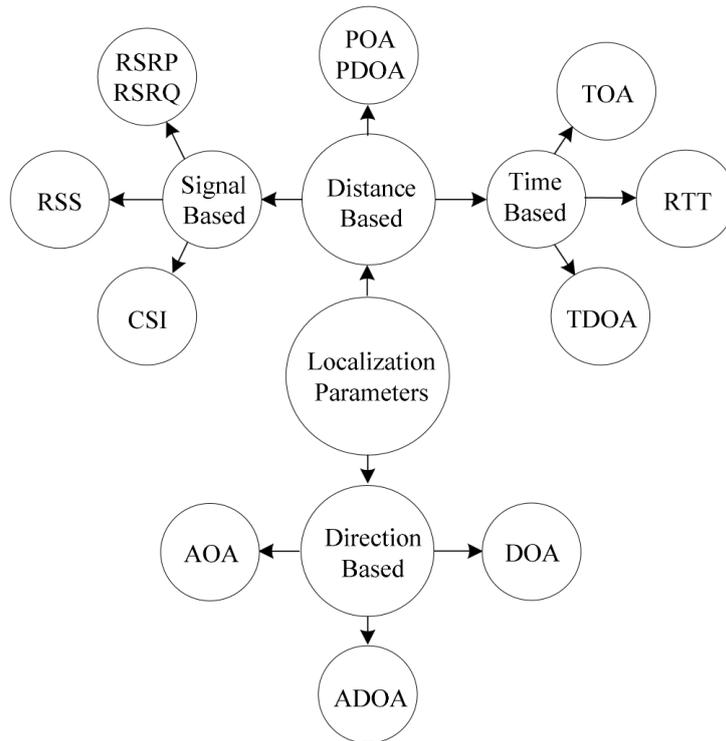


Abbildung 4: Übersicht der möglichen Messparameter zur Positionierung [42]

Allerdings haben Umwelteinflüsse einen starken Effekt auf die Messung, da etwa in einer realen Innenraumumgebung zahlreiche Hindernisse vorhanden sind, welche die Ausbreitung des Funksignals beeinträchtigen [74]. Außerdem ist der RSSI besonders anfällig für Rauschen und Mehrwegeeffekte, welche unter anderem durch Reflexion an der Oberfläche von Wänden zustande kommen können, wodurch die Lokalisierungsgenauigkeit erheblich verringert werden kann [84].

Bei der TOA-Methode (*Time of Arrival*) wird am Empfänger der Ankunftszeitpunkt der ersten Signalperiode gemessen, womit sie zu den zeitbasierten Systemen zählt. Die Entfernungsschätzung erfolgt mittels der gemessenen Sendezeit und bekannten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Funksignals. Um eine höhere Positionsgenauigkeit zu erreichen, benötigt ein TOA-Verfahren mindestens zwei Empfänger, für eine Trilateration drei, welche synchronisiert sein müssen. Um diese aufwendige Synchronisation zu umgehen, kann über das Funksignal selbst ein Zeitstempel mitgesendet werden [99]. *Time difference of arrival* (TDOA) misst nur die Zeitdifferenzen zwischen den Zeitpunkten der einzelnen Empfänger und benötigt daher keinen mitgesendeten Zeitstempel, jedoch mindestens drei Empfänger. Bei einer höheren Anzahl von Empfängern spricht man von einer Multilateration. Alternativ kann auch ein weiteres zeitbasiertes System angewandt werden, welches die Paketumlaufzeit bzw. *Round Trip Time* (RTT) nutzt. Diese Methode benötigt ebenfalls keine Synchronisation der Empfänger, welche in diesem Fall als Knotenpunkte bezeichnet werden sollten, da nach dem Signalempfang eine Signalantwort ausgesendet wird. Das zu lokalisierende Gerät zeichnet die Zeitstempel der empfangenen Signalantworten auf und kann daraus auf die eigene Position zurückschließen. Die RTT-Entfernungsmessung unterliegt jedoch erneut Einschränkungen, ausgelöst durch Reflexion sowie instabiler Taktgeschwindigkeiten

aufgrund von Verzögerungen durch Phasenrauschen und unterschiedliche Verarbeitungszeiten. Darüber hinaus ist diese Methode hinsichtlich gleichzeitiger Verarbeitungskapazitäten limitiert, weshalb nicht parallel auf eine größere Anzahl von Anfragen geantwortet werden kann [29].

Abschließend können richtungsbezogene Systeme, wie AOA (*Angle of Arrival*) bzw. DOA (*Direction of Arrival*), zur Positionierung von Personen mittels Funksignale verwendet werden. Diese Technik misst die Winkeldaten des Senders in Bezug auf die Orientierung der Empfänger. Dazu werden mehrere Antennen an jedem Empfangsgerät benötigt, welche als ein sogenanntes Antennen-Array agieren. Die gemessenen Winkel ergeben sich aus Analysen der Phasenverschiebungen oder in den unterschiedlichen Ankunftszeitpunkten an den einzelnen Array-Elementen. Neben den Mehrfachantennen können jedoch auch Richtantennen verwendet werden, welche sorgfältig positioniert ein RSSI-Verhältnis untereinander zur Positionsbestimmung verwenden [47]. Diese winkelbasierten Methoden benötigen mindestens drei Empfänger, sprich referenzierte Knotenpunkte, anhand welcher eine Triangulation vollzogen werden kann [66]. Die höhere Komplexität, aber vor allem auch die Notwendigkeit einer anspruchsvolleren Hardware, sind Haupthindernisse für den Erfolg von AOA-basierten Ortungssystemen [100]. Eine erweiterte Methode von AOA stellt *angle difference of arrival* (ADOA) dar, für welche die Array-Antennen aller Empfangsgeräte in selbiger Richtung montiert werden, womit Messungen der einzelnen Orientierungen für die Bezugswinkel entfallen. Anhand der bekannten Positionen der Knotenpunkte werden nur mehr die Differenzwinkel des Signals zwischen den Antennen für die Positionsbestimmung benötigt. Alle weiteren in Abbildung 4 dargestellten Methoden, sowie eine übersichtliche Tabelle mit angeführten Vor- und Nachteilen der jeweiligen Messparameter, können in der Referenz [42] nachgelesen werden.

Ultra-Wideband

UWB ist eine Funktechnologie für Kurzstreckenkommunikation mit hoher Bandbreite, die unter anderem mittels TOA-Messungen zur Entfernungsschätzung, Lokalisierung und Objektverfolgung verwendet wird. Im Allgemeinen werden Module, genannt Tags, für die Aussendung bestimmter Funksignale eingesetzt, welche von meist identischen, aber unbewegten Modulen, auch Anker bezeichnet, empfangen werden. Durch die gemessenen Entfernungen zu mehreren Ankern mit bekannter Position kann mittels Trilateration oder Multilateration auf die eigene Position des Senders geschlossen werden. Die Verwendung einer großen Bandbreite von über 500 MHz ermöglicht eine hohe zeitliche Auflösung und folglich eine höhere Genauigkeit bei Entfernungsschätzungen. Durch die Kombination bzw. Überlagerung mehrerer Signale mit leicht unterschiedlichen Frequenzen ist es möglich, einen zeitlich präziser definierten Impuls zu erzeugen, welcher für die hohe zeitliche Auflösung verwendet wird. Für diesen zeitlich kurzen Impuls ist die große Bandbreite erforderlich. Andere Systeme, wie WLAN, sind mit einer Bandbreite von 20 MHz bzw. 40 MHz begrenzt, wodurch nur ein Signal mit einer Dauer von mindestens 4 ns erzeugt werden kann. Dieser relativ lange Impuls kann an jedem Objekt, innerhalb von 1,2 m vom Empfänger sowie Sender, reflektiert werden und eine Impulsüberlappung verursachen, weshalb Positionsbestimmungen mittels WLAN unter der Verwendung von TOA-Methoden ungeeignet sind. Bei den UWB-Systemen liegt die Impulsdauer in der Größenordnung von Nanosekunden und kürzer, weshalb eine Bandbreite von mehr als 500 MHz die Fähigkeit besitzt, Reflexionen

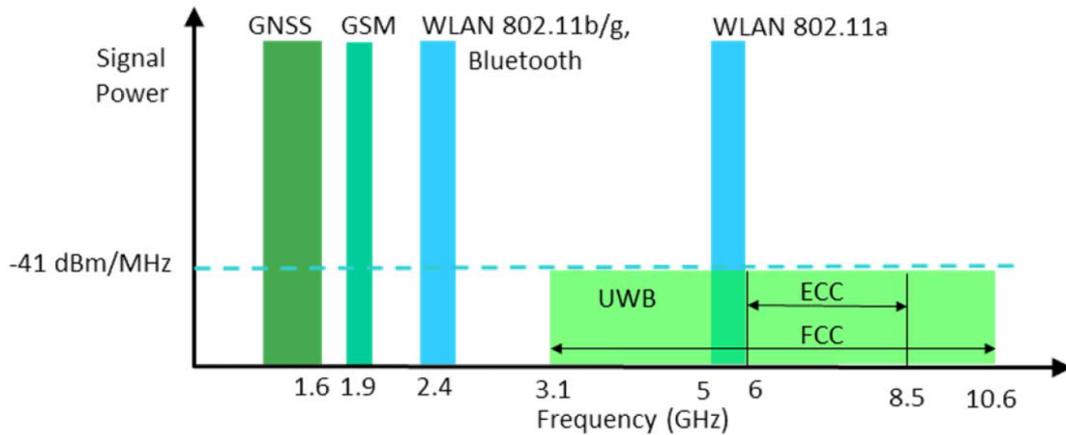


Abbildung 5: Das regulierte UWB Spektrum [58]

des Signals zu unterscheiden. Um Störungen mit anderen drahtlosen Kommunikationssystemen zu vermeiden hat die Federal Communications Commission (FCC) der USA die unlicenzierte Nutzung von UWB auf eine Strahlungsleistungsdichte von $-41,3$ dBm/MHz begrenzt und das Frequenzband auf 3,1 GHz und 10,6 GHz limitiert. Das European Communications Committee (ECC) hat das zur Nutzung freigegebene Frequenzband für UWB sogar zwischen 6,0 GHz bis 8,5 GHz beschränkt [12]. In Abbildung 5 können das regulierte UWB-Spektrum und die Bandbreiten weiterer relevanter Funkfrequenz-Standards betrachtet werden.

WLAN

Vor allem die Popularität von Smartphones sowie die zunehmende Anzahl an Funk-Terminals für WLAN hat die schnelle Entwicklung von *indoor location-based service* (ILBS) vorangetrieben, weshalb es für Ortungstechniken in Bereichen wie der öffentlichen Sicherheit, Industrie und medizinischen Behandlung weit verbreitet ist [22]. Neben dem großen Vorteil der bereits vorhandenen Infrastruktur mit standardmäßiger Hardware sind Positionierungssysteme mittels WLAN außerdem weniger durch räumlich getrennte Umgebungen beeinflusst und benötigen daher keine Sichtverbindung. Aufgrund der Komplexität von Zeit- und Winkelmessungen sind Verfahren mit AOA oder TOA weniger verbreitet, stattdessen beruhen die meisten Methoden auf RSSI, da diese an handelsüblicher WLAN-Hardware ausgeführt werden können [58]. Ein Nachteil für Verfahren, welche die Entfernungsschätzung über den RSSI ermitteln, stellt die signifikant unterschiedliche Sendeleistung verschiedener Geräte dar. Neben einer einfachen Schätzung der Entfernung aus dem Leistungsverlust ist eine Multilateration bevorzugt anzuwenden, da damit diese problematischen Schwankungen der Sendeleistung aufgehoben werden können. Aufgrund der komplexen Dämpfungsmechanismen in gefüllten Innenräumen kann es jedoch weiterhin zu starken Abweichungen kommen. Die Multilateration wird daher oft mit dem sogenannten *Fingerprinting* verbessert, indem der gewünschte Anwendungsbereich vorerst vermessen und an ausgewählten Referenzpunkten, meist in einem Raster, WLAN-Signale ausgesendet und deren RSSI-Werte aufgezeichnet werden. Bei der Ausführung des Ortungssystems kann dann ein am

WLAN-Netzwerk gemessenes Signalstärken-Muster mit den in der Datenbank gespeicherten Fingerprints verglichen werden. Die beste Übereinstimmung wird an den Benutzer zurückgegeben, wodurch auf eine Position nahe dem bestimmten Referenzpunkt geschlossen werden kann [53].

Ein weiteres System zur Positionierung kann via Bluetooth verwendet werden, welches ebenfalls wie WLAN auf dem 2,4-GHz-Band ein gutes Gleichgewicht an Reichweite und Durchsatz aufweist. Bluetooth eignet sich besonders als eine kostengünstige und leicht implementierbare Lösung für die Lokalisierung in Innenräumen. Sogenannte Transceiver, zu Deutsch Sende-Empfangsgeräte, sind in fast allen tragbaren Geräten, wie Laptops, Handys, Smartwatches aber auch Kopfhörern bereits vorhanden [2]. Allgemein zählen die hohe Sicherheit, die niedrigen Kosten, der geringe Stromverbrauch sowie die kompakte Größe zu den Vorteilen der Verwendung von Bluetooth zum Austausch von Informationen zwischen Geräten. Die Kommunikationsreichweite fällt jedoch je nach Ausbreitungsbedingungen mit 5 m bis 10 m deutlich geringer als bei WLAN aus. Zudem können Bluetooth-Sensoren, während eines vordefinierten Zyklus einige Sekunden nicht im Abfragemodus verbleiben, weshalb sie für eine Echtzeit-Anwendung ohne Latenz ungeeignet sind. Auch die einfache Entfernungsschätzungen über den Signalverlust ist mit einem handelsüblichen Bluetooth-Gerät nicht möglich, da standardmäßig kein Befehl zum Auslesen des RSSI implementiert ist [58].

GSM

Diese Ortungsmethoden beruhen ausschließlich auf der modernen flächendeckenden drahtlosen Kommunikationsinfrastruktur des vorhandenen Mobilfunknetzes der zweiten Generation, dem GSM. Diese Mobilfunknetze sind in den meisten Ländern weit verbreitet und übertreffen mit Zellgrößen von bis zu 35 km die Reichweite anderer Ansätze, wie WLAN, bei weitem. Der Massenmarkt der Mobilfunknutzer, sowie vor allem die enorme Reichweite, sind Hauptgründe für die Verwendung von GSM-basierten Ansätzen zur Positionsbestimmung für ortsbezogene Dienste und Notfallassistenten-Einsätze. Außerdem verwendet GSM lizenzierte Frequenzbänder, weshalb im Gegensatz zu WLAN keine Störungen durch andere Geräte mit selbiger Frequenz vorkommen können. Für die Positionsschätzung werden ebenfalls die in Unterkapitel 2.1.1 vorgestellten Methoden angewendet, welche die Standorte von nahegelegenen Antennen der Mobilfunktürme verwenden, um auf die Position des mobilen Gerätes zu schließen. Die hohe Reichweite und damit nicht benötigte hohe Dichte von Antennen führt jedoch gleichzeitig zu einer sehr geringen Genauigkeit mit systemabhängigen Standardabweichungen von einigen hundert Metern [40]. Trotz dieser Positionsabweichung ist die Methode für genannte Anwendungen wie Notfalldienste geeignet. Zudem kann die Ortungsgenauigkeit GSM-basierter Systeme mittels Fingerprinting signifikant verbessert werden [92].

RFID

RFID-Systeme bestehen aus einem Lesegerät und einem sogenannten Tag, welcher in der Nähe des Empfängers aufgegriffen bzw. erkannt wird. Dabei werden Daten von den RFID-Tags, üblicherweise aus einer eindeutigen Identifikationsnummer (ID) bestehend, mittels Funksignale

an das Lesegerät gesendet. Die Tags sind in Aktive und Passive zu unterscheiden. Aktive Tags beinhalten selbst einen RFID-Scanner, womit sie spezifisch auf andere RFID-Transceiver antworten können und daher eine interne Batterie benötigen. Ein passiver Tag besitzt hingegen keine Batterie, sondern kann rein aus der empfangenen Energie mittels induktiver Kopplung antworten. Die Reichweite passiver Tags fällt dadurch auf wenige Meter, während aktive Ansätze deutlich höhere Werte von bis zu 100 m erreichen können. Daher hängt die Genauigkeit dieser Systeme auch stark von der Reichweite sowie Einsatzdichte ab, wobei sich die Multilateration zur Erhöhung der Positionsgenauigkeit besonders für aktive Tags eignet. Zu den Vorteilen des RFID-Ansatzes zählen die hohe Datenrate der Lesegeräte, womit mehrere Tags problemlos gleichzeitig erfasst werden können, sowie die Möglichkeit zur kompakten Ausführung, weshalb sie beispielsweise auch als Aufkleber an Produkten im Einzelhandel zur Diebstahlüberwachung verwendet werden. Außerdem können RFID-Tags je nach Anwendungsumgebung verschiedene Frequenzbereiche verwenden, kategorisiert in Niederfrequenzen, engl. low frequency (LF), mit 30 kHz bis 500 kHz, Hochfrequenzen (HF) bei 3 MHz bis 30 MHz, Ultrahochfrequenzen (UHF) bei 433 MHz und zwischen 868 MHz bis 930 MHz und Mikrowellen bzw. Superhochfrequenzen (SHF) mit 2,4 GHz bis 2,5 GHz sowie 5,8 GHz [58]. Eine alternative Anwendung findet sich in Referenz [75], in welcher RFID-Tags in gewissen Abständen an die Decke eines Tunnelsystems geklebt und das Lesegerät auf einem elektrischen Fahrzeug angebracht wurden. Über die empfangenen IDs der RFID-Tags konnte das Fahrzeug dann auf die eigene Position, in einer 2D-Karte projiziert, schließen.

Magnetische Felder

Zu magnetischen Ortungssystemen werden Verfahren mit sehr langen elektromagnetischen Wellen und Frequenzen im kHz Bereich bis zu einigen wenigen MHz gezählt. Diese magnetischen Felder können durch Permanentmagneten, meist jedoch mittels Induktion in Spulen mit Wechsel- oder pulsierendem Gleichstrom, erzeugt werden. Auch die gebildeten elektrischen Felder können in Kombination mit den magnetischen Feldern zur Positionierung beitragen. Elektromagnetische Wellen mit höheren Frequenzen werden unter anderem durch Erde und Feuchtigkeit stark gedämpft, weshalb niederfrequente Ansätze bestens für die Ortung im Untergrund geeignet sind. Die Magnetfelder mit niedriger Frequenz können mit vernachlässigbarer Dämpfung die Vegetation und das Erdreich bzw. Gestein durchdringen [55]. Diese Eigenschaften macht die magnetische Lokalisation zur fähigsten Methode, um tiefe verborgene unterirdische Strukturen zu erkennen, wobei die Durchdringung von Wänden auch in Gebäuden vorteilhaft genutzt werden kann. Die realisierbare Reichweite und Genauigkeit können je nach den unterschiedlichen Ansätzen stark variieren. Eine Anwendung für Höhlen, Stollen und Tunnel konnte sogar eine Reichweite von 200 m mit einer Genauigkeit von 1 m, erreichen [58]. Neben den künstlich erzeugten Magnetfeldern nutzen zahlreiche moderne Systeme das natürliche Erdmagnetfeld unserer Erde, um eine Lokalisierung durchzuführen. Dabei werden Parameter wie die Magnetfeldstärke und/oder die Magnetfeldausrichtung mittels sogenannter Magnetometer gemessen. Gemessene Magnetfeldänderungen können sehr stark durch metallische Elemente wie Leitungen beeinflusst werden, weshalb sich vor allem für Innenräume Verfahren wie Fingerprinting etabliert haben [7].

2.1.2 Bildverarbeitung

Prinzipiell ist Licht eine elektromagnetische Welle und kann identisch wie in der Funktechnik zum Übertragen von Information Einsatz finden, jedoch unterscheiden sich die Eigenschaften von Licht sehr stark zu Mikro- und Radiowellen. Lichtsignale zur Positionierung in Innenräumen, englischer Begriff *light-based indoor positioning* (LIP), sowie die *Visible Light Communication* (VLC) haben großes Potenzial [54]. In dieser Arbeit werden jedoch nur bildverarbeitende Methoden zur Detektion und Positionierung von Objekten und Personen genauer betrachtet. Kameras haben sich zu einer dominierenden Technik für die Lokalisierung entwickelt, deren Erfolg sich auf den technologischen Fortschritt von Detektoren bzw. Bild-Sensoren zurückzuführen ist. Parallel dazu hat die allgemeine Entwicklung und Verbesserung der Rechenkapazität und Datenübertragungsrate sowie Algorithmen in der Bildverarbeitung zu neuen Möglichkeiten verholfen. Allgemein wird zwischen Ansätzen mit bewegten oder statischen Sensoren bzw. Kameras unterschieden. Bewegte Bildsensoren können aufgrund des Perspektivenwechsels, auch als *synthetic stereo vision* bekannt, ähnlich wie ein Stereokamerasystem, die aufgenommene Umgebung in 3D vermessen, sind dabei jedoch nicht vom Abstand zwischen den beiden Linsen limitiert, was zu höheren Messleistungen führt. Statische Kameras können durch die Anwendung gezielter Algorithmen, oft auf Basis von künstlicher Intelligenz (KI), unter anderem bewegte Objekte, aber vor allem auch Personen identifizieren. Die Positionierung hat dann, wie für alle kamera-basierten Systeme über die Bildkoordinaten, welche nur Winkelinformationen darstellen, ausschließlich über eine AOA (*Angle of Arrival*) zu erfolgen. Der damit erzeugte Bildraum benötigt für eine Transformation in den Objektraum eine Referenzierung, welche aus dem bekannten Abstand zwischen den Bildern oder durch vermessene Punkte in der Bildebene erzeugt werden kann. Alternativ können Distanzen auch direkt mit zusätzlichen Sensoren gemessen werden, wie etwa mit Laserscannern oder sogenannten Range-Imaging-Kameras [59].

Bildverarbeitende Systeme unterscheiden sich vor allem in der Methodik, wie die Information zur Referenzierung gewonnen wird, weshalb sich eine übersichtliche Einteilung danach anbietet. Es wird zwischen Systemen mit Referenzen aus einem 3D-Modell, aus Bildern, platzierten Zielmarken, projizierten Referenzpunkten bzw. -Muster, Referenzen mittels anderer integrierter Sensoren sowie Systemen ohne Referenz differenziert. Im Falle des 3D-Modells beruht die Referenzierung auf der Erkennung bzw. Detektion mehrerer Objekte in den Bildern, deren Position im vordefinierten Modell der Umgebung abgeglichen werden kann. Dieser Ansatz hat den Vorteil, keine Zielmarken zu benötigen sowie ohne die Installation anderer Messsensoren im Raum auszukommen. Auch ist das Potenzial für großflächige Aufnahmen gegeben, ohne deutlichen Mehraufwand zu generieren. Die Referenz aus Bildern, im Englischen auch als *view-based* bezeichnet, beruht auf zuvor entlang eines definierten Weges aufgenommenen Bildsequenzen. Während der Ausführung wird dann das aktuell aufgenommene Bild der Kamera mit den zuvor erfassten Aufnahmen verglichen und damit auf die aktuelle Position geschlossen. Für die Erkennung der Bildübereinstimmung ohne Zielmarken aus verschiedenen Perspektiven wird ein großer Rechenaufwand benötigt, weshalb dieser Ansatz Schwierigkeiten für eine Echtzeitauswertung mit sich führt. Während die beiden bereits genannten Ansätze besonders bei wechselnden Belichtungsbedingungen erschwert zuverlässige Ergebnisse liefern, kann vor allem die Genauigkeit der erkannten Referenzpunkte durch den nächsten Ansatz, mittels Zielmarken, deutlich verbessert werden. Allgemein geben Zielmarken, welche aufgrund ihrer eindeutigen Kodierung unterscheidbar sind, durch die algorithmische Erkennung dem System einen einfachen und genauen

Bezugsmaßstab. Zu den üblichen Arten von Zielen zählen ebene, durchaus auf Papier gedruckte, Ringe mit Segmenten sowie Bar- und QR-Codes, welche meist für einen höheren Kontrast in Schwarz-Weiß ausgeführt sind. Sehr ähnlich erfolgt der Prozess beim nächsten Prinzip, wo aufgrund der Projektion von Referenzpunkten und Mustern die physische Platzierung von Zielen in der Umgebung erspart bleibt. Mittels einer möglichst vom Bildhintergrund differenziert gewählten Helligkeit, Form und Farbe, wobei auch Infrarotlicht benutzt werden kann, wird die algorithmische Erkennung erleichtert. Daten für den Bezugsmaßstab können jedoch auch über andere Sensoren erhalten werden. In Kombination mit den genannten Methoden kann dadurch eine höhere Genauigkeit und Robustheit erreicht werden [59].

Die zunehmende Rechenleistung digitaler Geräte erlaubt, Kombinationen dieser Systeme mit Sensoren auch in mobiler Hardware wie Smartphones zu integrieren, womit auch der Massenmarkt erreicht wurde. So kann ein in der Nähe der Kameras serienmäßig verbauter *Light imaging, detection and ranging* (LiDAR) Sensor, wie in einem Apple iPhone 12 Pro, welcher ähnlich dem Ansatz der projizierten Referenzpunkte ein Laserraster ausstrahlt und die Entfernung zu den einzelnen Punkten misst, die Aufnahmen referenzieren und somit zur Erstellung eines 3D-Modells beitragen [52].

Auch *unmanned aerial vehicles* (UAVs), umgangssprachlich und aus dem militärischen auch als Drohnen bekannt, haben den Massenmarkt erreicht und deren Möglichkeiten zur Anwendung vervielfältigt. Die sogenannte UAV-Fotogrammetrie ist ein Begriff für das bereits stark etablierte entstandene Forschungsfeld der optischen Vermessung mittels UAVs. Systeme der Fotogrammetrie verwenden ebenfalls oft Kombinationen der vorhin genannten Ansätze. So werden meist in den UAVs integrierte Sensoren für GNSS Informationen in Kombination mit platzierten Zielmarkern verwendet. Einen Vorteil stellen die gewonnenen GNSS Daten dar, da ein durch Fotogrammetrie aufgenommenes Oberflächenmodell direkt mittels Georeferenzierung in ein übergeordnetes Koordinatensystem eingefügt werden kann. Für die Fotogrammetrie mit UAVs können auch weitere Sensoren verwendet werden, so beispielsweise auch das vorhin bereits vorgestellte System LiDAR [90].

Abschließend werden die bildverarbeitenden Systeme ohne Referenzierung vorgestellt. Im Gegensatz zu den vorherigen Methoden soll dieser Ansatz mobile Objekte, demnach Veränderungen in den Aufnahmen, mit hohen Bildraten in Echtzeit erfassen und durch eine oder mehrere statische Kameras verfolgen. Aufgrund der unveränderten Position der Bildsensoren werden keine externen Referenzen benötigt [59]. Diese Systeme stehen im besonderen Interesse dieser Arbeit, da diese sich ideal an die verbreiteten Überwachungsanlagen mittels Kameras, welche in öffentlichen unterirdischen Strukturen wie U-Bahnstationen und Tunnelanlagen üblich sind, anwenden lassen. Das äußerst weitreichende Gebiet umfasst zahlreiche Studien und Anwendungen zu Videoverarbeitungstechniken, Fahrzeugerkennung und -verfolgung, Multikamera-basierten Techniken, Aktivitäts- und Ereigniserkennung, Verkehrsüberwachung und viele weitere [77]. Ganz allgemein gesprochen werden bildverarbeitende Algorithmen, wie zum Beispiel für eine Objekterkennung, vorerst mit Bildmaterial versorgt, mit welchem der Algorithmus zunehmend die Objektdetektion erlernt. Für die Erlernung stehen oft sogar öffentliche Datenbanken mit reichlich Videomaterial zur Verfügung. Dieser Prozess ist durchaus zeitintensiv und benötigt dementsprechende Rechenleistung, prinzipiell gilt jedoch je mehr Material zur Erlernung verwendet wurde desto verlässlicher die anschließende Detektion. Dabei spielt die Art des zu detektierenden Objektes

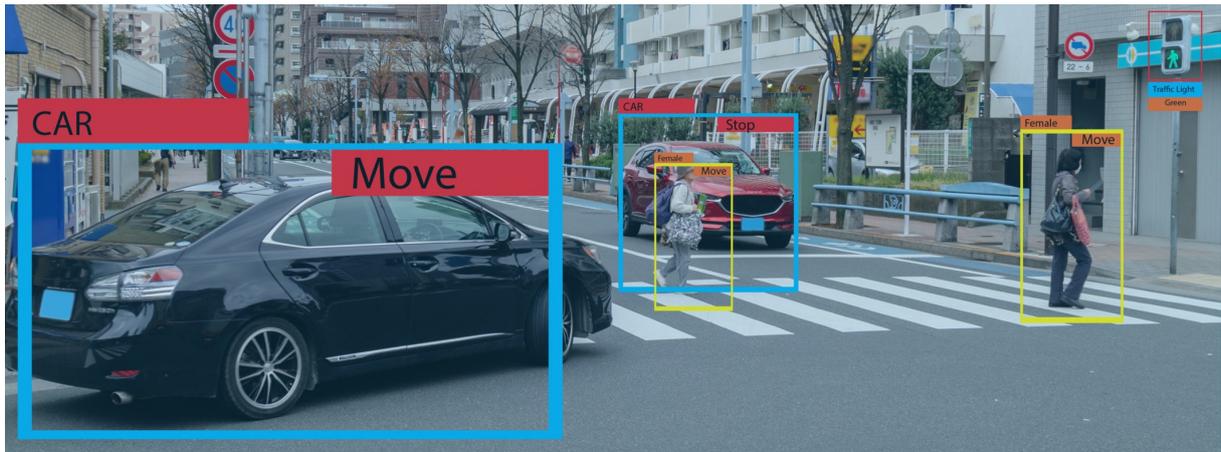


Abbildung 6: Bilderkennung für autonomes Fahren [61]

kaum eine Rolle, weshalb beispielsweise Stühle und verschiedene Fahrzeugtypen aber genauso Menschen und Tiere erkannt werden. Zudem existieren öffentlich zugängliche Algorithmen, welche bereits mit einem reichlichen Datensatz zur Erkennung von, wie in einem Beispiel angeführt, 80 verschiedenen Objektklassen zur Verwendung stehen [19]. Abbildung 6 zeigt eine musterhafte Aufnahme mit integrierter Bilderkennung für die Anwendung im Straßenverkehr, in welcher Fahrzeuge, Personen, aber auch Informationen wie die Ampelfarbe rechts oben im Bild, erkannt wurden. Besonders für die Entwicklung im Gebiet der autonomen Fahrzeuge kommen Algorithmen dieser Art zum Einsatz.

Die in Kameras verwendeten Lichtsensoren sind nicht auf den für den Menschen sichtbaren Bereich der Optik, zu welcher auch die ultraviolette und infrarote Strahlung zählt, beschränkt. Die meisten Lichtdetektoren digitaler Kameras nutzen außerdem ein weiteres Spektrum, meist in den nahen Infrarotbereich reichend, um auch noch bei sehr schwachen Lichtverhältnissen ein kontrastreicheres Bild erstellen zu können. Zusätzlich existieren auch Infrarotkameras, alternativ auch Thermal- oder Wärmebildkamera genannt. Für die Messung und bildliche Darstellung von Temperaturen sind die verwendeten Sensoren auf die erwarteten Emissionswellenlänge der Umgebung abgestimmt, und liegen daher meist in mittlerem und langwelligem Infrarotbereich. Die Bildverarbeitung funktioniert im Infrarotspektrum analog zum sichtbaren Bereich, wobei die meist geringere Auflösung sowie der schwächere Kontrast zu weniger robusten Ergebnissen führt. Nachteile dieses Ansatzes stellen jedoch die geringere Anwendung in unserer Infrastruktur dar, sowie vor allem der Mangel an öffentlichen Datenbanken mit Infrarotaufzeichnungen für das Trainieren der Algorithmen.



Abbildung 7: Vergleich der Kameraspektren von sichtbarem und infrarotem Licht [85]

Objekt- und Personenerfassungssysteme mittels Bildverarbeitung haben den Nachteil, direkte Sicht auf den zu detektierenden Körper zu benötigen. Auch kann die Sicht auf nur Teilbereiche eines Objektes die Erkennung erschweren, beispielsweise wenn sich eine Person hinter ein Fahrzeug begibt und nur Ausschnitte des Körpers ersichtlich sind. Außerdem kann das Sichtfeld durch Nebel oder Rauch verdeckt sein, besonders im Falle eines Fahrzeugbrandes in einem Tunnel entstehen dichte Rauchschwaden. Die elektromagnetische Infrarotstrahlung wird dabei nur geringfügig durch Nebeltropfen oder Rauchpartikel gestreut und ermöglicht daher eine klare Sicht. Die kurzwelligere Strahlung des sichtbaren Lichts wird dagegen jedoch stark durch Streuung beeinflusst, weshalb die Sicht vollständig beeinträchtigt und für eine Bildverarbeitung unbrauchbar werden kann. Ein Vergleich der beiden Spektren kann in Abbildung 7 betrachtet werden, eine Person wird durch Rauch im sichtbaren Lichtspektrum verdeckt, aber durch Wärmebildkameras leicht erkannt. Infrarotkameras sind daher von vielen Feuerwehren für eine klarere Sicht zur Brandszenenerkundung in Verwendung, um in solch feindlicher Umgebung sicher zu operieren und die Rettung von Menschenleben zu ermöglichen [51].

Genau diesen Ansatz der Bildverarbeitung mittels der in Teilen unserer Infrastruktur bereits weit verbreiteten Überwachungskamera-Anlagen verfolgt ein Forschungsprojekt, genannt Sub-MovCon, welches in Unterkapitel 4.5 genauer vorgestellt wird.

2.1.3 Weitere Methoden

Soundbasierte Technologien

Tonbasierte Technologien verwenden akustische Signale, die sich aus Druckwellen bestehend in der Luft ausbreiten. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Signalen breitet sich Schall deutlich langsamer aus, weshalb für eine genaue Bestimmung der Entfernung die Zeitpunkte zwischen der Emission und dem Empfang nicht so akkurat wie in der Funktechnik bestimmt werden müssen. Da Funksignale im Vergleich zu einem Tonsignal fast augenblicklich an dem Empfänger ankommen, werden sie oft in Kombination gleichzeitig ausgesendet, womit dann die gemessene Differenz der Ankunftszeiten für die Berechnung der Entfernung verwendet werden kann. Des Weiteren können natürlich auch Ansätze mit selbigen Parametern wie in der Funktechnik angewandt werden. Beispielsweise ist TOA (*time of arrival*) eine verbreitete Methode, welche auch in Multilateration die Vorteile eines langsamen Signals nützen kann. Akustische Signale im hörbaren Bereich, zwischen 16 Hz und 20 kHz, haben den Nachteil, von Menschen als störend wahrgenommen werden zu können, weshalb es zu raffinierten Entwicklungen kam, welche in bereits vorhandenen Sounds integriert werden. Zum Beispiel können Tonsignale in die in Einkaufszentren und andere öffentlichen Umgebungen bereits vorhandene Hintergrundmusik eingebettet werden, sodass sie für das menschliche Ohr nicht mehr wahrnehmbar sind. Verbreiteter existieren Systeme zur Standortbestimmung, welche über dem hörbaren Bereich, also Frequenzen über 20 kHz, mit Ultraschall arbeiten. Ähnlich, wie bereits in der Funktechnik vorgestellt, können auch diese Systeme aktiv oder passiv ausgeführt werden. Die Unterscheidung bezieht sich auf das mobile Gerät, dessen Position bestimmt werden soll. Der passive Ansatz verwendet daher Geräte, welche nur Tonsignale empfangen und aus den bekannten Positionen der Emitter, eventuell auch mithilfe einer Trilateration, auf den eigenen Standort schließen kann. Ein aktives System hingegen sendet Signale aus, je nach Anwendung können Informationen am mobilen Gerät auch empfangen werden, wobei hierfür durchaus Kommunikation mittels Funks verwendet wird. Benachteiligt sind aktive Ausführungen durch ihre Skalierbarkeit, da bei einer sehr hohen Anzahl sendender Geräte sich die Ultraschallsignale überlagern und dadurch die Auswertung stören können. Bei passiven Systemen wirkt sich die Anzahl der Empfänger nicht negativ auf die Leistung aus, da die Geräte synchronisiert abgestimmt werden können um eine Überlagerung der Ultraschallsignale zu vermeiden. Im Gegenteil zu den aktiven Systemen können passive Ausführungen dadurch sogar eine höhere Genauigkeit erreichen [7].

Inertiale Navigationssysteme

Mit einem INS (Inertial Navigation System), oder auch Trägheitsnavigationssystem, wird ein zukünftiger Standort eines bewegten Objektes, bei bekannter Anfangsposition, Geschwindigkeit und Richtung, näherungsweise bestimmt. Oft auch als Koppelnavigation bezeichnet, stellt dieses Verfahren eine der ältesten Navigationsmethoden dar, welche vor allem aus der Schifffahrt stammend heute auch für die Flug- und Raumfahrtnavigation bedeutend eingesetzt wird [7]. INSs basieren seit den 1930er Jahren meist auf Trägheitsmessenheiten, oder auch als IMUs (Inertial Measurement Units) bekannt, welche wiederum eine Kombination aus Beschleunigungsmessern und Gyroskopen darstellen. Dabei werden für die Messungen im dreidimensionalen Raum jeweils drei Sensoren beider Arten in den jeweiligen Achsen des x-y-z-Koordinatensystems verwendet.

Beschleunigungssensoren können nicht nur eine Geschwindigkeitsänderung, sondern auch die Beschleunigung zum Erdmittelpunkt, die Erdanziehungskraft, messen. Mit Gyroskopen kann eine Richtungsänderung bestimmt und damit auf die Orientierung geschlossen werden. In den späteren und heute üblichen IMU-Typen wurden noch drei Magnetometer hinzugefügt. Diese können die Richtung und Stärke des Erdmagnetfeldes messen und damit die Genauigkeit der Orientierungsermittlung erhöhen. Während frühe IMUs aufgrund ihrer Größe nicht für die Verwendung in mobilen kompakten Geräten einsetzbar waren, änderte sich durch die Einführung und Weiterentwicklung sogenannter *microelectromechanical systems* (MEMS) (Abbildung 8) das Einsatzgebiet von IMUs. MEMS sind eine häufig auf Siliziumstrukturen basierende Prozesstechnologie, mit der mechanische und elektrische Komponenten zu Systemen kombiniert werden. Mit den enormen Entwicklungen der Fotolithographie in der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik konnten diese nur Mikrometer großen Messsensoren immer höhere Präzisionen annähern und erreichten schließlich den Massenmarkt. IMUs auf MEMS-Basis sind unter anderem in einer Vielzahl von mobilen Geräten verbaut und sind zudem ein wichtiger Bestandteil in Smartphones. In Abbildung 8 ist eine beispielhafte MEMS-Struktur stark vergrößert dargestellt, wobei sich Aufbau und Form herstellerabhängig unterscheiden sowie meist deutlich komplizierter aufgebaut sind. Neben der Kompaktheit sind digitale Beschleunigungssensoren, Gyroskope und Magnetometer auf MEMS-Basis auch sehr kostengünstig herstellbar und äußerst stoß- bzw. schlagfest. Allgemein haben Trägheitsnavigationssysteme den Nachteil einer zunehmenden Ansammlung von Fehlern bzw. Fehlerfortpflanzung, weshalb ihre Genauigkeit auch oft in Prozent, abhängig von der zurückgelegten Strecke, angegeben wird. Neben der Streckenlänge ist die Genauigkeit von IMUs auch zeitabhängig, da Gyroskope von einem sogenannten Drift beeinträchtigt sind. Der auch als Kreiseldrift bekannte Fehler ist ebenfalls kumulativ, kann jedoch in Kombination mit den anderen Sensoren verbessert werden [44, 1].

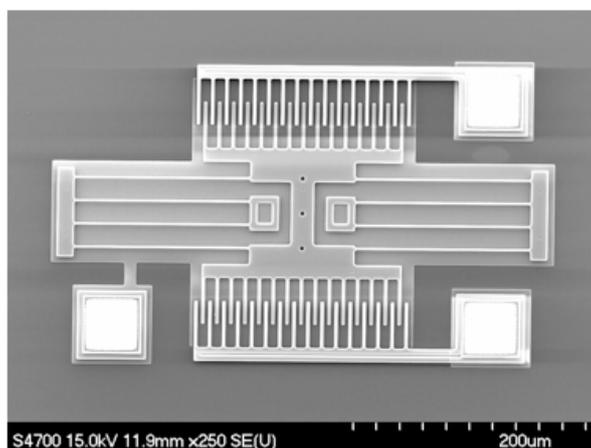


Abbildung 8: Stark vergrößerte MEMS-Struktur [60]

2.2 Ausführungsunterstützung

In dem vorherigen Unterkapitel wurden verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung und Positionierung von Personen vorgestellt, welche hinsichtlich ihrer verwendeten Signalarten differenziert eingeteilt werden konnten. Zudem wurden die jeweiligen Anforderungen für unterschiedliche Anwendungsfelder aufgezeigt. In diesem Unterkapitel soll kurz vorgestellt werden, welche alternativen Darstellungsmöglichkeiten existieren. Nach der Erfassung und anschließenden Bestimmung der Position, unabhängig von der Art der erläuterten Erfassungsmethoden, kann auch hinsichtlich des Umgangs mit der gewonnenen Information unterschieden werden. Grundsätzlich kann diese Information beispielsweise nur im mobilen Gerät verwendet werden, wie es bei der Positionsbestimmung mittels GPS der Fall sein kann, weshalb diese Ansätze allgemein auch als passiv benannt wurden. Bei vielen anderen Anwendungen ist der eigentliche Sinn einer Erfassung jedoch für die Weitergabe von Information an Dritte bestimmt, wie etwa bei Verkehrsanlagen an Überwachungszentren und -einheiten zur Erhöhung der Sicherheit.

Die übliche Darstellung der gewonnenen Information, wie etwa die Positionen einzelner Personen, erfolgt digital auf Bildschirmen. Für Strukturen, wie etwa mehrstöckige Gebäude, werden dazu meist Grundrisspläne, also horizontale Schnitte, der einzelnen Stockwerke verwendet. Für große Objekte bleiben dabei jedoch oft die Möglichkeiten der Positionsänderungen zwischen den einzelnen Geschoßen schwer übersichtlich abbildbar. Um beispielsweise in nur einer Abbildung mehrere Personen in den verschiedenen Stockwerken wiedergeben zu können, finden 3D-Modelle bevorzugt Verwendung. Deutlich komplexere Strukturen, welche keiner einheitlichen und wiederkehrenden Anordnung wie in Gebäuden unterliegen, stellen unterirdische Anlagen dar. Daher eignen sich Darstellungserweiterungen, wie etwa eine 3D-Visualisierung mittels virtueller Realität, besonders zur verbesserten Wiedergabe der Information mit dem Ziel, Einsatz- und Sicherheitskräfte zu unterstützen [35].

Zwei wichtige Vertreter der Ausführungsunterstützung werden folgend kurz vorgestellt, da sie für die im späteren Unterkapitel 4.5 enthaltenen Forschungsprojekte, vor allem aber auch für das Projekt dieser Arbeit, von zentraler Rolle sind. Neben den Begriffen wie *Virtual* und *Augmented Reality*, welche in den kommenden Unterkapiteln beschrieben werden, existieren auch weitere definierte Bezeichnungen in dem sogenannten Realität-Virtualität-Kontinuum, welche jedoch für diese Arbeit weniger von Belang sind und daher nicht genauer erläutert werden.

2.2.1 Virtual Reality

Auch wenn die Technologie zur virtuellen Realität, engl. Virtual Reality (VR), bereits seit den 60er Jahren verfügbar war, so konnte sie sich erst im Laufe des letzten Jahrzehnts zu einem trendigen Thema in der IT-Branche entwickeln. Mitunter ist es der rasanten Entwicklung von Smartphones zu verdanken, durch welche die Technik mittels VR-Headsets für Verbraucher zu einem erschwinglichen Produkt für Unterhaltung und Spiele werden konnte. Verallgemeinert soll VR eine virtuelle Umgebung so gut simulieren, dass die darin befindlichen Nutzer das Gefühl bekommen, sich wirklich in diesem Umfeld aufzuhalten. Wobei frühe Anwendungen, wie etwa für Flugsimulatoren oder militärische Trainings, aufgrund der niedrigen Auflösung und hohen Latenz häufig zu Schwindel und Übelkeit führten. Heutzutage beinhalten moderne Systeme üb-

licherweise sogar zusätzliche Hardware, wie etwa Kopfhörer, und Controller, aber auch haptische Handschuhe und Anzüge bis hin zu mehrdimensionalen Laufbändern, mit dem Ziel dem Nutzer die Möglichkeit zur Interaktion zu steigern und das Erlebnis noch näher an die Realität zu bringen [97].

VR unterscheidet sich deshalb stark von anderen digitalen Anwendungen, da mit herkömmlichen Computerbildschirmen, Mobiltelefonen, aber auch Leinwänden in Kinosälen, der Benutzer jederzeit außerhalb des Bildes blicken und die Realität feststellen kann. Hingegen versuchen Systeme mit VR die Wahrnehmung der realen Umgebung, vor allem visuell, komplett zu überlagern [18].

2.2.2 Augmented Reality

Augmented Reality (AR), zu Deutsch erweiterte Realität, verfolgt hingegen einen anderen Ansatz als VR. AR verwendet Technologien, mittels welcher versucht wird, die Wahrnehmung der Benutzer in der tatsächlichen Welt durch digitale Inhalte zu erweitern. Anders ausgedrückt wird eine digitale Informationsschicht über die reale Umgebung gelegt. Dabei gibt es diese Technologie in unzähligen Formen. Die größte Entwicklung liegt derzeit in den sogenannten Smart Glasses, oder größeren AR-Headsets, welche mit einer Displayprojektion auf der Glasebene die Wahrnehmung für den Anwender in 3D ermöglicht. Genauso existieren jedoch einfachere und weit verbreitete Applikationen, beispielsweise für Smartphones, mit welchen während des Filmens der Umgebung unter anderem auf eine bestimmte Ebene wie etwa auf einem Tisch oder eine aufgeschlagene Seite in einem Buch ein 3D-Modell oder eine Animation dargestellt werden kann [18]. In Abbildung 9 ist dieser Vorgang beispielhaft demonstriert, die gefilmte Umgebung wird durch eine Einblendung eines anschaulichen 3D-Gebäudemodells auf die Ebene des Bauplans erweitert. Rechts nebenan zeigt Abbildung 10 die exemplarische Zusammenarbeit zweier Ingenieure, welche mittels aufgesetzten AR-Headsets gemeinsam an einem holographischen 3D-Modell arbeiten. Wie hier auch angedeutet, erlauben viele AR-Headsets über ihre integrierten Kameras eine Interaktion mit den digitalen Darstellungen durch die Erkennung von Handbewegungen und Fingergesten. Neben dreidimensionalen Hologrammen und Animationen kann AR natürlich auch für banalere Informationen wie Textnachrichten, Wetterdaten oder zur Navigation im Alltag genutzt werden.

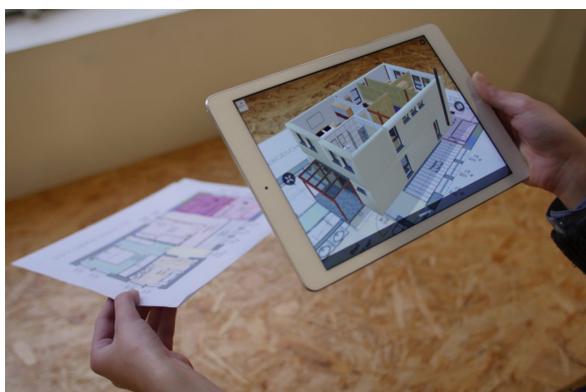


Abbildung 9: Tablet mit AR-Applikation [49]



Abbildung 10: AR-Headset am Arbeitsplatz [4]

3 Stand der Technik

Während zahlreiche und unterschiedliche Methoden zur Erfassung und Positionierung von Personen bereits vorgestellt wurden, soll in diesem Kapitel der aktuelle Stand der Technik näher erläutert werden. Hierbei wird der Fokus jedoch auf bereits etablierte Systeme in unterirdischen Strukturen, sowie speziell im Tunnelbau, gelegt. Anlagen zur Personenerfassung sind von Bedeutung, um schnelle und effiziente Hilfsmaßnahmen für verunfallte Personen aufnehmen zu können. Zusätzlich ist die Personenanzahl sowie deren Aufenthaltsbereiche im Tunnel zu erfassen, um ein rasches Eintreffen der Einsatzkräfte zu ermöglichen, womit die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Rettung erhöht wird [6]. Allgemein kann zwischen Systemen während der Bauphase und jenen in der anschließende Betriebsphase unterschieden werden. Für den laufenden Baubetrieb soll die Lokalisierung der im Tunnel befindlichen Mitarbeiter, sowie etwaige Fahrzeuge und Maschinen, gewährleistet sein. Die Personen und Gerätschaften können dabei mit eigens dafür entwickelten Apparaten ausgestattet werden. Im Gegensatz dazu, sollen beispielsweise im Falle eines Brandes während der Betriebsphase alle im Tunnel befindlichen Personen lokalisiert werden können, für welche die vorherige Aushändigung von eigenen Geräten, zumindest derzeit, nicht in Frage kommt.

Betriebsphase

Eine erneute Unterscheidung kann in der Betriebsphase hinsichtlich der Tunnelnutzungs-Art getroffen werden, weshalb zwischen einem Straßentunnel und einem Eisenbahntunnel differenziert wird. Gleichzeitig können damit auch Unternehmen, die den Tunnelbetrieb der beiden Arten aufrechterhalten, getrennt betrachtet werden. In dieser Arbeit werden die maßgebenden Betreiber der österreichischen Tunnelanlagen erwogen, welche einerseits die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) und andererseits die Österreichischen Bundesbahnen (ÖBB) bzw. die ÖBB-Infrastruktur AG, kurz ÖBB Infra, darstellen.

Der Betreiber von österreichischen Straßentunneln, die ASFINAG, ist verpflichtet die Anweisungen des Straßentunnel-Sicherheitsgesetzes (STSG) zu erfüllen. Das Bundesgesetz gilt für alle Tunnel im Verlauf von Autobahnen und Schnellstraßen in Österreich, welche eine Länge von mehr als 500 m aufweisen. Laut dem Gesetz ist für jeden dieser Tunnel ein Tunnel-Manager zu bestimmen, welcher jedoch nicht nur für den Betrieb, sondern auch schon bereits bei der Planung und dem Bau verantwortlich ist. Unter den umfangreichen Aufgaben dieses Managers zählt auch das Betreiben einer Überwachungszentrale, die verpflichtend für alle Anlagen ab einem Verkehrsaufkommen von mehr als 2.000 Fahrzeugen täglich, im Jahresdurchschnitt ermittelt, je Fahrstreifen geltend wird, wobei eine einzelne Zentrale zur Überwachung mehrerer Tunnel verwendet werden kann. Für alle zutreffenden Tunnelsysteme ist eine Videoüberwachungsanlage zur automatischen Erkennung von Verkehrsstörungen, wie beispielsweise durch stehen gebliebene Fahrzeuge, unter gewissen Voraussetzungen zu betreiben. Zu den Bedingungen zählen unter anderem die Regelung der Qualität von Bildern, mit welcher die Erkennbarkeit von Personen und Fahrzeugkennzeichen ausgeschlossen sein muss. Zudem sind diese 72 Stunden nach dem Aufzeichnungszeitpunkt auch zu löschen. Ausnahmen stellen hierbei jedoch Aufnahmen erheblicher Störungen oder Unfälle dar, welche für die spätere Feststellung rechtlicher Tatsachen oder für technische Analysen bis zu drei Jahre und in besserer Qualität aufbewahrt werden dürfen.

Aufnahmen sollen dabei ausschließlich dem Zweck der Sicherheit des Verkehrs und Tunnelbetriebes dienen sowie vor Zugriffen Unbefugter geschützt sein. Zusammenfassend ist die ASFINAG gesetzlich dazu verpflichtet ihre Tunnelanlagen mit Überwachungskameras auszustatten und mittels Algorithmen zur automatisierten Erfassung von Störungen zu erweitern [9].

Neben der algorithmischen Erkennung von Fahrzeugen zur Identifizierung von Gefahren existieren auch Ansätze, welche sich mit der Erfassung und Lokalisierung von Personen in Tunnelanlagen beschäftigen. So auch das Forschungsprojekt SubMoveCon, welches in Unterkapitel 4.5.4 genauer vorgestellt wird. Ein weiteres bereits in einigen Tunneln der ASFINAG erfolgreich integriertes System stellt das Akustische Tunnelmonitoring (AKUT) dar. Damit sollen anomale Geräusche wie durch einen Aufprallunfall, die Betätigung der Hupe, einen Reifenplatzer, das Zuschlagen von Türen, das Quietschen von Reifen beim Bremsen und sogar Stimmen erkannt werden. Ein anomales Geräusch kann dann neben einem Meldesignal an die Überwachungszentrale automatisch die betroffenen Kameras in der Nähe zuschalten, wodurch eine schnellere Reaktion auf ein eingetretenes Ereignis erreicht wird. Die hochsensiblen Mikrophone sind etwa alle 125 m neben einer Überwachungskamera installiert, wobei eine Integration in das Tunnel-sicherheitskonzept auch völlig unabhängig von anderen Systemen vollzogen werden kann [28]. AKUT ist bereits in 34 Straßentunneln der ASFINAG verbaut und kann vor allem gemeinsam mit der Videobildauswertung, den Brandmeldesensoren und vielen weiteren hochtechnologischen Systemen eine rasche Reaktion im Störfall ermöglichen. In Abbildung 11 ist schematisch eine Unfallerkennung durch das System AKUT, sowie die Signalweiterleitung über die Überwachungszentrale, dargestellt [86].

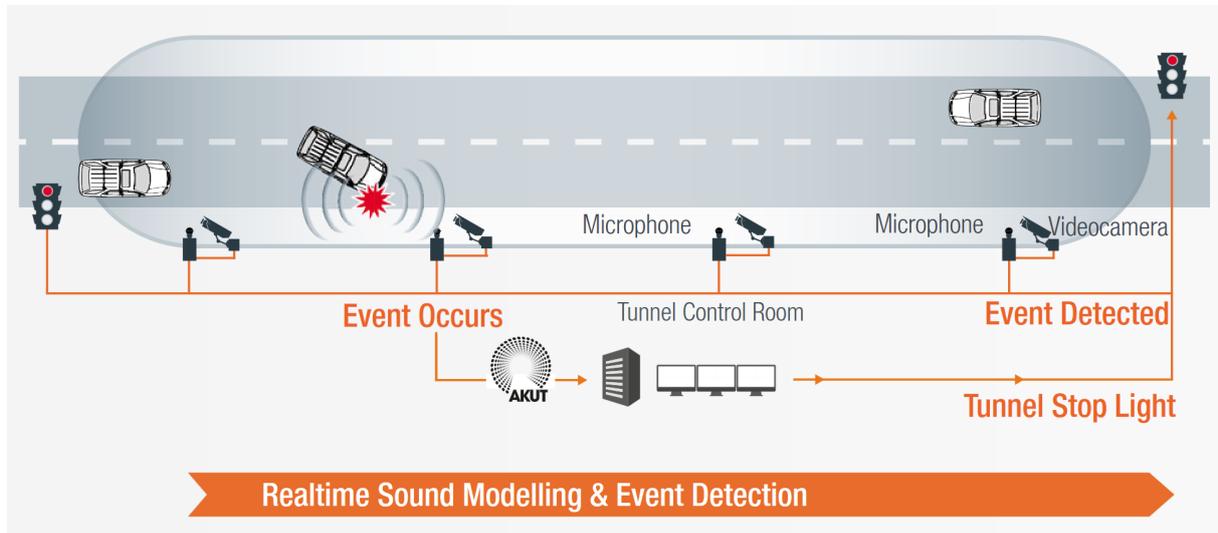


Abbildung 11: Schematische Darstellung AKUT [86]

Im Vergleich dazu kann für Eisenbahntunnel ein anderer Ansatz herangezogen werden, da die Anlagen, im Unterschied zum Straßentunnel, unter anderem nicht von individuellen Fahrzeugen durchquert werden. So ist das Schienennetz der ÖBB Infra flächendeckend mit einer sogenannten rechnergestützten Zugüberwachung ausgestattet. Diese kann sowohl über den Zugfunk als auch über Zugsicherungssysteme erfolgen. Dabei baut das Zugfunksystem weitestgehend auf

den europäischen Standard *Global System for Mobile Communications - Rail(way)* (GSM-R) mit einem eigenen Frequenzbereich. Zusätzlich verfügt das Schienennetz über punktuelle und kontinuierliche Zugsicherungssysteme, namentlich der Punktförmigen Zugbeeinflussung (PZB), und der Linienzugbeeinflussung (LZB). Eine weitere Anlage zur kontinuierlichen Zugsicherung stellt das *European Train Control System* (ETCS) dar, welches besonders bei Strecken mit höherer Verkehrsbelastung zum Einsatz kommt [63]. Neben den genannten Systemen zur Zugüberwachung sind, für den Fall eines in einem Tunnel stehen gebliebenen Zuges, beispielsweise wenn dieser aufgrund eines Ereignisses verlassen werden muss, Querschlagseingänge mit Türkontakten versehen. Mittels dieser Kontakte kann die Öffnung der Notausgangstüren registriert werden, generell sind aber auch die meisten Fluchtwege sowie Querschläge überwacht. Am Beispiel des Koralmtunnels kann allgemein ergänzend erwähnt werden, an vorgesehenen Bereichen wie an Nothaltestellen der Tunnelmitte werden meist Videoüberwachungsanlagen sowie Lautsprechereinrichtungen installiert. Diese zusätzlichen Systeme unterstützen die Einsatzleitung zur verbesserten Lagebeurteilung der Eingriffsmöglichkeiten von den Portalbahnhöfen aus [62].

Abgesehen von den Anlagen der ÖBB werden auch in Wien zahlreiche Tunnelsysteme für den U-Bahn-Verkehr betrieben. Auffallend ist dabei der Ausbau für eine permanente Videoüberwachung der Wiener Linien. Während 2015 noch etwa 2.000 Kameras in den über 100 U-Bahn-Stationen verbaut waren, sind es 2018 bereits 6.100 in den Stationen und Zügen. Insgesamt, also auch in anderen öffentlichen Verkehrsmitteln wie Bussen, zählten die Wiener Linien 2015 rund 8.000 verbaute Kameras, 2018 waren bereits etwa 12.500 im Einsatz [94, 41]. Die flächendeckende Videoüberwachung unterstützt dabei nicht nur die Verfolgung und Aufklärung von Strafdelikten, sondern sorgt auch bei Fahrgästen für ein erhöhtes Sicherheitsgefühl. Seit dem Frühjahr 2021 erhielt die Polizei in einer Vereinbarung mit den Wiener Linien für den Fall einer Gefahrensituation sogar Zugriff auf diese Live-Übertragungen, womit unter anderem ein reibungsloser Einsatz bei Großereignissen ermöglicht werden soll [31].

Bauphase

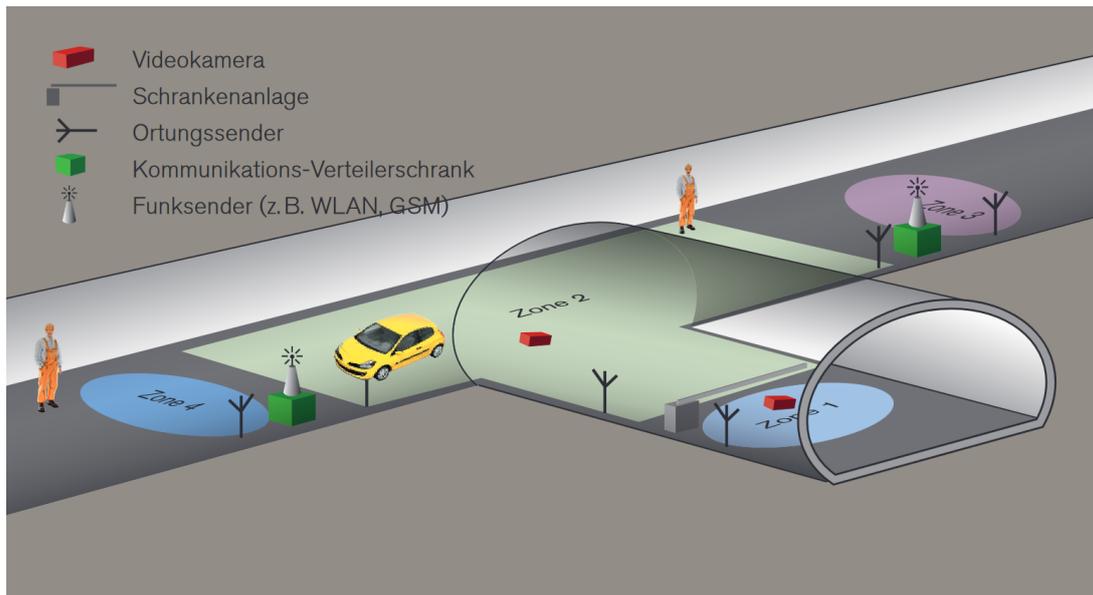
Wie am Anfang dieses Kapitels bereits erwähnt, liegt einer der Unterschiede zwischen den beiden Phasen hinsichtlich der Lokalisierung in der Möglichkeit, Mitarbeiter und Gerätschaften, die den Baubereich betreten, mit speziellen Applikationen auszustatten. Während Videoanlagen mittels Kameras an den Portalen zur Überwachung der Tunneleingänge üblich sind, werden sie im Inneren nur selten eingesetzt, da ihre Verwendung in den Bereichen der noch nicht abgeschlossenen Bautätigkeiten aus mehreren Gründen nicht geeignet ist. Zum einen ist eine Installation an der Außenschale dem Aufbau der darauffolgenden Schichten, bis hin zur fertigen Innenschale, im Weg und zum anderen sind die Kameras kontinuierlichem Staub und Dreck sowie allgemein rauen Bedingungen, beispielsweise starken Erschütterungen aufgrund eines Sprengvortriebes, ausgeliefert. Je näher der Ortsbrust, desto stärker die Belastungen. Unter anderem greifen Unternehmen deshalb auf Systeme zur Lokalisierung von Personen und Gerätschaften im Tunnelbau zurück, die auf vorgestellte Funktechniken wie WLAN, Bluetooth oder RFID beruhen.

Allgemein sind Arbeiten auf Untertagebaustellen einem erhöhten Unfall- und Gesundheitsrisiko ausgesetzt, da sie im Unterschied zu anderen Baustellen zusätzliche Gefährdungen aufweisen.

Folglich werden spezifische Anforderungen an Arbeitssicherheit und Gesundheitsschutz gestellt, welche in den RVS (Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen) 09.01.51 von der Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr (FSV) veröffentlicht wurden. Darin sind auch die Aufgaben- und Verantwortungsverteilungen des Bauherrn geregelt, zu welchen unter anderem die Zugangsmodalitäten und Personenerfassung gehören. Während der Bauphase kann natürlich ein zuständiger Baustellenkoordinator bestimmt werden, welchem dann die Verantwortung aller organisatorischer und sicherheitstechnischer Maßnahmen, wie etwa des Einsatzes von Rettungskräften sowie der Zugangskontrolle und Tunnelüberwachung, obliegt [24, 30].

Die genaue Anzahl der im Tunnel befindlichen Personen ist für die alarmierten Einsatzkräfte essenziell, da nach einer nicht registrierten Person auch nicht gesucht wird. Die strikte Anwendung der Personenerfassungssysteme ist besonders für jene von Belang, welche sich nur selten in der Tunnelanlage aufhalten, wie beispielsweise Subunternehmer sowie Besucher, und daher auch nur wenig Erfahrung in diesem Umfeld haben. Die Systeme der Erfassung untertage können grundsätzlich mechanisch oder elektronisch erfolgen. Unter mechanischen Anwendungen sind beispielsweise Listen, Steckkartensysteme oder Magnetwände zu verstehen, welche häufig bei überschaubaren Tunnelbaustellen bzw. solange der Tunnelfortschritt noch gering ist, angewendet werden. Sie sind besonders kostengünstige Verfahren, benötigen wenig Aufwand sowie Wartung und zeichnen sich durch eine einfache Handhabung sowie die hohe Ausfallsicherheit aus. Die Anfälligkeit für individuelle Nachlässigkeit ist bei mechanischen Methoden allerdings besonders hoch. Für elektronische Systeme ist es notwendig jeder Zutrittsperson ein eindeutig identifizierbares Sendegerät mitzugeben, welches von den im Tunnel platzierten Antennen erfasst werden kann. Der Aufbau dieser Geräte variiert dabei stark herstellerabhängig. Die Antennen werden meist im Tunnel am Portalbereich montiert und erfassen jede ausgestattete Person beim Eintritt oder Verlassen des Tunnels. Je nach Tunnelfortschritt und Projektgröße ist auch die Anbringung mehrerer Antennen sinnvoll, um damit eine genauere Lokalisierung in gewissen Bereichen zu ermöglichen. Allgemein ergeben sich die meisten Probleme für eine erfolgreiche Personenerfassung auch bei den digitalen Systemen bei fehlender Disziplin der Mitarbeiter, beispielsweise durch das Vergessen des Mitführens eines Sendegeräts, weshalb im Idealfall diese Geräte in andere Ausrüstungsgegenstände, wie etwa dem Helm, integriert werden. Zur Erhöhung der Sicherheit gibt es auch zahlreiche Entwicklungen von Systemen zur Montage auf Baufahrzeugen, die Personen um das Fahrzeug frühzeitig erkennen sollen, welche jedoch nicht Bestand dieser Arbeit sind [6].

Beispielhaft können folgende aktuelle Unternehmen genannt werden. Die RK safetec GmbH, ein Tochterunternehmen der österreichisch-schweizerischen Rhomberg Sersa Rail Holding GmbH, bietet zur Überwachung und Kommunikation von Baustellen ein nahezu lückenloses Leistungsspektrum an. Ein umfassendes Produkt, genannt ZOKA (für Zutritt, Ortung, Kommunikation und Alarmierung stehend), bietet RFID-Tags und Badges für eine in Zonen unterteilte Lokalisierung sowie Kommunikationsmöglichkeit mittels WLAN, GSM, TETRA, des Bündelfunks für Einsatzkräfte (Terrestrial Trunked Radio, ursprünglich Trans European Trunked Radio), und analoger Systeme. In Abbildung 12 kann die exemplarische Darstellung einer Ausführung des Ortungssystems von ZOKA mit den Zonenaufteilungen betrachtet werden. Wie ebenfalls ersichtlich sind kritische Stellen wie Querschläge und Kreuzungspunkte meist zusätzlich videoüberwacht. Zu den Referenzen zählen Baulose am Brenner Basistunnel sowie aktuell am Semmering Basistunnel [73]. Ebenfalls am Brenner Basistunnel, allerdings an Baulosen der italienischen Seite, ist aktuell das Unternehmen Advanced Microwave Engineering Srl, kurz AME, zuständig. Die



Zone 2 (1 Person, 1 Kfz), Zone 3 (0 Personen, 0 Kfz), Zone 4 (1 Person, 0 Kfz)

Abbildung 12: Erfassung in getrennten Zonen [72]

Produkte für den Tunnelbau sind dem vorhin genannten System ähnlich, wobei dieses Unternehmen auch Erweiterungen, wie zusätzliche Geräte für die Anwendung an Fahrzeugen zur frühen Erkennung von Personen in der Nähe sowie einer genaueren Abstandsmessung durch die Einführung von UWB-Technologie, anbietet [3]. Ebenso am Brenner Basistunnel an Baulosen der Porr AG im Einsatz ist das System N-Connex, der Matrix Design Group, LLC mit einem Vertriebspartnerschaftsvertrag mit Northern Light Technologies. Das durch Robustheit und Modularität ausgezeichnete System verwendet Ethernet- sowie Glasfaserkabel, über mehrere WLAN-Verteiler, um eine flächendeckende Lokalisierung und Kommunikation für alle WLAN-fähigen Geräte zu ermöglichen. Überdies können zusätzlich RFID-Tags zur Lokalisierungsunterstützung zum Einsatz kommen. Die hohe Datenübertragungsrate erlaubt zudem die Implementierung von Überwachungskameras, welche erneut gerne an kritischen Stellen angebracht werden. Die Positionierung über WLAN erfolgt außerdem nicht mehr nur in Zonen, sondern kann, wenn auch mit einer stark eingeschränkten Genauigkeit, punktuell ermittelt werden [57]. Am dritten Hauptbaulos des Koralmtunnels (KAT3), kam eine Tunnelkommunikation und Sicherheitstechnik eines weiteren Unternehmens zur Anwendung. Die deutsche Gesellschaft aus Göppingen, die Tunnelkom GmbH, bietet Systeme zur Kommunikation, Sicherheitstechnik, Personenerfassung und Alarmierung, Brandmeldung, Anlagensteuerung wie für Tore und Schranken, sowie Videoüberwachung an. Das Unternehmen vertreibt individuelle Tags in verschiedenen Größen, Formen und Eigenschaften, welche neben RFID auch mittels Bluetooth, oder einer Kombination aus beiden, eingesetzt werden können. Die Personen- und Fahrzeugerkennung erfolgt dabei wie bei anderen Systemen in eingeteilten Zonen [91]. Zu weiteren nennenswerten Unternehmen, welche sich auf den Tunnelbau spezialisiert haben, zählen die VMT GmbH, Gesellschaft für Vermessungstechnik, mit ihrem Produkt SCoUT, *Safety Coordination by Underground Tracking*, ehemals HADES, sowie die Durstmüller GmbH für Bergbau- und Drucklufttechnik, mit dem Produkt DULA-Link [14, 95]. Nicht nur im Tunnelbau tätig ist dagegen ein erwähnenswertes

Unternehmen, die insoft GmbH aus Großmehring bei Ingolstadt, welche für Großunternehmen Full-Service Plattform-Lösungen zu Indoor Ortungs- und Tracking-Lösungen sowie Auslastungsanalysen anbietet. Auch dieses Unternehmen stellt verschiedene Ausführungen von Tags zur Verfügung, die je nach Anforderungen mit Bluetooth, UWB, LoRaWAN, einem niederfrequenten Netzwerk (*Long Range Wide Area Network*) für eine höhere Reichweite, oder mit Kombinationen der genannten arbeiten. Beispielsweise existieren aber auch Tags an Armbändern, welche für zur Ortung von Patienten verwendet werden. Im Tunnelbau sind hauptsächlich Systeme auf Basis von Bluetooth im Einsatz, neben den Tag-Sensoren ist die Ortung genauso über die Smartphones der Mitarbeiter möglich, wofür regelrecht eine App installiert sowie Bluetooth eingeschaltet werden muss. In Abbildung 13 ist eine schematische Anwendung des Ortungssystems von insoft in einer Tunnelanlage dargestellt. Die Bildvergrößerung links unten zeigt eine weitere Anwendungsmöglichkeit, das sogenannte Geofencing, zu Deutsch eine geographische Bezäunung, bei welchem bestimmte Gefahrenbereiche auch digital als gesperrt gekennzeichnet werden können, und der Mitarbeiter sowie die Leitstelle bei erfasster Betretung ein Warnsignal erhalten [98].

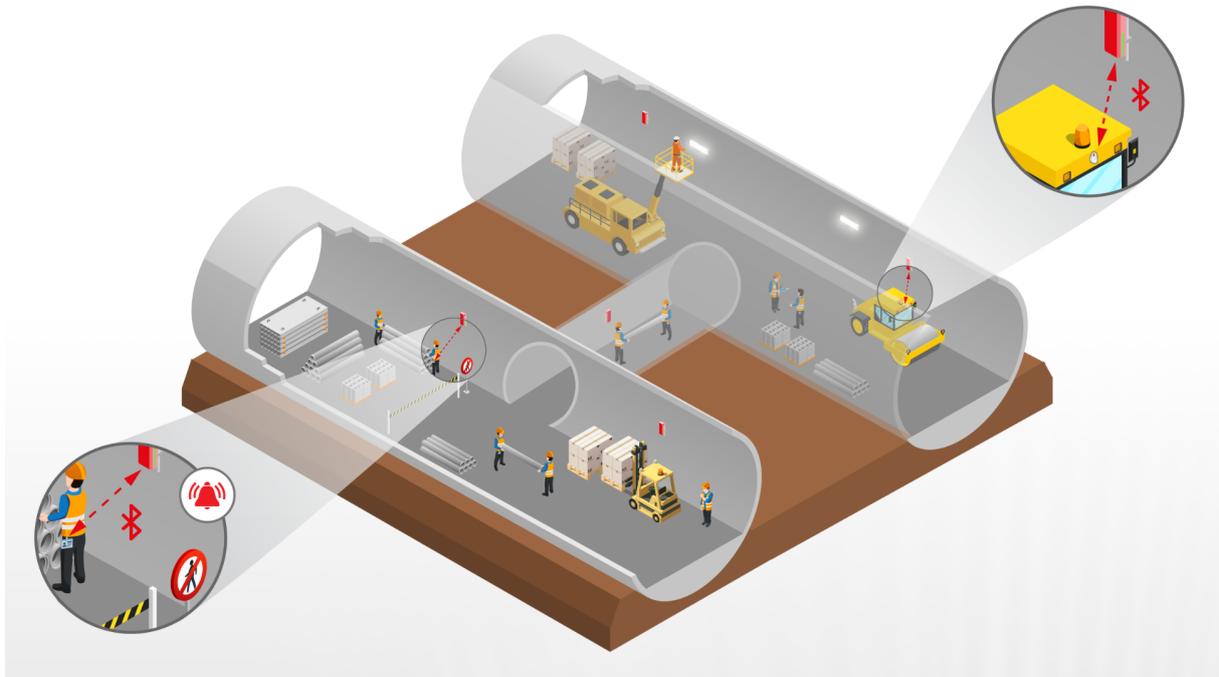


Abbildung 13: Personen- und Fahrzeug-Tracking im Tunnelbau [98]

4 Pilotprojekt RasPos am ZaB

4.1 Entstehung

Wie im vorherigen Kapitel näher gebracht existieren zahlreiche Lösungsmöglichkeiten zur Erfassung und Ortung von Mitarbeitern und Fahrzeugen während der Bauphase. Dabei bieten Unternehmen verschiedene Arten von meist handlichen mobilen Geräten, welche von Personen getragen, im Idealfall in der Schutzausrüstung wie dem Helm integriert, oder an Fahrzeugen montiert sind. Der Vorteil, Individuen zum Mitführen eines eigenen Gerätes verpflichtet zu können, ist für Betreiber öffentlicher Anlagen, wie der ASFINAG oder der ÖBB, zumindest derzeit, nicht denkbar. Stattdessen versucht einerseits die ASFINAG mit einer hohen Dichte an Überwachungskameras und anderen Anlagen, wie etwa AKUT, zur Verbesserung der Sicherheit beizutragen. Dabei werden unter anderem für das Videomaterial Algorithmen zum automatischen Erfassen von Fahrzeugen und der Erkennung von Ereignissen angewandt. Zur algorithmischen Erfassung und Lokalisierung von Einzelpersonen mittels Videomaterial, welche beispielsweise bei einem Brandfall aus den Fahrzeugen zu Flucht- und Rettungswegen aufbrechen, sind derzeit Systeme in Entwicklung, wie das bereits genannte Forschungsprojekt SubMoveCon, welches im späteren Unterkapitel [4.5.4](#) genauer vorgestellt wird. Andererseits versuchen die ÖBB sowie andere Betreiber öffentlichen Bahnverkehrs ihre Gleisfahrzeuge durch die Ausstattung jederzeit, auch in untertägigen Anlagen, lokalisieren zu können. Da durchaus im Falle eines Ereignisses diese Fahrzeuge ebenso verlassen werden müssen, sind vor allem in dafür vorgesehenen Nothaltestellen, Flucht- und Rettungswegen, aber auch in allgemein stark frequentierten Bereichen, wie U-Bahnstationen, ebenfalls dichte Überwachungsanlagen angebracht. An und für sich könnten die identischen algorithmischen Systeme, wie sie auch im Straßentunnel in Forschung sind, auch an diesen Videoüberwachungsanlagen eingesetzt werden.

Im Zuge dieser Diplomarbeit wurden die Projekte der Forschungsgruppe NIKE mit besonderem Augenmerk auf die Personenerfassung begleitend dokumentiert. Die einzelnen Projekte, welche im Unterkapitel [4.5](#) gesondert vorgestellt werden, wurden Mitte Juli 2022 erstmalig in Kombination ausgeführt. Bereits während vorheriger Recherchen wurden Vor- und Nachteile einzelner vorhandener Systeme zur Erfassung und Positionierung von Personen erkannt, wie sie unter anderem auch im Unterkapitel [2.1.2](#) bereits erwähnt wurden. So sind allgemein auf Bildverarbeitung basierende Systeme dem Nachteil einer verdeckten Sicht ausgesetzt, etwa wenn eine Person sich noch in einem Fahrzeug oder sich hinter einem Objekt befinden würde. Noch gravierenderen Einfluss auf Systeme dieser Art im optischen Bereich haben dichte Aerosole, so kann der im Falle eines Fahrzeugbrandes entstandene Rauch die Systeme in gewissen betroffenen Bereichen unbrauchbar machen. Besser in Konditionen mit dichten Aerosolen funktionieren Thermalbildanlagen, also Kameras im Infrarotbereich, da die niedrigeren Frequenzen des elektromagnetischen Spektrums den dichten Rauch kaum beeinflusst durchdringen können. Allgemein sind Infrarotanlagen in Tunnelsysteme jedoch kaum verbreitet, beispielsweise verwendet die ASFINAG Wärmebildkameras vor den Tunnelportalen, um frühzeitig stark erhitzte Teile, wie Motoren, Turbolader und Bremsen, von Lastkraftwägen erkennen und deren Einfahrt verhindern zu können [\[5\]](#).

Die Erforderlichkeit eines eigenen Gerätes der meisten Erfassungsmethoden auf Funkbasis, sowie die benötigte hohe Kameradichte, mit dem zusätzlichen Nachteil bei schlechten Sichtverhältnis-

sen, gaben den Anstoß für die Idee zu dem Forschungsprojekt dieser Arbeit namens RasPos. Die Abkürzung leitet sich von der Verwendung von Raspberry Pis zur Positionsbestimmung ab. Ein Raspberry Pi ist ein günstiger und fast Kreditkarten kleiner Computer, welcher im nächsten Unterkapitel [4.2](#) genauer beschrieben wird. Weltweit nimmt die Zahl der volljährigen Smartphone-Nutzer zu und lag im Jahr 2021 sogar bei über 80 % [\[83\]](#). In manchen Staaten ist der Anteil auch deutlich höher, so liegt dieser in den USA bei etwa 85 %, in Deutschland sogar bei 89 % und in Österreich bei 87 % [\[69, 82, 81\]](#). Zwischen einem Smartphone und dem Begriff Handy muss im Sinne dieser Statistiken, welche nur Smartphones berücksichtigen, deshalb unterschieden werden, da etwa auch heute noch manche einfachen Mobiltelefone keine Internetfunktion besitzen, weshalb diese auch nicht über eine Kommunikation mittels WLAN geortet werden könnten. Trotzdem könnte die Fähigkeit, einzelne Smartphones in einer bestimmten Umgebung zu detektieren, dazu beitragen, fast 90 % der Menschen darin zu lokalisieren.

Zahlreiche wissenschaftliche Arbeiten existieren bereits, die sich mit der Lokalisierung in Innenräumen und sogar mit der Ortung in unterirdischen Strukturen wie Bergwerksstollen befassen, aber dazu benötigen die meisten einen speziellen Sender, erfordern die Übertragung expliziter Signale oder versuchen durch komplexe Antennenanordnungen eine deutlich höhere Ortungsgenauigkeit zu erreichen, was in diesem Fall nicht notwendig wäre [\[11, 76, 37, 38\]](#). Zu den Anforderungen des Systems in dieser Arbeit zählt jedoch, nur Signale bzw. Informationen zu verwenden, die von den individuellen getragenen Geräten ohnehin ausgesendet werden. Anders ausgedrückt, soll die Ortung eines Gerätes erfolgen, ohne Änderungen an dessen Hardware oder Software vornehmen zu müssen. Dazu können unterschiedliche, in handelsüblichen Geräten verwendete, Funksignalarten herangezogen werden, wie etwa WLAN, Bluetooth oder GSM. Beispielsweise senden WLAN-Chips, welche in Smartphones aber auch in allen anderen WLAN-fähigen Geräten verbaut sind, standardmäßig kontinuierlich sogenannte Probe Requests. Signale dieser Art dienen allgemein zur verbesserten Kommunikation zwischen Netzwerken, als einfaches Beispiel, kann sich damit ein Gerät schneller automatisch mit einem Router verbinden, dessen Signal und Bandbreite gerade am stärksten zur Verfügung stehen. Wie in Unterkapitel [2.1.1](#) bereits vorgestellt, verfügen Methoden mittels Bluetooth eine nur geringe Reichweite von einigen Metern, weshalb sie sich neben anderen Nachteilen weniger für die Anwendung in dieser Diplomarbeit eignen würden. Die ebenfalls genannte Methode einer Ortung mittels GSM würde zwar über eine herausragende Reichweite verfügen, lässt jedoch aufgrund der lizenzierten Frequenzbänder weniger Spielraum für Forschungszwecke zu. Die Vielzahl der vorhandenen Literatur sowie Open-Source-Software für die Lokalisierung von mobilen Geräten über WLAN, mittels der bereits genannten Probe Requests, waren Mitgrund für die Auswahl zur Verwendung in dieser Arbeit.

Wie in Unterkapitel [2.1.1](#) vorgestellt, kann eine auf Funktechnik basierende Methode zur Positionierung mittels unterschiedlicher Messparameter erfolgen. Auch das gewählte System über WLAN-Probe-Requests erlaubt viele verschiedene Ansätze zur Lokalisierung des Signalursprungs. Dabei erfordern richtungsbasierte Parameter wie AOA (Angle of Arrival) aufwändigere Hardware wie Antennenarrays oder entfernungs-basierte Parameter wie TOA (Time of Arrival) eine anspruchsvolle Zeitsynchronisation. Dagegen sind auf die Signalstärke basierte Systeme, mittels RSSI (Received Signal Strength Indicator), besonders durch ihre Einfachheit von Vorteil, auch wenn allgemein aufgrund der starken Einflüsse der Umgebung die Genauigkeit schwächer als bei den vorhin genannten Methoden ausfällt. Besonders die Fülle von Literatur und öffentlich

verfügbarer Software waren ausschlaggebend für die Auswahl eines auf RSSI-basierten Systems im Zuge dieser Diplomarbeit. Der RSSI beschreibt die gesamte empfangene Signalleistung in Milliwatt und wird üblicherweise in der logarithmischen Skala von Dezibel-Milliwatt (dBm) angegeben. Typische Werte der negativen Skala sind dabei über -60 dBm für sehr starke und unter -100 dBm für sehr schwache Signalniveaus [78]. Lokalisierungssysteme mittels RSSI basieren auf der Abnahme der Signalstärke mit zunehmender Entfernung zwischen Sender und Empfänger. Dieser Signalabfall ist jedoch zudem stark von der Ausgangssignalstärke, in diesem Fall von dem Wi-Fi-fähigen Gerät, sowie von dessen Ausrichtung und Umgebung abhängig. Abbildung 14 aus Referenz [37] zeigt in (a) Unterschiede, wenn ein Smartphone in Richtung des Empfängers (*Facing the AP*) oder entgegen (*Back to the AP*) gehalten wird, während sich die tragende Person bis auf 50 m entfernt bewegt. In (b) wurde das Smartphone gehalten, während sich die Person einmal um die eigene Achse drehte. Unter anderem wurde aufgrund dieser Ergebnisse, welche den starken Einfluss der Ausrichtung einer Smartphone tragenden Person auf die Signalstärke zeigen, entschieden, die Lokalisierungsgenauigkeit im Zuge dieser Diplomarbeit hauptsächlich in Bereichen bzw. Zonen zu verfolgen.

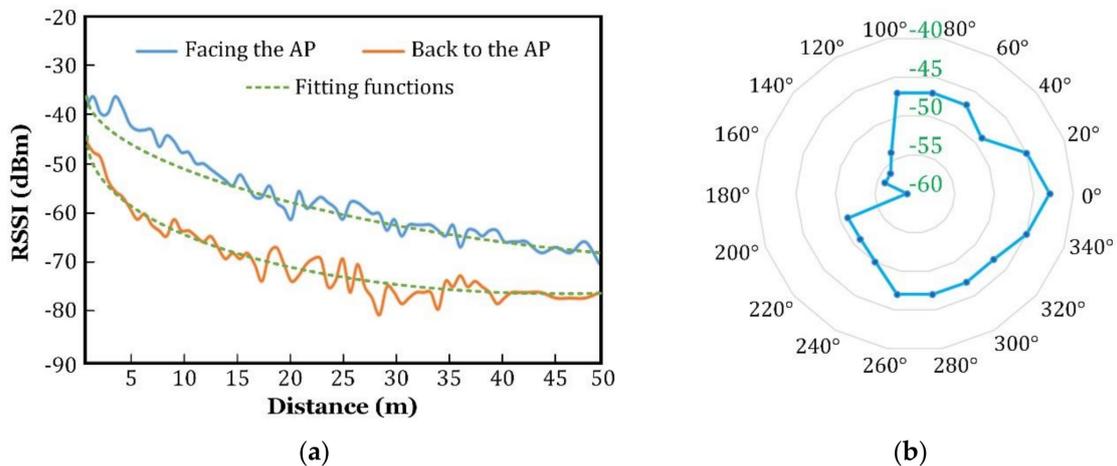


Abbildung 14: Einfluss der Ausrichtung eines Smartphones auf die Signalstärke [37]

Neben der messbaren Signalstärke, dem RSSI, beinhalten die bereits vorgestellten Probe Requests von WLAN-Geräten auch Informationen für den Netzwerk- bzw. Verbindungsaufbau, wie die individuelle MAC-Adresse (*Media Access Control*) zur eindeutigen Identifikation, aber auch weitere Daten wie beispielsweise über den Gerätetyp und Hersteller [93]. Allgemein sind Probe Requests im 802.11-Standard des *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), des weltweiten Berufsverbands aus den Bereichen Elektrotechnik und Informationstechnik, als aktiver Mechanismus definiert, die den WLAN-Verbindungsprozess beschleunigen. Die kontinuierliche Aussendung erfolgt dabei an einigen Geräten im Durchschnitt einmal pro Minute, wobei die Intervalle stark vom jeweiligen Hersteller, Modell, Betriebssystem und den Einstellungen abhängen [23]. Mit dieser Gegebenheit lässt sich jedoch auch keine kontinuierliche Positionsbestimmung eines bewegten Senders ermöglichen, stattdessen ist nur eine punktuelle Lokalisierung möglich. Eine Abschätzung des tatsächlich hinterlegten Bewegungspfades, kann nur im Nachhinein erfolgen, indem die bestimmten Positionspunkte in den Abständen der Zeitintervalle verbunden werden.

4.2 Hardware und Software

Als Empfänger, zum Auslesen der Probe Requests, können prinzipiell die meisten Geräte mit herkömmlichen WLAN-Chips verwendet werden, wobei häufig eine eigene Software installiert wird, welche die WLAN-Chips in den sogenannten Monitor-Modus umstellt. Mit diesen können die ansonsten nur im Hintergrund der Netzwerkprogramme laufenden Kommunikationsanfragen aufgezeichnet und ausgelesen werden. Bei der in dieser Arbeit verwendeten Software handelt es sich um ein leicht modifiziertes Python-Skript aus einem Beitrag auf GitHub (<https://github.com>), einem Dienst zum Veröffentlichen von Software-Entwicklungsprojekten, welches unter dem Betriebssystem Linux läuft. Das Programm wurde, wie in der Referenz, auf Raspberry Pis installiert und konnte mittels zusätzlicher USB-WLAN-Adapter im Monitor-Modus ausgeführt werden [79]. Der Raspberry Pi ist ein günstiger, kreditkartengroßer Computer, der 2012 im Computerlabor der Universität Cambridge entwickelt wurde [8]. Aufgrund des geringen Stromverbrauchs können Pis auch mittels einer Batterie betrieben werden, weshalb sie als tragbares Gerät zusätzlich für die Verwendung in dieser Arbeit geeignet sind. In Abbildung 15 ist eines der verschiedenen Modelle der Raspberry Pi Serie mit Anschlüssen für USB, Strom, LAN, etc. zu erkennen. Die Versuche wurden auf den Raspberry Pis des Verfassers durchgeführt, auf einem Pi 2 Modell B V1.1 sowie einem Pi 3 Modell B+. Zusätzlich wurden Versuche auch auf dem Laptop des Autors ausgeführt, wobei Linux mit einer virtuellen Maschine gestartet wurde, um die Installation auf einem Windows PC zu ermöglichen. Für alle Systeme, Laptop und Pis, wurden USB-WLAN-Adapter für das Monitoring der Probe Requests verwendet.



Abbildung 15: Raspberry Pi [96]

Als Sender wurden drei Smartphones des Autors verwendet, ein Xiaomi Redmi Note 3, ein Asus Zenfone Max Pro M1 sowie ein Realme GT Master Edition. Wie auch in Referenz [50] beschrieben, erfolgt die Aussendung der Probe Requests auffallend öfter, wenn die Mobiltelefone nicht mit einem Netzwerk verbunden sind. Für noch kürzere Sendeintervalle, bzw. für eine gezielte Steuerung, wurde außerdem einfach das WLAN in den Einstellungen an- und ausgeschaltet.

Die verwendete Software von Referenz [79] erlaubt zahlreiche Einstellungen, wie die Anpassung der Dauer eines Scan-Vorganges oder die Ausführung in Dauerschleife. Damit in einer Umgebung mit vielen verschiedenen WLAN-fähigen Geräten nur Smartphones gezählt werden, hat die Software ebenfalls bereits eine Funktion integriert. Hierzu wird die aus der Probe Request

erhaltene MAC-Adresse mit der öffentlichen Datenbank des IEEE mit dem *Organizationally Unique Identifier* (OUI) verglichen. Die ersten sechs Stellen der MAC-Adresse sind herstellerspezifisch, wodurch über eine erkannte OUI auch auf die Art des Gerätes geschlossen werden kann. Aus datenschutzrechtlichen Gründen wird jedoch vor allem in neueren Geräten die originale MAC-Adresse in den Probe Requests durch eine sogenannte randomisierte, also zufällig angeordnete, MAC-Adresse ersetzt. Ein Großteil der empfangenen MAC-Adressen können daher keinem eindeutigen Gerät mehr zugeordnet werden, weshalb die Software verändert wurde, um eine Personenschätzung nicht nur über eindeutig identifizierte Smartphones zu ermitteln.

Auf das Ergebnis hat auch die einstellbare Dauer des Scan-Vorganges großen Einfluss, da in einem kurzem Zeitfenster weniger Probe Requests fallen und daher auch kaum Geräte erkannt werden. Bei einer sehr lang gewählten Scan-Zeit können zwar viel mehr Geräte erkannt werden, jedoch auch auf Kosten der Informationsaktualität, da beispielsweise nur alle drei Minuten die aktuelle Anzahl wiedergegeben wird. Nach mehreren Versuchen wurde die Dauer eines Scans meist auf 90 Sekunden gestellt, da damit ein guter Kompromiss zwischen Anzahl der erkannten Geräte und Aktualität der Information getroffen wurde. Vor allem bei Versuchen mit sehr langen Messzeiten und einer damit meist entsprechend hohen Anzahl empfangener MAC-Adressen, fiel eine unerwartet lange Verzögerung für die Berechnung der Personenanzahl auf. Dabei benötigte das System mit der geringsten Rechenleistung, am Raspberry Pi 2, erwartungsgemäß am längsten. Da während des Rechenvorganges ausgesendete Probe Requests nicht empfangen werden können, würden somit gewisse MAC-Adressen im Programm unberücksichtigt bleiben. Aus diesem Grund wurde versucht eine sogenannte Threading Methode anzuwenden, mittels welcher mehrere Programmschleifen unabhängig voneinander laufen können. Damit kann eine fast lückenlose Scan-Periode vollzogen werden, während die Auswertung der gescannten Daten simultan verläuft. Auch die im Unterkapitel [4.4](#) noch detailliertere Beschreibung der Implementierung in ein Visualisierungsprogramm sorgte aufgrund einer langsamen Übertragung der Daten zum Server für zusätzliche Verzögerungen von mehreren Sekunden, weshalb eine Threading-Ausführung auch hierfür vorgesehen war. Der für die Anwendung dieser Diplomarbeit verwendete Python-Code ist dem Anhang beigefügt. Zum Zeitpunkt der Ausführungen waren die Methoden mit Threading jedoch noch nicht erfolgreich implementiert, weshalb die angeführte Version auch noch keine unabhängigen Programmschleifen beinhaltet.

4.3 Versuche zur Reichweite

Vor den Ausführungen in der Tunnelanlage wurden Versuche zur Reichweite der Probe Requests durchgeführt. Alle Untersuchungen sowie die anschließende Ausführung fanden in den Tunnelsystemen des Zentrums am Berg (ZaB) am steirischen Erzberg statt. Ein Übersichtsplan von der Anlage am ZaB ist in Abbildung [16] dargestellt. Die beiden Straßentunnel sind links oben im Bild beginnend in dunkelblau eingezeichnet und werden in Straßentunnel Nord (obere Röhre) und Süd (untere Röhre) unterschieden. Vom Portal beginnend verläuft bis etwas weiter als zum begehbaren Querschlag 1 (GQ-1) die Innenschale in gelb markiert, und ist demnach, unter anderem mit einer Zwischendecke, voll ausgebaut. Der restliche Straßentunnel Nord und Süd ist nur im Teilausbau gefertigt, dementsprechend ist keine Innenschale, sondern nur die tragende Spritzbetonschicht aufgebracht. Die Regelquerschnitte der beiden Arten des Straßentunnels Nord aus der Referenz [26] sind im Anhang der Diplomarbeit beigegefügt. Links unten im Bild beginnen die beiden Eisenbahntunnel Ost und West in hellblau eingezeichnet, welcher ebenfalls über einen

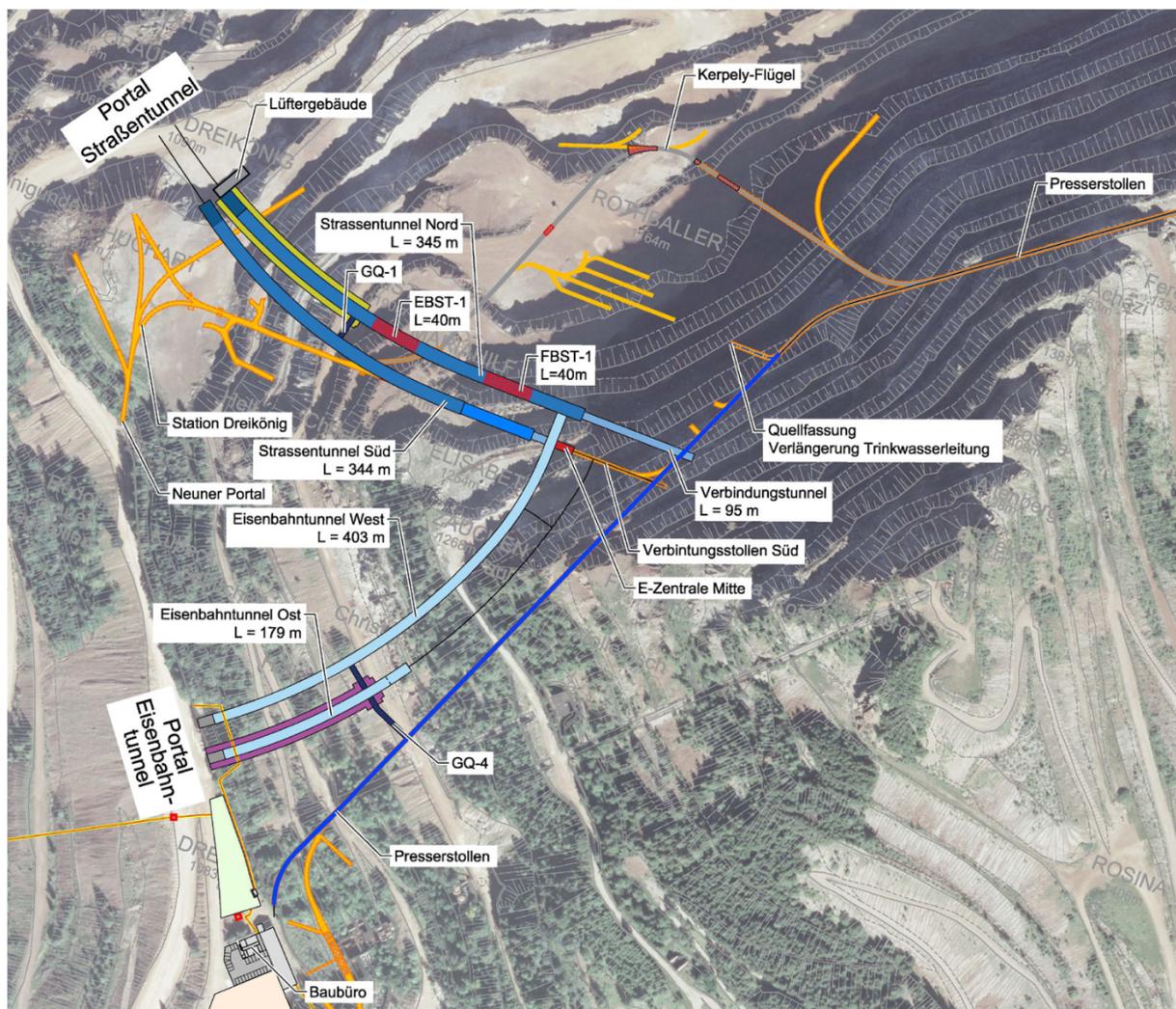


Abbildung 16: Übersichtsplan Zentrum am Berg [27]

GQ-4 verbunden sind. Der Eisenbahntunnel Ost ist kürzer und zum Großteil im Vollausbau, also mit Innenschale, gefertigt, während die Weströhre nur einschalig ausgeführt, aber bis hin zu den Verbindungskreuzungen mit den Straßentunneln reicht. Auch die Regelquerschnitte der Eisenbahntunnel aus der Referenz [26] sind dem Anhang beigefügt. Die Ausführung von Ras-Pos, in Kombination mit weiteren laufenden Forschungsprojekten am ZaB, fand ausschließlich im Bereich des Straßentunnels Nord statt. Mehrere verschiedene Versuche zur Reichweite wurden ebenfalls im Nordtunnel, sowohl im Bereich der Innenschale als auch in Bereichen mit nur Spritzbeton als Ausbau, ausgeführt. Weiters war die Durchdringung der Signale von verschiedenen Türanlagen der beiden begehbaren Querschläge von Interesse, weshalb auch dort Versuche vorgenommen wurden. Fortlaufend werden in diesem Kapitel die durchgeführten Versuche kurz vorgestellt und aus Gründen der Lesbarkeit auch deren Ergebnisse direkt angeführt. In Kapitel 5 werden sie daher nur beiläufig genannt.

4.3.1 Spritzbetonschale

Im Straßentunnel Nord wurden Versuche mit zwei Smartphones des Autors durchgeführt, die in Unterkapitel 4.2 vorgestellten Modelle von Xiaomi sowie Asus. Dafür wurde der Laptop als Empfangsgerät mit einem USB-WLAN-Adapter nahe dem GQ-1 aufgestellt und der Python-Code in Dauerschleife ausgeführt. Wie in Abbildung 17 ersichtlich wurden in 25 m Schritten bis auf 200 m Messungen zur Signalstärke durchgeführt. 200 m unter anderem deshalb, da sich in diesem Bereich bereits die Kreuzung des Eisenbahntunnels befindet, bzw. sich auch der Querschnitt im Verbindungstunnel zum Presserstollen deutlich verringert. Die als Punkte dargestellten Messergebnisse stellen den Mittelwert von mindestens 9 bzw. bis zu 19 empfangenen Signalen dar. Die Anzahl variiert aufgrund verschiedener Einflüsse, wie der erklärten Berechnungszeit zwischen

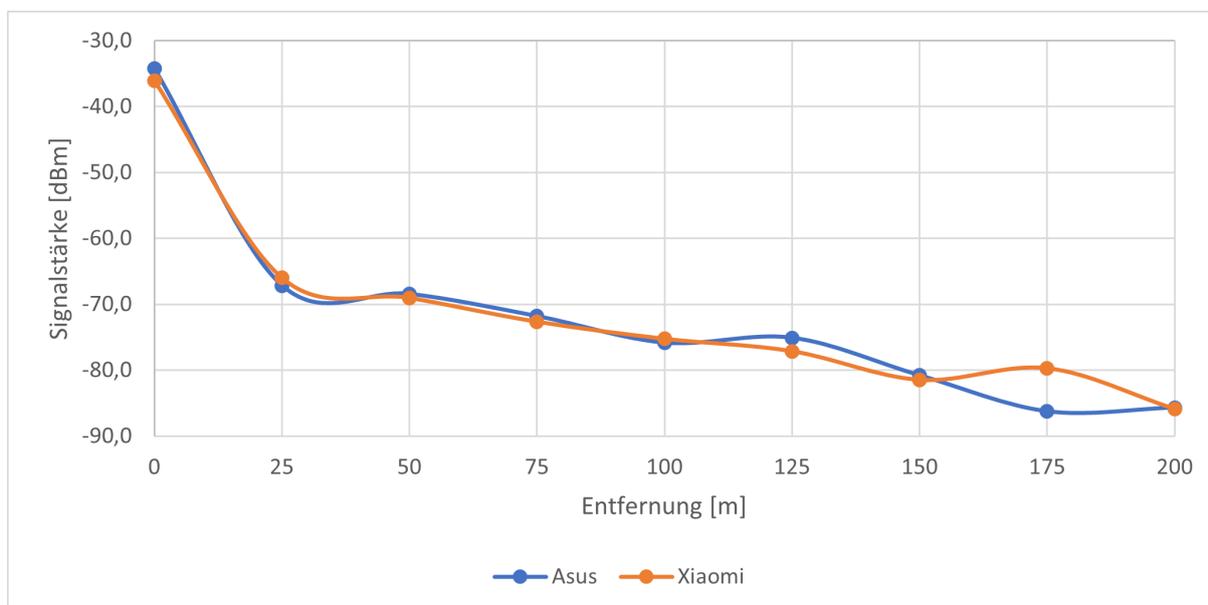


Abbildung 17: Messergebnisse zur Reichweite im Spritzbetonbereich des Nordtunnels

den Scanvorgängen oder unterschiedlichen Software und Hardware der beiden Geräte. Die gemessenen Signalwerte streuen dabei stark mit etwa 10 dBm, vereinzelt auch 15 dBm, an den jeweilig dargestellten Mittelwerten. Wiederholend erklärt, werden Signalstärken meist in dBm (Dezibel Milliwatt), einer logarithmischen Skala angegeben, wobei Netzwerke nur im negativen Bereich liegen, da sie für positive Werte nicht stark ausgestrahlt werden. Trotz der Schwankungen nehmen die Signalstärken wie erwartet besonders in den ersten Metern Entfernung stark ab und unterscheiden sich gering zwischen den beiden Geräten. Bemerkenswert hingegen ist die hohe Reichweite, wobei die damit verglichene Reichweite in Innenräumen deutlich mehr durch Stör- und Dämpfungselemente wie Wände beeinträchtigt wird.

4.3.2 Innenschale

Ebenfalls in der Nähe von GQ-1 startend wurde der nächste Versuch zur Reichweite in der Nordröhre des Straßentunnels durchgeführt, diesmal jedoch im Bereich der Innenschale. Auch hier wurden mit denselben beiden Smartphones im Abstand von 25 m WLAN-Probe-Requests ausgesendet. Der Innenschalenbereich ist jedoch nur etwa 150 m lang, weshalb die Messungen nach Erreichen des Portals beendet wurden. In Abbildung 18 können erneut die Mittelwerte der Signalstärken in Abhängigkeit von der Entfernung betrachtet werden. Auch die Messungen in der Innenschale zeigen starke Abfälle der Werte innerhalb weniger Meter.

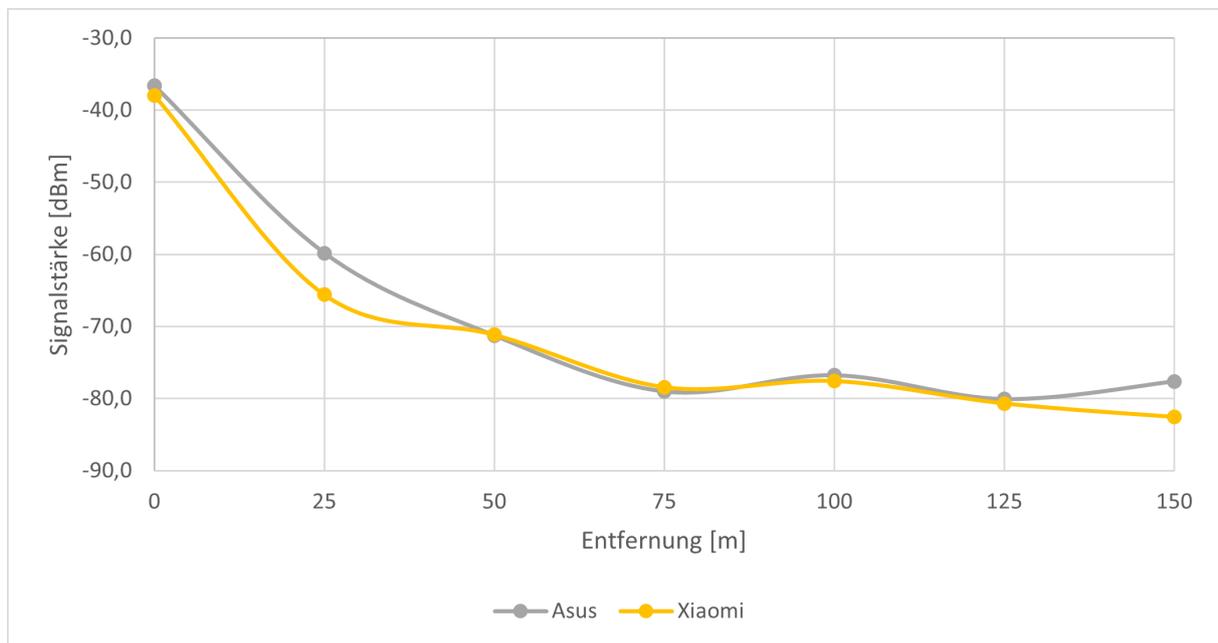


Abbildung 18: Messergebnisse zur Reichweite im Bereich mit Innenschale des Nordtunnels

4.3.3 Vergleich Spritzbeton zu Innenschale

In Abbildung 19 sind nun die Werte der beiden vorherigen Messungen in einer Darstellung zusammengeführt, womit sich die Signalstärken aus Abb. 18 sowie jene aus Abb. 17 besser vergleichen lassen. Die Abkürzung SB bezieht sich auf die Messungen im Bereich des Spritzbetons und I für die Versuche unter Einfluss der Innenschale. Abgesehen von den Mittelwerten an der Messung mit 25 m Abstand, sowie erneut bei 150 m, fallen die Signalstärken bei den Versuchen mit Innenschale teilweise deutlich niedriger als bei jenen im Spritzbetonbereich aus. Die deutliche Wellenbewegung der Signalstärken bei den Versuchen mit Innenschale könnten jedoch auch aufgrund der aufgestellten Fahrzeuge entstanden sein. So könnte der aufgestellte Bus zu Übungszwecken der Feuerwehr Auslöser für die starke Dämpfung bei 75 m Entfernung sein. Wie im vorherigen Unterpunkt erwähnt, endet die Messung im Innenschalenbereich bei 150 m, da dann bereits das Portal erreicht wurde. Auch wenn die Darstellung eine Differenz zwischen den Signalstärken in Bereichen mit Innenschale zum Vergleich mit denen im Spritzbeton vermuten lässt, ist aufgrund der generell stark ausfallenden Schwankungen der RSSI-Werte nur schwer ein sinnvoller und allgemeingültiger Differenzwert zu bestimmen.

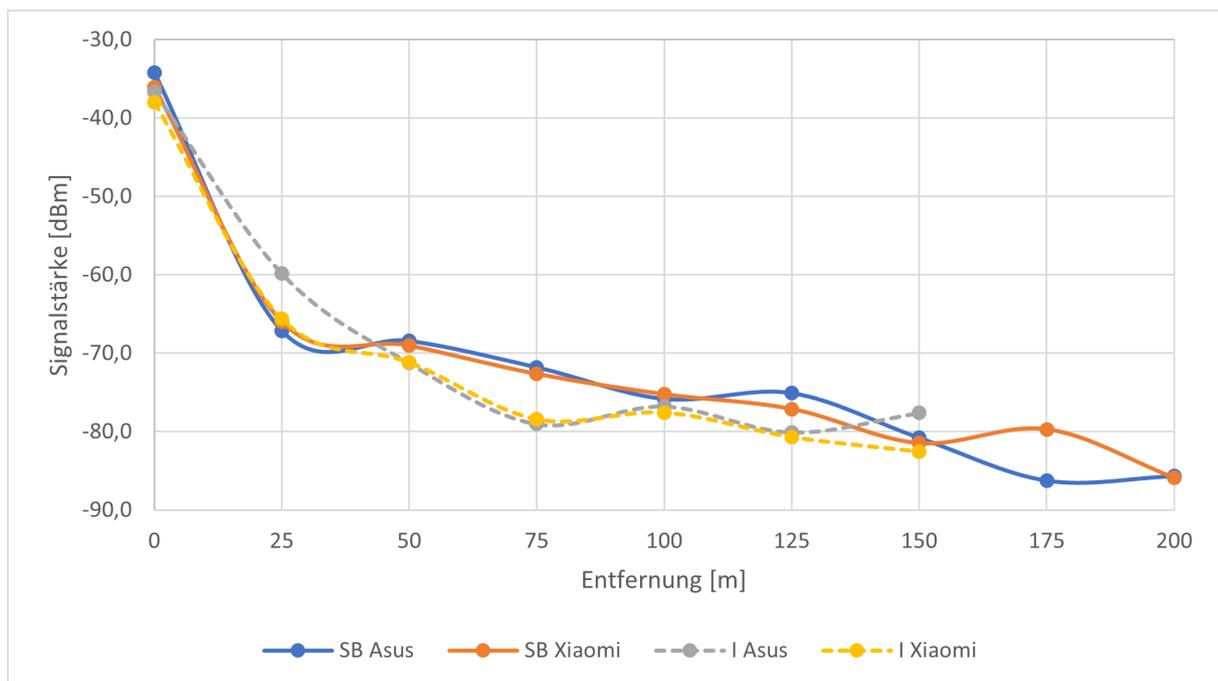


Abbildung 19: Messergebnisse zur Reichweite im Nordtunnel, Bereiche mit Spritzbeton (SB) im Vergleich zur Innenschale (I)

4.3.4 Dämpfung eines Körpers

Auch von Interesse war die mögliche Einwirkung eines Körpers auf die Signalstärke, wenn dieser sich zwischen Sender und Empfänger befindet. Dies soll beispielsweise das Tragen eines Smartphones nahe am Körper simulieren. Das Experiment stellt einen Extremfall dar, bei welchem versucht wird, das Sendegerät in die genau entgegengesetzte Richtung zu positionieren, da damit die stärkste Dämpfung erwartet wird. Die Abbildung 20 zeigt den Einfluss eines Körpers, nahe dem Sender und zwischen Sender und Empfänger, auf die Signalstärke. Der Versuch fand nur in dem mit Spritzbeton ausgekleideten Straßentunnel Nord statt, wobei die Messung lediglich bis 100 m durchgeführt wurde. Zum Vergleich sind die ursprünglichen Mittelwerte im Spritzbetonbereich in die Abbildung hinzugefügt und mit SB in der Legende gekennzeichnet, während die bewusst herbeigeführten gedämpften Messungen mit K markiert sind. Dabei wurden die ersten Versuche nicht wie sonst direkt am Empfänger, sondern zur vereinfachten Aufstellung mit einem Abstand von 2 m begonnen, wobei auch eine zusätzliche Position bei 12,5 m eingenommen wurde. Die gedämpften Mittelwerte zeigen ähnlich wie in Abbildung 14 aus der Referenz 37 stellenweise eine Signalminderung von über 10 dBm, wodurch die Auswirkungen der Ausrichtung einer Person auf die Genauigkeit der Lokalisierungsmethode mittels RSSI bestätigt werden kann.

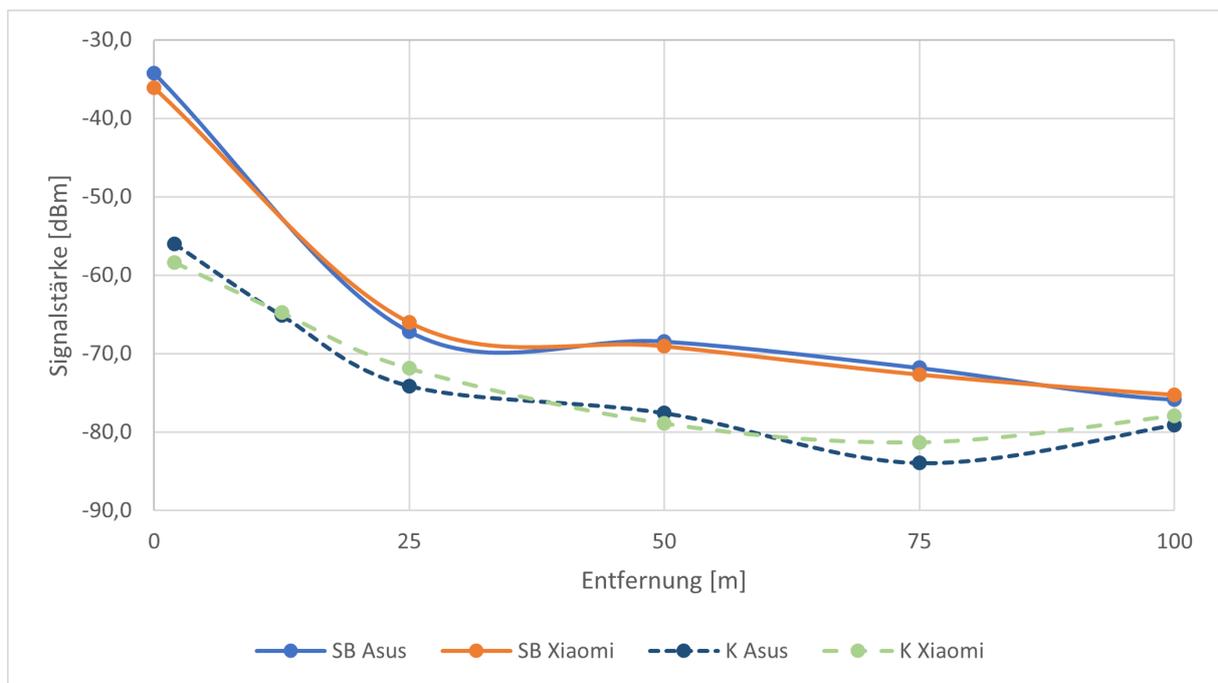


Abbildung 20: Messergebnisse zur Reichweite mit Körper nahe am Sender zwischen dem Empfänger (K) im Vergleich zu vorherigen ungedämpften Messungen (SB)

4.3.5 Signalstärke aus einem Fahrzeug

Nach den Untersuchungen bezüglich der möglichen Signalminderung durch einen Körper, wurden weiterführende Messungen aus einem Fahrzeug vorgenommen, womit der Lokalisierungsversuch einer in einem PKW befindlichen Person simuliert wurde. Das ausgewählte Fahrzeug dient ebenfalls wie viele weitere zu Übungs- und Lehrzwecken der Feuerwehr und befand sich im Spritzbetonbereich des Straßentunnels Nord. Der Sender, das Smartphone des Herstellers Asus, wurde auf den Fahrersitz des PKWs platziert und der Empfänger etwa 12,5 m entfernt aufgestellt. Abbildung 21 zeigt eine Kastengrafik mit den gemessenen Signalstärken aus dem Auto. Zum Vergleich wurden die in Unterkapitel 4.3.4 aufgezeigten einzelnen Werte, aus dem Experiment mit einer Person, dem Körper, zwischen Sender und Empfänger, genauso als Kastengrafik hinzugefügt. Die mit K, für Körper, gekennzeichneten Werte entstammen der Messung mit einem Abstand von ebenfalls 12,5 m, wobei die Ergebnisse beider Geräte, des Asus sowie des Xiaomi, beigefügt wurden. Aus den Grafiken ist ersichtlich, die Werte der Dämpfung aus dem Fahrzeug streuen zwar stärker als jene des vorherigen Versuches, auffallend ist jedoch auch, die Mittelwerte aller drei Kastengrafiken, mit einem x-förmigen Punkt markiert, liegen nah beieinander. Das durchgeführte Experiment beweist erwartungsgemäß keinen Zusammenhang der Dämpfung durch einen Körper und ein Fahrzeug, sehr wohl kann jedoch eine signifikante Minderung der Signalstärke in einem Straßentunnel mit Teilausbau in beiden Fällen als erwiesen betrachtet werden (Vergleich Abb. 20).

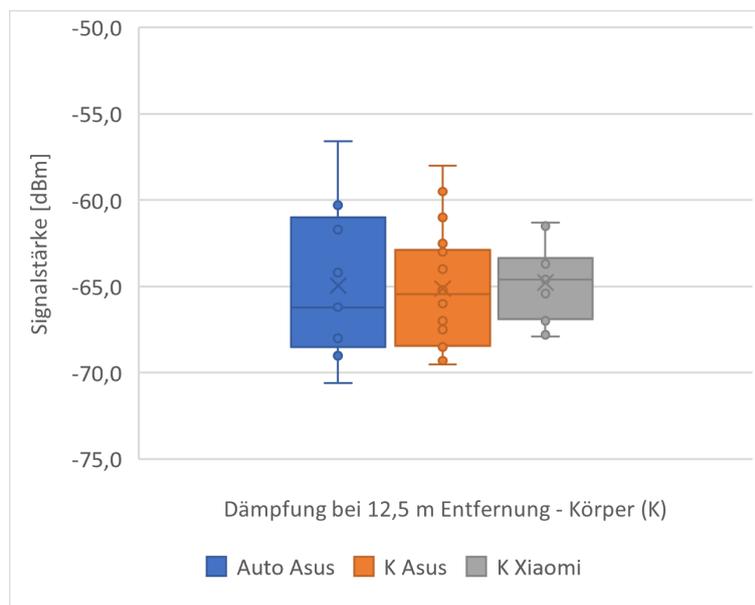


Abbildung 21: Dämpfungseffekt aus einem Fahrzeug im Vergleich zum Körper

4.3.6 Reichweite an einer Tunnelkreuzung

Auch wurde die Reichweite an der Kreuzung von Straßentunnel Nord bzw. Süd mit dem Eisenbahntunnel West begutachtet (Abb. 22), um eine Ausbreitung der Wellen quasi um die Ecke zu studieren. Dazu wurde das Empfangsgerät, wie in dem vereinfachten Grundrissplan der Kreuzung in Abbildung 22 dargestellt, auf die Position von Punkt 1 platziert. Als Sender wurde in diesem Fall nur das Asus Smartphone verwendet und in Abständen von etwa 25 m bei markierter Position 2, sowie bei etwa 50 m an Punkt 3, aufgestellt. Die gemessenen Mittelwerte sind in Abbildung 23 eingetragen, wobei die ursprünglichen gerade verlaufenden Messungen im Spritzbetonbereich, aus Unterkapitel 4.3.1, mit SB gekennzeichnet, für einen Vergleich hinzugefügt wurden. Für eine bessere Darstellung des Kurvenverlaufs wurden außerdem Messungen bei 5 m Entfernung hinzugefügt, deren Position jedoch unbedeutend sind, da sie noch vor der Kreuzung stattfanden. Wie zu erwarten sind die Werte bei 0 m und 5 m Abstand nahezu identisch, unerwartet hingegen, bleibt auch der Mittelwert bei 25 m annähernd übereinstimmend. Das Ausbleiben eines messbaren Unterschieds könnte jedoch aufgrund der Anordnung gegeben sein, bei welcher die beiden Positionspunkte, des Senders und Empfängers, annähernd Sichtkontakt zueinander haben. Ein ausgeprägter Unterschied in den Signalstärken wird erst bei der Messung mit 50 m Abstand deutlich, wobei diese Position genau in der Mitte der Kreuzung mit dem südlichen Straßentunnel festgelegt wurde. Die Differenz zwischen diesen beiden Mittelwerten liegt bei über 15 dBm. Weitere Messungen in Richtung des Eisenbahntunnels West, bei einer Entfernung von ca. 75 m, wurden durchgeführt, jedoch konnte keine der ausgesendeten Probe Requests von dem USB-WLAN-Adapter des Empfängers mehr erkannt bzw. ausgelesen werden. Aus den gemessenen Effekten kann ein ähnliches Verhalten der Signalausbreitung für vergleichbare Kreuzungspunkte, wie etwa an Querschlägen, erwartet werden, jedoch ist keine allgemeingültige Aussage aufgrund der Vielzahl von Einflussfaktoren, wie beispielsweise die Anordnung und Maße der Tunnelquerschnitte, erreichbar.

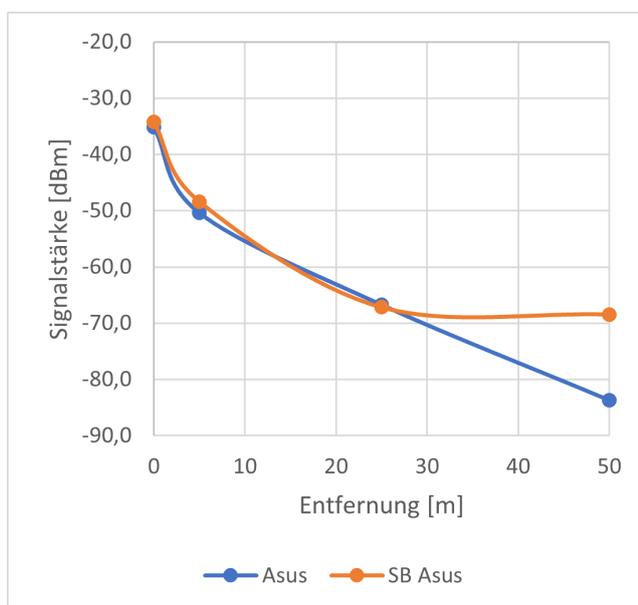
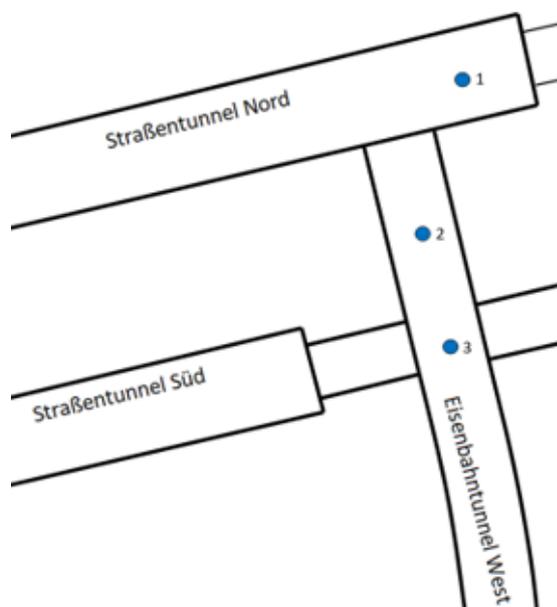


Abbildung 22: Messungen zur Reichweite an einer Tunnelkreuzung

Abbildung 23: Reichweiten im Vergleich zu geradlinigen Messungen

4.3.7 Untersuchung unterschiedlicher Querschlagtüren

Nach den Versuchen zur Signalstärke an Tunnelkreuzungen wurden ähnliche Experimente an den beiden Querschlägen am ZaB, GQ-1 und GQ-4, durchgeführt. Zudem sind an den begehbaren Querschlägen verschiedene Arten von Fluchttüren installiert, weshalb deren unterschiedliche Auswirkungen bzw. die Durchdringbarkeit ebenfalls studiert wurden. Während in GQ-1 beidseitig voneinander getrennte Flügeltüren als Fluchtmöglichkeit eingebaut sind, ist im GQ-4 in Richtung Eisenbahntunnel Ost eine Schiebetür und gegenüber eine Doppelflügeltür angebracht. Die Messungen können in der Kastengrafik von Abbildung 24 betrachtet werden, wobei mit zwei der vorgestellten Smartphone-Modelle Versuche mit einer offenen Flügeltür, in der Legende mit O gekennzeichnet, sowie beiden geschlossenen Türen, mit G beschrieben, durchgeführt wurden. Dazu wurden die beiden Sendegeräte in die Mitte des Querschlags, Gesamtlänge ca. 20 m, gegeben und der Empfänger wenige Meter außerhalb der Tür in Sichtlinie, nur bei offener Tür, platziert. In Abbildung 25 ist der Fall mit einer geöffneten Flügeltür im GQ-1 aus der Sicht des Senders wiedergegeben. Die gemessenen Werte in der Kastengrafik zeigen einen Abfall der Mittelwerte von ca. 20 dBm, ausgelöst durch die Schließung der Flügeltür. Anzumerken ist, bei den Werten mit offener Tür wurden insgesamt sechs der von dem Asus-Gerät ausgesendeten Signalstärken, mit O Asus in der Legende gekennzeichnet, aus der Datenreihe entfernt, da sie sich von den übrigen zwölf Werten, mit über 73 dBm, deutlich unterschieden. Der Autor geht diesbezüglich von einer Störung durch Interferenzen oder einem Bedienungsfehler bei den Ausführungen aus.

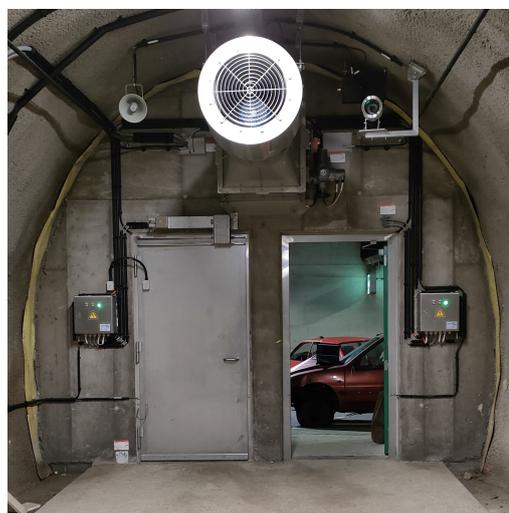
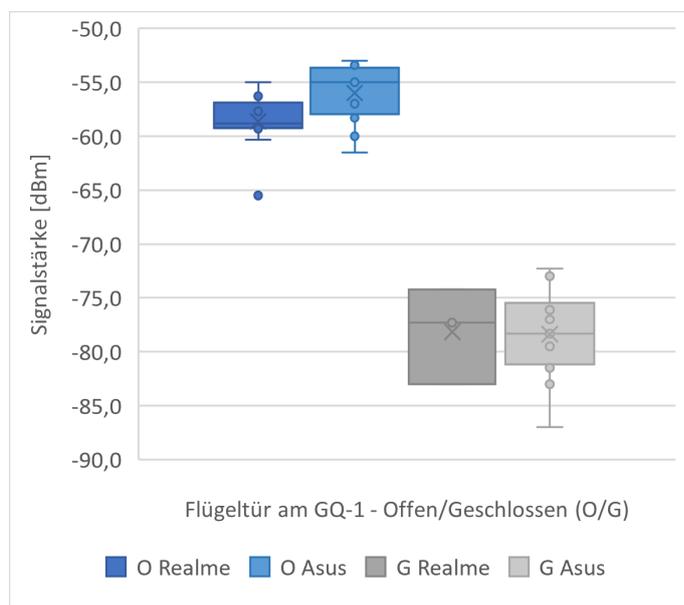


Abbildung 24: Signalstärke bei offener und geschlossener Flügeltür am GQ-1

Abbildung 25: GQ-1 von Innen - Flügeltüren

Weitere Versuche wurden am GQ-4 durchgeführt, wobei ähnlich wie in GQ-1 die Sender, diesmal aus dem Xiaomi und Asus bestehend, in der Mitte des etwa 22 m langen Querschlags und der Empfänger außerhalb, wenige Meter vor der Doppelflügeltür, platziert wurden. In Abbildung 26 sind die Ergebnisse als Kastengrafik dargestellt. Die Messungen fanden erneut vorerst mit einseitig offener Doppelflügeltür, mit O in der Legende beschriftet, und anschließend mit geschlossenen Türen, mit G gekennzeichnet, statt. Auffallend dabei, die Mittelwerte im Vergleich zu offener und geschlossener Tür unterscheiden sich mit über 20 dBm (Abb. 26), wobei auch unerwartet die Mittelwerte von Xiaomi und Asus bei geschlossener Querschlagstür untereinander stärker abweichen. Im Vergleich zu den vorherigen Messungen am GQ-1 zeigt sich eine stärkere Abschirmung durch das System einer Doppelflügeltür, zumindest aus diesen Versuchen. Abbildung 27 zeigt eine Aufnahme aus dem GQ-4 in Richtung Eisenbahntunnel Ost, mit geschlossenem Zustand der Doppelflügeltür.

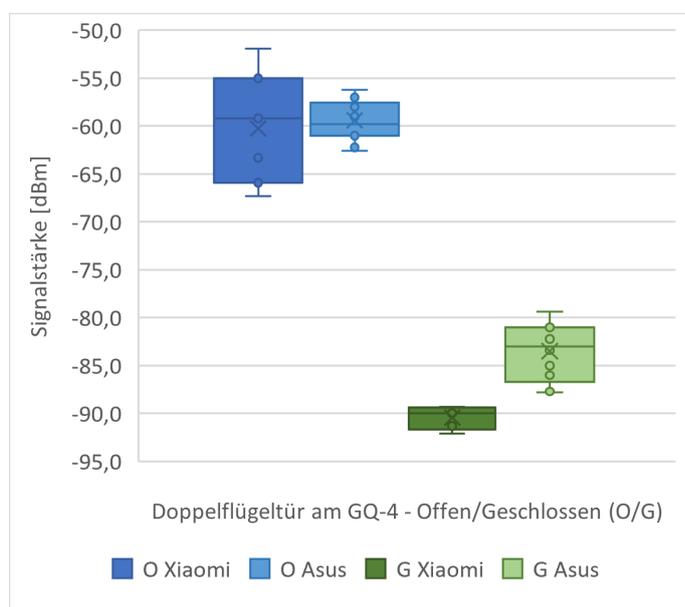


Abbildung 26: Signalstärken bei offener und geschlossener Doppelflügeltür am GQ-4

Abbildung 27: GQ-4 von Innen - Doppelflügeltür

Gegenüber befindet sich am GQ-4 Richtung Eisenbahntunnel West eine große Schiebetür, welche in Abbildung 29 aufgenommen wurde. Messungen fanden an dieser Tür erneut mit zwei Smartphones, jedoch nicht wie an den Versuchen vorhin im offenen sowie geschlossenen Zustand statt, alternativ wurde der Empfänger zum Vergleich in die Mitte des Querschlags gegeben. Die Ergebnisse können in der Kastengrafik von Abbildung 28 betrachtet werden. Nach der Ausführung mit dem Empfänger, dem Laptop im Inneren des Querschlags, in der Legende der Abbildung mit PCi für innen bezeichnet, wurde mit den, wenigen Metern vor der Schiebetür platzierten, Sendern getauscht. Diese Version des Versuchs ist mit dem nachstehenden Buchstaben, i für im Inneren des Querschlags, bei Xiaomi i sowie Asus i in der Legende beschriftet. Alle Versuche in dieser Abbildung fanden mit der geschlossenen Schiebetür statt. Auffallend ist der unerwartet starke Unterschied in den gemessenen Signalstärken rein aufgrund des Austausches der Platzierung von Sender und Empfänger. Im Falle des Xiaomi-Gerätes liegt die Differenz der Mittelwerte

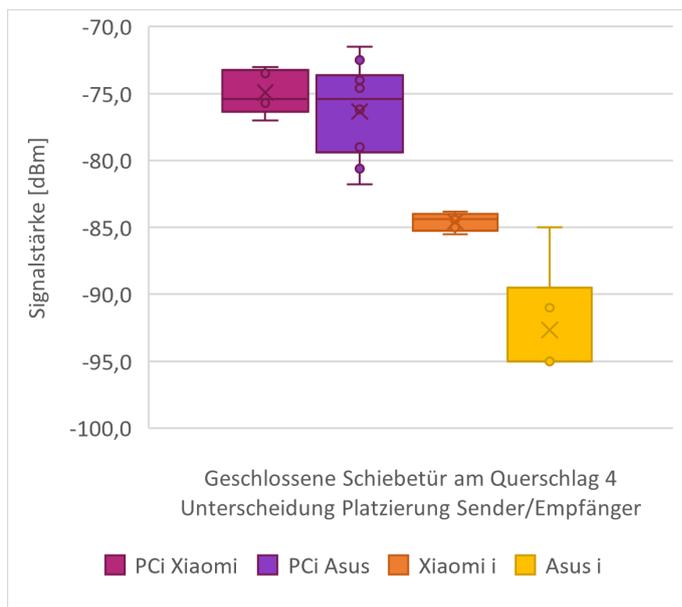


Abbildung 28: Signalst. bei Positionswechsel der Sender/Empfänger an der ST am GQ-4



Abbildung 29: GQ-4 von Innen - Schiebetür

bei fast 10 dBm, beim Asus hingegen liegen die Mittelwerte sogar über 16 dBm auseinander. Auch ausgeprägt ist der Unterschied zwischen den Sendegeräten, besonders im Zusammenhang der zweiten Messungen, an welchen die Sender in der Querschlagsmitte platziert wurden. Dabei weichen die Mittelwerte von Xiaomi zu Asus über 8 dBm voneinander ab. Allgemein könnte daraus geschlossen werden, die Durchdringung ist durchaus richtungsabhängig. Die Ursachen dafür könnten aber neben dem Aufbau der Schiebetür und anderen geometrischen Gegebenheiten im Tunnel auch am Abstand des Senders bzw. Empfängers liegen, beispielsweise könnte den Messungen zufolge eine metallische Tür in der Nähe des Senders zu weniger Störungen führen als nahe dem Empfänger.

Abschließend werden zum Vergleich alle vorgestellten Messungen der drei verschiedenen Türtypen in Abbildung 30 als Kastengrafik dargestellt, wobei nur die Signalstärken bei geschlossener Tür zusammengeführt wurden. Dabei stehen die Abkürzungen in der Legende FT für die in GQ-1 angetroffenen getrennten Flügeltüren, ST für die Schiebetür in GQ-4 sowie DFT für die Doppelflügeltür ebenfalls in GQ-4. Wie ebenso in der Legende angeführt wurden unterschiedliche Sendegeräte eingesetzt, wobei das Smartphone des Herstellers Realme nur in GQ-1 verwendet wurde. Aus den Grafiken ist ersichtlich, auch wenn die Mittelwerte der gemessenen Signalstärken, vor allem an den Türen von GQ-4 auch vom Sendegerät abhängig, ausgeprägt schwanken, so zeigen doch die einseitigen Flügeltüren in GQ-1 die geringste Abschwächung des Signals. Werden die beiden anderen Türen am GQ-4 betrachtet, neigen beide Mittelwerte an der Schiebetür zu niedrigeren Werten, woraus geschlossen werden kann, dass diese Türart den stärksten dämpfenden Einfluss auf die Signalausbreitung in dieser Versuchsreihe besitzt. Weshalb die Mittelwerte am GQ-4 zwischen den Geräten so ausgeprägt schwanken, kann aus Sicht des Autors nicht einfach erklärt werden, weshalb Schwankungen im RSSI aufgrund komplexer Einflüsse als plausibel gewählt wurden. Auch zeigen die Werte keinen Zusammenhang zu den Herstellern,

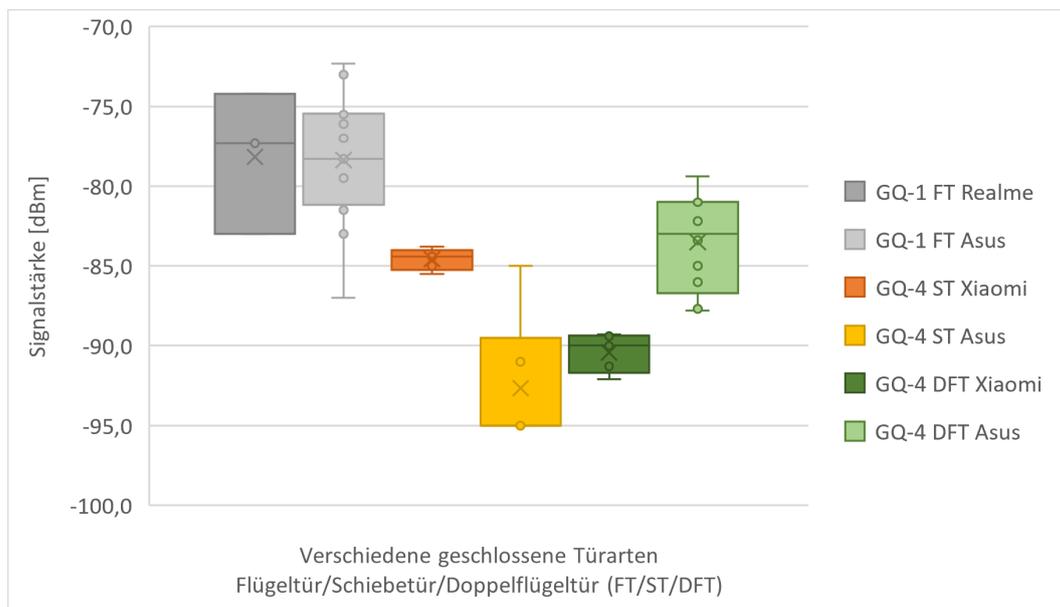


Abbildung 30: Alle drei geschlossenen Türarten im Vergleich

da an der Schiebetür in GQ-4 das Xiaomi deutlich höhere Signalstärken aufweist, während der Versuch an der Doppelflügeltür in GQ-4 das Smartphone des Herstellers Asus einen ausgeprägter stärkeren dBm-Mittelwert vorlegt.

4.3.8 Lokalisierung mittels zweier Empfänger

Nach den Messungen zur Reichweite in der Tunnelanlage sowie den Untersuchungen der Dämpfungseigenschaften verschiedener Türarten wurden weiterführend Versuche für eine genaue Positionierung unternommen. Dieser Ansatz soll zeigen, ob eine Lokalisierung der ansonsten nur in Zonen aufgeteilten Methoden, mittels zweier getrennt aufgestellter Empfänger verbessert werden kann. Da Tunnelanlagen grob betrachtet lineare Systeme darstellen, könnte rein aus den Signalstärken zweier örtlich getrennter Empfänger auf eine relative Position dazwischen geschlossen werden. Einfach ausgedrückt, kann davon ausgegangen werden, dass eine Person, deren Signal an einem Empfänger stärker ausfällt, sich diesem auch näher befindet. Gleichfalls gilt, bei übereinstimmenden Signalstärken an zwei voneinander entfernten Empfängern, von den möglichen Störungsmechanismen abgesehen, wird sich die Person in etwa in der Mitte dazwischen befinden. Alle der folgenden Versuche fanden im Bereich des Spritzbetons, dem Teilausbau, des Straßentunnels Nord statt.

Dazu wurde für den ersten Versuch der Empfänger, erneut am Laptop mit einem USB-WLAN-Adapter, aufgestellt und die Software, wie in Unterkapitel 4.2 vorgestellt, in Dauerschleife ausgeführt. Als Sender wurden die beiden Smartphones, Asus und Realme, verwendet und während der Durchführung vorne nahe am Körper gehalten. Mit einem langsamen Schrittempo, über 2 km/h, wurden die Sender vom Empfänger bis zu einer Entfernung von etwa 200 m weggetra-

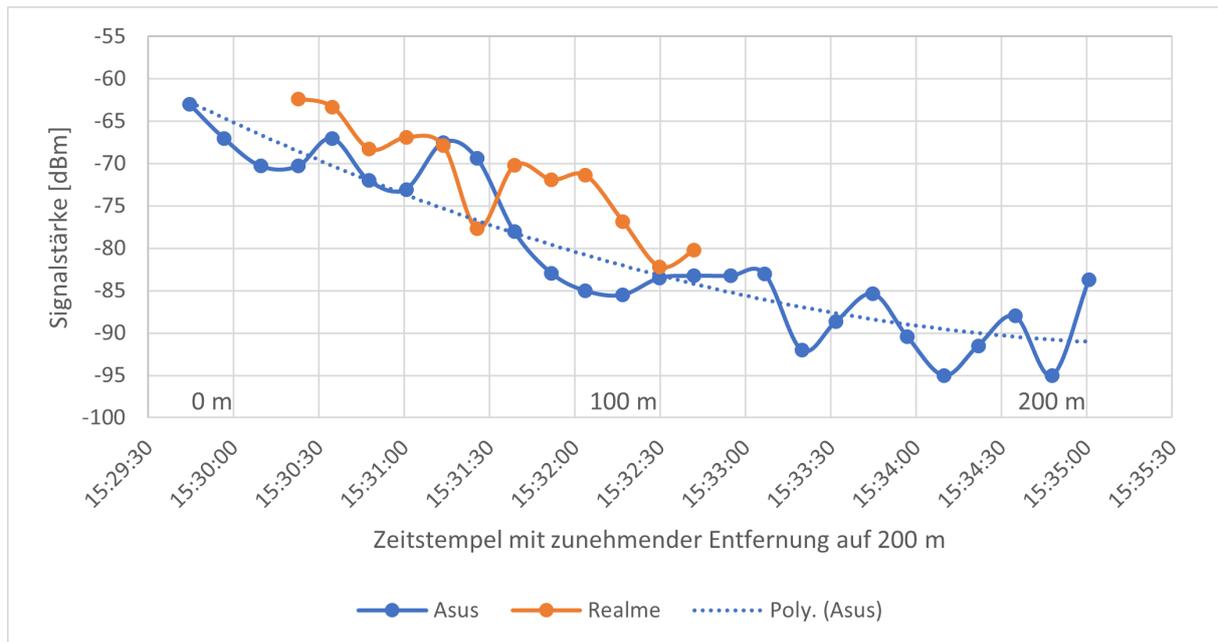


Abbildung 31: Signalstärken bei zunehmender Entfernung und zwei Sendern

gen. In ungefähren Abständen von 20 Sekunden wurde wiederholend die WLAN-Funktion der beiden Mobilgeräte ein- und wieder ausgeschaltet, womit ein nahezu gleichzeitiges Aussenden der Probe Requests erreicht wurde. In Abbildung 31 sind die gemessenen Signalstärken mit den dazugehörigen Zeitstempeln grafisch wiedergegeben. Eine einfache Trendlinie, polynomisch zweiten Grades, wurde den Werten des Asus-Gerätes hinzugefügt. Die Werte des Sendegerätes Realme wurden erst später, bereits nach einigen Metern Entfernung, empfangen, vor allem bricht der Messverlauf etwas nach der Hälfte der Strecke ab. Der Grund für das Ausbleiben der Daten ist nicht eindeutig, eine fehlerhafte Bedienung könnte die Ursache darstellen, da beispielsweise ein zu schnelles Wiederausschalten der WLAN-Funktion die Aussendung des Probe Requests verhindert. Trotzdem zeigen die gemessenen Werte eine eindeutige Abnahme, wenn auch mit starken Schwankungen. Auch der Signalstärkenverlauf des Asus Gerätes zeigt abnehmende Werte, wobei erneut hohe Schwankungen vorhanden sind, weshalb, um diesen optisch entgegenzuwirken, eine Trendlinie eingefügt wurde. Mit diesem Versuch zeigt sich die Eignung einer Lokalisierungsmethode, welche nicht nur in Zonen aufgeteilt ist, sondern sogar Schätzungen zu einer Position dazwischen wiedergeben könnte. Die ausgeprägten Schwankungen des RSSI, sowie die mit durchschnittlich nur einmal pro Minute limitierende Aussendung von Probe Requests, bleiben jedoch problematisch für diese Methode und stellen das System vor eine große Herausforderung.

Weiterführend wurde ein ähnlicher Versuch durchgeführt, bei welchem zwei Empfänger in 200 m Entfernung untereinander aufgestellt wurden. Der Laptop wurde auf selbiger Position wie im vorherigen Experiment belassen, während der Raspberry Pi 2 Modell B V1.1 in genanntem Abstand auf einer Notwegleuchte an der Seitenwand, der Tunnelulme, befestigt wurde. Der gesamte Versuch fand ausschließlich im Bereich des Teilausbaues mit Spritzbeton statt. Beide Empfangsgeräte verwenden denselben USB-WLAN-Adapter und sind für die Durchführung des Scanvor-

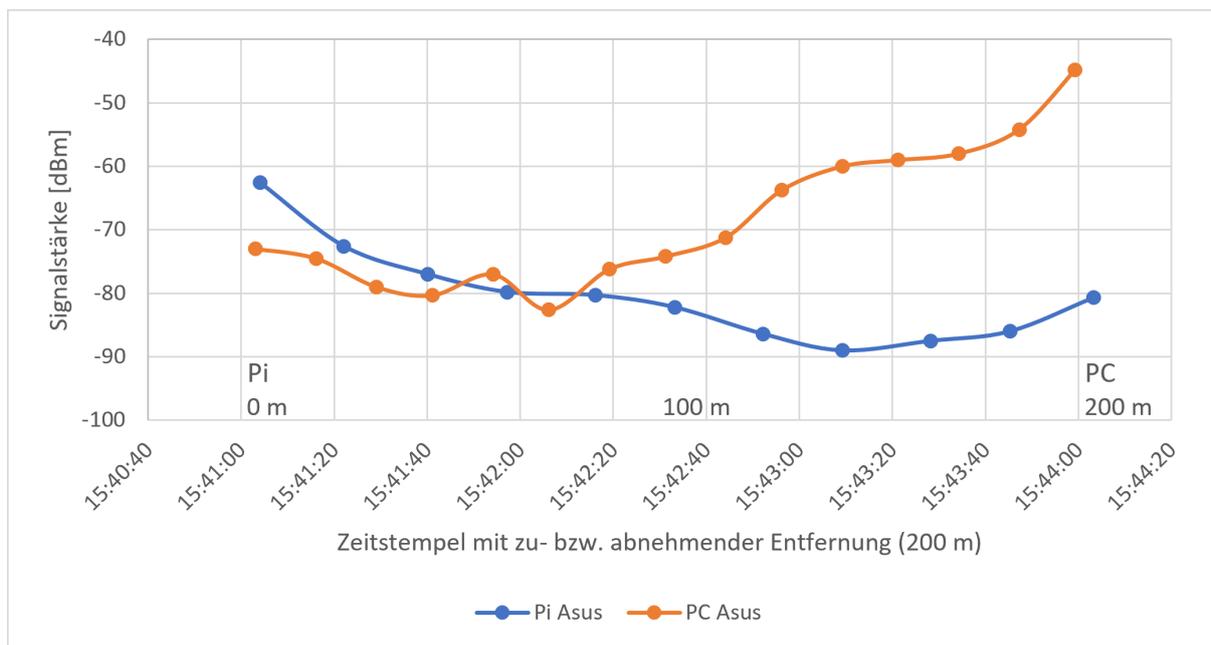


Abbildung 32: Signalstärken bei Bewegung von Pi Richtung PC im Spritzbetonbereich (200 m)

ganges in Dauerschleife mit identischer Periodeneinstellung geschaltet. Als Sendegerät wurde aus Gründen der Verlässlichkeit, wie im vorherigen Versuch gezeigt, das Asus Smartphone gewählt, mit welchem an der Pi-Position in Richtung des Laptops gestartet wurde. Abbildung 32 zeigt die gemessenen Signalstärken beider Empfänger mit den dazugehörigen Zeitstempeln auf dem zurückgelegten Weg von ungefähr 200 m. Wie erwartet nehmen die Werte einerseits am Pi mit zunehmender Entfernung ab, während sie andererseits am Laptop, in der Legende der Abbildung mit PC bezeichnet, ansteigen. Auffallend sind hierbei die Unterschiede zwischen den Werten der Empfänger, allgemein fällt der Verlauf am Laptop mit höheren dBm auf. Da beide Empfänger für die Messung der Signalstärken die exakt identische Hardware, USB-WLAN-Adapter, verwenden, sollte die Ungleichheit anderen Ursprungs sein. Die plausibelste Erklärung lässt sich mit Hilfe eines vorherigen Experiments finden, in welchem die Dämpfung eines Körpers untersucht wurde. Das Sendegerät wurde dabei identisch wie in diesem Versuch getragen, weshalb der Körper des Trägers einen abschwächenden Einfluss auf den Pi-Empfänger ausübte. Außerdem könnte auch die Positionierung der Empfänger eine Rolle spielen, da der Pi zwar höher, dafür aber nahe der Seitenwand des Tunnels platziert wurde. Auch zeigen sich deutlich mehr empfangene Werte am Laptop, anders ausgedrückt sind die Zeitstempel einander näher. Wie in Unterkapitel 4.2 bereits erklärt, hängt die Dauer einer Schleife neben der einstellbaren Scandauer auch an der jeweilig benötigten Bearbeitungszeit, welche am Pi, aufgrund der schwächeren Rechenleistung, auch bezeichnend länger ausfällt. Die Punkte der beiden Kurven stellen daher nicht den tatsächlichen Zeitpunkt der gleichzeitig ausgesendeten Probe Requests dar, sondern den Zeitstempel der beendeten Bearbeitung am jeweiligen Empfänger.

Für die genauere lineare Positionierung zwischen zwei Empfängern wurden die Ergebnisse aus Abbildung 32 noch weiterbearbeitet. Dazu mussten vorerst alle Werte beider Empfänger auf identische Zeitstempel verschoben werden, was mittels einfacher Interpolation auf einen gröbe-

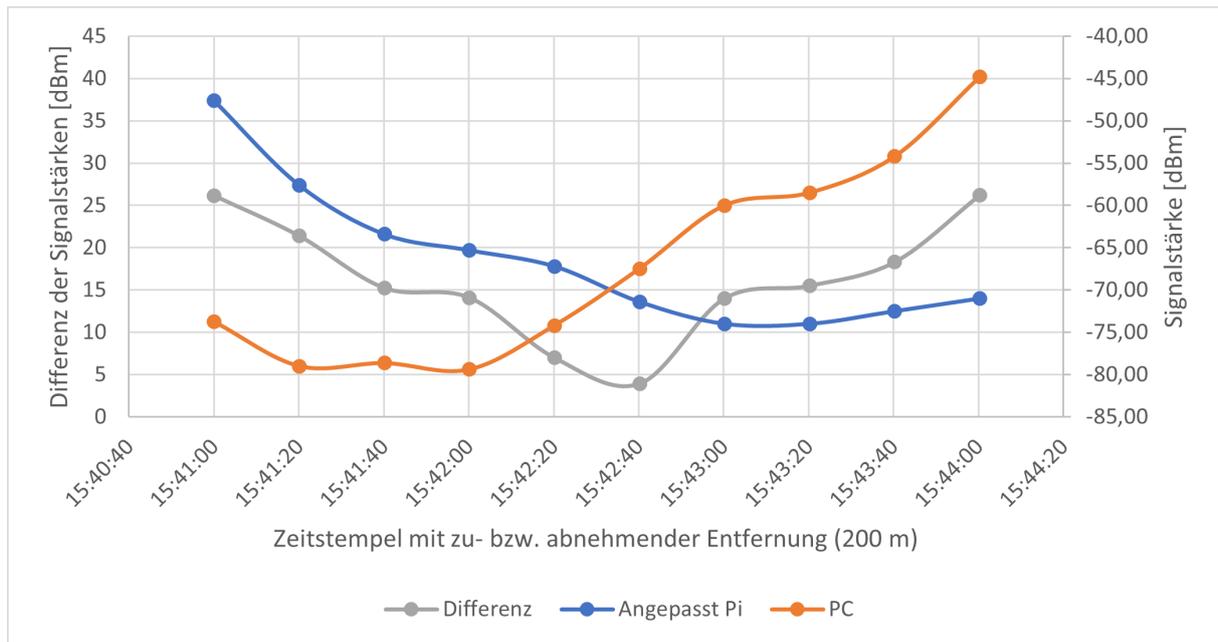


Abbildung 33: Angepasste Signalstärken mit Differenzwerten bei Bewegung von Pi Richtung PC im Spritzbetonbereich (200 m)

ren Abstand von 20 Sekunden erfolgte. Durch diese Aufteilung wurden gleichzeitig die Schwankungen, vor allem des PC-Empfängers, reduziert. Um die Differenzen durch Dämpfungen, wie etwa die eines Körpers nahe am Sender, auszugleichen, wurde die gesamte gemessene Kurve des Pi-Empfängers um 15 dBm angehoben. Die neu entstandene Kurve ist in Abbildung 33 ersichtlich und in der Legende mit Angepasst Pi gekennzeichnet. Neben dem auf die Zeitstempel geänderten Kurvenverlauf des PC-Empfängers wurde zusätzlich eine Differenz für die jeweiligen Zeitpunkte eingefügt, welche auf der linken Seite der Grafik eine Sekundärachse erhielt. Die berechnete Kurve der Differenz zeigt dabei einen für weiterführende Bearbeitungen gut geeigneten Verlauf, da die Werte annähernd symmetrisch und in der Mitte nahe null liegen. Allein aus dieser Kurve könnte die Positionierung beispielsweise in fünf Bereiche unterteilt werden und durch einfache Programmschritte genauer erfolgen. So könnte die Trennung der Bereiche mit einer Differenz von 10 dBm bzw. 20 dBm festgelegt werden. Werte unter 10 dBm würden dann die Position in der Mitte zwischen den Empfängern schätzen, während Differenzen größer als 20 dBm eine Position nahe einem Empfänger wiedergeben würden. Eine tatsächliche Ausführung lässt jedoch keinen hohen Anspruch an die Bestimmungsgenauigkeit zu, da die Orientierung der Person nicht bekannt ist bzw. nicht unterschieden werden kann, ob der Sender dem Empfänger zu- oder abgewandt getragen wird.

Zusammenfassend geht aus den Versuchen zur Reichweite hervor, der verwendete Ansatz mittels RSSI ist für eine exakte Lokalisierung ungeeignet, da die Signalwerte zu stark durch Umgebungseinflüsse variieren. Für eine in Zonen bzw. Bereiche eingeteilte Detektion von Personen kann das vorgestellte System weiterhin wirksam eingesetzt werden.

4.4 Implementierung in SOMT

Das *Subsurface Operations Mission Tool* (SOMT) wurde für eine Einsatzplanung in komplexen untertägigen Strukturen entwickelt und verwendet dazu eine Virtual Reality Applikation. Als Grundbaustein der laufenden Forschungsprojekte am ZaB wird es im folgenden Unterkapitel 4.5.2 näher vorgestellt. Die VR-Applikation ist auch für das Projekt RasPos ein essenzieller Teil, der es ermöglicht über WLAN erfasste Personen in eine graphische Übersicht zu projizieren. Dazu wurde ein Programm in RasPos implementiert, welches von anderen Forschungsprojekten bereits für die Kommunikation mit dem SOMT-Server verwendet wurde und ebenfalls in Python geschrieben war. Eine Übersicht der verwendeten Schnittstellen mit dem Server ist in Unterkapitel 4.6 eingefügt und detaillierter beschrieben. Die Teile des Python-Codes, welche explizit für diese Kommunikation eingefügt wurden, können im Anhang unter RasPos Programmcode nachgelesen werden, und befinden sich in den Zeilen 18 bis 74 sowie 327 bis 334. Für erste Versuche wurde der Empfänger im GQ-1, zwischen den Straßentunneln, aufgestellt. Nach ausgeführtem Scanvorgang wurde die gewonnene Information an den Server weitergeleitet, wobei die bekannte Position des Empfängers mitübertragen wurde. Die erhaltenen Daten konnten darauf in der Virtual Reality des Servers eingespielt und betrachtet werden. Die erfolgreiche Ausführung des Systems und Implementierung in das Visualisierungsprogramm SOMT ist in Abbildung 34 ersichtlich. Die Ansicht im Bild befindet sich unterhalb der Oberfläche nahe am Tunnel, wobei die dem Betrachter zugewandte Flächen der Tunnelanlage automatisch ausgeblendet werden. Neben den Straßentunneln wurden auch die zugänglichen Bereiche der Stollensysteme am ZaB mit in

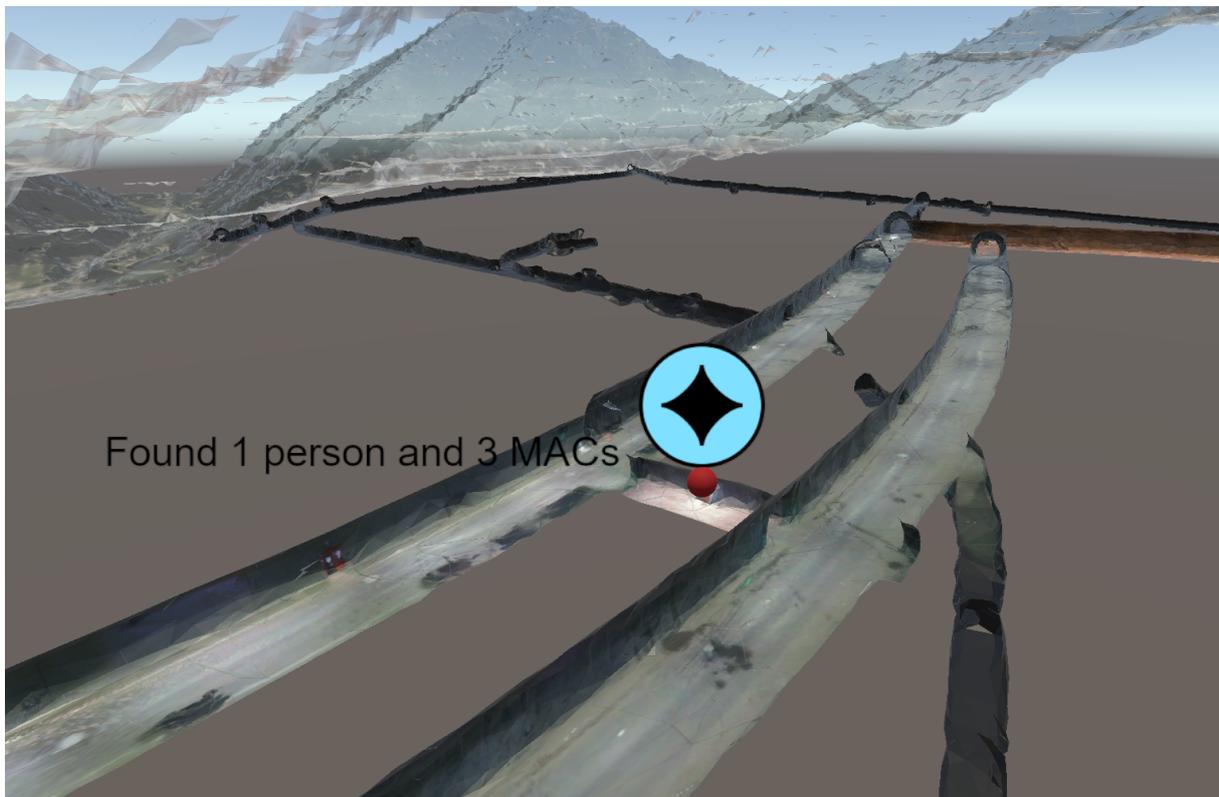


Abbildung 34: Bildschirmaufnahme der Einbindung von RasPos in SOMT

die 3D-Visualisierung aufgenommen. Die rote Kugel im Bild stellt den angegebenen Standpunkt des Empfängergerätes dar, das kreisförmige Zeichen darüber ein dafür passend ausgesuchtes taktisches Symbol, welches vor allem in späterer Folge für eine klare Übersicht und Unterscheidungsmöglichkeit sorgt. Der eingeblendete Text besteht aus den im Scanvorgang gewonnenen Daten, wobei für die erste Zahl, eine MAC-Adresse eindeutig einem Smartphone zugeordnet werden konnte, während insgesamt drei verschiedene MAC-Adressen über empfangene Probe Requests erkannt wurden. Die Identifikation eines Smartphones funktioniert dabei über den Abgleich der herstellereigenschaftlichen Eigenschaften einer MAC-Adresse mit dem OUI (Organizationally Unique Identifier), wie in Unterkapitel [4.2](#) bereits erklärt. Da nicht alle Geräte einem Hersteller zugeordnet werden konnten, wurde entschieden die zweite Ziffer hinzuzufügen. Die erkannte Person stellt das Smartphone des Autors dar, die weiteren MAC-Adressen könnten den Infrastruktur-Geräten in dieser Umgebung zugehören.

4.5 Weitere laufende Forschungsprojekte

4.5.1 NIKE FTMT

Das *Fast Tunnel Modelling Tool* (FTMT) wurde zur schnellen Erstellung von 3D-Modellen untertägiger Anlagen entwickelt. Das Programm ist für diese Diplomarbeit sowie die Forschungsprojekte in NIKE (Nachhaltige Interdisziplinarität bei Komplexen Einsätzen unter Tage) von Bedeutung, da ein erstelltes 3D-Modell in SOMT eingefügt und für die darin vorgesehene Weiterverwendung genutzt werden kann. Das Projekt wurde im Rahmen der NIKE Forschungsprogramme 2020 gemeinsam mit dem Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH und dem Österreichischem Bundesheer gestartet. Ziel ist die rasche Erstellung von unterirdischen Strukturen und Anlagen in einem digitalen Format, welche mithilfe von 2D-Plänen erfolgen kann. In Abbildung [35] sind die groben Strukturen eines mit FTMT erstellten Abschnittes einer Tunnelanlage sowie die erfolgte Referenzierung in ein Geländemodell beispielhaft dargestellt. Informationen über die Tunnelachsen sowie Regelquerschnitte können schnell extrahiert und in FTMT für die Generierung eines 3D-Modells verwendet werden. Je nach Bauwerksgröße und vorhandener Daten kann die Bildung des 3D-Modells unterschiedlich viel Zeit in Anspruch nehmen, wobei die Genauigkeit der Modelle zweitrangiger Bedeutung unterliegen, da sie auch mit fortschreitendem Einsatz nachgebessert werden können. Priorität hat die Geschwindigkeit, um im Falle eines Ereignisses in einer komplexen Struktur, einer unterirdischen Anlage, den Einsatzkräften sowie der Einsatzleitung schnellstmöglich Informationen zu deren Unterstützung zur Verfügung stellen zu können. Als Ausgangsdaten dienen dabei unter anderem Bestände der Anlagenbetreiber, welche zweidimensionale Einsatz- und Alarmpläne für weitgehend alle österreichischen Straßentunnel besitzen. Eine erstellte 3D-Struktur kann dann in ein 3D-Geländemodell eingefügt werden, wobei markante Punkte wie Portale zur groben Georeferenzierung, also der Zuweisung raumbezogener Referenzpunkte zu einem Geodatensatz, dienen könne [34].

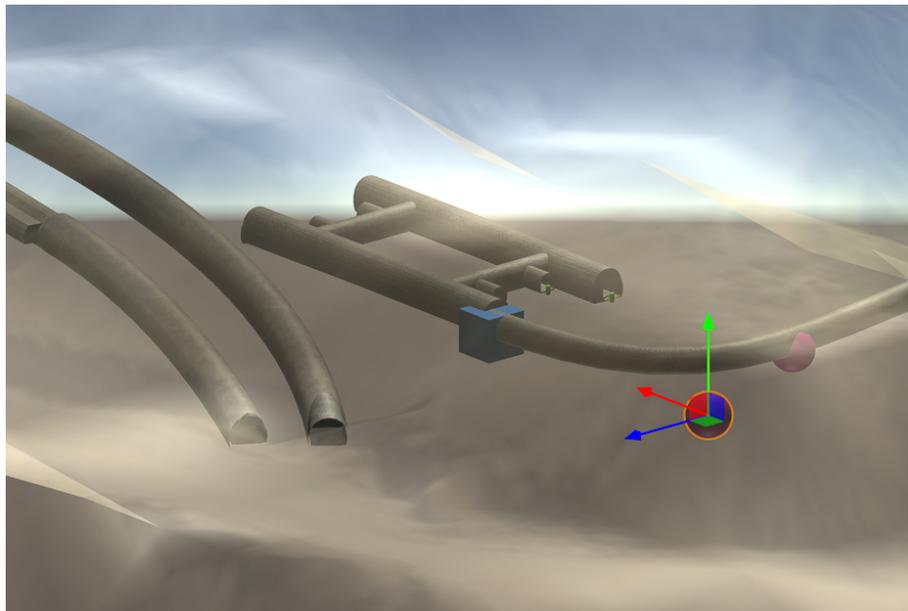


Abbildung 35: Beispielbild einer in FTMT erstellten Tunnelanlage [39]

4.5.2 NIKE SOMT

Das bereits vorgestellte SOMT (Subsurface Operations Mission Tool) ermöglicht eine optimierte Planung von Einsätzen in einem komplexen untertägigen Szenario. Dabei dient vor allem die Verwendung der dreidimensionalen Virtual Reality Umgebung einer bestmöglichen Übersicht und bietet zugleich die Optionen einer Interaktion mit gewonnenen Informationen zur Einsatzvorbereitung sowie -führung. Auch dieses Projekt wurde 2020 als Teil der Forschungsgruppe NIKE in Zusammenarbeit der Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH und dem Österreichischem Bundesheer gestartet. Für die Einspielung in die VR-Visualisierung können bereits vorhandene oder mittels FTMT erstellte 3D-Modelle verwendet werden. Die Bedeutsamkeit von SOMT für die Einsatzleitung sowie für weitere Forschungsprojekte liegt darin, dass hiermit eine Oberfläche geschaffen wird, welche für alle weiteren gewonnenen Informationen eine übersichtliche Unterscheidbarkeit sowie geeignete Bearbeitbarkeit ermöglicht. So zählen unter anderem zu den Tools von SOMT die Interaktion mit dem Geländemodell, bei welchem sowohl die Träger eines VR-Systems als auch Personen von einem PC aus, sich in der Umgebung frei bewegen und diese auch skalieren können, um so ein bestmögliches Bild der Umfeldbedingungen zu erhalten. Die VR-Anwendung ermöglicht zusätzlich eine Bewegung in erstellten Modellen, so kann der Benutzer eine Begehung im Maßstab 1:1 in einer Tunnelanlage durchführen bzw. an ausgewählte Stellen eintauchen. Bezeichnend sind jedoch vor allem die vielseitigen Möglichkeiten zur Einsatzplanerstellung, bei welchen dem Nutzer mit diversen Tools eine optimale Gestaltung ermöglicht wird [35]. Die Anwendung von SOMT in Kombination mit integrierten Informationsströmen der verschiedenen NIKE Forschungsprojekte am ZaB werden erneut in Kapitel 5 nähergebracht.

4.5.3 NIKE BLUETRACK

Ein weiteres Projekt der NIKE Forschungsgruppe stellt BLUETRACK dar, auch als Blue Force Tracking bekannt, welches in erster Linie für den militärischen Einsatz in unterirdischen Strukturen entwickelt wurde. Besonders da die Navigation und Positionierung im Untergrund nicht auf die Signale der globalen Navigationssatellitensysteme (GNSS) aufbauend erfolgen kann, eignen sich daher Systeme, die auf Kurzstrecken-Kommunikationstechnologien basieren. Darunter zählen, wie in Unterkapitel 2.1.1 bereits erklärt, Methoden mittels Ultrabreitband (UWB), Wi-Fi, Bluetooth, sowie Systeme, welche sich die Trägheitsnavigation (INS) zunutze machen. Zur Entwicklung dieses Projektes stand die Forschungs- und Trainingseinrichtung am ZaB zur Verfügung. Die Anforderungen an das System waren dabei einerseits die Lokalisierung von Kräften in unterirdischen Strukturen, für welche auch eine vertikale Komponente erforderlich ist. Und andererseits die gewonnenen Informationen in ein 3D-Modell zu integrieren und visualisieren, um eine Übersicht in komplexen Strukturen zu erhalten. Dies wurde durch die Implementierung der Informationen, wie Positionen und Trajektorien, in den bereits vorgestellten SOMT-Server erreicht. Darüber hinaus zählt zu den weiteren Anforderungen, die Erkennung von wechselnden Körperhaltungen wie Gehen, Laufen, Springen und Krabbeln. Um all diesen Ansprüchen gerecht zu werden, verwendet NIKE BLUETRACK UWB-Module, sogenannte Tags, die am Helm jeder Person angebracht sind. Die identischen Module, auch als sogenannte Anker bezeichnet, werden zur Referenzierung eingesetzt, welche vorher bereits an verteilten Stellen, oder mitgeführt und erst während der Ausführung, platziert werden können. Zusätzlich wird an jedem Schuh der Person, im Bereich der Schnürsenkel, eine IMU-Einheit angebracht, welche jede Geschwindigkeits-



Abbildung 36: An einer Person angebrachtes System Bluetrack

und Richtungsänderung wahrnimmt. Um der prinzipiell bei inertialen Messeinheiten anfallenden relativen Fehlerfortpflanzung gegenzusteuern, werden gemessene Werte mit Ergebnissen der UWB-Module abgeglichen und korrigiert [56]. Abbildung 36 zeigt eine Aufnahme während der durchgeführten Versuche von BLUETRACK am ZaB. Von unten nach oben im Bild erkennt man als erstes die kompakten, an den Schuhen befestigten, IMU-Einheiten. Diese verfügen über eine eigene Batterie und kommunizieren mittels Bluetooth an eine tragbare Recheneinheit, einen Raspberry Pi. Das eingesetzte Pi 4 Model B wurde an einem der Unterschenkel befestigt, da aus Gründen der häufig unterbrochenen Bluetooth-Verbindung eine Position nahe der IMU-Einheit gewählt wurde. Der Raspberry Pi wurde mit einem eigenen Akku ausgestattet, die im Bild gezeigten Kabel waren nur während des Startvorganges angebracht. Oben im Bild wurde am Helm des Trägers ein UWB-Modul, ein Tag, befestigt. Zusätzlich ist an der Spitze des Helmes ein 360°-Miniprisma montiert, da bei diesen Versuchen eine Totalstation, zur späteren Referenzierung zu den tatsächlichen Positionen, mit automatischer Prismenverfolgung aufgebaut wurde. Rechts oben im Bild ist einer der vielen im Tunnel platzierten UWB-Anker erkennbar, diese wurden in Abständen von etwa 40 m beidseitig verteilt. Das Projekt wird von OHB Digital Solutions GmbH gemeinsam mit der Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH, der Montanuniversität Leoben, dem Bundesministerium für Landesverteidigung sowie der Technischen Universität Graz geführt.

4.5.4 NIKE SUBMOVECON

Für die Detektion und Nachverfolgung von Personen in unterirdischen Strukturen, die nicht zu den Einsatzkräften gehören, d.h. Zivilisten, welche nicht mit einem wie in NIKE BLUETRACK verwendeten Geräten ausgerüstet sind, werden andere Ansätze erforderlich. Für diese Situation entstand deshalb ein weiteres Projekt der Forschungsgruppe NIKE in Kooperation mit der Joanneum Research Forschungsgesellschaft mbH, welches mittels bildverarbeitender Algorithmen eine Personenerfassung sowie ein Tracking-System ermöglicht. Namensgebung entstand dabei aus dem Englischen für *Subsurface Movement Control*. Der Algorithmus kann dabei auf den Live-Stream des am ZaB vorhandenen Überwachungssystems angewandt werden. Dabei können die Aufnahmen sowohl im optischen als auch im infraroten Bereich liegen, womit die Funktion bei schlechten Sichtverhältnissen wie Rauch gegeben ist. Ähnlich wie andere in Unterkapitel 2.1.2 vorgestellte bildverarbeitende Algorithmen verwendet auch dieser ein auf künstlicher Intelligenz basiertes System, welches im Vorhinein mit ausreichendem Bildmaterial trainiert werden muss. Über die bekannten Positionen der am ZaB vorinstallierten Kameras, sowie der digitalen Auslegung gewisser Kontrollpunkte am Boden und an den Seitenwänden im Bild, kann zusätzlich eine aus der Perspektive abhängige Abschätzung des Aufenthaltsortes einer erfassten Person erfolgen. Auch die gemessene Pixelhöhe eines detektierten Individuums wird mit einer angenommenen Durchschnittsgröße der tatsächlichen Person abgeglichen und fließt in die Positionsberechnung ein. Damit können lokalisierte Personen auch in Echtzeit auf eine Karte oder in ein 3D-Modell, wie etwa in die VR-Umgebung von SOMT, projiziert werden. Darüber hinaus kann durch einen weiteren Algorithmus eine sogenannte Skeleton-Estimation erfolgen, quasi eine aus dem Bild errechnete Abschätzung des menschlichen Skeletts. Damit kann, neben der Unterscheidung einer Person in stehend oder bewegt, auch eine Klassifizierung der Haltung erfolgen, durch welche beispielsweise zwischen stehend, sitzend und liegend unterteilt werden kann. Ziel ist damit unter anderem verletzte Personen frühzeitig zu erkennen und den Einsatzkräften zu melden. Abbildung 37 zeigt die Anwendung der Algorithmen an einer Überwachungskamera am ZaB. Auch in Abbildung 38 wurde selbiges System eingesetzt, diesmal jedoch an einer Wärmebildkamera am ZaB, wobei das Farbschema des Bildes für eine bessere Erkennung vorerst angepasst wurde [68].

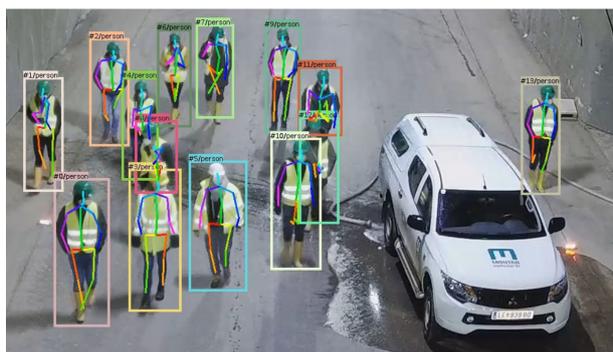


Abbildung 37: Personenerfassung und Skeleton-Estimation [68]

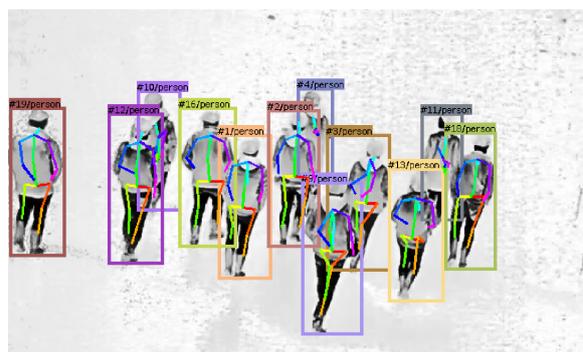


Abbildung 38: Thermalbild mit geändertem Farbschema [68]

4.5.5 NIKE DHQ-RADIV

Einsätze in unterirdischen Strukturen, wie Tunnelanlagen, erfordern ein umfassendes Lagebild, um die Entscheidungen der Einsatzführung in komplexen Situationen zu erleichtern und eine Informationsgrundlage bereitzustellen. Daher ist eine Integration und geeignete Visualisierung heterogener Datenbestände von Bedeutung, weshalb das Forschungsprojekt NIKE DHQ-RADIV initiiert wurde. Dabei steht die Entwicklung des Digital-Head-Quarters (DHQ) mit einer Rapid-Data Integration und Visualisierung (RADIV) im Vordergrund. Das Projekt wird von der Montanuniversität Leoben koordiniert, zu den Partnern zählen die Syncpoint GmbH, Herrn Thomas Peterseil, die IL-Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH, die Meixner Vermessung ZT GmbH, das Bundesministerium für Landesverteidigung, die OHB Digital Solutions GmbH sowie die JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH. Im Zuge einer geeigneten Visualisierung soll nicht nur eine zweidimensionale Planungsoberfläche sowie die VR-Umgebung von SOMT genutzt werden, sondern auch Systeme mit AR (Augmented Reality). Eine Vielzahl an relevanten Informationen können von Betreibern untertägiger Infrastrukturen zur Verfügung gestellt werden, jedoch meist erst nach der Feststellung eines Ereignisses. Unter anderem ist die Integration verschiedenster Datenquellen aus anderen Systemen, wie etwa von unterschiedlichen NIKE Forschungsprojekten, in eine geeignete Umgebung für weiterführende Entscheidungen erforderlich, weshalb die zentrale Schnittstelle von SOMT übernommen wird [20]. Außerdem soll im Rahmen von DHQ-RADIV mit unterschiedlichen Arten von Trainingsszenarien in verschiedenen Umgebungen, ein einzigartiges Umfeld für Training, Forschung und Entwicklung entstehen. Mit dem Ziel, die Fähigkeiten für unterirdische Einsätze zur Brandbekämpfung, medizinischen Behandlung, dem Umgang mit radioaktiven Substanzen und vielen weiteren zu verbessern [36].

4.5.6 NIKE MED

Ein weiteres Projekt der Forschungsgruppe NIKE stellt Medical-Treatment, kurz NIKE MED, dar, welches mit gezielten Entwicklungen von Trainings und Equipment Rettungskräfte auf Einsätze untertage vorbereitet. Projektkoordinator ist erneut die Montanuniversität Leoben mit den Partnern SIM CAMPUS - Zentrum für Notfall-, Krisen- und Katastrophensimulation und Katastrophendiplomatie GmbH, Mindconsole GmbH, Disaster Competence Network Austria, IL-Ingenieurbüro Laabmayr & Partner ZT GesmbH, Universität Innsbruck sowie Bundesministerium für Landesverteidigung. Ereignisse in unterirdischen Strukturen führen meist zu massenhaft Betroffenen, welche häufig identische Verletzungsmuster aufweisen. Zu diesen typischen Verletzungen zählen unter anderem durch Verbrennungsgase hervorgerufene Vergiftungen sowie großflächige Verbrennungen, ausgelöste psychische Störungen sowie die Kontamination mit Stoffen, welche auch für Rettungskräfte eine Gefährdung darstellen. Die Herausforderung liegt in der medizinischen Versorgung großer Menschenmengen innerhalb kürzester Zeit, welche aufgrund der komplexen Situation zusätzliche Anforderungen an weiterführendes Vorgehen, wie etwa die Zuweisung von Versorgungsketten, aufweisen. Daher entwickelt NIKE MED ein System, mit welchem verfügbare und erforderliche Einsatzkräfte evaluiert und deren Versorgung optimiert werden können [21].

4.5.7 Mobile Wettertore

Neben den genannten Projekten existieren weitere Vorhaben, die für Durchführungen der Forschungsgruppe NIKE bedeutend sind, darunter auch zahlreiche Versuche zu einem sogenannten mobilen Wettertor am ZaB. Bewetterungsanlagen, welche die Frischluftversorgung sowie eine gerichtete Abluft sicherstellen, sind ein wichtiger Bestandteil von Untertagebauwerken im Berg- sowie Tunnelbau. Eine gezielt steuerbare Bewetterung gewinnt im Falle eines Ereignisses zusätzlich an Bedeutung, da beispielsweise bei einem Tunnelbrand erzeugte giftige Rauchschwaden über dafür vorgesehene Wege abgeleitet werden können, damit so die Flucht- und Rettungsmöglichkeit aufrechterhalten werden kann. Jedoch sind in komplexen unterirdischen Strukturen zahlreiche Szenarien denkbar, in welchen die installierten Systeme für eine optimale Lösung nicht ausreichen, beispielsweise wenn sich im vorgesehenen Abluftweg bereits Personen befinden. So kann ein Wettertor an ausgewählten Stellen rasch aufgebaut werden, und somit einen zusätzlichen Eingriff in die Lüftungsströmungen erlauben. Mobile Wettertore können dabei nicht nur Abschnitte und damit Personen vor giftigen Aerosolen schützen, oder beispielsweise durch die Abschottung diverser Seitenstollen eine Luftstromabschwächung verhindern, sondern auch die optimierte Einbringung diverser Kampfmittel ermöglichen. Zu den Anforderungen an ein Wettertor zählen unter anderem die rasche Errichtung, eine ausreichende Dichtheit, eine Durchfahrtsmöglichkeit sowie die Anfertigung aus brandbeständigen Materialien. Um das Verhalten von Luftströmungen zu simulieren und gegebenenfalls die optimale Position eines Wettertores zu berechnen, werden Softwarelösungen, wie etwa ein für den untertägigen Bergbau entwickeltes Programm, genannt VentSim, eingesetzt. Abbildung 39 zeigt ein aufgebautes mobiles Wettertor im Bereich des Straßentunnels mit Innenschale am ZaB. Der mittlere Teil des in diesem Fall auf den Querschnitt maßgeschneiderten Materials kann dabei seitlich gelöst und nach oben aufgerollt werden, um Fahrzeugen eine temporäre Durchfahrt zu ermöglichen [33].



Abbildung 39: Mobiles Wettertor am ZaB [89]

4.6 Integration von RasPos in den laufenden Projekten

Gemeinsame Forschungsaktivitäten der NIKE Projekte fanden Mitte Juli 2022 an der Tunnelanlage am ZaB statt. Dabei wurde besonderes Augenmerk auf die gleichzeitige Ausführung und Implementierung in SOMT gelegt, wobei in Zusammenarbeit mit DHQ-RADIV darauf geachtet wurde, die verschiedenen Informationsströme so optimal wie möglich für eine weiterführende Übersicht in der VR-Oberfläche zu bearbeiten. Auch das Projekt RasPos konnte nach der erfolgreichen Kommunikation mit dem SOMT-Server, wie in Unterkapitel 4.4 bereits vorgestellt, an den Großversuchen teilnehmen.

Abbildung 40 zeigt den Netzwerkplan am ZaB, nach welchem die Kommunikationsmöglichkeiten für die Forschungsprojekte eingerichtet wurden. Links unten im Bild beginnend sind vier Processing PCs eingefügt, welche die nötige Rechenleistung zur Bildverarbeitung für NIKE SUBMOVECON zur Verfügung stellen. Rechts daneben sind repräsentativ Kameras eingezeichnet, wobei das Überwachungssystem am ZaB etwa 20 Aufnahmegeräte im optischen Bereich in der Tunnelanlage verteilt, sowie vier weitere Thermalbildkameras im sogenannten Hitzeschild für Brandversuche besitzt. Die Bildübertragung der Livestreams erfolgte dabei über ein inter-

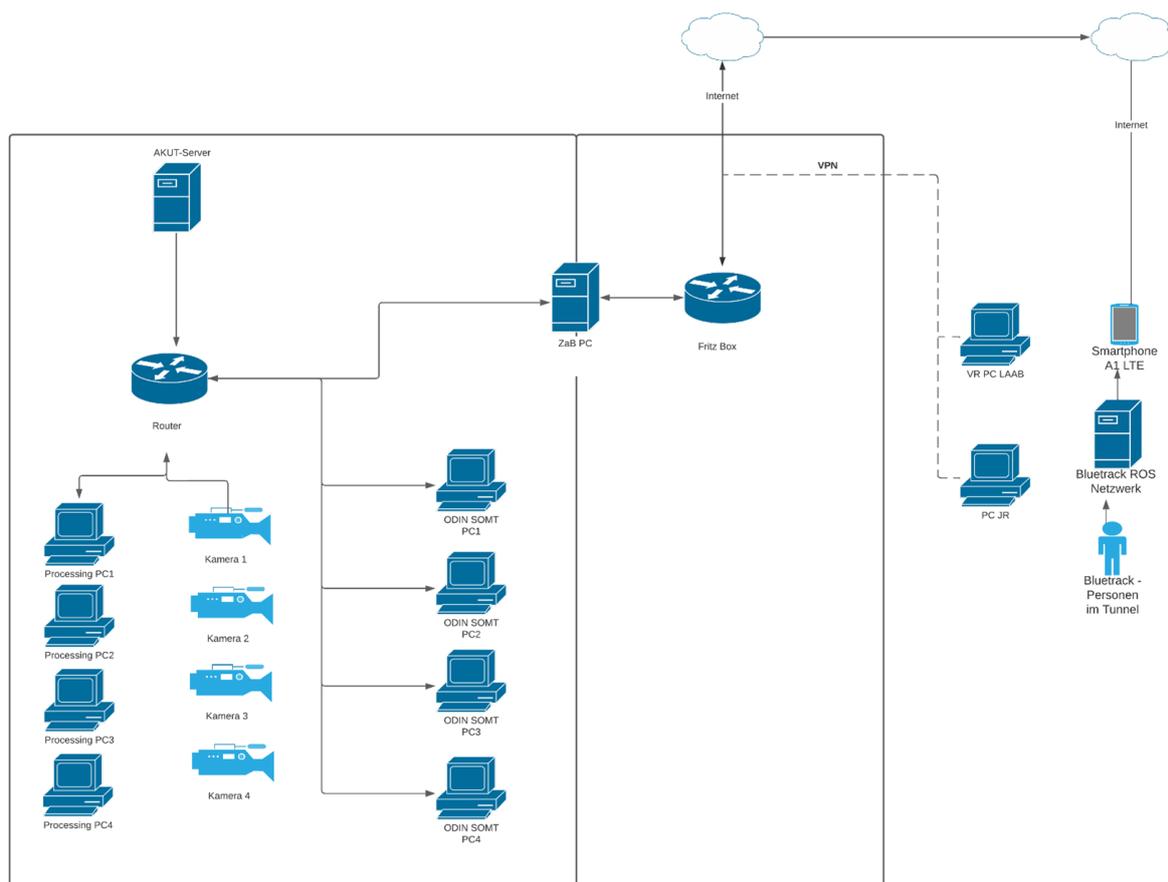


Abbildung 40: Netzwerkplan für die Ausführung am ZaB [15]

nes Netzwerk unter der sogenannten Protokollierung von RTSP (*Real-Time Streaming Protocol*), wobei die Kommunikationsschnittstelle mit den Rechnern von SUBMOVECON über einen Siemens-Switch am ZaB hergestellt werden konnte. Über selbige Schnittstelle erfolgte auch der Zugriff eines weiteren Systems, welches in Kapitel 3 genannt wurde und speziell in Straßentunnel der ASFINAG auch Anwendung findet. Gemeint ist das System AKUT, welches in den Großversuchen ebenfalls eingesetzt wurde, um Aktivität in Bereichen des Tunnels über laute akustische Ereignisse erkennen zu können. Im selbigen Netzwerk angeschlossen wurden auch die Rechenserver von SOMT, wobei die im Netzwerkplan gewählte Bezeichnung mit ODIN SOMT PCs ein noch nicht vorgestelltes Projekt, genannt ODIN, inkludiert, welches für eine individualisierte Einsatzplanung in einer zweidimensionalen Umgebung verwendet werden kann. Über den Router mit selbigem Netzwerk verbunden ist außerdem der ZaB PC, mit welchem gesondert Aufgaben übernommen werden konnten, wie etwa die gezielte Anfertigung von Aufnahmen mehrerer Überwachungsvideos. Daran verbunden ist ein weiterer Router, eine Fritz!Box, mit welcher ein Zugriff auf das öffentliche Internet, sowie ein Datenaustausch darüber, ermöglicht wurde. So konnte auch über VPN (*Virtual Private Network*) eine sichere und verschlüsselte Verbindung zum Netzwerk am ZaB eingerichtet werden, welche für den VR PC von Laabmayr sowie einen weiteren leistungsstarken Laptop, in der Abbildung mit PC JR beschriftet, vorgesehen waren. Mit selbiger VPN-Verbindung wurde auch der Zugriff auf den ZaB PC über eine Remote-Desktop Anwendung ermöglicht, wodurch die Ansteuerung der Kameras sowie die Regelung der Videoaufnahmen auch vom Heimnetzwerk des Autors geregelt wurden. Das aufgezeichnete Material dient dabei vorwiegend zur Kontrolle und Auswertung der Großversuche, im Speziellen für die Projekte SUBMOVECON, BLUETRACK sowie RASPOS. Rechts neben der VPN-Verbindung ist im Netzwerkplan eine weitere Möglichkeit zur Kommunikation dargestellt. Am Beispiel von BLUETRACK kann eine mit diesem System ausgestattete Person, über ein mittels Hotspot am Mobiltelefon aufgebautes Netzwerk, Daten auch über das im Tunnel des ZaBs installierte 5G-Netz von A1 an die IP-Adresse der Fritz Box weiterleiten.

Auf diese Weise konnte nach vorgenommenen Erweiterungen am Python-Code, wie in Unterkapitel 4.4 näher erklärt, auch der Datentransfer von RasPos durchgeführt werden. Wobei, da das Heimnetzwerk des Autors zufällig ebenfalls das LTE-Netz von A1 nutzt, statt eines Smartphones mit aktivierter Hotspot-Funktion, einfach der Heimrouter im Tunnel eingesetzt werden konnte. Neben dem Vorteil eines unabhängigen Kommunikationssystems wurde damit auch eine größere Reichweite ermöglicht, so konnte der eingesetzte Router alle im Tunnel aufgebauten Systeme von RasPos mit ausreichend stabilem WLAN versorgen. Für die Durchführung wurden sowohl der Laptop als auch die beiden Pis im Straßentunnel Nord als Empfänger, in einem gewählten Abstand von etwa 100 m, platziert.

Am Großversuch der Forschungsgruppe NIKE fanden neben den Ausführungen der einzelnen Projekte auch Trainings der Grubenwehr in Zusammenarbeit mit der Feuerwehr statt. Dabei wurden verschiedene Szenarien zur Personensuche und -rettung, unter anderem im Bereich des Hitzeschildes mit beabsichtigtem Brand sowie künstlich erzeugten dichten Rauch, durchgeführt. Die Gruppe, üblicherweise aus fünf Mitgliedern bestehend, konnte dabei zusätzlich für Anwendungen der verschiedenen NIKE Projekte genutzt werden. So wurden beispielsweise Trajektorien der Einsatzkräfte mittels BLUETRACK aufgezeichnet und die ungefähren Positionen über die Überwachungsanlagen durch SUBMOVECON ermittelt. Dabei konnte bei den Versuchen mit eingeschalteter Rauchanlage auch die Bildverarbeitung mit Wärmebildkameras erprobt werden.

Auch die Lokalisierung der Personen über empfangene WLAN-Signale konnte in ausgewählten Bereichen durch RasPos bewältigt werden. Weitere Systeme und Versuche fanden dabei Anwendung, darunter auch das System AKUT, sowie Projekte, die noch nicht vorgestellt wurden. So beschäftigten sich Fähnriche an Instituten der Theresianischen Militärakademie im Rahmen ihrer Bachelorarbeiten mit Themen zu untertägigem Atemschutz, der Wellenausbreitung des Militärfunks sowie die Unterstützung der Leitstellen durch die VR-Umgebung. Zusätzlich beschäftigte sich ein Projekt mit sogenannten Vitalwesten, durch welche Vitalwerte von Personen aufgezeichnet werden konnten. Dazu wurden Einsatzkräfte mit den Westen ausgestattet, womit sie hinsichtlich ihrer Herz- und Atemfrequenz sowie Bewegungsintensität überwacht werden konnten. Auch wurden Versuche mit mobilen Wettertoren im Zusammenhang mit Strömungssimulationen, sowie in Kooperation mit der Colorado State University zur Ausbreitung von Schadstoffen, Projektname CBRN (Chemical, biological, radiological and nuclear), durchgeführt.

Im Anschluss an die Großversuche der Forschungsgruppen fanden am ZaB dreitägig die Urban Operations Expert Talks 2022 (UOET22) statt. Die Konferenz verbindet nationales sowie internationales Expertenwissen aus den unterschiedlichsten Bereichen zum Thema operative Herausforderungen im urbanen Umfeld. Neben den zahlreichen Vorträgen über kritische Infrastrukturen, globale militärische Entwicklungen auch in Bezug zu Trainingsgestaltung, Herausforderungen der psychologischen sowie medizinischen Versorgungsarten, bis hin zur Einführung in Quantensensoren, wurden auch Resultate der NIKE Forschungsprojekte präsentiert. Die Ergebnisse der Großversuche im Juli 2022, sowie ein kurzer Einblick in die an den UOET22 präsentierten Erkenntnisse, werden gesammelt in den nachstehenden Kapiteln behandelt.

5 Ergebnisse

Zu den erreichten Meilensteinen zählt die erstmalige erfolgreiche Zusammenarbeit der unterschiedlichen Projekte aus der Forschungsgruppe NIKE, gemeinsam mit zusätzlichen Unternehmungen, am Großversuch in der Tunnelanlage des ZaBs. Auch RasPos konnte als Projekt dieser Diplomarbeit vollständig in die Programme integriert werden und somit zu gemeinsamen Ergebnissen beitragen. Abbildung 41 zeigt eine Momentaufnahme der in SOMT visualisierten dreidimensionalen Umgebung während der Durchführung eines Versuches. Das dafür verwendete 3D-Modell wurde aus vorherigen Vermessungen mittels Laserscanner erstellt. In diesem Versuchsszenario begaben sich drei als gefährlich eingestufte Personen einige hundert Meter in den Straßentunnel Nord und wurden dabei von den Überwachungskameras aufgezeichnet. Damit konnten sie in Echtzeit von den SUBMOVECON-Algorithmen erfasst und über ihre Position als Objekt, mit einem bestimmten taktischen Symbol versehen, in die 3D-Ansicht von SOMT integriert werden. Um ein besseres Bild der Situation zu erhalten, können die Liveübertragungen der Überwachungskameras zusätzlich in der VR-Umgebung als Videostream angezeigt werden, wobei die Position der gewählten Kamera mit einem roten Viereck im Bild gekennzeichnet ist. Die Bewegungen der drei von SUBMOVECON erfassten Personen können so zeitgleich auf der Projektion im Tunnelmodell sowie der Überwachungskamera beobachtet werden. Mittig im selbigen Bild, mit einem magentafarbenen Symbol gekennzeichnet, ist eine als Zivilperson identifizierte Person. Auch diese wird durch eine der zahlreichen Kameras aufgenommen und mit dem System von SUBMOVECON an der jeweiligen Position eingeblendet. Direkt links neben diesem Individuum scheint ein hellblaues Symbol auf, welches das vorgestellte und in manchen Tunnelanlagen der ASFINAG bereits vorhandene System von AKUT darstellt. Dabei wird, wie im Moment dieser Aufnahme, ein markantes akustisches Signal von der Einrichtung erkannt und in Form einer aufscheinenden Meldung an der Stelle des jeweiligen Mikrofons wiedergegeben. In diesem Szenario wurden unter anderem Schreie sowie ein gelöster Schuss erkannt. Mit selbigem Symbol erscheinen drei weitere Objekte in der VR-Umgebung auf, bei welchen es sich

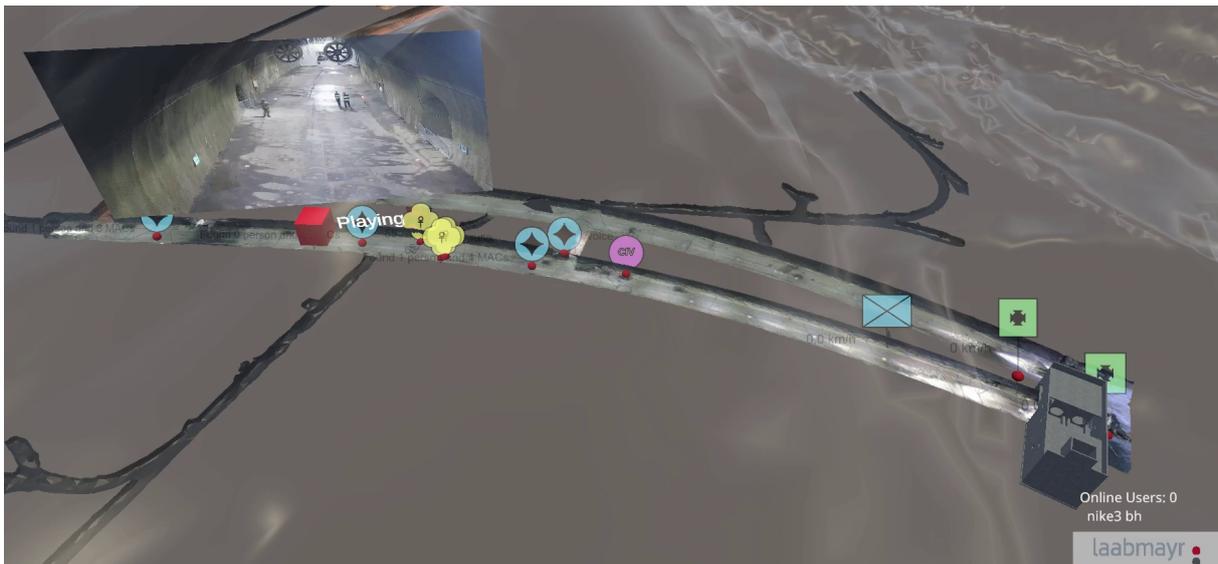


Abbildung 41: SOMT-Aufnahme während eines Großversuches

um die Positionen der drei Einheiten von RasPos handelt. Als Empfänger wurden der Laptop, ganz links im Bereich der Kreuzung, der Raspberry Pi 2, in der Nähe des GQ-1, sowie der Pi 3 dazwischen platziert. Dabei konnte durch empfangene Probe Requests von den Mobiltelefonen der im Tunnel befindlichen Personen auf Bereiche mit Aktivität geschlossen werden. Die Software wurde dabei bei allen drei Stationen identisch auf eine Scandauer von 90 Sekunden eingestellt und in Dauerschleife ausgeführt. Nach jeder abgeschlossenen Periode wurden die gesammelten Daten an den SOMT-Server weitergeleitet, wobei in der übertragenen Information zudem die Koordinaten für die jeweilige Position des Empfängers mitgesendet wurde. Rechts in selbiger Abbildung befindet sich noch ein hellblaues rechteckiges sowie zwei hellgrüne Symbole. Hierbei handelt es sich um Einheiten, welche mit dem System von BLUETRACK ausgestattet wurden. Die Unterscheidung des taktischen Kennzeichens kann dabei hinsichtlich der Art der jeweiligen Einheit getroffen werden, um beispielsweise zwischen militärischen Truppen und der Gruben- bzw. Feuerwehr differenzieren zu können. Zusätzlich besteht bei diesen Symbolen die Möglichkeit hinterlegte Trajektorien, in dieser Abbildung ausgeblendet, sowie die aktuelle jeweilige Geschwindigkeit anzuzeigen. Zum Zeitpunkt der Aufnahme waren die Einheiten mit den angegebenen 0,0 km/h noch stationär, da sie für das Szenario entsprechend auf Befehle warteten. Mittels der in SOMT auf unterschiedlichste Anforderungen gezielt optimierbaren Oberfläche konnte auch eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit der Kommandozentrale, dem NIKE DHQ-RADIV, erreicht werden.

In einem weiteren Szenario wurden Brandversuche im Straßentunnel Nord, im dafür vorgesehenen Bereich des Hitzeschildes, durchgeführt. Ziel war es die Systeme der Forschungsgruppe NIKE in Situationen mit eingeschränkter Sicht, erzeugt durch dichten künstlichen Rauch, sowie bei starken Hitzequellen zu evaluieren. Das künstliche Feuer für die Brandsimulation wird dabei über eine gesteuerte Gasflamme erzeugt. Neben durchgeführten Strömungssimulationen konnte vor allem das Projekt SUBMOVECON die Anwendung der Algorithmen an den Wärmebildkameras sowie die Weiterleitung der gewonnenen Daten an den SOMT-Server erproben. Abbildung 42 zeigt eine Momentaufnahme der Grubenwehr im Einsatz ihres Übungsszenari-



Abbildung 42: Live-Personenerfassung im Infrarotbereich mit SUBMOVECON



Abbildung 43: Live-Skeleton-Estimation im Infrarotbereich

os im Bereich des Hitzeschildes, wobei die Infrarotaufnahmen vor der Auswertung in Echtzeit hinsichtlich ihrer Farbcodes bearbeitet wurden, um für die Verarbeitung ein kontrastreicheres Bild zu erhalten. Wie im Bild zu erkennen konnten alle fünf Mitglieder trotz der starken Hitzequelle, des künstlich in Brand gesetzten Fahrzeugs rechts unten, erfolgreich erfasst werden. An den vorgenommenen Versuchen (Abb. 42) lässt sich ein interessanter Effekt beobachten. Da metallische Oberflächen die infrarote Strahlung gut reflektieren, können sie für dieses Spektrum wie ein Spiegel wirken. Daher wird, an eine für das Auge als matt erkannte Oberfläche, wie die des aus Stahl geformten Hitzeschildes, die ausgestrahlte Wärme einer Person so gut gespiegelt, dass der Algorithmus, in selbiger Abbildung ganz links, eine weitere Person im Tunnel zu erkennen glaubt. Dieser Effekt konnte auch an anderen Oberflächen beobachtet werden, wie etwa an der Karosserie von Fahrzeugen. Abbildung 43 zeigt hingegen eine andere Situation in einem ähnlichen Szenario, wobei hier die vorgestellte Skeleton-Estimation angewendet wurde. Neben der Unterscheidung in stehend oder bewegt kann damit auch eine geänderte Haltung registriert werden, so auch an der gebeugten bzw. knienden Person, zweite von links im Bild. Die neu erworbene Information kann in der Visualisierung von SOMT neben dem taktischen Symbol zusätzlich angezeigt werden. Die beiden gezeigten Ausführungen in Abbildung 42 und 43 mit den unterschiedlichen Algorithmen wurden nur für die Darstellung getrennt angewandt, die Live-Auswertung bzw. -Anzeige kann jedoch sehr wohl simultan in einem Bild erfolgen.

In der folgenden Abbildung 44 ist ein für die Projekte BLUETRACK und RasPos durchgeführtes Szenario dargestellt. Wie in der Momentaufnahme des mittels SOMT visualisierten Tunnelmodells abgebildet, wurden hierfür die erhaltenen Trajektorien der drei Einsatzmitglieder eingeblendet. Die Positionsermittlung erfolgte dabei rein durch das von BLUETRACK an den Personen angebrachte System, mithilfe der in diesen Bereichen des Tunnels verteilten UWB-Anker. Rechts oben im Bild befindet sich eine mit grünem Symbol markierte Einsatzinheit, deren Trajektorien bis hin zum Start des Szenarios am Tunnelportal nachverfolgbar sind. Selbiges gilt für die zweite Einheit mit grünem Symbol in der Mitte des Bildes, welche für den

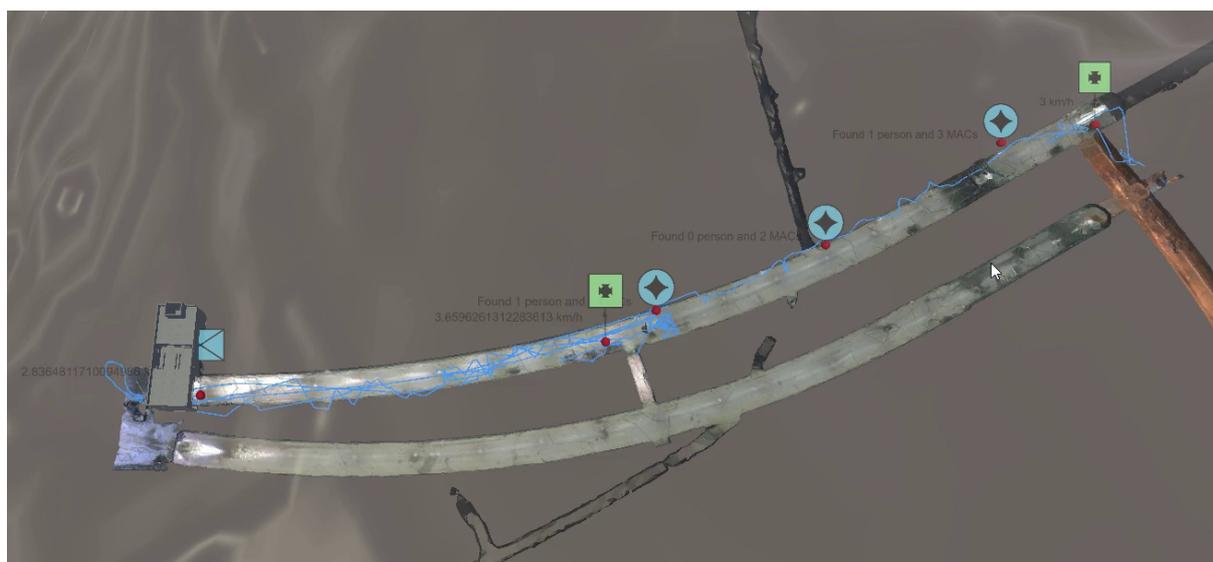


Abbildung 44: In blauer Farbe eingeblendete Trajektorien von BLUETRACK

Moment des Szenarios noch im Bereich des Querschlags verweilt. Im Aufenthaltsbereich des Portals geblieben ist eine weitere Person, welche klar mit einem hellblauen und rechteckigen taktischen Symbol unterschieden werden kann, da sie einer anderen Einsatzart unterliegt, oder beispielsweise eine leitende Funktion ausübt. Wenngleich die angezeigten Trajektorien nicht konstant perfekt in das 3D-Modell errechnet bzw. angezeigt wurden, so ist die Genauigkeit in diesem Szenario bereits völlig ausreichend, um etwa für die Einsatzleitung im DHQ-RADIV eine tragende Entscheidungshilfe darzustellen. Unter anderem können mit einem Blick bereits durchsuchte und damit gesicherte Bereiche festgestellt werden. Links neben den taktischen Symbolen wurden außerdem die aktuellen Geschwindigkeiten der Einheiten eingeblendet.

Auch das System RasPos konnte in diesem Szenario die Funktion der Personenerfassung über WLAN erneut unter Beweis stellen. Die einzelnen Empfänger wurden dabei identisch platziert, in Abbildung 44 von links nach rechts aufzählend, der Raspberry Pi 2 nahe dem GQ-1, mit etwa hundert Metern Abstand folgend der Pi 3, und abschließend der Laptop des Autors nahe der Kreuzung zum Eisenbahntunnel West. Die Scans erfolgten mit eingestellter Dauer von 90 Sekunden, wobei einerseits keine Zeitsynchronisation der einzelnen Rechner beabsichtigt wurde, sowie andererseits auch die unterschiedliche Rechenleistung zu davon abhängigen ungleichen Periodendauern führten. Anzumerken sind außerdem selten vorgekommene Verzögerungen, welche unabhängig von der Rechenleistung aufgrund einer zufällig schlechten Datenübertragung zustande kamen. Die genannten Gegebenheiten führten zu unterschiedlichen Aktualisierungszeitpunkten der empfangenen und in der SOMT-Umgebung angezeigten Daten jedes Empfängers. Die asynchronen Änderungen, welche jeweils etwa alle zwei Minuten erfolgten, wurden dabei von den mit SOMT arbeitenden Personen, wie jenen im DHQ-RADIV, nicht als störend aufgefasst. Die übertragenen Daten beinhalten, wie in Abbildung 44 jeweils links neben den Empfängern notiert, die Anzahl der derzeit in diesem Bereich über das jeweilige Smartphone identifizierbaren Personen. So werden in diesem Szenario beide Einheiten an den nächstgelegenen Empfängern erfolgreich erfasst, bzw. auch, wie für den Bereich des mittleren Empfängers, korrekt null Personen angezeigt. Die zusätzlich angeführte Anzahl empfangener unterschiedlicher MAC-Adressen wird im nachstehenden Kapitel 6 genauer diskutiert. Der Vollständigkeit halber soll hier erwähnt sein, die Ergebnisse der einzelnen Versuche zur Reichweite der WLAN Probe Requests wurden bereits in Kapitel 4.3 inkludiert.

Abschließend können die Ergebnisse der an etwaigen Szenarien mitwirkenden Vitalwesten präsentiert werden. Abbildung 45 zeigt einen ausgewerteten Ausschnitt der gemessenen Daten eines Trägers, welcher in einem Szenario der Brandsimulation als Mitglied der Grubenwehr beteiligt war. Dargestellt sind über den Verlauf der Zeit gemessene Werte der Herzfrequenz, in rot mit Heart BPM (beats per minute) gekennzeichnet und Bewegungsintensität, in schwarz mit Dynamic Load beschriftet. Auffallend ist hierbei die erwartete Korrelation zwischen Bewegungsdynamik und Herzfrequenz, da bei einer Intensivierung der Bewegung auch ein Anstieg der Herzrate folgt. Wie die Legende rechts in der Grafik erwarten lässt, können neben den vorgestellten Messwerten auch weitere Parameter aufgenommen werden. So kann bei vorhandenem GPS eine Beschleunigungsberechnung erfolgen, welche alternativ mittels der drei Beschleunigungssensoren, mit Acc für Englisch *acceleration* beschriftet, durchgeführt werden kann. Auch eine Aussage über die Geschwindigkeit der Person kann damit getroffen werden. Zudem wird die Herzfunktion mit weiteren Parametern beobachtet, wie etwa mit einem EKG (Elektrokardiograph), oder auch ECG im englischen Sprachraum, sowie einem errechneten Wert der sogenannten Herzfrequenz-

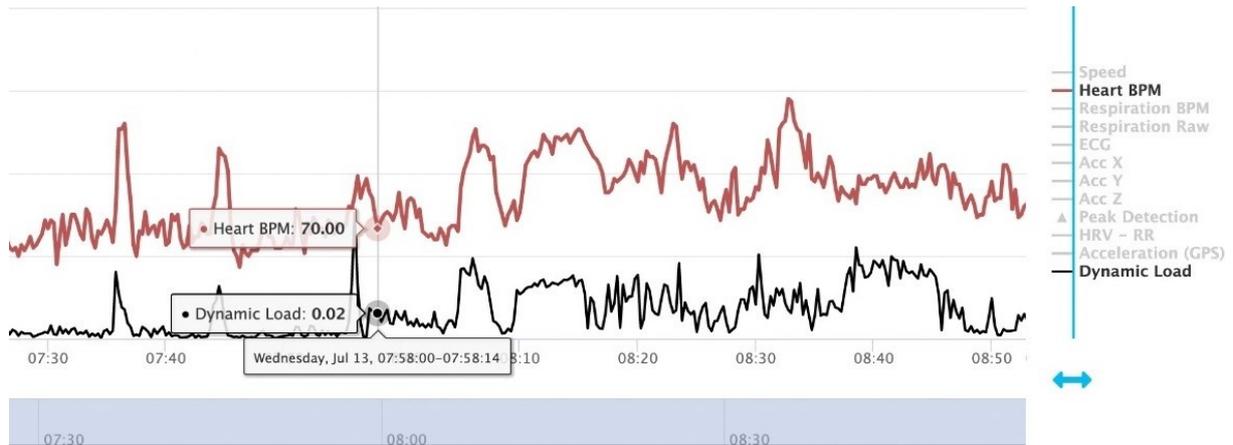


Abbildung 45: Vitalwesten - Herzrate und Bewegungsbelastung

variabilität, engl. *heart rate variability* (HRV). Von ähnlicher Bedeutung sind Parameter zur Atmung des Trägers, beispielsweise wird die Atemrate, in der Legende mit dem englischen Begriff Respiration BPM angegeben, mit aufgezeichnet. Die mittels der Vitalwesten gewonnenen Informationen können sowohl damit ausgestattete Personen in deren Tätigkeit als auch, bei Weiterleitung der Daten, die Entscheidungsträger der Einsatzleitung unterstützen. Beispielsweise kann frühzeitig erkannt werden, wenn sich eine Person nahe der individuellen Belastungsgrenze befindet. Zusätzlich kann, bei auftretenden Schadstoffen, die Gefahr schneller registriert und somit die Betroffenheit von weiteren Einsatzmitgliedern verhindert werden.

6 Diskussion

6.1 Ergebnisbewertung

Im Allgemeinen können die in Kapitel 5 beschriebenen Ergebnisse der einzelnen Projekte als äußerst erfolgreich betrachtet werden, vor allem der einzigartige gemeinsame Einsatz in den durchgeführten Großversuchen bildet dabei ein eindrucksvolles und ebenso lehrreiches Gesamtergebnis. So kam es beispielsweise während der Umsetzung häufig zu Problemen am SOMT-Server, da die enorme Datenmenge, aufgrund der zahlreich simultan eintreffenden Projektinformationen, die Übertragungsleitungen kurzzeitig überbelastete. Zudem kam es bei den Auswertungen durch SUBMOVECON zu einem, einfach ausgedrückt, Datenstau, weshalb es zu Verzögerungen von mehreren Sekunden zwischen dem Videomaterial in Echtzeit und den an SOMT geleiteten ausgewerteten Informationen kam. Diese, sowie weitere in der Praxis aufgetretene Probleme, konnten durch Änderungen und Umstrukturierungen, unter anderem in den verwendeten Software Applikationen, behoben werden. Am Großversuch konnte außerdem die Maßgeblichkeit der Verwendung eines optimierbaren und 3D-visualisierenden Systems, wie es SOMT darstellt, für eine übersichtliche Einsatzkoordinierung verdeutlicht werden. Generell konnte auch die Bedeutsamkeit der Ausführungen an einer Tunnelversuchsanstalt in der Größe einer tatsächlichen Anlage, wie sie das Zentrum am Berg zur Verfügung stellen kann, erwiesen werden.

Die Ergebnisse von RasPos waren in der Anwendung der vorgestellten Szenarien erfolgreich, jedoch zeigten sich auch hier zahlreiche Schwierigkeiten in der Ausführung. Die Einstellung an den Empfängern wurde bewusst auf empfindlich belassen, sprich es wurde keine Unterscheidung in den Signalstärken getroffen. Hintergrund war die Entscheidung, möglichst alle empfangenen Probe Requests, wenn auch nur sehr schwach mit Werten nahe -90 dBm, zu registrieren, um Personen trotz Dämpfungsverhältnissen und ähnlichem noch erfassen zu können. Bei der Ausführung wurden dadurch jedoch manche Personen an allen drei Empfängern gleichzeitig erfasst, womit eine Unterscheidung des Aufenthaltsbereiches nicht mehr gegeben war. Die aufgetretenen Verzögerungen aufgrund der unterschiedlichen Berechnungsdauern wurden, wie bereits erwähnt, kaum störend wahrgenommen. Jedoch erhöht eine lange Bearbeitungszeit die Wahrscheinlichkeit ausgesendete Probe Requests zu versäumen, da die verwendete Python-Software nur während der Scan-Periode Signale aufzeichnen kann. Zudem kamen Ausfälle vor, in denen durch einen Systemfehler in der Software die Dauerschleife unterbrochen wurde. Da diese am Pi 2 auftraten, wird die geringe Rechenleistung als Auslöser dafür vermutet. Ein weiteres Problem wurde bei größeren Mengen von Personen im Tunnel verdeutlicht. Wie in Kapitel 4.2 beschrieben, werden vor allem bei modernen Smartphones zur Erhöhung der Datensicherheit die tatsächlichen herstellereigenen MAC-Adressen unterdrückt und durch zufällige ersetzt. Dadurch kann die vorgesehene Identifizierung als Smartphone nicht mehr erfolgen, weshalb entschieden wurde, die Anzahl aller in einer Periode empfangenen MAC-Adressen in das Datenpaket für den SOMT-Server zu inkludieren. Da WLAN-Probe-Requests in manchen Geräten auch deutlich öfter als einmal pro Minute emittiert werden und zusätzlich die zufälligen MAC-Adressen bei jeder Aussendung neu erstellt werden können, entstanden starke Schwankungen dieser Anzahl erfasster Personen. Obwohl immer noch Änderungen und Bewegungen an den Empfängern beobachtet werden konnten, wich die schwankende Anzahl erfasster Personen stark von der tatsächlich im Tunnel befindlichen Menschenmenge ab. Zusammenfassend war die Ausführung von RasPos am Großversuch trotz der aufgetretenen Probleme erfolgreich und instruktiv.

6.2 Ausblick

Mit den Ausführungen und Ergebnissen von RasPos konnten weiterführende Erkenntnisse und Ideen zu Verbesserungen entstehen. Um ausgesendete Probe Requests, während am Empfänger die Bearbeitung stattfindet, trotzdem empfangen zu können, ist eine Einbringung des sogenannten Threadings in den Python-Code notwendig. Versuche, die damit verbundenen Programmschleifen in die Software zu integrieren, wurden bereits begonnen, konnten jedoch zum Zeitpunkt der Arbeit noch nicht funktionsfähig fertiggestellt werden. Die erzeugten Schleifen könnten dann WLAN-Signale empfangen und diese parallel dazu ohne Unterbrechung auswerten sowie weiterleiten.

Wie in Unterkapitel [4.3](#) mit den Versuchen zur Lokalisierung mittels zweier Empfänger bereits angedacht, könnte eine genauere Positionierung der erfassten Geräte durch die Bearbeitung der Messwerte aus mehreren Empfängern erfolgen. Dazu sollten jedoch auch die ausgewerteten Daten annähernd zeitgleich weitergeleitet werden können, weshalb für diesen Ansatz eine Kommunikation der Empfänger untereinander bzw. eine Zeitsynchronisation von Vorteil wäre.

Für eine genauere Lokalisierung könnte alternativ zu den Methoden mittels RSSI auch auf einen Ansatz gewechselt werden, für welchen die Ankunftszeit der Signale gemessen wird. Die präziseren Systeme mittels TOA (Time of Arrival) würden allerdings mehrere Empfänger voraussetzen, für den linearen Fall, wie in einem Tunnel, könnten aber auch zwei ausreichend wirken. Zusätzlich wäre eine genaue Zeitsynchronisation der verwendeten Geräte nötig.

Das aufgetauchte Problem durch die Unterdrückung der herstellerspezifischen MAC-Adressen, bzw. der Einführung zufällig generierter MACs, könnte mit folgendem Ansatz umgangen werden. Anstatt alle ein bis zwei Minuten eine Anzahl von erfassten Personen für einen Bereich wiederzugeben, könnte durch eine deutlich verkürzte Scan-Periode jede empfangene Probe Request einzeln als Aktivität eingeblendet werden. Beispielsweise könnte damit durch die Einführung genauerer Methoden mittels TOA, aber auch RSSI, ein Aufblinken der Position des Signalursprungs in der 3D-Umgebung von SOMT erreicht werden. Um einen Überfluss eingeblendeter taktischer Symbole zu verhindern, könnte einfach eine begrenzte Anzeigedauer oder zeitabhängige Transparenz eingestellt werden.

Als abschließende Idee könnte RasPos nicht nur stationär, sondern auch als tragbares System ausgeführt werden. Da beispielsweise das Projekt BLUETRACK ebenfalls Raspberry Pis für die Lokalisierung der Einsatzkräfte verwendet, könnte RasPos in die Software dieser Systeme integriert werden und als tragbarer Empfänger agieren. Dabei könnten erneut die identischen Methoden mittels RSSI oder TOA angewendet werden, wobei die dafür benötigte Position des jeweiligen Empfängers aus den Berechnungen des BLUETRACK Systems übernommen werden könnten. Die Anwendung von Trilateration ist dabei nicht zwingend nötig, so könnte ein einzelner Empfänger der damit ausgestatteten Person auch einfach Informationen über elektronische Geräte in dessen Nähe übermitteln, womit sich erneut auf Personen bzw. Aktivität schließen ließe.

7 Zusammenfassung

Die durchgeführten Versuche, sowohl zur Reichweite als auch besonders jene in Zusammenarbeit mit den Projekten der Forschungsgruppe NIKE, konnten die Eignung eines auf WLAN-basierten Systems für die Detektion und Abschätzung der in einem Bereich befindlichen zivilen Personen, bestätigen. Das in dieser Arbeit präsentierte System RasPos beruht auf der kontinuierlichen Aussendung sogenannter Probe Requests, welche von WLAN-fähigen Geräten zur Kommunikation untereinander für einen optimierten Verbindungsaufbau von Netzwerken verwendet werden. Die verschiedenen Möglichkeiten mittels dieser Informationen, eine Lokalisierung zu bewerkstelligen, wurden aufgezeigt, zusätzlich wurden jedoch zuvor auch grundlegende, auf anderen Informations- bzw. Signalarten basierende Methoden, speziell für die Positionierung in Innenräumen sowie Strukturen untertage, vorgestellt. Für ein verbessertes Verständnis der später vorgestellten visualisierenden Systeme wurden in den Grundlagen auch die ausführungunterstützenden Methoden, wie etwa Virtual Reality, inkludiert. Anschließend wurde auch auf den Stand der Technik eingegangen, in welchen für den Tunnelbau relevante Aspekte, unterteilt in Bau- und Betriebsphase, gemeinsam mit kurzen Vorstellungen relevanter Produkte und Unternehmen, erörtert wurden.

Auf die Entstehung von RasPos, sowie dessen technischer Aufbau und Umsetzung wurde eingegangen, gleichzeitig konnte auch ein kurzer Einblick in die eingesetzte Software gegeben werden. Um die Eignung des Vorhabens zu überprüfen, wurden vorerst Versuche zur Reichweite an der Tunnelanlage des am steirischen Erzberg befindlichen Zentrum am Berg durchgeführt. Dabei wurden weitere Untersuchungen unternommen, unter anderem zur Signalabschwächung durch einen Körper, der Signalausbreitung an einer Tunnelkreuzung sowie Messungen aus dem Inneren eines Fahrzeugs. Außerdem wurde das Signaldämpfungsverhalten von drei unterschiedlichen Fluchttürtypen an den am ZaB befindlichen begehbaren Querschlägen untersucht. Für die Verwendung des Systems als genaueres Positionierungsverfahren wurden auch Versuche mit zwei Empfänger durchgeführt. Dabei zeigten sich bei den Ausführungen bereits Nachteile der gewählten Methode, da die gemessenen Signalstärken aufgrund komplexer Wellenausbreitungsmechanismen stark schwankten. Zusammenfassend konnte das vorgeschlagene System trotzdem für den Einsatz in unterirdischen Strukturen, zur Verwendung für eine in Bereichen unterteilte Detektion von Personen, als geeignet beurteilt werden.

Da die Teilnahme des eigenen Projektes an gemeinsamen Großversuchen am ZaB und ein Zusammenwirken mit der Forschungsgruppe NIKE und weiteren Versuchspartnern, welche sich mit ähnlichen Themen zur Erhöhung der Sicherheit in unterirdischen und komplexen Anlagen beschäftigen, geplant waren, wurden auch diese Projekte und deren Vorgehen in der Diplomarbeit vorgestellt. An den Ausführungen konnte besonders mit dem visualisierenden Programm SOMT verdeutlicht werden, wie wichtig eine übersichtliche und, den jeweiligen Anforderungen entsprechend, optimierbare Oberfläche für eine effektive Einsatzleitung und Durchführung ist. Die gemeinsamen Erfolge und jeweiligen Ergebnisse, welche gekürzt in dieser Arbeit beigefügt sind, wurden im Anschluss an den Großversuchen auch auf einer Konferenz, den Urban Operations Expert Talks 2022, präsentiert.

Die Ergebnisbewertung und vor allem die darauffolgenden Erkenntnisse und Verbesserungsvorschläge wurden mit Fokus auf das Projekt RasPos behandelt. Mit dem demonstrierten System

konnten Personen, bzw. deren WLAN-fähige Geräte, detektiert und zu den jeweiligen Bereichen der Empfänger zugeordnet werde. Da die Signalausendung durchschnittlich nur einmal pro Minute erfolgt, ist eine kontinuierliche Verfolgung der erfassten Person mit diesem Ansatz nicht möglich. Jedoch fiel bei einer in Zonen aufgeteilten Positionierung die punktuelle Erfassung nicht störend auf, da die Bereiche, aufgrund der demonstrierten hohen Reichweite, groß genug gewählt werden konnten. Die vorgeschlagene Berücksichtigung der Geräteart, mit welcher nur Smartphones gezählt, und andere WLAN-fähigen Geräte, wie Smartwatches und Tablets, aussortiert hätten werden können, erwies sich als nicht durchführbar. Die herstellereinspezifischen Adressen für eine Geräteidentifikation können von modernen Apparaten zur Datensicherheit unterdrückt werden, weshalb die Geräteart nicht mehr bestimmbar wird. Deshalb wurden auch alternative Ansätze vorgeschlagen, welche selbige Signale verwenden, jedoch den Empfängern mittels einer Zeitsynchronisation eine genauere Positionsbestimmung des Signalursprungs ermöglicht.

Grundlegend soll RasPos aufgrund gewisser Einschränkung, wie der Unsicherheit, ob eine Person tatsächlich ein WLAN-fähiges Gerät mit sich führt, andere vorgestellte Systeme nicht ersetzen, sondern als Ergänzung fungieren. Beispielsweise könnten sich im Falle eines Tunnelbrandes eingesetzte bildverarbeitende Systeme, infolge des dichten Rauches oder durch die Errichtung der vorgestellten mobilen Wettertore, als unwirksam erweisen, womit Systeme auf WLAN-Basis vorteilhaft eingesetzt werden könnten, da die verwendeten Funkwellen Rauch sowie das Material des Wettertores mit vernachlässigbaren Dämpfungseffekten durchdringen können. Zu den weiterführenden Ideen zählt auch eine tragbare Version von RasPos, welche Personen im nahen Bereich des Anwenders detektieren könnte. Ziel dabei ist für alle Systeme und Erweiterungen, die Sicherheit in Strukturen untertage, wie Tunnelanlagen, zu erhöhen, indem den Einsatzkräften im Falle eines Ereignisses gezielt zusätzliche Informationen zur Verfügung gestellt werden können. Dadurch soll eine effektivere Durchführung eines Einsatzes, sowie eine damit verbundene höhere Wahrscheinlichkeit zu einer erfolgreichen Rettung bzw. Evakuierung von Personen, ermöglicht werden.

8 Verzeichnisse

8.1 Literatur

- [1] Norhafizan Ahmad u. a. “Reviews on Various Inertial Measurement Unit (IMU) Sensor Applications”. In: *International Journal of Signal Processing Systems* (2013), S. 256–262. ISSN: 23154535. DOI: [10.12720/ijsp.1.2.256-262](https://doi.org/10.12720/ijsp.1.2.256-262).
- [2] Marco Altini u. a. “Bluetooth indoor localization with multiple neural networks”. In: *IEEE 5th International Symposium on Wireless Pervasive Computing 2010*. IEEE, 5.05.2010 - 07.05.2010, S. 295–300. ISBN: 978-1-4244-6855-3. DOI: [10.1109/ISWPC.2010.5483748](https://doi.org/10.1109/ISWPC.2010.5483748).
- [3] AME - Advanced Microwave Engineering Srl. *Internetwebsite*. 2022. URL: <https://www.ameol.it/de/>.
- [4] ARPost. *Holo-Light Launches ARES AR Workspace for Engineering and Industrial Design: The AR workspace allows engineers and industrial designers to upload CAD files and turn them into 3D holographic models they can interact with*. Hrsg. von ARPost. 2020. URL: <https://arpost.co/2020/05/21/holo-light-ares-ar-workspace/>.
- [5] ASFINAG - Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft. *Tunnelsicherheit: Die wichtigsten Sicherheitseinrichtungen*. 2022. URL: <https://www.asfinag.at/verkehr-sicherheit/tunnelsicherheit/>.
- [6] Raimund Binder. “Personenerfassung auf Untertagebaustellen – ein wichtiger Beitrag zur Erhöhung der Sicherheit für alle Beteiligten”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 155.6 (2010), S. 285–288. ISSN: 0005-8912. DOI: [10.1007/s00501-010-0575-6](https://doi.org/10.1007/s00501-010-0575-6).
- [7] Ramon F. Brena u. a. “Evolution of Indoor Positioning Technologies: A Survey”. In: *Journal of Sensors* 2017 (2017), S. 1–21. ISSN: 1687-725X. DOI: [10.1155/2017/2630413](https://doi.org/10.1155/2017/2630413).
- [8] J. Dean Brock, Rebecca F. Bruce und Marietta E. Cameron. “Changing the world with a Raspberry Pi”. In: *Journal of Computing Sciences in Colleges* 29 (2013), S. 151–153.
- [9] Bundesgesetzblatt. *Bundesgesetz über die Sicherheit von Straßentunneln (Straßentunnel-Sicherheitsgesetz – STSG): BGBl. I Nr. 54/2006*. 9.08.2022. URL: <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20004722>.
- [10] Bundesministerium für Inneres, Hrsg. *Arten von Katastrophen*. 2022. URL: https://www.oesterreich.gv.at/themen/gesundheit_und_notfaelle/katastrophenfaelle/Seite.2950020.html.
- [11] Matteo Cypriani, Gilles Delisle und Nadir Hakem. “Wi-Fi-based positioning in underground mine tunnels”. In: *International Conference on Indoor Positioning and Indoor*

- Navigation*. IEEE, 28.10.2013 - 31.10.2013, S. 1–7. ISBN: 978-1-4799-4043-1. DOI: [10.1109/IPIN.2013.6817894](https://doi.org/10.1109/IPIN.2013.6817894).
- [12] Paolo Dabove u. a. “Indoor positioning using Ultra-wide band (UWB) technologies: Positioning accuracies and sensors’ performances”. In: *2018 IEEE/ION Position, Location and Navigation Symposium (PLANS)*. IEEE, 23.04.2018 - 26.04.2018, S. 175–184. ISBN: 978-1-5386-1647-5. DOI: [10.1109/PLANS.2018.8373379](https://doi.org/10.1109/PLANS.2018.8373379).
- [13] Yuejun Dong u. a. “The research and application of indoor location algorithm based on wireless sensor network”. In: *2011 IEEE 3rd International Conference on Communication Software and Networks*. IEEE, 27.05.2011 - 29.05.2011, S. 719–722. ISBN: 978-1-61284-485-5. DOI: [10.1109/ICCSN.2011.6014369](https://doi.org/10.1109/ICCSN.2011.6014369).
- [14] Durstmüller GmbH, Hrsg. *Personenerfassungs- und Evakuierungssysteme: DULA-Link Personenerfassungssysteme*. URL: https://www.dula.at/pdf/Katalog16_12.pdf.
- [15] Julian Eder und Lukas Hager. *Netzwerkplan: 220630_Netzwerkplan_IronNike*. 2022.
- [16] Bernd Eissfeller, Andreas Teuber und Peter Zucker. “Indoor-GPS: ist der Satellitenempfang in Gebäuden möglich”. In: *ZfV, Zeitschrift für Vermessung* 4 (2005), S. 130.
- [17] Europäisches Parlament, Rat der Europäischen Union. *Richtlinie 2004/54/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 29. April 2004 über Mindestanforderungen an die Sicherheit von Tunneln im transeuropäischen Straßennetz: Document 32004L0054*. 29.04.2004. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2004/54/oj>.
- [18] Mana Farshid u. a. “Go boldly!” In: *Business Horizons* 61.5 (2018), S. 657–663. ISSN: 00076813. DOI: [10.1016/j.bushor.2018.05.009](https://doi.org/10.1016/j.bushor.2018.05.009).
- [19] Hannes Fassold und Ridouane Ghermi. “OmniTrack: Real-Time Detection and Tracking of Objects, Text and Logos in Video”. In: *2019 IEEE International Symposium on Multimedia (ISM)*. IEEE, 9.12.2019 - 11.12.2019, S. 245–2451. ISBN: 978-1-7281-5606-4. DOI: [10.1109/ISM46123.2019.00057](https://doi.org/10.1109/ISM46123.2019.00057).
- [20] FFG Projektdatenbank. *NIKE DHQ-RADIV: Digital Head Quarter-Entwicklung RAPID Data Integration and Visualization als Kernprozess der Stabsarbeit*. Hrsg. von Österreichische Forschungsförderungs GmbH. 2021. URL: <https://projekte.ffg.at/projekt/4098856/pdf>.
- [21] FFG Projektdatenbank. *NIKE MED: Nachhaltige Interdisziplinarität in Komplexen Einsätzen - MEDical treatment*. Hrsg. von Österreichische Forschungsförderungs GmbH. 2021. URL: <https://projekte.ffg.at/projekt/4101152/pdf>.
- [22] A. J. Fornace, K. W. Kohn und H. E. Kann. “DNA single-strand breaks during repair of UV damage in human fibroblasts and abnormalities of repair in xeroderma pigmentosum”.

- In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 73.1 (1976), S. 39–43. ISSN: 0027-8424. DOI: [10.1073/pnas.73.1.39](https://doi.org/10.1073/pnas.73.1.39).
- [23] Julien Freudiger. “How talkative is your mobile device?” In: New York, NY, USA: ACM, 2015, S. 1–6. ISBN: 9781450336239. DOI: [10.1145/2766498.2766517](https://doi.org/10.1145/2766498.2766517).
- [24] FSV - Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr. *Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen - Sicherheit und Gesundheitsschutz auf Untertagebaustellen: RVS 09.01.51*. URL: <http://www.fsv.at/shop/produktdetail.aspx?IDProdukt=20e3dbd6-cb4d-435e-b579-9c56eca36564>.
- [25] Robert Galler. “Research@ZaB – Forschungs- und Entwicklungszentrum sowie Trainings- und Schulungszentrum mit Fokus auf den Bau und Betrieb von Untertageanlagen”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 161.2 (2016), S. 76–83. ISSN: 1613-7531. DOI: [10.1007/s00501-016-0443-0](https://doi.org/10.1007/s00501-016-0443-0).
- [26] Robert Galler. *Welcome at Zentrum am Berg: Full scale research and development & education and training in construction and operation of underground facilities*. Urban Operations Expert Talks 2022, 2022.
- [27] Robert Galler u. a. *Prävention von Katastrophenszenarien Untertage: Forschung und Entwicklung sowie Ausbildung und Training am Zentrum am Berg (ZaB)*. Hrsg. von Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift : ÖIAZ. 2021. URL: https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/8686443/8_katastrophen.pdf.
- [28] Franz Graf und Martin Gruber. *Graf, Franz, and Martin Gruber. "Rapid Incident Detection in Tunnels through Acoustic Monitoring—Operating Experiences in Austrian Road Tunnels*. Hrsg. von 9th International Conference ‘Tunnel Safety and Ventilation’ 2018. Graz, 2018. URL: https://www.joanneum.at/fileadmin/user_upload/2018-04-06-AKUT_Paper_Tunnelkonferenz_Graz_2018_final.pdf.
- [29] Guangyi Guo u. a. “Indoor Smartphone Localization: A Hybrid WiFi RTT-RSS Ranging Approach”. In: *IEEE Access* 7 (2019), S. 176767–176781. DOI: [10.1109/ACCESS.2019.2957753](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957753).
- [30] Michael Halwachs. “Guidelines for health and safety and fire safety on underground construction sites”. In: *Geomechanics and Tunnelling* 11.6 (2018), S. 659–665. ISSN: 1865-7362. DOI: [10.1002/geot.201800049](https://doi.org/10.1002/geot.201800049).
- [31] Heute. *Polizei erhält Zugriff auf LIVE-Cams der Wiener Linien*. Hrsg. von DJ Digitale Medien GmbH. 2021. URL: <https://www.heute.at/s/polizei-hat-in-wien-nun-zugriff-auf-oeffi-kameras-100131739>.
- [32] Peter Hofer. “Coping with Complexity. The Development of Comprehensive SubSurface Training Standards from a Military Perspective”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische*

- Monatshefte* 164.12 (2019), S. 497–504. ISSN: 1613-7531. DOI: [10.1007/s00501-019-00915-9](https://doi.org/10.1007/s00501-019-00915-9).
- [33] Peter Hofer, Michael Nöger und Manfred Eder. “Mobile Wettertore in komplexen untertägigen Einsätzen”. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 166.12 (2021), S. 603–611. ISSN: 1613-7531. DOI: [10.1007/s00501-021-01178-z](https://doi.org/10.1007/s00501-021-01178-z).
- [34] Peter Hofer u. a. *Das Fast Tunnel Modelling Tool für Untertagebauwerke: Fast Tunnel Modelling Tool for Subsurface Structures*. Hrsg. von AGIT – Journal für Angewandte Geoinformatik, 7-2021. 2021. URL: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/AGIT_2021/537707003.pdf.
- [35] Peter Hofer u. a. “Die Rolle von Virtual Reality in der Bewältigung militärischer Einsätze unter Tage: The Role of Virtual Reality in Coping with Subsurface Military Operations”. In: *AGIT, Journal für Angewandte Geoinformatik*. 2020, S. 126–131. URL: https://gispoint.de/fileadmin/user_upload/paper_gis_open/AGIT_2020/537698012.pdf.
- [36] Peter Hofer u. a. “RApid Data Integration and Visualization (RADIV) in Subsurface Operations”. In: *Geomechanics and Tunnelling* 15.3 (2022), S. 305–310. ISSN: 1865-7362. DOI: [10.1002/geot.202100068](https://doi.org/10.1002/geot.202100068).
- [37] Yanbin Hou, Xiaodong Yang und Qammer H. Abbasi. “Efficient AoA-Based Wireless Indoor Localization for Hospital Outpatients Using Mobile Devices”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18.11 (2018). DOI: [10.3390/s18113698](https://doi.org/10.3390/s18113698).
- [38] Kaixuan Huang u. a. *High Precision Indoor Localization with Dummy Antennas – An Experimental Study*. URL: <http://arxiv.org/pdf/2108.10646v1>.
- [39] IL - Ingenieurbüro Laabmayr und Partner ZT GmbH. *FTMT – Fast Tunnel Modeling Tool: Entwicklung einer Applikation zur schnellen Erstellung von 3D-Modellen untertägiger Anlagen*. 2020. URL: <https://www.laabmayr.at/tunnel-plus/rd/ftmt-fast-tunnel-modeling-tool/>.
- [40] Hilmar Ingensand und P. Bitzi. “Technologien der GSM-Positionierungsverfahren”. In: *AVN - Allgemeine Vermessungs-Nachrichten*. Bd. 8-9. 2001, S. 286–294. URL: <https://gispoint.de/artikelarchiv/avn/2001/avn-ausgabe-8-92001/1910-technologien-der-gsm-positionierungsverfahren.html>.
- [41] Hubert Kickinger. *Überwachung: 12.500 Kameras bei Wiener Linien*. Hrsg. von Österreichischer Rundfunk - ORF. 2018. URL: <https://wien.orf.at/v2/news/stories/2905244/index.html>.
- [42] Tan Kim Geok u. a. “Review of Indoor Positioning: Radio Wave Technology”. In: *Applied Sciences* 11.1 (2021), S. 279. DOI: [10.3390/app11010279](https://doi.org/10.3390/app11010279).

- [43] Bernhard Klamfer. “Resilienz von Straßentunneln-Bedrohungen, Ausfallszenarien und verkehrliche Auswirkungen”. Masterarbeit. Montanuniversität Leoben, 2019. URL: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/4699462/AC15592447.pdf>.
- [44] Manon Kok, Jeroen D. Hol und Thomas B. Schön. “Using Inertial Sensors for Position and Orientation Estimation”. In: *Foundations and Trends® in Signal Processing* 11.1-2 (2017), S. 1–153. ISSN: 1932-8346. DOI: [10.1561/20000000094](https://doi.org/10.1561/20000000094). URL: <http://arxiv.org/pdf/1704.06053v2>.
- [45] Ulf Konrad. *Das elektromagnetische Spektrum*. www.ulfkonrad.de. URL: <https://www.ulfkonrad.de/physik/12-13/2-semester/elektromag-spektrum>.
- [46] Prashant Krishnamurthy. “Technologies for Positioning in Indoor Areas”. In: *Indoor Wayfinding and Navigation* (2015). ISSN: 4822-3084. DOI: [10.1201/b18220-4](https://doi.org/10.1201/b18220-4).
- [47] A. R. Kulaib u. a. “An overview of localization techniques for Wireless Sensor Networks”. In: *2011 International Conference on Innovations in Information Technology*. IEEE, 25.04.2011 - 27.04.2011, S. 167–172. ISBN: 978-1-4577-0311-9. DOI: [10.1109/INNOVATIONS.2011.5893810](https://doi.org/10.1109/INNOVATIONS.2011.5893810).
- [48] Christiane Lellig u. a. *Soll sich der Mensch dem Tunnel anpassen oder der Tunnel dem Menschen? Forschungsauftrag FGU 2008/002 auf Antrag der Fachgruppe für Untertagebau (FGU)*. Hrsg. von Schweizerische Eidgenossenschaft - Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation UVEK. 2011.
- [49] Yariv Levski. *10 Real World Examples of AR Marketing Success: 1. Augment — A Versatile Platform for AR Marketing Apps*. Hrsg. von A Medium Corporation. 2017. URL: <https://medium.com/@yarivlevski/10-real-world-examples-of-ar-marketing-success-d75a3f77fc6b>.
- [50] Kai Li u. a. *SenseFlow: An Experimental Study for Tracking People*. 2016. DOI: [10.48550/arXiv.1606.03713](https://doi.org/10.48550/arXiv.1606.03713).
- [51] Massimiliano Locatelli u. a. “Imaging live humans through smoke and flames using far-infrared digital holography”. In: *Optics express* 21 (2013), S. 5379–5390. DOI: [10.1364/OE.21.005379](https://doi.org/10.1364/OE.21.005379).
- [52] Gregor Luetzenburg, Aart Kroon und Anders A. Bjørk. “Evaluation of the Apple iPhone 12 Pro LiDAR for an Application in Geosciences”. In: *Scientific reports* 11.1 (2021), S. 22221. DOI: [10.1038/s41598-021-01763-9](https://doi.org/10.1038/s41598-021-01763-9).
- [53] Gough Lui u. a. “Differences in RSSI readings made by different Wi-Fi chipsets: A limitation of WLAN localization”. In: *2011 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS)*. IEEE, 29.06.2011 - 30.06.2011, S. 53–57. ISBN: 978-1-4577-0186-3. DOI: [10.1109/ICL-GNSS.2011.5955283](https://doi.org/10.1109/ICL-GNSS.2011.5955283).

- [54] Malith Maheepala, Abbas Z. Kouzani und Matthew A. Joordens. “Light-Based Indoor Positioning Systems: A Review”. In: *IEEE Sensors Journal* 20.8 (2020), S. 3971–3995. ISSN: 1530-437X. DOI: [10.1109/JSEN.2020.2964380](https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2964380).
- [55] Andrew Markham u. a. “Underground Localization in 3-D Using Magneto-Inductive Tracking”. In: *IEEE Sensors Journal* 12.6 (2012), S. 1809–1816. ISSN: 1530-437X. DOI: [10.1109/JSEN.2011.2178064](https://doi.org/10.1109/JSEN.2011.2178064).
- [56] Karin Mascher u. a. “NIKE BLUETRACK: Blue Force Tracking in GNSS-Denied Environments Based on the Fusion of UWB, IMUs and 3D Models”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 22.8 (2022). DOI: [10.3390/s22082982](https://doi.org/10.3390/s22082982).
- [57] Matrix Design Group, LLC. *N-Connex - High-Speed Gigabit Modular Network*. 2022. URL: <https://matrixteam.com/mining-networks-2/n-connex/>.
- [58] Rainer Mautz. “Indoor positioning technologies”. Habilitation Thesis. Zurich: ETH Zurich, 2012. DOI: [10.3929/ethz-a-007313554](https://doi.org/10.3929/ethz-a-007313554). URL: <https://www.research-collection.ethz.ch/bitstream/handle/20.500.11850/54888/eth-5659-01.pdf>.
- [59] Rainer Mautz und Sebastian Tilch. “Survey of optical indoor positioning systems”. In: *2011 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. IEEE, 21.09.2011 - 23.09.2011, S. 1–7. ISBN: 978-1-4577-1805-2. DOI: [10.1109/IPIN.2011.6071925](https://doi.org/10.1109/IPIN.2011.6071925).
- [60] MEMS and Nanotechnology Exchange. *What is MEMS Technology?* URL: <https://www.mems-exchange.org/MEMS/what-is.html>.
- [61] Stefan Mey. *Autonomous vehicles: AVL optimizes object recognition in AI*. Hrsg. von Brutkasten Media GmbH. 2020. URL: <https://brutkasten.com/deepen-ai-avl/>.
- [62] Christof Neumann und Christian Sommerlechner. *Notfallkonzepte für österreichische Eisenbahntunnel*. 2017. URL: <https://silو.tips/download/inhalt-dipl-ing-christof-neumann-ilf-beratende-ingenieure-zt-ges-mbh-a-linz-harr>.
- [63] ÖBB-Infrastruktur AG. *Schienennetz-Nutzungsbedingungen 2023*. 1.2. 2022. URL: <https://infrastruktur.oebb.at/de/geschaeftpartner/schienennetz/snb/snb-2023/schienennetz-nutzungsbedingungen-2023.pdf>.
- [64] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr FSV. *Tunnelbau, Bauliche Gestaltung, Bauliche Anlagen für Betrieb und Sicherheit: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen - RVS 09.01.24*. 1.06.2014.
- [65] Österreichische Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr FSV. *Tunnelbau, Betrieb und Sicherheit, Tunnelausrüstung: Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen - RVS 09.02.22*. 1.06.2014.

- [66] Rong Peng und Mihail L. Sichitiu. “Angle of Arrival Localization for Wireless Sensor Networks”. In: *2006 3rd Annual IEEE Communications Society on Sensor and Ad Hoc Communications and Networks*. IEEE, 28.09.2006 - 28.09.2006, S. 374–382. ISBN: 1-4244-0626-9. DOI: [10.1109/SAHCN.2006.288442](https://doi.org/10.1109/SAHCN.2006.288442).
- [67] Fernando Joaquim Leite Pereira. “Positioning systems for underground tunnel environments”. Dissertation. Universidade do Porto, 2016. URL: <https://cds.cern.ch/record/2215397/files/CERN-THESIS-2016-101.pdf>.
- [68] Roland Perko u. a. “Human Tracking and Pose Estimation for Subsurface Operations”. In: *Proceedings of the OAGM Workshop 2021* (2021), S. 77–79. DOI: [10.3217/978-3-85125-869-1-15](https://doi.org/10.3217/978-3-85125-869-1-15).
- [69] Pew Research Center. *Mobile phone ownership over time from 2002 to 2021*. 2021. URL: <https://www.pewresearch.org/internet/fact-sheet/mobile/>.
- [70] Stephanie Radon und Bernd Strnad. *Bericht über Brände und Unfälle in Tunnelanlagen: Bericht gemäß § 3 Abs. 8 STSG beziehungsweise EU-Direktive 2004/54/EG 1999-2019*. Hrsg. von Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. Wien, 2020. URL: https://www.bmk.gv.at/dam/jcr:b268b082-424d-429c-8026-7b60608e4ed7/tunnelbericht_1999-2019_20200904.pdf.
- [71] J. Rantakokko u. a. “User requirements for localization and tracking technology: A survey of mission-specific needs and constraints”. In: *2010 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation*. IEEE, 15.09.2010 - 17.09.2010, S. 1–9. ISBN: 978-1-4244-5862-2. DOI: [10.1109/IPIN.2010.5646765](https://doi.org/10.1109/IPIN.2010.5646765).
- [72] RK safetec GmbH. *Internetwebsite*. URL: <https://www.rk-safetec.com/de>.
- [73] RK safetec GmbH. *Produktfolder ZOKA - Überwachungs- und Kommunikationssystem: Überwachungs- und Kommunikationssysteme für die Großbaustelle*. URL: <https://www.rk-safetec.com/media/107/download/ZOKA%20-%20%C3%9Cberwachungs-%20und%20Kommunikationssystem.pdf?v=1>.
- [74] Mohd Ezanee Rusli u. a. “An Improved Indoor Positioning Algorithm Based on RSSI-Trilateration Technique for Internet of Things (IOT)”. In: *2016 International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCE)*. IEEE, 26.07.2016 - 27.07.2016, S. 72–77. ISBN: 978-1-5090-2427-8. DOI: [10.1109/ICCCE.2016.28](https://doi.org/10.1109/ICCCE.2016.28).
- [75] S. Radacina Rusu, M. J. D. Hayes und J. A. Marshall. “Localization in large-scale underground environments with RFID”. In: *2011 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*. IEEE, 8.05.2011 - 11.05.2011, S. 001140–001143. ISBN: 978-1-4244-9788-1. DOI: [10.1109/CCECE.2011.6030640](https://doi.org/10.1109/CCECE.2011.6030640).

- [76] Sebastian Sadowski und Petros Spachos. “RSSI-Based Indoor Localization with the Internet of Things”. In: *IEEE Access* 6 (2018), S. 30149–30161. DOI: [10.1109/ACCESS.2018.2843325](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2843325).
- [77] K. K. Santhosh, D. P. Dogra und P. P. Roy. “Anomaly Detection in Road Traffic Using Visual Surveillance”. In: *ACM Computing Surveys* 53.6 (2021), S. 1–26. ISSN: 0360-0300. DOI: [10.1145/3417989](https://doi.org/10.1145/3417989).
- [78] Martin Sauter. *From GSM to LTE-advanced: An introduction to mobile networks and mobile broadband*. Revised 2. edition. Chichester: Wiley, 2014. ISBN: 978-1-118-86192-9.
- [79] Zack Schollz. *howmanypeoplearearound: Count the number of people around you by monitoring wifi signals*. GitHub, 2017. URL: <https://github.com/schollz/howmanypeoplearearound>.
- [80] Xiang Song u. a. “A hybrid positioning strategy for vehicles in a tunnel based on RFID and in-vehicle sensors”. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 14.12 (2014), S. 23095–23118. DOI: [10.3390/s141223095](https://doi.org/10.3390/s141223095).
- [81] Statista. *Anteil der Smartphone-Besitzer sowie Nutzung von Mobile Commerce in Österreich von 2013 bis 2021*. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/568185/umfrage/smartphone-besitz-und-smartphone-nutzung-in-oesterreich/>.
- [82] Statista. *Anteil der Smartphone-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2012 bis 2021*. 2022. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/585883/umfrage/anteil-der-smartphone-nutzer-in-deutschland/>.
- [83] Statista. *Number of smartphone subscriptions worldwide from 2016 to 2026*. Hrsg. von Surveys of U.S. adults conducted 2002-2021. 2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/330695/number-of-smartphone-users-worldwide/>.
- [84] Mari Saua Svalastog. “Indoor Positioning - Technologies, Services and Architectures”. Master thesis. University of Oslo, 2007. URL: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/9742/Svalastog.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- [85] Teledyne FLIR LLC. *Can Thermal Imaging See Through Walls? And Other Common Questions*. 2019. URL: <https://www.flir.eu/discover/cores-components/can-thermal-imaging-see-through-walls/>.
- [86] THE INNOVATION COMPANY. *AKUT® Acoustic Tunnel Monitoring: Incident recognition in less than 1 second!* April. 2022. URL: https://www.akut-tunnel.com/fileadmin/ProduktWebseiten/DIGITAL/akut-tunnel.com/DIGITAL_AKUT_Folder_April_2022.pdf.

- [87] Theresianische Militärakademie. *Forschung & Entwicklung - SubSurface / Subterranean Operations - Forschungspartner*. 2022. URL: <https://www.milak.at/forschung/subops/forschungspartner>.
- [88] Theresianische Militärakademie. *Forschung & Entwicklung - SubSurface / Subterranean Operations - Projekte*. 2022. URL: <https://www.milak.at/forschung/subops/projekte>.
- [89] Theresianische Militärakademie. *Forschungsbereich: Komplexe Einsätze unter Tage: Im "Zentrum am Berg" konnte erstmals das mobile Wettertor aufgebaut und getestet werden*. 2022. URL: <https://www.milak.at/news/detail/forschungsbereich-komplexe-einsaetze-unter-tage>.
- [90] Alexander Tscharf. "UAV-gestützte Vermessung im Bergbau - Zur Frage der Genauigkeit unter Verwendung von Structure from Motion". Dissertation. Leoben: Montanuniversität Leoben, 2020. URL: <https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/5905014/AC16110344.pdf>.
- [91] Tunnelkom GmbH. *Firmenpräsentation Tunnelkom GmbH*. 2021. URL: http://www.tunnelkom.de/Firmenpraesentation_Tunnelkom_deutsch_V211123.pdf.
- [92] Alex Varshavsky u. a. "GSM indoor localization". In: *Pervasive and Mobile Computing* 3.6 (2007), S. 698–720. ISSN: 15741192. DOI: [10.1016/j.pmcj.2007.07.004](https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2007.07.004).
- [93] Edwin Vattapparamban u. a. "Indoor occupancy tracking in smart buildings using passive sniffing of probe requests". In: *2016 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC)*. IEEE, 2016, S. 38–44. ISBN: 978-1-5090-0448-5. DOI: [10.1109/ICCW.2016.7503761](https://doi.org/10.1109/ICCW.2016.7503761).
- [94] Vienna Online. *Mehr Videoüberwachung in Wiens U-Bahn-Stationen*. Hrsg. von Russmedia Digital GmbH. 2015. URL: <https://www.vienna.at/mehr-videoueberwachung-in-wiens-u-bahn-stationen/4559088>.
- [95] VMT GmbH Gesellschaft für Vermessungstechnik. *SCoUT - Systemlösung zur Ortung und Alarmierung von Personen, Fahrzeugen und mobiler Ausrüstung unter Tage*. 2017. URL: <https://www.vmt-gmbh.de/wp-content/uploads/2017/01/20170123-PDS-Scout-DE-.pdf>.
- [96] Wikibit. *Raspberry PI*. URL: <https://www.wikibit.it/r/cosa-significa-raspberry-pi-3358/>.
- [97] Isabell Wohlgenannt, Alexander Simons und Stefan Stieglitz. "Virtual Reality". In: *Business & Information Systems Engineering* 62.5 (2020), S. 455–461. ISSN: 2363-7005. DOI: [10.1007/s12599-020-00658-9](https://doi.org/10.1007/s12599-020-00658-9).

- [98] Gina Wurms. *Die Vorteile von Tracking Lösungen in der Tunnelbranche: Dieser Artikel beschreibt verschiedene Einsatzmöglichkeiten positionsgebender und zustandserfassender Sensorik in der Tunnelbranche und deren Vorteile*. Hrsg. von infsoft GmbH. 2018. URL: <https://www.infsoft.com/de/blog/die-vorteile-von-trackingloesungen-in-der-tunnelbranche/>.
- [99] Henk Wymeersch, Jaime Lien und Moe Z. Win. “Cooperative Localization in Wireless Networks”. In: *Proceedings of the IEEE* 97.2 (2009), S. 427–450. ISSN: 0018-9219. DOI: [10.1109/JPROC.2008.2008853](https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008853).
- [100] Ali Yassin u. a. “Simultaneous context inference and mapping using mm-Wave for indoor scenarios”. In: *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*. IEEE, 21.05.2017 - 25.05.2017, S. 1–6. ISBN: 978-1-4673-8999-0. DOI: [10.1109/ICC.2017.7996976](https://doi.org/10.1109/ICC.2017.7996976).
- [101] Mariella Zapletal. “Effiziente Maßnahmen für die Tunnelsicherheit in Österreich”. Master Thesis. Technische Universität Wien, 2010. URL: <https://permalink.obvsg.at/AC08468924>.

8.2 Abkürzungen

Abb.	Abbildung
ADOA	Angle difference of arrival
AKUT	Akustisches Tunnelmonitoring
AOA	Angle of Arrival
AR	Augmented Reality (Erweiterte Realität)
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft
BLUETRACK	Blue Force Tracking
BMK	Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie
BPM	Beats per minute
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa (ungefähr)
CBRN	Chemical, biological, radiological and nuclear
DHQ	Digital-Head-Quarters
DOA	Direction of Arrival
ECC	European Communications Committee
ECG	Electrocardiography
EKG	Elektrokardiograph
engl.	Englisch
ETCS	European Train Control System
FCC	Federal Communications Commission
FSV	Forschungsgesellschaft Straße-Schiene-Verkehr
FTMT	Fast Tunnel Modelling Tool
GNSS	Globales Navigationssatellitensystem
GPS	Global Positioning System
GQ	Begehrter Querschlag
GSM	Global System for Mobile Communication
GSM-R	Global System for Mobile Communications - Rail(way)
HF	Hochfrequenz
HRV	Herzfrequenzvariabilität, engl. heart rate variability
ID	Identifikationsnummer
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
ILBS	Indoor location-based service
IMU	Inertial measurement unit
INS	Inertial Navigation System
IP	Internet Protocol
IT	Informationstechnologie
KAT3	Drittes Hauptbaulos des Koralmtunnels
KI	Künstliche Intelligenz
LAN	Local Area Network
LF	Niederfrequenzen, engl. low frequency
LiDAR	Light imaging, detection and ranging

LIP	Light-based indoor positioning
LoRaWAN	Niederfrequenz-Netzwerk, engl. Long Range Wide Area Network
LTE	Long Term Evolution
LZB	Linienzugbeeinflussung
MAC	Media Access Control
MED	Medical-Treatment
MEMS	Microelectromechanical systems
NIKE	Nachhaltige Interdisziplinarität bei Komplexen Einsätzen unter Tage
ÖBB	Österreichischen Bundesbahnen
OUI	Organizationally Unique Identifier
PC	Personal Computer
PKW	Personenkraftwagen
PZB	Punktformige Zugbeeinflussung
RADIV	Rapid-Data Integration und Visualisierung
RASPOS	Raspberry Positioning
RF	Radiofrequenz
RFID	Radio-frequency identification
RSSI	Received Signal Strength Indicator
RTSP	Real-Time Streaming Protocol
RTT	Round Trip Time
RVS	Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen
SHF	Superhochfrequenz
SOMT	Subsurface Operations Mission Tool
STSG	Straßentunnel-Sicherheitsgesetzes
SUBMOVECON	Subsurface Movement Control
TDOA	Time difference of arrival
TETRA	Terrestrial Trunked Radio, ursprünglich Trans European Trunked Radio
TOA	Time of Arrival
UAV	Unmanned aerial vehicle
UHF	Ultrahochfrequenz
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UOET	Urban Operations Expert Talks (Expertengespräche zu urbanen Operationen)
USB	Universal Serial Bus
UWB	Ultra-wideband
VLC	Visible Light Communication
VPN	Virtual Private Network
VR	Virtual Reality (Virtuelle Realität)
WLAN	Wireless Local Area Network
ZaB	Zentrum am Berg

8.3 Abbildungen

1	Übersicht der Technologien in Abhängigkeit der Reichweite und Genauigkeit [58]	5
2	Übersicht der Anforderungen an Reichweite und Genauigkeit [58]	6
3	Spektrum der elektromagnetischen Strahlung [45]	7
4	Übersicht der möglichen Messparameter zur Positionierung [42]	9
5	Das regulierte UWB Spektrum [58]	11
6	Bilderkennung für autonomes Fahren [61]	16
7	Vergleich der Kameraspektren von sichtbarem und infrarotem Licht [85]	17
8	Stark vergrößerte MEMS-Struktur [60]	19
9	Tablet mit AR-Applikation [49]	21
10	AR-Headset am Arbeitsplatz [4]	21
11	Schematische Darstellung AKUT [86]	23
12	Erfassung in getrennten Zonen [72]	26
13	Personen- und Fahrzeug-Tracking im Tunnelbau [98]	27
14	Einfluss der Ausrichtung eines Smartphones auf die Signalstärke [37]	30
15	Raspberry Pi [96]	31
16	Übersichtsplan Zentrum am Berg [27]	33
17	Messergebnisse zur Reichweite im Spritzbetonbereich des Nordtunnels	34
18	Messergebnisse zur Reichweite im Bereich mit Innenschale des Nordtunnels	35
19	Messergebnisse zur Reichweite im Nordtunnel, Bereiche mit Spritzbeton (SB) im Vergleich zur Innenschale (I)	36
20	Messergebnisse zur Reichweite mit Körper nahe am Sender zwischen dem Empfänger (K) im Vergleich zu vorherigen ungedämpften Messungen (SB)	37
21	Dämpfungseffekt aus einem Fahrzeug im Vergleich zum Körper	38
22	Messungen zur Reichweite an einer Tunnelkreuzung	39
23	Reichweiten im Vergleich zu geradlinigen Messungen	39
24	Signalstärke bei offener und geschlossener Flügeltür am GQ-1	40
25	GQ-1 von Innen - Flügeltüren	40
26	Signalstärken bei offener und geschlossener Doppelflügeltür am GQ-4	41
27	GQ-4 von Innen - Doppelflügeltür	41
28	Signalst. bei Positionswechsel der Sender/Empfänger an der ST am GQ-4	42
29	GQ-4 von Innen - Schiebetür	42
30	Alle drei geschlossenen Türarten im Vergleich	43
31	Signalstärken bei zunehmender Entfernung und zwei Sendern	44
32	Signalstärken bei Bewegung von Pi Richtung PC im Spritzbetonbereich (200 m)	45
33	Angepasste Signalstärken mit Differenzwerten bei Bewegung von Pi Richtung PC im Spritzbetonbereich (200 m)	46
34	Bildschirmaufnahme der Einbindung von RasPos in SOMT	47
35	Beispielbild einer in FTMT erstellten Tunnelanlage [39]	49
36	An einer Person angebrachtes System Bluetrack	51
37	Personenerfassung und Skeleton-Estimation [68]	52
38	Thermalbild mit geänderten Farbschema [68]	52

39	Mobiles Wettertor am ZaB [89]	54
40	Netzwerkplan für die Ausführung am ZaB [15]	55
41	SOMT-Aufnahme während eines Großversuches	58
42	Live-Personenerfassung im Infrarotbereich mit SUBMOVECON	59
43	Live-Skeleton-Estimation im Infrarotbereich	59
44	In blauer Farbe eingeblendete Trajektorien von BLUETRACK	60
45	Vitalwesten - Herzrate und Bewegungsbelastung	62

Anhang

RasPos Programmcode

```
1 import threading
2 import sys
3 import os
4 import os.path
5 import platform
6 import subprocess
7 import json
8 import time
9 import requests
10 import netifaces
11 import click
12
13 from howmanypeoplearearound.oui import load_dictionary, download_oui
14 from howmanypeoplearearound.analysis import analyze_file
15 from howmanypeoplearearound.colors import *
16
17
18 """For communication with the server"""
19 API_URL = 'http://***.***.***.***:****'
20 POI_ENDPOINT = '/pois/'
21
22 TOKEN = '*****'
23 HEADERS = {"Authorization": f"Bearer {TOKEN}", "accept" : "application/json"}
24
25 POI_URL = API_URL + POI_ENDPOINT
26
27 def get_all_pois():
28     print("Calling GET on: ", POI_URL)
29     response = requests.get(POI_URL, headers=HEADERS, verify=False)
30     json_pretty_print(response.json())
31
32 def create_poi(payload):
33     print("CALLING POST on: ", POI_URL)
34
35     response = requests.post(POI_URL, json=payload, headers=HEADERS, verify=False)
36     if response.status_code == 201:
37         response = response.json()
38         id = response["id"]
39         print("Successfully created a new object with id", id)
40         return id
41     else:
42         print("Error when creating POI:")
43         json_pretty_print(response.json())
44
45 def update_poi(id, payload):
46     url = POI_URL + str(id)
47     print("CALLING PUT on: ", url)
48     response = requests.put(url, json=payload, headers=HEADERS, verify=False)
49     if response.status_code == 200:
50         response = response.json()
51         id = response["id"]
```

```

52     print("Successfully updated object with id", id)
53     return id
54     else:
55         print("Error when updating POI:")
56         json_pretty_print(response.json())
57
58 def delete_poi(id):
59     url = POI_URL + str(id)
60     print("CALLING DELETE ON: ",url)
61     response = requests.delete(url,headers=HEADERS,verify=False)
62     if response.status_code == 200:
63         print("Successfully deleted POI with id:",id)
64     else:
65         print("Could not delete POI with id:", id)
66         json_pretty_print(response.json())
67
68 def json_pretty_print(input):
69     print(json.dumps(input,indent=4, sort_keys=True))
70
71 def get_json_template(template_path):
72     with open(template_path) as f:
73         return json.load(f)
74
75
76 """Start How-many-people-are-around (HoMPA) [Schollz 2017]"""
77 if os.name != 'nt':
78     from pick import pick
79
80
81 def which(program):
82     """Determines whether program exists"""
83     def is_exe(fpath):
84         return os.path.isfile(fpath) and os.access(fpath, os.X_OK)
85
86     fpath, fname = os.path.split(program)
87     if fpath:
88         if is_exe(program):
89             return program
90     else:
91         for path in os.environ["PATH"].split(os.pathsep):
92             path = path.strip('"')
93             exe_file = os.path.join(path, program)
94             if is_exe(exe_file):
95                 return exe_file
96     raise
97
98
99 def showTimer(timeleft):
100     """Shows a countdown timer"""
101     total = int(timeleft) * 10
102     for i in range(total):
103         sys.stdout.write('\r')
104         # the exact output you're looking for:
105         timeleft_string = '%ds left' % int((total - i + 1) / 10)
106         if (total - i + 1) > 600:
107             timeleft_string = '%dmin %ds left' % (
108                 int((total - i + 1) / 600), int((total - i + 1) / 10 % 60))

```

```

109     sys.stdout.write("[%%-50s] %d%% %15s" %
110                    ('=' * int(50.5 * i / total), 101 * i / total,
timeleft_string))
111     sys.stdout.flush()
112     time.sleep(0.1)
113     print("")
114
115
116 def fileToMacSet(path):
117     with open(path, 'r') as f:
118         maclist = f.readlines()
119         return set([x.strip() for x in maclist])
120
121
122 @click.command()
123 @click.option('-a', '--adapter', default='', help='adapter to use')
124 @click.option('-z', '--analyze', default='', help='analyze file')
125 @click.option('-s', '--scantime', default='60', help='time in seconds to scan')
126 @click.option('-o', '--out', default='', help='output cellphone data to file')
127 @click.option('-d', '--dictionary', default='oui.txt', help='OUI dictionary')
128 @click.option('-v', '--verbose', help='verbose mode', is_flag=True)
129 @click.option('--number', help='just print the number', is_flag=True)
130 @click.option('-j', '--jsonprint', help='print JSON of cellphone data', is_flag=
True)
131 @click.option('-n', '--nearby', help='only quantify signals that are nearby (
rssi > -70)', is_flag=True)
132 @click.option('--allmacaddresses', help='do not check MAC addresses against the
OUI database to only recognize known cellphone manufacturers', is_flag=True)
# noqa
133 @click.option('--nocorrection', help='do not apply correction', is_flag=True)
134 @click.option('--loop', help='loop forever', is_flag=True)
135 @click.option('--port', default=8001, help='port to use when serving analysis')
136 @click.option('--sort', help='sort cellphone data by distance (rssi)', is_flag=
True)
137 @click.option('--targetmacs', help='read a file that contains target MAC
addresses', default='')
138 @click.option('-f', '--pcap', help='read a pcap file instead of capturing')
139
140
141 def main(adapter, scantime, verbose, dictionary, number, nearby, jsonprint, out,
allmacaddresses, nocorrection, loop, analyze, port, sort, targetmacs, pcap)
:
142     if analyze != '':
143         analyze_file(analyze, port)
144         return
145     if loop:
146         while True:
147             adapter = scan(adapter, scantime, verbose, dictionary, number,
148                             nearby, jsonprint, out, allmacaddresses, nocorrection, loop,
sort, targetmacs, pcap)
149     else:
150         scan(adapter, scantime, verbose, dictionary, number,
151              nearby, jsonprint, out, allmacaddresses, nocorrection, loop, sort,
targetmacs, pcap)
152
153
154 def scan(adapter, scantime, verbose, dictionary, number, nearby, jsonprint, out,

```

```

155 allmacaddresses, nocorrection, loop, sort, targetmacs, pcap):
156     """Monitor wifi signals to count the number of people around you"""
157
158     if (not os.path.isfile(dictionary)) or (not os.access(dictionary, os.R_OK)):
159         download_oui(dictionary)
160
161     oui = load_dictionary(dictionary)
162
163     if not oui:
164         print('couldn\'t load [%s]' % dictionary)
165         sys.exit(1)
166
167     try:
168         tshark = which("tshark")
169     except:
170         if platform.system() != 'Darwin':
171             print('tshark not found, install using\n\napt-get install tshark\n')
172         else:
173             print('wireshark not found, install using: \n\tdbrew install
174 wireshark')
175             print(
176                 'you may also need to execute: \n\tdbrew cask install wireshark-
177 chmodbpf')
178             sys.exit(1)
179
180     if jsonprint:
181         number = True
182     if number:
183         verbose = False
184
185     if not pcap:
186         if len(adapter) == 0:
187             if os.name == 'nt':
188                 print('You must specify the adapter with -a ADAPTER')
189                 print('Choose from the following: ' +
190                     ', '.join(netifaces.interfaces()))
191                 sys.exit(1)
192             title = 'Please choose the adapter you want to use: '
193             adapter, index = pick(netifaces.interfaces(), title)
194
195     print("Using %s adapter and scanning for %s seconds..." %
196           (adapter, scantime))
197
198     if not number:
199         # Start timer
200         t1 = threading.Thread(target=showTimer, args=(scantime,))
201         t1.daemon = True
202         t1.start()
203
204     dump_file = '/tmp/tshark-temp'
205     # Scan with tshark
206     command = [tshark, '-i', adapter, '-a',
207               'duration:' + scantime, '-w', dump_file]
208
209     run_tshark = subprocess.Popen(
210         command, stdout=subprocess.PIPE, stderr=subprocess.STDOUT)
211     stdout, nothing = run_tshark.communicate()

```

```

209         if not number:
210             t1.join()
211         else:
212             dump_file = pcap
213
214     # Read tshark output
215     command = [
216         tshark, '-r',
217         dump_file, '-T',
218         'fields', '-e',
219         'wlan.sa', '-e',
220         'wlan.bssid', '-e',
221         'radiotap.dbm_antsignal'
222     ]
223     run_tshark = subprocess.Popen(
224         command, stdout=subprocess.PIPE, stderr=subprocess.STDOUT)
225     output, nothing = run_tshark.communicate()
226
227     # Read target MAC address
228     targetmacset = set()
229     if targetmacs != '':
230         targetmacset = fileToMacSet(targetmacs)
231
232     foundMacs = {}
233     for line in output.decode('utf-8').split('\n'):
234         if line.strip() == '':
235             continue
236         mac = line.split()[0].strip().split(',')[0]
237         dats = line.split()
238         if len(dats) == 3:
239             if ':' not in dats[0] or len(dats) != 3:
240                 continue
241             if mac not in foundMacs:
242                 foundMacs[mac] = []
243             dats_2_split = dats[2].split(',')
244             if len(dats_2_split) > 1:
245                 rssi = float(dats_2_split[0]) / 2 + float(dats_2_split[1]) / 2
246             else:
247                 rssi = float(dats_2_split[0])noth
248             foundMacs[mac].append(rssi)
249
250     if not foundMacs:
251         print("Found no signals, are you sure %s supports monitor mode?" %
252 adapter)
253         sys.exit(1)
254
255     for key, value in foundMacs.items():
256         foundMacs[key] = float(sum(value)) / float(len(value))
257
258     # Find target MAC address in foundMacs
259     if targetmacset:
260         sys.stdout.write(RED)
261         for mac in foundMacs:
262             if mac in targetmacset:
263                 print("Found MAC address: %s" % mac)
264                 print("rssi: %s" % str(round(foundMacs[mac], 1)))

```

```

265     sys.stdout.write(RESET)
266
267     cellphone = [
268         'Motorola Mobility LLC, a Lenovo Company',
269         'GUANGDONG OPPO MOBILE TELECOMMUNICATIONS CORP.,LTD',
270         'Huawei Symantec Technologies Co.,Ltd.',
271         'HUAWEI TECHNOLOGIES CO.,LTD',
272         'Huawei Device Co., Ltd.',
273         'TCT mobile ltd',
274         'zte corporation',
275         'ASUSTek COMPUTER INC.',
276         'Microsoft',
277         'HTC Corporation',
278         'Samsung Electronics Co.,Ltd',
279         'SAMSUNG ELECTRO-MECHANICS(THAILAND)',
280         'BlackBerry RTS',
281         'LG ELECTRONICS INC',
282         'Apple, Inc.',
283         'LG Electronics',
284         'OnePlus Tech (Shenzhen) Ltd',
285         'Xiaomi Communications Co Ltd',
286         'LG Electronics (Mobile Communications)']
287
288     alloui = 0 #counts all MACs
289     cellphone_people = []
290     for mac in foundMacs:
291         oui_id = 'Not in OUI'
292         alloui +=1
293         if mac[:8] in oui:
294             oui_id = oui[mac[:8]]
295         if verbose:
296             print(mac, round(foundMacs[mac], 1), oui_id, oui_id in cellphone)
297         if allmacaddresses or oui_id in cellphone:
298             if not nearby or (nearby and foundMacs[mac] > -70):
299                 cellphone_people.append(
300                     {'company': oui_id, 'rssi': round(foundMacs[mac], 1), 'mac':
301                     mac})
302         if sort:
303             cellphone_people.sort(key=lambda x: x['rssi'], reverse=True)
304         if verbose:
305             print(json.dumps(cellphone_people, indent=2))
306
307     percentage_of_people_with_phones = 0.9 #nearly 90% in Austria and Germany
308     if nocorrection:
309         percentage_of_people_with_phones = 1
310         num_people = int(round(len(cellphone_people) /
311                             percentage_of_people_with_phones))
312
313     if number and not jsonprint:
314         print(num_people)
315     elif jsonprint:
316         print(json.dumps(cellphone_people, indent=2))
317     else:
318         if num_people == 0:
319             print("No one around or no known OUI.")
320             print("But up to %d people, including all devices." % alloui)
321         elif num_people == 1:

```

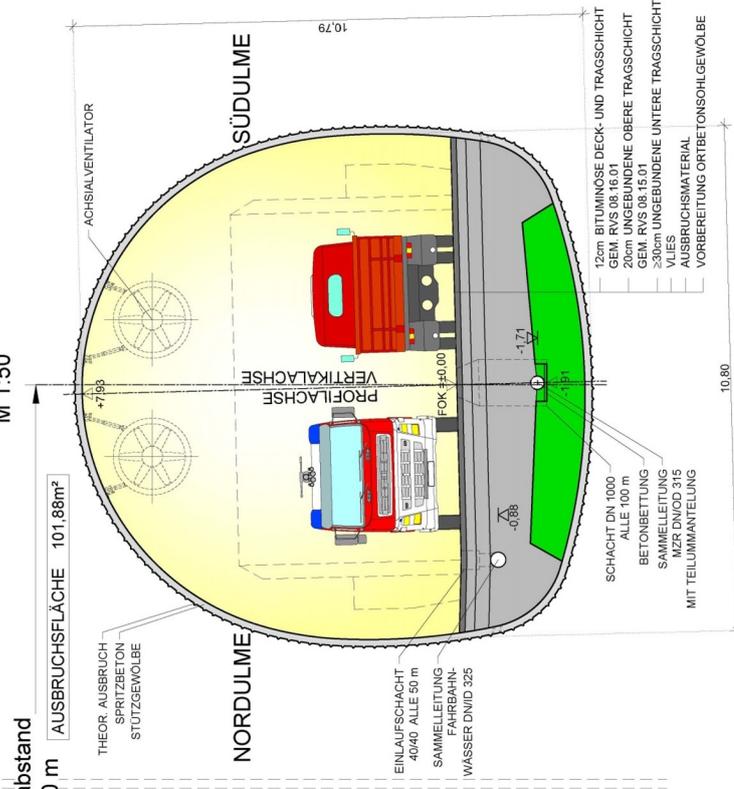
```

321     print("There is %d person around (Phones with known OUI only)." %
num_people)
322     print("But up to %d people, including all devices." % alloui)
323     else:
324         print("There are about %d people around (Phones with known OUI only)
." % num_people)
325         print("But up to %d people, including all devices." % alloui)
326
327     """Send output to server"""
328     poi_payload = get_json_template('/usr/local/lib/python3.10/dist-packages/
howmanypeoplearearound/poi_video_event.json')
329     poi_payload["properties"]["t"] = "RasPos1: Found " + str(num_people) + "
person and " + str(alloui) + " MACs - " + str(time.time())
330     poi_payload["properties"]["layerId"] = 2
331     #print(poi_payload)
332     #create_poi(poi_payload) #create only first time
333     update_poi(poi_payload)
334
335     if out:
336         with open(out, 'a') as f:
337             data_dump = {'cellphones': cellphone_people, 'time': time.time()}
338             f.write(json.dumps(data_dump) + "\n")
339             if verbose:
340                 print("Wrote %d records to %s" % (len(cellphone_people), out))
341     if not pcap:
342         os.remove(dump_file)
343     return adapter
344
345
346 if __name__ == '__main__':
347     main()

```

Regelquerschnitt Straßentunnel am ZaB

**RQ STRASSENTUNNEL SÜD
MIT SOHLGEWÖLBE
TEILAUSSBAU (1-SCHALIG)**
M 1:50



**RQ STRASSENTUNNEL NORD
MIT SOHLGEWÖLBE
VOLLAUSSBAU**
M 1:50

