

Hier steht der Titel der Diplom-/Studien-/Master-/ Bachelorarbeit

Diplomarbeit/Studienarbeit/Masterarbeit/Bachelorarbeit
von

Vorname Nachname

am Institut für Telematik
der Fakultät für Informatik

Erstgutachter:	Prof. Dr. ?. ??????????
Zweitgutachter:	Prof. Dr. ?. ??????????
Betreuender Mitarbeiter:	Dipl.-Inform. ?. ??????????

Bearbeitungszeit: ?? . Monat 20?? – ?? . Monat 20??

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet habe.

Karlsruhe, den ?? . ?????? 201?

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zielsetzung der Arbeit	2
1.2	Anforderungen an das Bereichsortungssystem	2
1.3	Klassifikation von Ortungssystemen	3
1.3.1	Protokoll	3
1.3.2	Topologie	3
1.3.3	Lokalisierungsprinzip	3
1.3.4	Messgrößen	4
1.3.4.1	Time of arrival	4
1.3.4.2	Time difference of arrival	5
1.3.4.3	Roundtrip time of flight	6
1.3.4.4	Received signal strength	6
1.4	Gliederung der Arbeit	7
2	Phase 1 - Keine Veränderungen an den APs	9
2.1	Vorherige Arbeiten	9
2.1.1	WiFi-LLS	9
2.1.2	AiRISTA Flow RTLS	10
2.1.3	AeroScout	10
2.1.4	Selbstlokalisierung mit Szenenanalyse	11
2.2	Grundlagen der 802.11 Spezifikation	11
2.2.1	Scan	12
2.2.2	Join	13
2.2.3	Reassociation	14
2.3	ESP8266	14
2.3.1	ESP8266 Arduino Core	15
2.3.2	ESP Open SDK	16
2.4	WiFi-LSS Implementierung	16
	Literaturverzeichnis	19

1. Einleitung

Während die Ortung im Außenbereich fest in der Hand von Satellitensystemen wie dem Global Positioning System (GPS) liegen, bietet die Ortung im Innenraum eine Vielzahl verschiedener Technologien. Neben Technologien wie Bluetooth, Radio Frequency Identification (RFID) und Ultra Wide Band (UWB) weckt WLAN wegen seiner großen Verbreitung immer wieder Interesse in Forschung und Industrie.

So hat die Ortung mittels WLAN gerade im medizinischen Bereich durch kommerzielle Lösungen Verbreitung gefunden, Probleme finden sich aber bei Ortungsgenauigkeit gegenüber anderen Techniken und dem vergleichsweise hohen Energieverbrauch des WLAN Protokolls. Während sich viele wissenschaftliche Arbeiten der Ortungsgenauigkeit widmen, ist für den alltäglichen Einsatz die kurze Batterielaufzeit der mobilen Einheiten hinderlich, wenn nicht zum Beispiel Smartphones als mobile Einheiten in Frage kommen.

Auch im Tunnelbau ist eine Ortung von Mitarbeitern und Besuchern von Nöten um in Notfällen bestimmen zu können, ob und wie viele Personen sich im Gefahrenbereich befinden, dies beeinflusst die Arbeit der Rettungskräfte. Das veränderliche Umfeld der Baustelle, auf der große Stahl- und Betonelemente bewegt werden, stellt dabei die genaue Ortung mittels Radiowellen vor große Probleme und es wird nur eine Bereichsortung durchgeführt, bei der jede Tunnelröhre in mehrere hundert Meter große Abschnitte aufgeteilt wird und der Wechsel der Mitarbeiter zwischen den Abschnitten beobachtet wird. Dies stellt zwar nur eine geringe Genauigkeit dar, erlaubt es aber bei Bränden zu erkennen welche Personen sich durch die Abschnitte Richtung Ausgang bewegen und welche in ihrem Abschnitt verharren, sie sind vermutlich bewegungsunfähig oder eingeschlossen.

Die geringe Genauigkeit hat zudem Vorteile bezüglich des Datenschutzes, da sie verhindert, dass die Arbeiter mit Bewegungsprofilen analysiert werden können und zum Beispiel geprüft wird wer sich wie lange im Pausenraum aufhält.

Die Ortung wird derzeit bei einem Referenzunternehmen mittels Bluetooth durchgeführt, dabei sind die Knoten eigenständige Bluetooth-Einheiten, die mit dem Ethernet Backbone verbunden sind. Als mobile Einheiten kommen sowohl batteriebetriebene Tags als auch Smartphones zum Einsatz. Das zentrale Sicherheitssystem fragt die gesehenen mobilen Einheiten bei den Knoten an und bereitet die Ergebnisse graphisch auf.

1.1 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit soll der Entwurf und die Implementierung eines Bereichsortungssystems für Personen in Tunnelanlagen unter Verwendung eines bestehenden Netzwerks von WLAN Access Points (APs) sein. Bei einem Bereichsortungssystem handelt es sich um ein Ortungssystem, bei dem die Positionen nicht genau bestimmt werden. Stattdessen wird das Areal, auf dem geortet werden soll, in einzelne Bereiche unterteilt und jede mobile Einheit beim Vorgang des Ortens einem dieser Bereiche zugeordnet.

Diese Arbeit grenzt sich von vorherigen Arbeiten dadurch ab, dass die Laufzeit beziehungsweise der Energieverbrauch der mobilen Einheiten im Vordergrund steht. Statt der nur wenige Tage umfassenden Laufzeiten anderer WLAN basierter Tags ist das Ziel dieser Arbeit eine Laufzeit von mehreren Monaten.

Der Entwurfsraum umfasst in einem ersten Schritt keine Änderungen an den Access Points, ihre Anzahl, Position, Software und Hardware ist gegeben.

Anschließend wird diese Beschränkung gelockert und die Software der APs kann verändert werden, bei diesen Veränderungen sollen aber die grundlegenden Mechanismen der 802.11 Spezifikation erhalten bleiben. So soll es nicht assoziierten Clients nicht möglich sein direkt mit Servern im Netzwerk zu kommunizieren, da dies die Sicherheit des gesamten Netzwerks gefährden könnte.

In einer zweiten Lockerung der Beschränkungen soll auch die Hardware veränderbar sein, dies widerspricht zwar der Annahme der bestehenden Struktur von WLAN APs, da diese potenziell ausgetauscht werden müssten, erweitert den Handlungsspielraum jedoch enorm und erlaubt es die vorherigen Implementierungen mit einer energetisch effizienten und potenziell nicht WLAN-basierten Protokollen zu vergleichen.

Für jeden dieser Schritte müssen die angrenzenden Komponenten (Ortungsserver und mobile Einheiten) implementiert und hinsichtlich des Energieverbrauchs und der Erkennungssicherheit evaluiert werden. Abschließend sollen die drei Systeme miteinander verglichen werden.

1.2 Anforderungen an das Bereichsortungssystem

Da es sich um ein Bereichsortungssystem handeln soll, werden keine direkten Anforderungen an die Genauigkeit der Ortung gestellt, jedoch soll ein klarer Wechsel zwischen zwei Bereichen, und damit zwei Access Points, zuverlässig erkannt werden. Bei den von den Zielpersonen getragenen Positionssendern, den sogenannten Tags, soll es sich in den ersten beiden Schritten um Geräte handeln, die auf WLAN Basis arbeiten und somit mit den Access Points kompatibel sind. Im dritten Schritt ist dies nicht erforderlich und die Kompatibilität wird durch technische Änderungen am AP wiederhergestellt. Die Tags sollen eine Laufzeit von bis zu drei Jahren erreichen, sie müssen jedoch mindestens eine Laufzeit von sechs Monaten aufweisen, um als verwendbar angesehen zu werden. Dabei sind Größe und Gewicht der Lösung zu beachten, zwar kann die Laufzeit eines Tags jederzeit durch die Vergrößerung des Energiespeichers herbeigeführt werden, die Tags müssen jedoch mühelos von den Zielpersonen an einem Band um den Hals getragen werden können. Zuletzt soll unter Rücksichtnahme auf das beschriebene Szenario die Komplexität der IT-Infrastruktur so gering wie möglich gehalten werden um ein stabiles und kostengünstiges System zu garantieren.

1.3 Klassifikation von Ortungssystemen

Die Klassifikation von Ortungssystemen auf Funkbasis kann neben dem verwendeten Protokoll anhand der Topologie, dem Lokalisierungsprinzip und der gemessenen Größen durchgeführt werden [LDBL07]. Außerdem wird zwischen zweidimensionaler und dreidimensionaler Lokalisierung unterschieden.

1.3.1 Protokoll

Prinzipiell lassen sich verwendete Frequenzen, Modulationsverfahren und Sendeleistung frei wählen, solange die gesetzlichen Vorgaben für die Sender eingehalten werden. Wenn ein eigenes Protokoll verwendet wird, kann die Kodierung der Informationen frei gewählt werden. Ein Beispiel für ein solches Protokoll ist die Ortung mit Ultra-Breitband Signalen (UWB), mit dem Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden können. Bestehende Protokolle zu verwenden hat dagegen den Vorteil, dass üblicherweise commodity-of-the-shelf Komponenten verwendet werden können, was die Kosten des Systems senkt. Im Gegenzug können für die Genauigkeit wichtige Parameter nicht mehr frei gewählt werden und der Overhead des Protokolls muss übernommen werden. Beispiele für solche Protokolle sind 802.11 (WLAN), Bluetooth und Radio Frequency Identification (RFID).

1.3.2 Topologie

Die Topologie hat zwei Dimensionen, Fernlokalisierung versus Selbstlokalisierung und direkt versus indirekt und beschreibt wie Knoten und mobile Einheiten zusammenwirken.

Bei der direkten Fernlokalisierung werden von mobilen Einheiten gesendete Signale an Knotenpunkten gemessen und die Ergebnisse an einen zentralen Ortungsserver weitergegeben, dieser führt dann die Lokalisierung durch. Das Ergebnis der Lokalisierung ist nur zentral verfügbar.

Bei der direkten Selbstlokalisierung senden hingegen die Knoten und die mobilen Einheiten messen die eingehenden Signale. Anhand der Messergebnisse bestimmt jede mobile Einheit seine Position, die Ergebnisse der Lokalisierung sind anschließend nur auf der mobilen Einheit verfügbar.

Die indirekte Fernlokalisierung gleicht der direkten Selbstlokalisierung, allerdings besteht zusätzlich eine Datenverbindung zu einem zentralen Ortungsserver, dem die berechnete Position mitgeteilt wird. Das Ergebnis steht nach kurzer Verzögerung sowohl auf der mobilen Einheit als auch zentral zur Verfügung, optional können dort die Daten von anderen mobilen Einheiten abgerufen werden um sich über deren Positionen zu informieren.

Auch die indirekte Selbstlokalisierung erweitert die direkte Fernlokalisierung um eine Datenverbindung zwischen mobiler Einheit und zentralem Ortungsserver. So kann sie sich über die eigene und eventuelle auch andere mobile Einheiten informieren. Dies kann insbesondere bei der Verwendung von Mischtechnologien notwendig sein, wenn die zur Ortung genutzte Technik es nicht erlaubt an den mobilen Einheiten zu empfangen, aber dennoch eine Selbstlokalisierung durchgeführt werden soll.

1.3.3 Lokalisierungsprinzip

Das einfachste Lokalisierungsprinzip ist das Umgebungsprinzip, hier wird eine mobile Einheit dem Knoten mit dem stärksten Signal zugeordnet, der Knoten kann

sowohl als Sender als auch als Empfänger auftreten. Die gewonnene Position ist dabei nur symbolisch und ihre Genauigkeit ist abhängig von der Dichte des Netzes. Für eine erfolgreiche Lokalisierung muss nur ein Knoten in Reichweite der mobilen Einheit sein, was diese Möglichkeit auch in komplexeren Lokalisierungsprinzipien zu einer sinnvollen Ausweichmöglichkeit macht, falls nicht genügend Knoten in Reichweite sind.

Die geometrische Bestimmung der Position einer mobilen Einheit mit drei oder mehr Knoten nennt man Trilateration. Dabei wird üblicherweise für jeden Knoten die Distanz zur mobilen Einheit bestimmt, anschließend wird ein Kreis mit der gemessenen Distanz um jeden Knoten gebildet und der Schnittpunkt der drei Kreise bestimmt die Position der mobilen Einheit. Da die Distanzen aus den gemessenen Signalparametern geschätzt werden müssen sind sie fehlerbehaftet und es ergibt sich oft kein eindeutiger Schnittpunkt, dann wird zum Beispiel die Mitte der Schnittpunkte gewählt.

Die geometrische Bestimmung ist ebenfalls über die Berechnung der Winkel zu den Knoten möglich, dies nennt man Triangulation. Der Winkel kann zum Beispiel über die zeitlich Differenz der ankommenden Signale an den synchronisierten Knoten bestimmt werden, dann wird von jedem Knoten aus eine Halbgerade in diesem Winkel gefällt und der Schnittpunkt bestimmt die Position der mobilen Einheit. Wenn mit gerichteten Antennen gearbeitet wird, kann der Winkel des eingehenden Signals direkt bestimmt werden, dann müssen nur zwei Knoten in Reichweite sein um die mobile Einheit zu lokalisieren.

Das aufwendigste Lokalisierungsprinzip ist die Szenenanalyse. Hier werden zunächst in einer offline-Phase Vektoren $(m_1, m_2, \dots, m_n, p_x, p_y, p_z)^T$ aus Messgrößen und Positionsmarken gesammelt, anhand dieser Fingerabdrücke werden dann in der online-Phase die Positionen neuer Messergebnisse bestimmt. Üblicherweise kommen dabei Verfahren des maschinellen Lernens wie k-nearest-neighbour, neuronale Netze oder Support Vektor Machines (SVM) zum Einsatz um die Muster der Fingerabdrücke aus der offline-Phase zu erkennen und die Positionen $(p_x, p_y, p_z)^T$ in der online-phase aus den gemessenen Größen $(m_1, m_2, \dots, m_n)^T$ zu schätzen. Im zweidimensionalen Fall wird dabei $p_z = 0$ angenommen.

1.3.4 Messgrößen

Beliebte Messgrößen für die Positionsbestimmung sind Ankunftszeit des Signals (time of arrival, TOA), die Differenz der Ankunftszeiten (time difference of arrival, TDOA), die Paketumlaufzeit (roundtrip time of flight, RTOF) und die Stärke des empfangenen Signals (received signal strength, RSS). Es existieren aber noch mehr messbare Größen, wie etwa die Messung der empfangenen Phase des Signals (received signal phase, RSP) und die Messung des Einfallswinkel des Signals mit mehreren gerichteten Antennen (angle of arrival, AOA).

1.3.4.1 Time of arrival

TOA beruht auf der begrenzten Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals, hochfrequente Signale breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit $c = 299.792.458 \text{ m/s}$, Ultraschall mit Schallgeschwindigkeit $c \approx 343 \text{ m/s}$ bei 20°C aus, damit ergibt sich die Distanz $d_i = c * (t_{\text{empfangen},i} - t_{\text{gesendet}})$ mit i sei der empfangende Knoten. Die Position der mobilen Einheit kann dann mit der Methode der kleinsten Quadrate bestimmt

werden, dazu wird die Kostenfunktion $F(x, y, t_{\text{gesendet}}) = \sum_{i=1}^N \alpha_i^2 f_i^2(x, y, t_{\text{gesendet}})$ mit $f_i(x, y, t_{\text{gesendet}}) = d_i - \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$ und α_i sei die Konfidenz von Knoten i , minimiert. Dies erfordert, dass die Knoten zeitsynchronisiert sind und $t_{\text{empfangen},i}$ möglichst ohne vorherige Verarbeitung bestimmt wird um Varianzen zu vermeiden. Zusätzlich ist es von Vorteil, wenn auch die mobile Einheit synchronisiert ist, da dann nur noch mit zwei Variablen optimiert werden muss, da t_{gesendet} dann entsprechend der Synchronisation und dem Sendeintervall als gegeben angenommen werden kann. Die Forderung nach Synchronität ist jedoch für $c = 299.792.458 \text{ m/s}$ sehr stark, da das Signal nur $0.00000000336 \text{ s/m}$ benötigt und somit bereits kleine zeitliche Ungenauigkeiten große Fehler verursachen und erst durch zusätzliche Messungen oder Glättungstechniken hohe Genauigkeiten erreicht werden können. Skibniewski et al. konnten hohe Genauigkeit durch die Verwendung von Ultraschall erzielen, da sich durch die geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit Imperfektionen in der Synchronisierung weniger stark auswirken [SkJa09]. Bei einer Selbstlokalisierung ist zu beachten, dass t_{gesendet} den Sendezeitpunkt der Knoten darstellt, sie müssen also entweder alle gleichzeitig auf verschiedenen Frequenzen oder in einem vordefinierten Muster nacheinander senden, die Zeitdifferenz des tatsächlichen Sendezeitpunkts zu t_{gesendet} muss dann vom Empfangszeitpunkt $t_{\text{empfangen},i}$ abgezogen werden.

1.3.4.2 Time difference of arrival

Bei TDOA wird statt der direkten Ankunftszeiten die Differenz der Ankunftszeiten gemessen, dies erfordert üblicherweise Zeitsynchronität bei den Knoten, nicht jedoch bei der mobilen Einheit, da nur die Ankunftszeiten für die Berechnung relevant sind. Die mobile Einheit liegt dabei auf dem Schnittpunkt zweier Hyperboloiden, die jeweils zwischen den Knoten, die TDOA gemessen haben, und einem Referenzknoten aufgespannt werden. Die Hyperboloiden werden aufgestellt durch

$R_{i,j} = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2} - \sqrt{(x_j - x)^2 + (y_j - y)^2 + (z_j - z)^2}$ mit (x_i, y_i, z_i) sei der jeweilige Messknoten, (x_j, y_j, z_j) sei der gemeinsame Referenzknoten und (x, y, z) sei die Position der mobilen Einheit. Abb. 1.1 zeigt die Lösung

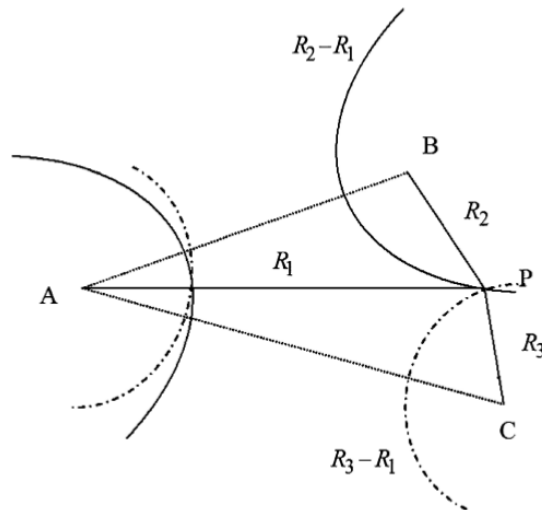


Abbildung 1.1: Positionsbestimmung mit der Differenz der Ankunftszeiten (TDOA), aus [LDBL07].

graphisch, Drane et. al. und Torrieri beschreiben die analytische Lösung der Gleichung mit nichtlinearer Regression [DrMS98] beziehungsweise Taylor-Entwicklung [Torr84]. Li et al. eliminiert zusätzlich die Forderung nach Synchronisation für mobile Einheiten, die sowohl senden als auch empfangen können [LPLaY00]. Dabei wird ein Datenpaket an die mobile Station gesendet und von dieser mit einem Acknowledgement beantwortet, diese Kommunikation wird von anderen Knoten beobachtet und die Differenz der Ankunftszeiten des Datenpakets und des Acknowledgements als $t_{i,1}$ mit $i \in \text{Knoten}$ protokolliert. Zusätzlich ist $t_{i,0}$ als die Differenz zwischen dem Senden des Datenpakets und dem Empfangen an den anderen Knoten durch die bekannte Position aller Knoten ebenfalls bekannt. Damit kann die Differenz der Ankunftszeit $TDOA_{i,j} = (t_{i,0} + t_{i,1}) - (t_{j,0} + t_{j,1})$ mit $i, j \in \text{Knoten}$ ohne vorherige Synchronisation berechnet werden.

1.3.4.3 Roundtrip time of flight

Wird RTOF gemessen muss die mobile Einheit sowohl senden als auch empfangen können. Dabei wird die Zeit vom Aussenden eines Paketes bis zur Ankunft der Antwort gemessen, wichtig sind hier zum einen möglichst spät/früh gesetzten Zeitstempel beim Senden/Empfangen des Signals und eine sehr konstante Verarbeitungszeit des Kommunikationspartners. Zunächst muss dabei die Verarbeitungszeit gemessen werden, indem Knoten und mobile Einheit auf einen Abstand von 0 Metern gebracht werden, anschließend kann die Entfernung $d = c * (t_{\text{empfangen}} - t_{\text{gesendet}} - t_{\text{Verarbeitung}})$ bestimmt werden. Die Position wird dann analog zu TOA bestimmt. Diese Messgröße kann sowohl für die Fern- als auch für die Selbstlokalisierung verwendet werden, ist aber sehr anfällig gegenüber Schwankungen in der Verarbeitungszeit, die bei Protokollen wie 802.11 häufig auftreten.

1.3.4.4 Received signal strength

RSS überprüft wie stark das empfangene Signal aus dem allgemeinen Rauschen auf der verwendeten Frequenz hervor sticht. Dafür ist es wichtig, dass immer mit der selben Leistung gesendet wird, dann kann mit einem theoretisch oder empirisch ermittelten Ausbreitungsmodell die Entfernung zwischen mobiler Einheit und Knoten anhand des Pfadverlustes bestimmt werden. Dann ist $d = F(S_{\text{gesendet}}, S_{\text{empfangen}})$ mit F sei das Ausbreitungsmodell. Um gute Ergebnisse zu erzielen sollten jeweils möglichst gleichförmige mobile Einheiten und Knoten verwendet werden, denn Lui et al. konnte für WLAN zeigen, dass unterschiedliche Hardware bei Knoten und mobiler Einheit erhebliche Varianz in den gemessenen RSS Werten erzeugt [LGLD⁺11]. Zusätzliche Probleme entstehen, wenn Spezifikationen wie Bluetooth eine Anpassung der Sendeleistung vorsehen [HoSo07], dann muss eine solche Anpassung eliminiert werden. Bei Bluetooth geschieht das durch die Verwendung von Inquiry Paketen, diese dienen zur Entdeckung anderer Bluetooth-fähiger Geräte und werden immer mit voller Sendeleistung gesendet um möglichst alle Geräte in Reichweite zu erreichen. Ein weiteres Problem von RSS ist der starke Einfluss von Hindernissen und anderen Signalen auf dem selben Frequenzband. Gerade bei der Ortung in Innenräumen wirken diese Einflüsse begrenzend auf die Genauigkeit und oft muss eine Kalibrierung durchgeführt werden um die Einflüsse von Wänden und anderen Hindernissen zu eliminieren.

1.4 Gliederung der Arbeit

Im folgenden Kapitel 2 sollen zunächst einige wissenschaftliche und kommerzielle Lösungen zur Ortung in Innenräumen diskutiert werden. Anschließend wird in Kapitel 3 die Spezifikation 802.11, auch wireless LAN (WLAN) genannt, in einem für diese Arbeit notwendigem Maße erörtert. Dort werden auch die für das Ortungssystem nötigen Teile der Bluetooth 4.0 (Low Energy) Spezifikation erläutert. In Kapitel 4 wird eine Übersicht über die Hardware der Bluetooth und WLAN Tags und deren Programmiermöglichkeiten gegeben. Im Anschluss wird in Kapitel 5 der Entwurfsraum im Rahmen einer theoretischen Betrachtung abgesteckt. Die nachfolgenden Kapitel 6 und 7 widmen sich der Methodik und Ausführung von Experimenten bezüglich Energieverbrauch und Reichweite der Tags. Die Implementierung der Ortungsserver und die Schnittstellen zu Access Points und Sicherheitssystem werden in Kapitel 8 beschrieben. Zum Schluss folgt ein Fazit, welches die Ergebnisse zusammenfasst und die evaluierten Lösungsansätze abschließend vergleicht.

2. Phase 1 - Keine Veränderungen an den APs

In einem ersten Schritt sollten laut Aufgabenstellung keine Veränderungen an den Access Points vorgenommen werden können. Weil die Ortung deshalb auf WLAN basieren muss sind die Knoten im Folgenden immer APs. Ein Tag ist eine mobile Einheit, umgekehrt gilt dies jedoch nicht, da auch alle anderen WLAN-fähigen Geräte, wie Smartphones und Laptops, als mobile Einheit in Frage kommen. Die Unveränderlichkeit bedeutet insbesondere auch, dass keine Messwerte verwendet werden können, die direkt am AP gemessen werden müssen und nicht als Teil der 802.11 in das dahinterliegende Netzwerk weitergeleitet werden. Da time of arrival Synchronisation und präzise Timer bei den APs voraussetzt und time difference of arrival nur von den APs gemessen werden kann, eignen sich diese Messgrößen nicht für diese Aufgabenstellung. Received signal strength und roundtrip time of flight können auf der mobilen Einheit gemessen werden, nicht jedoch an den APs, da die in der PHY-beziehungsweise MAC-Schicht gemessenen Werte nicht an weitere Empfänger im Netzwerk propagiert werden. Somit scheidet die direkte Fernlokalisierung mangels Messgrößen aus, es wird stattdessen eine indirekte Fernlokalisierung durchgeführt, bei der die mobile Einheit eine Selbstlokalisierung durchführt und das Ergebnis dem Ortungsserver über eine Datenverbindung mitteilt.

2.1 Vorherige Arbeiten

Zunächst werden vorherige Arbeiten behandelt, sowohl wissenschaftliche als auch kommerzielle Lösungen.

2.1.1 WiFi-LLS

Chen et al. stellen mit dem WiFi-based Local Location System (WiFi-LLS) ein System zur indirekten Fernlokalisierung vor ???. Als Messgröße wird die Stärke des empfangenen Signals (received signal strength, RSS) genutzt, diese wird laut 802.11 Spezifikation als Index (RSSI) von der Hardware zurückgegeben.

Für die Ortung wird zunächst der RSSI von Paketen naher APs gemessen und zusammen mit der MAC-Adresse der mobilen Einheit in ein Paket gepackt und versenden

es an den Ortungsserver. Anschließend wird auf dem Ortungsserver ein theoretisches Signalausbreitungsmodell $P(d) = P(d_0) - 10 \log_{10}(\frac{d}{d_0})^n - OAF$ mit der Distanz d , der Signalstärke $P(d)$ und der Referenzdistanz $d_0 = 1m$ zur Bestimmung der Position der mobilen Einheit verwendet. $P(d_0)$, der Pfadverlustexponent n und der Hindernisdämpfungsfaktor OAF müssen bestimmt werden, jedoch lassen sich $P(d_0)$ und n auf einer einzelnen Teststrecke mit unterschiedlichen Abständen von AP und mobiler Einheit bestimmen und OAF kann für einen Gebäudetyp bestimmt werden. Dadurch hat das Modell einen konstanten Aufwand, dies ist für Baustellen interessant, da sich diese Werte einmalig messen und dann sogar über mehrere gleichartige Baustellen übertragen ließen.

In dieser Veröffentlichung steht die Ortungsgenauigkeit im Vordergrund und es werden keine Angaben zum Energieverbrauch gemacht. Als Referenz kann dienen, dass die mobile Einheit bei WiFi-LLS alle 5 Sekunden einen Scan (siehe Abschnitt 2.2.1) durchführt, dann werden die Signalstärken entdeckten APs zusammen mit der eigenen MAC-Adresse in XML codiert und das so erzeugte Paket an den Ortungsserver versendet.

2.1.2 AiRISTA Flow RTLS

Ekahau bietet unter der Marke *AiRISTA Flow RTLS* eine, zu WiFi-LLS ähnliche, Lösung kommerziell an [Flow17c]. Ihr Ekahau B4 Badge Tag ermittelt regelmäßig den RSSI zu nahegelegenen Access Points und versendet diese an einen Ortungsserver [LDBL07]. Das Tag bietet darüber hinaus noch einige Zusatzfunktionen, so können über die Datenverbindung auch Nachrichten und Alarmierungen an das Tag gesendet werden und die drei angebrachten Knöpfe können programmiert werden. Bezüglich des Energieverbrauchs gibt sich das Informationsblatt des B4 Badge Tag vage: Das Tag soll abhängig vom Ortungsintervall wochenlang halten, danach muss der 600 *mA/h* Akku geladen werden [Flow17b]. Das Informationsblatt zum Ekahau W4, welches statt um den Hals am Handgelenk getragen wird, gibt an, dass der verbaute 530 *mA/h* Akku bei einem Ortungsintervall von 15 Sekunden 500 Stunden (ca. 21 Tage) hält [Ekah17].

AiRISTA Flow spricht auf ihrer Website zum Beispiel Krankenhäuser, Schulen und Regierungseinrichtungen an, hier sollen zusätzlich bewegliche Objekte wie etwa Krankenhausbetten geortet werden. Die dazu verwendeten Asset Tags werden über einen Beschleunigungssensor aktiviert und können, wenn die Objekte selten bewegt werden, deutlich längere Laufzeiten erreichen [Flow17a].

2.1.3 AeroScout

Auch das AeroScout System von Stanley Healthcare richtet sich an den medizinischen Sektor und soll Objekte und Personen orten [Mana17], [Heal17a]. Da sich auch dieses System in das bestehende WLAN-Netzwerk einfügt, sollte es ebenfalls auf einer indirekten Fernlokalisierung beruhen und demnach ähnliche Eigenschaften bezüglich des Energieverbrauchs aufweisen.

Das Informationsblatt ihres T14 Tags für Personen gibt eine Laufzeit von bis zu drei Wochen, abhängig von Konfiguration und Typ des Tags, an [Heal17b]. Eine Angabe zu dem verwendeten Typ, der Konfiguration oder der Kapazität des verbauten Akkus wird nicht gemacht.

2.1.4 Selbstlokalisierung mit Szenenanalyse

Prasithsangaree et al. stellen ein WiFi-LLS ähnliches System vor [PrKC02], es verwendet aber eine offline-Phase zum Sammeln von Fingerabdrücken für Positionen in einem Abstand von 1,5 beziehungsweise 3 Metern. In diesen Fingerabdrücken werden die gemessenen RSSI der von den APs empfangenen Pakete als Merkmale zusammen mit der Position als Label gespeichert. In der anschließenden online-Phase werden die gemessenen RSSI mit den Fingerabdrücken verglichen und die Position als gewichtetes Mittel der Labels bestimmt.

Die offline-Phase ist natürlich im Sinne der Aufgabenstellung nicht sinnvoll, da für eine Tunnelbreite von 10m 4000 beziehungsweise 2000 Messungen pro Kilometer vorgenommen werden müssten. Generell eignen sich Lösungen mit Szenenanalyse nicht gut für Baustellen, da diese nicht auf die potentiell höhere Genauigkeit angewiesen sind. Üblicherweise müssen dort sehr große Flächen vermessen werden und die Veränderungen durch den Baufortschritt führen dazu, dass regelmäßig neu gemessen werden muss. Außerdem müssen bewegliche Störquellen wie Baumaschinen vorher aus dem Bereich entfernt werden, um unverfälschte Fingerabdrücke zu erhalten. Der Aufwand ein System mit Szenenanalyse auf einer Baustelle zu betreiben ist deshalb sehr hoch und widerspricht der Forderung nach geringer Komplexität.

Die Arbeit zeigt aber die Volatilität der empfangenen Signalstärke auf, dies wurde 2011 von Lui et al. genauer untersucht [LGLD⁺11]. Lui et al. zeigen, dass die gemessene empfangene Signalstärke stark von der beteiligten Hardware abhängt und die Systeme jedes mal neu kalibriert werden müssen wenn sie auf ein neues AP-Modell portiert werden. Auf dem Areal sollte deshalb optimalerweise nur ein AP-Modell verwendet werden.

Abb. 2.1 zeigt die gemessenen RSSI Werte für die von ihnen getesteten Netzwerkarten mit unterschiedlichen Distanzen, für einige Karten korreliert die empfangene Signalstärke nur sehr schwach mit der Distanz zwischen Knoten und mobiler Einheit. Sie zeigen außerdem, dass einige AP-Modelle den RSSI speichern und nur bei größeren Veränderungen aktualisieren und dass die Antenne signifikanten Einfluss auf den protokollierten Wert hat.

2.2 Grundlagen der 802.11 Spezifikation

802.11 beschreibt eine Form der drahtlosen Datenübertragung mittels Funkwellen. Die Spezifikation beschreibt die physische Schicht (PHY-Layer) und den Mediumszugriff (MAC-Layer) für ein Funknetzwerk, dass sich mit den darüber liegenden Schichten des OSI-Modells in andere Netzwerke eingebunden werden kann. Wird ein solches Netzwerk in ein Local Area Network (LAN) eingebunden spricht man üblicherweise vom Wireless Local Area Network (WLAN). Die 1997 erstmals verabschiedete Spezifikation wurde häufig erweitert und wird in ihrer ursprünglichen Form praktisch nicht mehr angewendet, da die Datenraten zu gering sind. Der ESP8266 beherrscht die Erweiterungen b, g und n, die alle im 2,4 GHz Spektrum senden, jedoch unterschiedliche Modulationsverfahren verwenden.

Zur Vermeidung von Kollisionen kommt Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance (CSMA/CA) zum Einsatz. Bei CSMA/CA wird zunächst das Medium belauscht und gewartet bis keine Signale mehr auf dem Medium sind. Dann muss ein Inter Frame Spacing (IFS) abgewartet werden, je nach Priorität ist dieses unterschiedlich lang (SIFS<PIFS<DIFS<EIFS), anschließend kann gesendet werden.

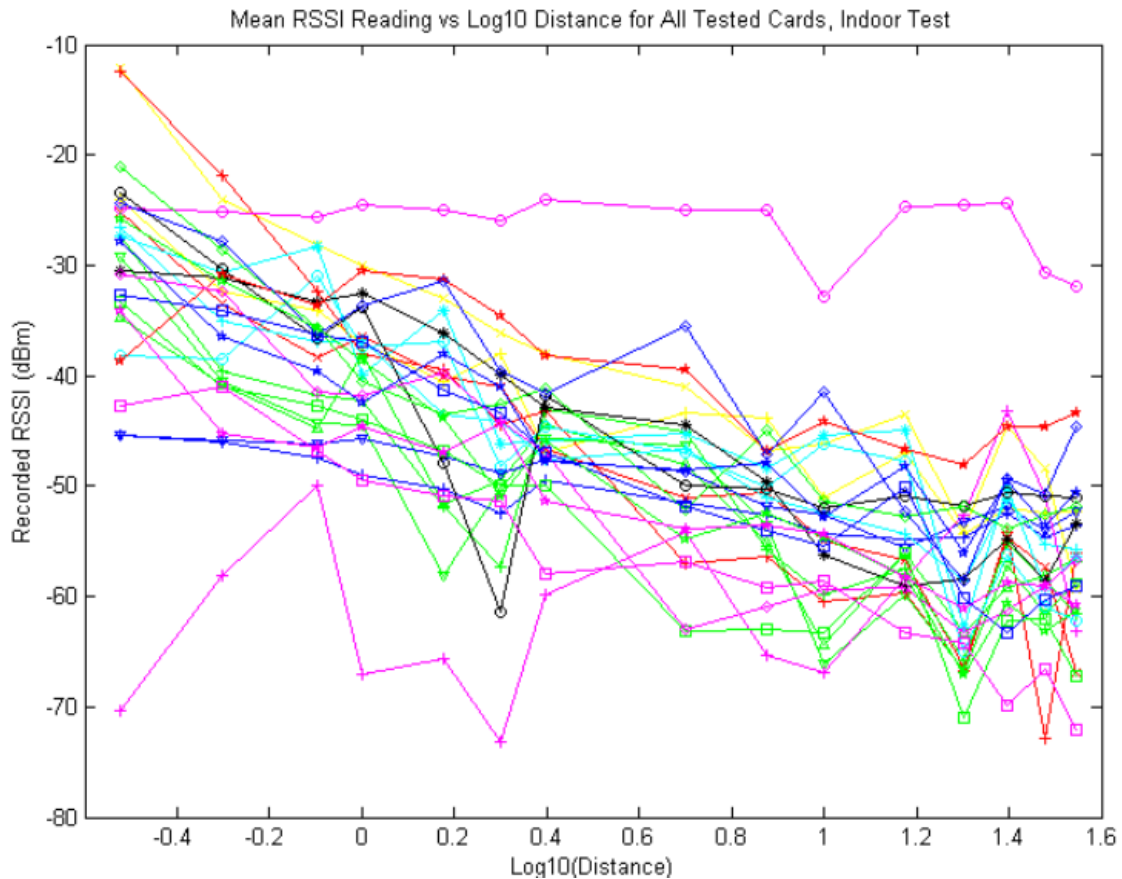


Abbildung 2.1: Gemessener RSSI mit verschiedenen Access Points und Distanzen, aus [LGLD⁺11].

Tritt trotzdem eine Kollision auf, versucht der Sender es erneut mit einem längeren IFS.

802.11 spezifiziert ebenfalls mehrere Operationen, die beispielsweise zur Entdeckung von Ressourcen und der Authentifizierung an einer Ressource dienen, einige, für diese Arbeit wichtige Operationen werden im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Scan

Scan ist eine Operation zur Entdeckung von Access Points, sie kann von einer Station (Endverbraucher, zum Beispiel Smartphone oder Laptop) aktiv oder passiv ausgeführt werden. Bei einem passiven Scan empfängt die Station und filtert die von Access Points regelmäßig gesendeten Beacon Frames heraus, diese gelten dann als entdeckt. Ein Beacon Frame ist ein Management Frame, der dazu gedacht ist, technische Möglichkeiten des APs zu bewerben, zum Beispiel die möglichen Datenraten und Zeitstempel zur Synchronisierung. Versteckte APs senden keine Beacon Frames.

Bei einem aktiven Scan sendet die Station einen Probe Request aus, dieser kann sowohl an alle APs (broadcast) als auch an einen speziellen AP adressiert sein. Ein Probe Request bewirkt, ähnlich wie ein Beacon Frame, die technischen Möglichkeiten der Station. Der adressierte AP, beziehungsweise im Falle des broadcasts alle, beantwortet den Probe Request mit einer Probe Response in der er mitteilt welche der beworbenen Funktionen er ebenfalls unterstützt, die Station schließt den

Vorgang mit einem Acknowledgement ab.

Das 2,4GHz ISM-Band wird in Europa in 13 10MHz breite Kanäle aufgeteilt, da ein AP immer nur auf einem Kanal aktiv ist müsste jeder Kanal gescannt werden. Praktisch werden jedoch breitere Kanäle verwendet, 802.11g verwendet beispielsweise 20MHz breite Kanäle, so dass effektiv nur die Kanäle 1, 5, 9 und 13 geprüft werden müssen.

Tabelle 2.1 listet alle in der 802.11 Spezifikation gelisteten Management Frames. Ein Management Frame wird durch die Typenbits markiert und durch die Bits für den Subtypen weiter unterschieden.

Tabelle 2.1: Management Frames nach 802.11

Type	Subtype	Beschreibung
00	0000	Association Request
00	0001	Association Response
00	0010	Reassociation Request
00	0011	Reassociation Response
00	0100	Probe Request
00	0101	Probe Response
00	0110	Timing Advertisement
00	0111	Reserved
00	1000	Beacon
00	1001	ATIM
00	1010	Disassociation
00	1011	Authentication
00	1100	Deauthentication
00	1101	Action
00	1110	Action No Ack
00	1111	Reserved

2.2.2 Join

Aus den entdeckten APs kann nun einer ausgewählt werden um seinem Netzwerk (BSS) beizutreten. Es kann zwar geschehen, dass mehrere APs eines Netzwerks entdeckt wurden, eine Station kann jedoch zu jedem Zeitpunkt nur mit einem AP assoziiert sein.

Um einem Netzwerk beizutreten muss sich die Station zunächst authentifizieren, dieser Vorgang wird über einen Authentication Frame (siehe Tabelle 2.1) initiiert. Das weitere Vorgehen hängt vom Authentifizierungsverfahren ab, zum Beispiel kann der AP einen Challenge Text an die Station senden, die mit einem, aus dem Passwort erzeugten, Schlüssel entschlüsselt wird und an den AP zurück gesendet werden kann. Ist die Antwort korrekt bestätigt der AP den Vorgang mit einem Acknowledgement und eventuell zusätzlichen Informationen für eine Verschlüsselung.

Anschließend kann die Station mit dem AP assoziiert werden. Sie erhält nun eine IP und der AP gibt dem Netzwerk bekannt, dass er für die Station zuständig ist, dies geschieht üblicherweise über das Address Resolution Protokoll (ARP).

Ist eine Station assoziiert kann sie Datenverbindungen mit anderen Teilnehmern im Netzwerk aufbauen, sie könnte beispielsweise das HTTP-Protokoll nutzen um eine Webseite anzufordern.

2.2.3 Reassociation

Eine Reassociation wird durchgeführt wenn die Station keine gute Verbindung mehr zu ihrem AP hat und ein AP des selben Netzwerks verfügbar ist, der eine bessere Verbindung bietet. Um diesen neuen AP zu entdecken muss zunächst ein Scan durchgeführt werden.

Anschließend sendet die Station einen Reassociation Request an den neuen AP, im Reassociation Request wird der alte AP benannt, so dass der neue AP überprüfen kann, ob die Station tatsächlich mit ihm assoziiert ist, gepufferte Pakete von ihm entgegennehmen und die Assoziation mit ihm auflösen kann. Der Kommunikationsvorgang zwischen den APs wird auch als Handoff bezeichnet, wird dieser erfolgreich abgeschlossen antwortet der neue AP der Station mit einer Reassiziation Response. Abschließend wird dem Netzwerk die neue Assoziation mittels ARP mitgeteilt.

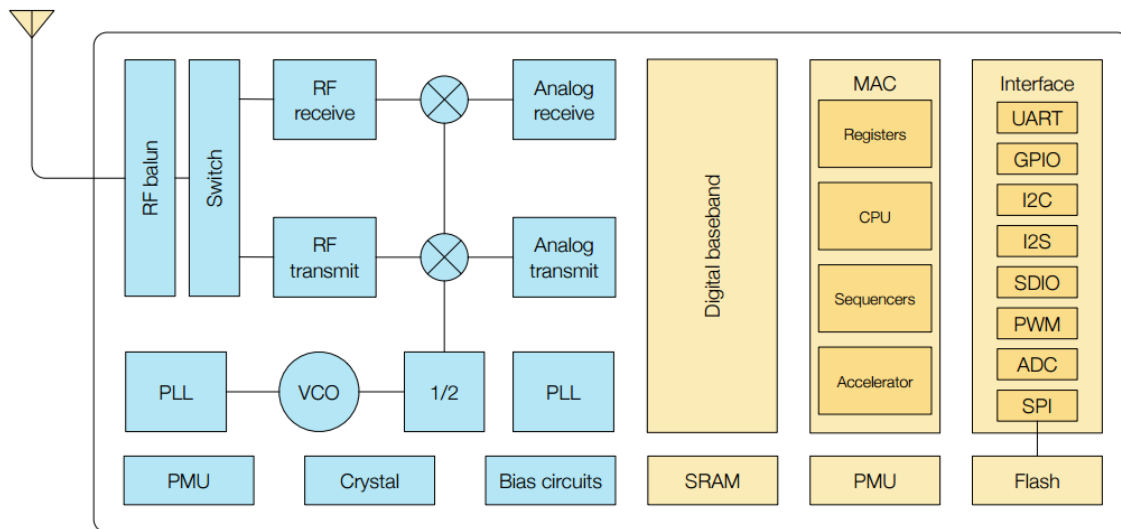


Abbildung 2.2: Blockdiagramm des ESP8266, aus [Team17]

2.3 ESP8266

Der ESP8266 soll für das Tag eingesetzt werden, dabei handelt es sich um einen Mikrocontroller von Espressif. Der Esp8266 besitzt neben einer CPU eine 802.11b/g/n/e/i-fähige WLAN-Einheit und diverse andere, kabelgebundene Kommunikationsstandards wie zum Beispiel GPIO, I2C und SPI, siehe Abb. 2.2.

Da der ESP8266 selbst weder über Flashspeicher, noch über eine Antenne verfügt wird er auf einem Modul mit diesen Komponenten verbaut, die in dieser Arbeit betrachteten Module sind das ESP12-S und das ESP12-F. Das neuere ESP12-F sollte eine höhere Reichweite entfalten, dies wird noch Gegenstand eines Experiments sein. Abb. 2.3 zeigt die beiden Module nebeneinander, die unterschiedlichen Antennenformen sind deutlich zu erkennen.

Espressif gibt im Datenblatt auch Aufschluss über den Energieverbrauch des Chips, siehe dazu Abb. 2.4. Für die Prototypenentwicklung wird ein ESP12-S Modul auf einem Adafruit Feather Huzzah verwendet, dieses stellt mit dem CP2104 eine serielle Schnittstelle zum Chip her, reguliert die Spannung für den Chip auf 3,3V und bringt den 2mm Pinabstand des ESP12-S Moduls auf die für Breadboards üblichen 2,5mm. Das Adafruit Feather Huzzah mit ESP12-S ist in Abb. 2.3 links abgebildet.

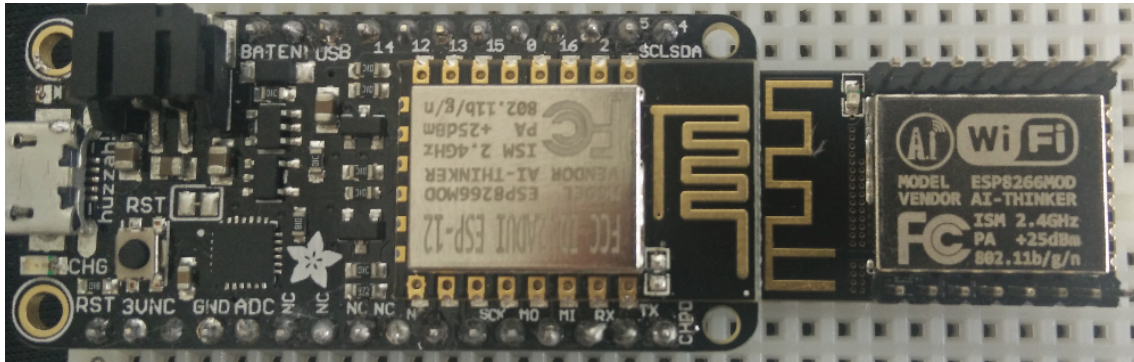


Abbildung 2.3: Vergleich der Antennen, links: ESP12-S verbaut auf einem Adafruit Feather Huzzah, rechts: ESP12-F

Parameters	Min	Typical	Max	Unit
Tx802.11b, CCK 11Mbps, P OUT=+17dBm	-	170	-	mA
Tx 802.11g, OFDM 54Mbps, P OUT =+15dBm	-	140	-	mA
Tx 802.11n, MCS7, P OUT =+13dBm	-	120	-	mA
Rx 802.11b, 1024 bytes packet length , -80dBm	-	50	-	mA
Rx 802.11g, 1024 bytes packet length, -70dBm	-	56	-	mA
Rx 802.11n, 1024 bytes packet length, -65dBm	-	56	-	mA
Modem-sleep ^①	-	15	-	mA
Light-sleep ^②	-	0.9	-	mA
Deep-sleep ^③	-	20	-	μA
Power Off	-	0.5	-	μA

Abbildung 2.4: Energieverbrauch des ESP8266 bei verschiedenen Operationen, aus [Team17]

2.3.1 ESP8266 Arduino Core

Eine einfache Möglichkeit den ESP8266 zu programmieren stellt die bekannte Arduino IDE dar.

Unter Windows muss zunächst der Treiber für den *CP2104 USB-to-Serial Chip* installiert werden, auf Linux und Mac entfällt dieser Schritt. Nach der Installation der Arduino IDE muss dort in den Einstellungen unter *Additional Boards Manager URLs* die URL http://arduino.esp8266.com/stable/package_esp8266com_index.json hinzugefügt werden. Nach einem Neustart der IDE kann im *Boards Manager* das Paket für den ESP8266 heruntergeladen werden und anschließend das Board *Adafruit HUZZAH ESP8266* ausgewählt werden.

Ist das Board über USB mit dem Computer verbunden kann nun eigener Code oder eines der Beispiele aus *Examples for Adafruit HUZZAH ESP8266* mit STRG+U auf den Chip geladen werden. Dieser Vorgang wird im Folgenden als flashen bezeichnet. Der ESP8266 Arduino Core wird als Open Source Projekt gepflegt und setzt die ESP Open SDK auf einen, für die Arduino IDE üblichen Stil um. Dabei wird möglichst die Kompatibilität zu Arduino gewahrt, das führt oft dazu, dass bereitgestellte Funktio-

nen der SDK nicht in Arduino umgesetzt wurden. Sollten die Funktionen dennoch benötigt werden können die Header-Dateien der SDK direkt importiert werden:

```
//Hier wird ein Header des ESP8266 Arduino Core importiert
#include <ESP8266WiFi.h>

//Hier wird ein Header der ESP Open SDK importiert
extern "C" {#include "user_interface.h"}
```

2.3.2 ESP Open SDK

Statt mit der Arduino Core Umsetzung der ESP Open SDK kann natürlich auch direkt mit ihr programmiert werden.

Dazu muss zunächst das Github Projekt geklont werden: `git clone --recursive https://github.com/pfalcon/esp-open-sdk.git` und anschließend mit `make` kompiliert werden. Wurde die Kompilierung erfolgreich abgeschlossen sollte die Pfadvariable (PATH) entsprechend der Meldung des make-Tools erweitert werden.

Die in C geschriebenen Programme können nun mit einem modifizierten GCC-Kompiler kompiliert und anschließend mit dem `esptool.py` zunächst in ein Image umgewandelt und dann geflasht werden. Das in *examples* enthaltene *blinky* Beispiel beinhaltet neben dem Beispielcode eine Makefile, in der diese Schritte nachvollzogen werden können, mit `make flash` wird das Beispiel kompiliert und geflasht.

Programme werden in regulärem C unter Zuhilfenahme der in `/sdk/include` enthaltenen Header-Dateien geschrieben, zu beachten ist nur, dass einige Funktionen der `stdlib.h` nicht verwendet werden können. Dies betrifft vor allem direkten Speicherzugriff wie zum Beispiel `memcpy`, hier muss stattdessen `os_memcpy` verwendet werden. Alle betroffenen Funktionen sind in `osapi.h` beschrieben.

Einige frühe Experimente zeigten, dass Programme, die mit der ESP Open SDK geschrieben wurden auf dem Chip schneller starten als solche, die mit dem ESP8266 Arduino Core geschrieben wurden. Diese Andeutung von Ineffizienzen bei der Übersetzung von Arduino Code wurde zum Anlass genommen, für die nachfolgenden Implementierungen nach der Fertigstellung des Prototypen in Arduino ebenfalls eine Implementierung in C hinzuzufügen, um ein energetisch optimales Programm zu erhalten.

2.4 WiFi-LSS Implementierung

Die mobile Einheit des WiFi-LLS Systems führt alle 5 Sekunden einen Scan aus, kodiert die Ergebnisse in XML und versendet sie an den Ortungsserver. Da der Fokus dieser Arbeit auf dem Energieverbrauch liegt werden für die Referenzimplementierung eines WiFi-LLS-Tags die Kodierung in XML durch eine simple String Kodierung ersetzt und die Ergebnisse werden über UDP an den Ortungsserver übermittelt. Damit wird der overhead einer TCP-Verbindung vermieden.

Zunächst muss sich das Tag dem Netzwerk beitreten (Join) und anschließend einen Scan ausführen und ein UDP-Paket versenden. Da die Scan-Funktion des Arduino Core es nicht erlaubt den RSSI zu einem AP auszulesen muss `user_interface.h` importiert und die Scan-Funktion der SDK direkt verwendet werden, die Implementierung ähnelt daher stark jener in C. Um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren, soll der Chip möglichst viel Zeit in Energiesparzuständen verbringen. Der

tieftste Schlafzustand, der dennoch eine Aufrechterhaltung der WLAN-Verbindung erlaubt ist der `light_sleep`. Er wird von Chip automatisch aufgerufen, wenn er keine Aufgaben zu erledigen hat, kann aber auch manuell aufgerufen werden, beides wurde getestet.

Einige Parameter können gewählt werden: Insbesondere die Intervallzeit bestimmt, wie oft der Chip aktiv ist und damit auch wie viel Energie er verbraucht. Für Mitarbeiter im Tunnel kann von einer Maximalgeschwindigkeit von 30 *km/h* ausgegangen werden, diese wird durch Schienen- oder Lastkraftfahrzeuge erreicht. Die maximale Reichweite des ESP12-S beziehungsweise ESP12-F Moduls ist nicht bekannt und muss noch bestimmt werden, sie wird zwischen 50 und 100 Metern angenommen. Es wurde daher ein Intervall von 5 Sekunden gewählt, in dieser Zeit bewegt sich ein Mitarbeiter bei 30 *km/h* ca. 42 m.

Des Weiteren kann theoretisch die Zahl der gescannten Kanäle gewählt werden, da sich die Einflussbereiche der APs in einem WLAN-Netzwerk üblicherweise überlappen ist es aber sinnvoll diese über die 4 nichtüberlappenden Kanäle zu verteilen. Eine Implementierung die nur einen Kanal scannt tritt deshalb nur außer Konkurrenz an.

Tabelle 2.2 zeigt den gemessenen Verbrauch der Implementierungen in Arduino und C, jeweils mit und ohne manuell aufgerufenen `light_sleep` und eine Implementierung, die nur einen Channel scannt. Für die Tests wurde das Adafruit Feather Huzzah verwendet, es wurde mit 5 V aus einer USB-Powerbank mit Energie versorgt, der Verbrauch wurde mit einem dazwischen geschalteten USB-Power-Meter gemessen. Die Werte wurden stationär in einer Mietwohnung in einem 5-stöckigen Wohnhaus und damit nicht unter realen Bedingungen aufgezeichnet. Unter realen Bedingungen finden durch die Bewegung des Mitarbeiters regelmäßig Reassociations statt, im Gegenzug liefert ein Scan in einem Tunnel weniger Ergebnisse als in einem Wohnhaus. Ein Test unter realen Bedingungen ist im Abschnitt ?? zu finden, er beinhaltet jedoch nur noch die Implementierung in C mit `light_sleep` und einem Scan auf allen 4 Kanälen.

Tabelle 2.2: Energieverbrauch WiFi-LSS-artiger Tags

SDK	manueller <code>light_sleep</code>	Anzahl Kanäle	Spannung in V	Ø Ver- brauch in mA	Ø Ver- brauch in mW
Arduino Core	Nein	4	5	22	110
Arduino Core	Ja	4	5	21	105
ESP Open SDK	Nein	4	5	19	95
ESP Open SDK	Ja	4	5	19	95
ESP Open SDK	Ja	1	5	6,5	32,5

Die Tests zeigen, dass die Programmierung mit der ESP Open SDK einen Vorteil beim Energieverbrauch hat, dieser liegt bei ca 10%. Andererseits fällt auf, dass die Reduzierung der gescannten Channel eine signifikante Senkung des Energieverbrauchs nach sich zieht, die Scan-Funktion ist also der Hauptverbraucher.

Um die finale Laufzeit zu bestimmen muss die Kapazität des Akkus bekannt sein. Ein Lithium-Polymer Akku hat eine Nennspannung von 3,7 V, seine Kapazität wird in *mAh* angegeben. Ein beispielhafter 1400 *mAh* Lithium-Polymer Akku liefert folglich $1400 \text{ mAh} * 3,7 \text{ V} = 5180 \text{ mWh}$. Die Laufzeit beträgt dann $5180 \text{ mWh} / 95 \text{ mW} \approx 54,53 \text{ h}$, also etwas mehr als 2,25 Tage.

Literaturverzeichnis

- [ANSSY13] H. Abdel-Nasser, R. Samir, I. Sabek und M. Youssef. MonoPHY: Mono-stream-based device-free WLAN localization via physical layer information. In *Wireless communications and networking conference (WCNC), 2013 IEEE*. IEEE, 2013, S. 4546–4551.
- [BaPa00] P. Bahl und V. N. Padmanabhan. RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. In *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies. Proceedings. IEEE*, Band 2. Ieee, 2000, S. 775–784.
- [BaPB00] P. Bahl, V. N. Padmanabhan und A. Balachandran. Enhancements to the RADAR user location and tracking system. *Microsoft Research* 2(MSR-TR-2000-12), 2000, S. 775–784.
- [ChLu07] Y. Chen und R. Luo. Design and implementation of a wifi-based local locating system. In *Portable Information Devices, 2007. PORTABLE07. IEEE International Conference on*. IEEE, 2007, S. 1–5.
- [DrMS98] C. Drane, M. Macnaughtan und C. Scott. Positioning GSM telephones. *IEEE Communications Magazine* 36(4), 1998, S. 46–54.
- [Ekah17] Ekahau. Ekahau W4 Wearable Tag. https://www.airistaflow.com/wp-content/uploads/2016/07/Ekahau-RTLS-W4_DS_1-15.pdf, 2017.
- [Flow17a] A. Flow. Ekahau A4 Asset Tag. https://www.airistaflow.com/wp-content/uploads/2016/07/AiRISTAFLOW_Ekahau-RTLS_A4_DS.pdf, 2017.
- [Flow17b] A. Flow. Ekahau B4 Badge Tag. https://www.airistaflow.com/wp-content/uploads/2016/09/AiRISTAFLOW_-Ekahau-B4_DS.pdf, 2017.
- [Flow17c] A. Flow. Offizielle Website von AiRISTA Flow. <https://www.airistaflow.com/#>, 2017.
- [Freu15] J. Freudiger. How talkative is your mobile device?: an experimental study of Wi-Fi probe requests. In *Proceedings of the 8th ACM Conference on Security & Privacy in Wireless and Mobile Networks*. ACM, 2015, S. 8.
- [Goog17] Google. Offizielle Website des Android-Projekts. https://www.android.com/intl/de_de/phones/, 2017.

- [Heal17a] S. Healthcare. AeroScout: Staff Assist for Improved Security. <https://www.stanleyhealthcare.com/solutions/health-systems/security-protection/staff-security>, 2017.
- [Heal17b] S. Healthcare. T14 Patient and Staff Badge, 2017.
- [HoSo07] A. M. Hossain und W.-S. Soh. A comprehensive study of bluetooth signal parameters for localization. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2007. PIMRC 2007. IEEE 18th International Symposium on*. IEEE, 2007, S. 1–5.
- [LDBL07] H. Liu, H. Darabi, P. Banerjee und J. Liu. Survey of wireless indoor positioning techniques and systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)* 37(6), 2007, S. 1067–1080.
- [LGLD⁺11] G. Lui, T. Gallagher, B. Li, A. G. Dempster und C. Rizos. Differences in RSSI readings made by different Wi-Fi chipsets: A limitation of WLAN localization. In *Localization and GNSS (ICL-GNSS), 2011 International Conference on*. IEEE, 2011, S. 53–57.
- [LPLaY00] X. Li, K. Pahlavan, M. Latva-aho und M. Ylianttila. Comparison of indoor geolocation methods in DSSS and OFDM wireless LAN systems. In *Vehicular Technology Conference, 2000. IEEE-VTS Fall VTC 2000. 52nd*, Band 6. IEEE, 2000, S. 3015–3020.
- [Mana17] A. H. A. T. . Management. Ekahau A4 Asset Tag. <https://www.stanleyhealthcare.com/solutions/health-systems/supply-chain-asset-management/asset-management>, 2017.
- [MiSA03] A. Mishra, M. Shin und W. Arbaugh. An empirical analysis of the IEEE 802.11 MAC layer handoff process. *ACM SIGCOMM Computer Communication Review* 33(2), 2003, S. 93–102.
- [MKML06] K. Muthukrishnan, G. Koprnikov, N. Meratnia und M. Lijding. Using time-of-flight for WLAN localization: feasibility study. 2006.
- [NLLP04] L. M. Ni, Y. Liu, Y. C. Lau und A. P. Patil. LANDMARC: indoor location sensing using active RFID. *Wireless networks* 10(6), 2004, S. 701–710.
- [PrKC02] P. Prasithsangaree, P. Krishnamurthy und P. Chrysanthis. On indoor position location with wireless LANs. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2002. The 13th IEEE International Symposium on*, Band 2. IEEE, 2002, S. 720–724.
- [SkJa09] M. J. Skibniewski und W.-S. Jang. Simulation of Accuracy Performance for Wireless Sensor-Based Construction Asset Tracking. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering* 24(5), 2009, S. 335–345.
- [Team17] E. S. I. Team. ESP8266EX Datasheet. http://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf, 2017.

-
- [Torr84] D. J. Torrieri. Statistical theory of passive location systems. *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems* (2), 1984, S. 183–198.
- [WiKP09] S. B. Wibowo, M. Klepal und D. Pesch. Time of flight ranging using off-the-self ieee802. 11 wifi tags. In *Proceedings of the International Conference on Positioning and Context-Awareness (PoCA'09)*, 2009.

