

Energieoptimierung funkbasierter Ortungseinheiten

Masterarbeit
von

Marius Wodtke

Institut für Angewandte Informatik und Formale Beschreibungsverfahren (AIFB)
der Fakultät für Informatik

Erstgutachter:
Zweitgutachter:
Betreuernder Mitarbeiter:

Prof. Dr. H. Schmeck
Prof. Dr. ?. ??????????
Dipl.-Inform. K. Bao

Bearbeitungszeit: 01. April 2017 – 31. Oktober 2017

Ich erkläre hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig 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 31. Oktober 2017

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	1
1.1 Bisherige Situation	1
1.2 Umgebung für funkbasierte Ortung	2
1.3 Zielsetzung der Arbeit	2
1.4 Anforderungen an das Bereichsortungssystem	3
1.5 Gliederung der Arbeit	3
2 Grundlagen	5
2.1 Klassifikation von Ortungssystemen	5
2.1.1 Funkprotokoll-Standards	5
2.1.2 Topologie	5
2.1.2.1 Direkte Fernlokalisierung	6
2.1.2.2 Direkte Selbstlokalisierung	6
2.1.2.3 Indirekte Fernlokalisierung	6
2.1.2.4 Indirekte Selbstlokalisierung	6
2.1.2.5 Lokalisierung ohne Basisstationen	6
2.1.2.6 Hybride Topologie	6
2.1.3 Lokalisierungsprinzip	7
2.1.4 Messgrößen	8
2.1.4.1 Time of arrival	8
2.1.4.2 Time difference of arrival	9
2.1.4.3 Roundtrip time of flight	10
2.1.4.4 Received signal strength	10
2.2 Grundlagen der IEEE 802.11 Spezifikation	10
2.2.1 Scan	11
2.2.2 Join	11
2.2.3 Reassociation	12
2.3 Grundlagen der Bluetooth Spezifikation	13
2.3.1 Inquiry Scan	13
2.3.2 Advertising	14
2.4 Grundlagen von LoRaWAN	14
3 Analyse	17
3.1 Verwandte Arbeiten	17
3.1.1 Verwandte Arbeiten - Selbstlokalisierung & indirekte Fernlokalisierung mit IEEE 802.11	17
3.1.1.1 WiFi-LLS	17
3.1.1.2 AiRISTA Flow RTLS	18
3.1.1.3 AeroScout	18

3.1.1.4	Selbstlokalisierung mit Szenenanalyse	19
3.1.2	Verwandte Arbeiten - Fernlokalisierung & indirekte Selbstlokalisierung mit IEEE 802.11	19
3.1.2.1	RADAR	19
3.1.2.2	Verbesserungen an RADAR	21
3.1.2.3	Time-of-flight Lokalisierung	21
3.1.2.4	Ortung ohne mobile Einheit	21
3.1.3	Verwandte Arbeiten - Funkbasierte Lokalisierung mit weiteren Funkprotokollen	22
3.1.3.1	Geeignete Messwerte für Bluetooth	22
3.1.3.2	Antwortbasierte Inquiry Lokalisierung	23
3.1.3.3	RSSI-basierte Inquiry Lokalisierung	24
3.1.3.4	RSSI-basierte BLE Lokalisierung	24
3.1.3.5	Lokalisierung mit LoRa	25
3.2	Auswahl des Funkprotokolls	25
3.3	Auswahl der Topologie	26
3.4	Auswahl der Messgrößen	26
3.5	Auswahl der Hardware	27
3.6	Weiteres Vorgehen	27
4	Indirekte Fernlokalisierung mit 802.11	29
4.1	ESP8266	29
4.1.1	ESP8266 Arduino Core	30
4.1.2	ESP Open SDK	31
4.2	WiFi-LLS Implementierung	32
4.3	Anpassungen für Bereichsortung	33
4.4	Untersuchung des Energieverbrauchs	36
4.4.1	WiFi-LLS	36
4.4.2	Indirekte Bereichsortung	39
4.4.3	Kein AP in Reichweite	39
4.5	Reichweite von WLAN	39
4.5.1	Methodik	41
4.5.2	Ergebnisse	41
4.5.3	Bewertung	41
5	Direkte Fernlokalisierung mit 802.11	43
5.1	RADAR Implementierung	43
5.2	Anpassungen für Bereichsortung	44
5.2.1	Anzahl der verwendeten Kanäle	46
5.3	Untersuchung des Energieverbrauchs	47
5.3.1	RADAR	47
5.3.2	Probe Request Lokalisierung	47
6	Fernlokalisierung mit Bluetooth	51
6.1	nRF52832	51
6.1.1	Arduino Bluefruit nRF52 API	52
6.2	BLE Advertising Implementierung	52
6.2.1	Theoretische Energieverbrauchsabschätzung	53
6.3	RFM95	54

6.3.1	RadioHead RFM9x für Arduino	55
6.4	LoRa Implementierung	55
6.4.1	Theoretische Energieverbrauchsabschätzung	55
6.5	Untersuchung des Energieverbrauchs	57
6.5.1	Bluetooth Low Energy Advertising	57
6.5.2	Lokalisierung mit LoRa	57
6.6	Reichweite von Bluetooth	58
6.6.1	Methodik	59
6.6.2	Ergebnisse	59
6.6.3	Bewertung	60
6.7	Reichweite von LoRa	60
6.7.1	Methodik	61
6.7.2	Ergebnisse	61
6.7.3	Bewertung	62
7	Beschleunigungssensor	63
7.1	LIS3DH	63
7.2	Abschaltautomatik	63
7.3	Bewertung	64
8	Ermittlung der Funkreichweite	53
8.1	WLAN	53
8.1.1	Methodik	53
8.1.2	Ergebnisse	54
8.1.3	Bewertung	54
8.2	Bluetooth	55
8.2.1	Methodik	55
8.2.2	Ergebnisse	56
8.2.3	Bewertung	56
8.3	LoRa	56
8.3.1	Methodik	56
8.3.2	Ergebnisse	57
8.3.3	Bewertung	58
9	Vergleich der Implementierungen	59
9.1	Simulationsumgebung	59
9.2	Anpassungen der Implementierungen	60
9.3	Methodik	60
9.4	Ergebnisse	61
9.4.1	WiFi-LLS	61
9.4.2	Indirekte Bereichsortung	62
9.4.3	RADAR	64
9.4.4	Probe Request Lokalisierung	65
9.4.5	Bluetooth Low Energy Advertising	67
9.4.6	Lokalisierung mit LoRa	67
9.5	Bewertung	68
Literaturverzeichnis		71

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.

1.1 Bisherige Situation

Die Ortung wird derzeit bei der Ed. Züblin AG mittels Bluetooth durchgeführt, dabei sind die Basisstationen 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 Basisstationen an und bereitet die Ergebnisse

graphisch auf.

Der Tunnel wird in Bereiche zu circa 500 Meter aufgeteilt, die Tunnelbohrmaschine (TBM) stellt dabei einen Sonderbereich dar, weil sie sich im Gegensatz zu den anderen Bereichen langsam bewegt. Neue Bereiche werden hinter der TBM eingefügt und sind dann stationär.

Die Bluetooth Basisstationen werden in Kästen verstaut die weitere notwendige Technik, wie etwa ein Notfalltelefon, enthalten. Weil diese Kästen nur etwa alle 500 Meter montiert sind, existieren große Lücken in denen die mobilen Einheiten nicht geortet werden. Eine mobile Einheit bleibt im System so lange in einem Bereich bis sie wieder von einer Basisstation erkannt wird.

Wird die mobile Einheit von der Erfassungseinheit vor dem Portal (Tunneleingang) erkannt gilt sie als außerhalb des Tunnels. Abbildung 1.1 zeigt die bisherige Situation mit Bluetooth Basissationen, die Reichweite der der Basistationen ist dabei nicht maßstabsgetreu.

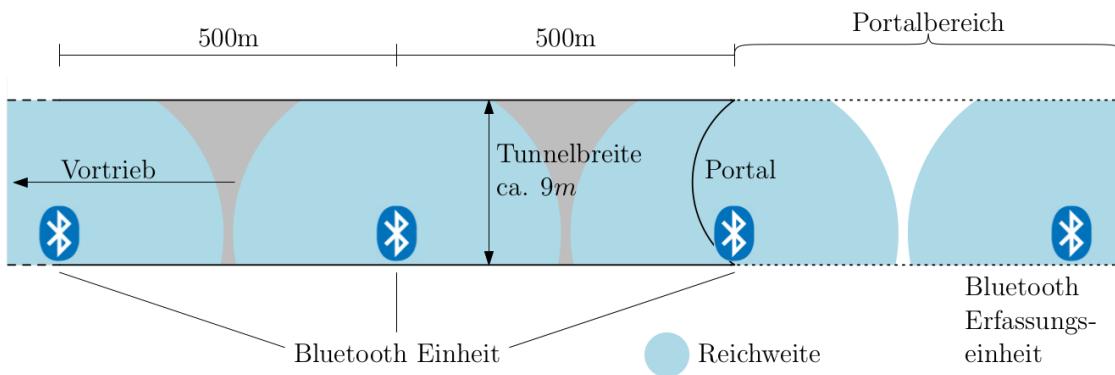


Abbildung 1.1: Bereichsortung mit Bluetooth, aus [Maur16].

1.2 Umgebung für funkbasierter Ortung

Als Versuchsumgebung dient die Tunnelbaustelle Rastatt. Dort gelten die Positionen der Kästen für die Technik als unveränderlich. Nur sie bieten Strom, Netzwerkanbindung (LAN) und Schutz vor dem Baustellenumfeld. Für Funkprotokolle, die weniger als 250 Meter Reichweite haben muss daher mit Erfassungslücken gerechnet werden. Auf der TBM und anderen technischen Fahrzeugen sind jedoch mehr Basisstationen möglich.

Es existiert bereits ein WLAN Netzwerk, dessen Access Points als Basisstationen genutzt werden können. Es handelt sich um APs der Firma Lancom, diese stellt auch einen LN-862 für Versuche. Für zukünftige Baustellen soll der Abstand der Versorgungskästen auf 250 Meter sinken, diese Situation ist in Abbildung 1.2 skizziert.

1.3 Zielsetzung der Arbeit

Ziel der Arbeit soll der Entwurf und die Implementierung eines Bereichsortungssystems für Personen in Tunnelanlagen 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



Abbildung 1.2: Zukiünftige Situation der Tunnelbaustellen.

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. Ziel dieser Arbeit eine mehrmonatige Laufzeit der mobilen Einheiten.

Für diese Arbeit werden mehrere Prototypen für mobile Einheiten entwickelt und auf ihre Charakteristik bezüglich des Energieverbrauchs und der Erkennungssicherheit untersucht. Der Entwurfsraum umfasst dabei die Hardware und Software der mobilen Einheit sowie die Implementierung des Ortungsservers, die für die Funktechnologie benötigte Infrastruktur wird jeweils als gegeben angenommen.

1.4 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 Basisstationen, zuverlässig erkannt werden. Die mobilen Einheiten sollen von Personen um den Hals getragen werden können. Dies bedingt ein geringes Gewicht des Akkus, gleichzeitig soll aber die Laufzeit der mobilen Einheit maximiert werden, sodass ein Akku mit möglichst großer Kapazität gewählt werden sollte. Zuletzt soll unter Rücksichtnahme auf das beschriebene Szenario die Komplexität der benötigten IT-Infrastruktur so gering wie möglich gehalten werden um ein stabiles und kostengünstiges System zu garantieren.

1.5 Gliederung der Arbeit

Nachdem zunächst in Kapitel 2 die Grundlagen der funkbasierten Ortung und der verwendeten Funkprotokolle behandelt werden, wird in Kapitel 2 das Problem analysiert und verwandte Arbeiten aufgezeigt. Die Kapitel 4, 5 und 6 beschäftigen sich mit der Implementierung und Untersuchung der Prototypen. In Kapitel 7 wird die Integration eines Beschleunigungssensors zur Verlängerung der Laufzeit diskutiert. Das Fazit in Kapitel ?? fasst die Arbeit noch einmal zusammen, vergleicht und bewertet die Ergebnisse.

2. Grundlagen

2.1 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.

2.1.1 Funkprotokoll-Standards

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 IEEE 802.11 (WLAN), Bluetooth und Radio Frequency Identification (RFID).

2.1.2 Topologie

Die Topologie hat zwei Dimensionen, Fernlokalisierung versus Selbstlokalisierung und direkt versus indirekt und beschreibt wie Basisstationen und mobile Einheiten zusammenwirken. Alle besprochenen Topologien sind in Abbildung 2.1 veranschaulicht, gewellte Pfeile stellen hier zu messende Signale dar, gerade Pfeile sind gerichtete Datenverbindungen.

2.1.2.1 Direkte Fernlokalisierung

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

2.1.2.2 Direkte Selbstlokalisierung

Bei der direkten Selbstlokalisierung senden hingegen die Basisstationen 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.

2.1.2.3 Indirekte Fernlokalisierung

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.

2.1.2.4 Indirekte Selbstlokalisierung

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.

2.1.2.5 Lokalisierung ohne Basisstationen

Die mobilen Einheiten können sich auch gegenseitig lokalisieren, dazu messen sie die Distanz zu anderen mobilen Einheiten. Sie können diese Ergebnisse dann wiederum anderen mobilen Stationen mitteilen um so indirekt mit weiteren Referenzen die Lokalisierung zu präzisieren. Dadurch entsteht eine maßstabslose Karte, die die reale Position der mobilen Einheit zu den anderen mobilen Einheiten erfasst. Diese kann zusätzlich an einen zentralen Ortungsserver versendet werden um sie dort verfügbar zu machen.

2.1.2.6 Hybride Topologie

In einer hybriden Topologie orten sich die mobilen Einheiten gegenseitig, werden dabei aber von wenigen Basisstationen unterstützt. Diese Basisstationen geben ihre feste Position bekannt, dadurch ist es möglich der entstehenden Karte Punkte für die Ausrichtung und Skalierung hinzuzufügen. Außerdem können sie mit dem zentralen Ortungsserver kommunizieren um eine indirekte Fernlokalisierung mittels der durch die mobilen Einheiten propagierten Karten eine indirekte Fernlokalisierung durchzuführen.



Abbildung 2.1: Topologien für die Lokalisierung

2.1.3 Lokalisierungsprinzip

Das einfachste Lokalisierungsprinzip ist das Umgebungsprinzip, hier wird eine mobile Einheit der Basisstation mit dem stärksten Signal zugeordnet, die Basisstation 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 eine Basisstation in Reichweite der mobilen Einheit sein, was diese Möglichkeit auch in komplexeren Lokalisierungsprinzipien zu einer sinnvollen Ausweichmöglichkeit macht, falls nicht genügend Basisstationen in Reichweite sind.

Die geometrische Bestimmung der Position einer mobilen Einheit mit drei oder mehr Basisstationen nennt man Trilateration. Dabei wird üblicherweise für jede Basisstation die Distanz zur mobilen Einheit bestimmt, anschließend wird ein Kreis mit der gemessenen Distanz um jede Basisstation 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 Basisstationen möglich, dies nennt man Triangulation. Der Winkel kann zum Beispiel über die zeitliche Differenz der ankommenden Signale an den synchronisierten Basisstationen bestimmt werden, dann wird von jeder Basisstation 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 Basisstationen 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.

2.1.4 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).

2.1.4.1 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 die empfangende Basisstation. 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 Basisstation i , minimiert. Dies erfordert, dass die Basisstationen 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 3.36 ns/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 Basisstationen 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 $t_{empfangen,i}$ abgezogen werden.

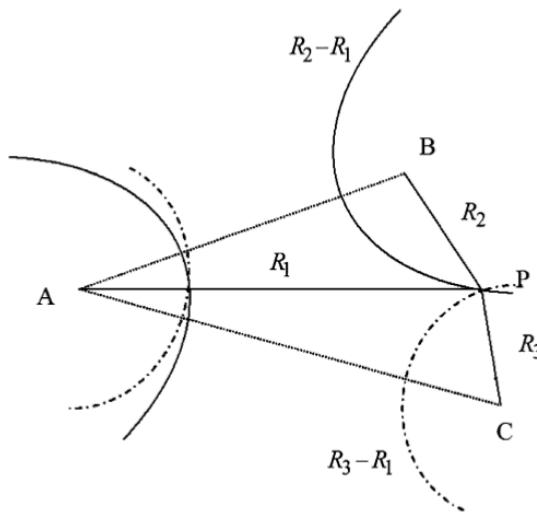


Abbildung 2.2: Positionsbestimmung mit der Differenz der Ankunftszeiten (TDOA), aus [LDBL07].

2.1.4.2 Time difference of arrival

Bei TDOA wird statt der direkten Ankunftszeiten die Differenz der Ankunftszeiten gemessen, dies erfordert üblicherweise Zeitsynchronität bei den Basisstationen, 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 Basisstationen, die TDOA gemessen haben, und einer Referenzstation 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 Messstation, (x_j, y_j, z_j) sei die gemeinsame Referenzstation und (x, y, z) sei die Position der mobile Einheit. Abbildung 2.2 zeigt die Lösung 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 Basisstationen

beobachtet und die Differenz der Ankunftszeiten des Datenpaketes und des Acknowledgements als $t_{i,1}$ mit $i \in \text{Basisstationen}$ protokolliert. Zusätzlich ist $t_{i,0}$ als die Differenz zwischen dem Senden des Datenpaketes und dem Empfangen an den anderen Basisstationen durch die bekannte Position aller Basisstationen ebenfalls bekannt. Damit kann die Differenz der Ankunftszeit $TDOA_{i,j} = (t_{i,0} + t_{i,1}) - (t_{j,0} + t_{j,1})$ mit $i, j \in \text{Basisstationen}$ ohne vorherige Synchronisation berechnet werden.

2.1.4.3 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 Basisstation 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 IEEE IEEE 802.11 häufig auftreten.

2.1.4.4 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 Basisstation 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 Basisstationen verwendet werden, denn Lui et al. konnte für WLAN zeigen, dass unterschiedliche Hardware bei Basisstationen und mobiler Einheit erhebliche Varianz in den gemessenen RSS Werten erzeugt [LGLD¹¹]. 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.

2.2 Grundlagen der IEEE 802.11 Spezifikation

Die Spezifikation IEEE 802.11 beschreibt eine Form der drahtlosen Datenübertragung mittels Funkwellen [IEEE12h]. Sie beschreibt die physische Schicht (PHY-Layer) und den Mediumszugriff (MAC-Layer) für ein Funknetzwerk, dass 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). IEEE 802.11 wurde 1997 erstmals verabschiedet und wurde häufig erweitert und wird in ihrer ursprünglichen Form praktisch nicht mehr angewendet, da die Datenraten zu gering sind. Die Erweiterungen werden mit Buchstaben benannt (zum Beispiel IEEE 802.11g) und verändern etwa die verwendete Frequenz und Modulationsverfahren. 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 (Short IFS < Priority IFS < Data IFS < Extended IFS), anschließend kann gesendet werden. Tritt trotzdem eine Kollision auf, versucht der Sender es erneut mit einem längeren IFS.

IEEE 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) passiv oder aktiv ausgeführt werden [IEEE12a]. Bei einem passiven Scan empfängt die Station und filtert die von Access Points regelmäßig gesendeten Beacons heraus, diese gelten dann als entdeckt. Ein Beacon 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 Beacons.

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, die technischen Möglichkeiten der Station. Der addressierte AP, beziehungsweise im Falle eines Broadcasts alle APs, 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 2,4 GHz ISM-Band wird in Europa in 13 je 10 MHz breite Kanäle aufgeteilt, da ein AP immer nur auf einem Kanal aktiv ist, müsste jeder Kanal gescannt werden. Praktisch werden jedoch breitere Kanäle verwendet. IEEE 802.11g verwendet beispielsweise 20 MHz breite Kanäle, sodass effektiv nur die Kanäle 1, 5, 9 und 13 geprüft werden müssen.

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

2.2.2 Join

Aus den entdeckten APs kann nun einer ausgewählt werden, um seinem Netzwerk (BSS) beizutreten [IEEE12c]. 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.

Tabelle 2.1: Management Frames nach IEEE 802.11 [IEEE12g]

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	Authentification
00	1100	Deauthentification
00	1101	Action
00	1110	Action No Ack
00	1111	Reserved

Dieser Vorgang wird über einen Authentication Frame (siehe Tabelle 2.1) initiiert [IEEE12d]. Das weitere Vorgehen hängt vom Authentifizierungsverfahren ab, zum Beispiel kann der AP einen verschlüsselten Challenge Text an die Station senden, der 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 Stromchiffre.

Anschließend kann die Station mit dem AP assoziiert werden [IEEE12e]. 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) oder das Internet Group Management Protocol (IGMP).

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 [IEEE12f]. 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, sodass 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 Reassociation Response. Abschließend wird dem Netzwerk die neue Assoziation mittels ARP mitgeteilt.

2.3 Grundlagen der Bluetooth Spezifikation

Bluetooth beschreibt eine Form der Funkkommunikation über kurze Distanzen, die zunächst für Mobiltelefone entwickelt und dann auf weitere Geräteklassen übertragen wurde. Ursprünglich wurde die physische Schicht (PHY-Layer) und der Mediumszugriff (MAC-Layer) in der Spezifikation 802.15.1 definiert [IEEE02]. Diese wird allerdings nicht mehr vom Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) gepflegt.

Bluetooth ist bereits in der Version 5.0 erschienen, da jedoch zum Zeitpunkt der Recherche für diese Arbeit kaum kompatible Geräte wird im Folgenden auf Bluetooth 4.0 Bezug genommen [Blue10a]. Bluetooth erlaubt es nach der Entdeckung eines Kommunikationspartners und anschließendem Aufbau einer Verbindung mit ihm im 2,4 GHz ISM-Band. Die Reichweite für die Verbindung hängt neben äußeren Hindernissen und den verwendeten Antennen auch von der jeweiligen Sendeleistung ab. Bluetooth Geräte werden dazu in drei Klassen eingeteilt, siehe Tabelle 2.2.

Tabelle 2.2: Klasseneinteilung für Bluetooth Geräte nach Sendeleistung, aus [Blue10c].

Power Class	Maximum Output Power (Pmax)	Nominal Output Power	Minimum Output Power ¹	Power Control
1	100 mW (20 dBm)	N/A	1 mW (0 dBm)	Pmin<+4 dBm to Pmax Optional: Pmin ² to Pmax
2	2.5 mW (4 dBm)	1 mW (0 dBm)	0.25 mW (-6 dBm)	Optional: Pmin ² to Pmax
3	1 mW (0 dBm)	N/A	N/A	Optional: Pmin ² to Pmax

Mit Bluetooth 4.0 wurde erstmals Bluetooth Low Energie (BLE, auch Bluetooth Smart) vorgestellt. BLE wurde für niedrigen Energieverbrauch optimiert, es verzichtet auf den Verbindungsauflaufbau, um den Zeitabschnitt in dem das Gerät aktiv ist zu reduzieren. Da aber Informationen, die üblicherweise während des Verbindungsauflaufbaus übertragen werden, nun als Header um das Datenpaket gepackt werden müssen, sinkt die Bruttodatenrate gegenüber Bluetooth deutlich [Riga16]. BLE eignet sich somit vor allem dann, wenn wenige oder selten Informationen ausgetauscht werden müssen. Im Folgenden werden die, für die Lokalisation wichtigen Operationen vorgestellt. Es handelt sich dabei jeweils um die Funktion des Entdeckens von Ressourcen mittels Inquiry Scan für Bluetooth beziehungsweise mittels Advertising für BLE.

2.3.1 Inquiry Scan

Eine Bluetooth Verbindung besitzt immer einen Master und einen Slave [Blue10f]. Da es sich beim Inquiry Scan um eine Operation zum Entdecken von Ressourcen handelt ist, sind die Rollen noch nicht festgelegt. Die Spezifikation geht aber davon aus, dass der Sender der Inquiry Message der Master ist. Nachdem der Master die Inquiry Message versendet hat antwortet der Slave nach 625 μ s mit einer Inquiry Response. Soll eine erweiterte Inquiry Response zum Einsatz kommen, wird dies in der Inquiry Response gekennzeichnet und die erweiterte Inquiry Response 1250 μ s

später gesendet. Diese Zeiten sind den bei Bluetooth vorgesehenen Frequenzsprüngen angepasst. Abbildung 2.3 zeigt den Vorgang inklusive erweiterter Inquiry Response. Die Pakete sind entsprechend ihrer Inhaltsspezifikation benannt, ID entspricht der Inquiry Message, FHS der Inquiry Response und Extended Inquiry Response Packet der erweiterten Inquiry Response.

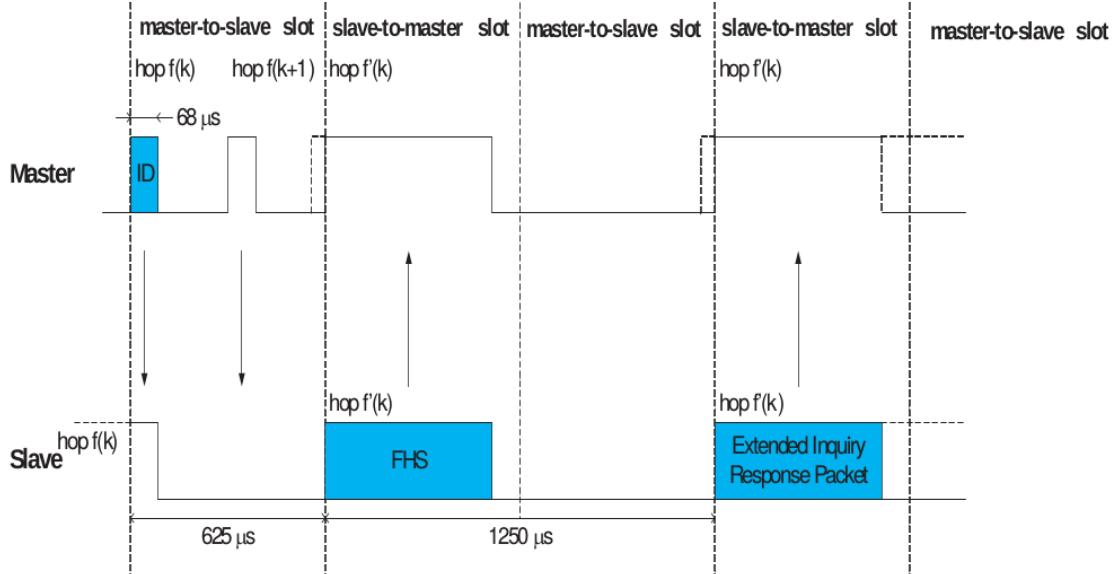


Abbildung 2.3: Inquiry Scan Vorgang, aus [Blue10f].

2.3.2 Advertising

Für das Advertising stellt die Bluetooth Spezifikation drei über das Frequenzband verteilte Kanäle bereit [Blue10b]. Auf diesen können BLE Geräte Advertising Pakete in einem unidirektionalen Broadcast versenden. Advertising Pakete dürfen auch Nutzdaten enthalten, diese können dann von anderen, scannenden BLE Geräten empfangen werden [Blue10d]. Allerdings dürfen die Nutzdaten maximal eine Länge von 31 Byte aufweisen [Blue10g]. Wurde zusätzlich im Advertising Paket markiert, dass das Gerät verbindungsfähig ist, kann ein scannendes Gerät nach empfangen des Advertising Paketes einen Scan Request an das verbindungsfähige Gerät richten, um die Parameter für eine Verbindung auszuhandeln [Blue10e].

2.4 Grundlagen von LoRaWAN

Bei Long Range Wide Area Network (LoRaWAN) handelt es sich um ein Netzwerkprotokoll, welches die proprietäre Modulationstechnik LoRa verwendet. Es ist für betriebreibetriebene Endgeräte optimiert und wird von der LoRa Alliance spezifiziert [SLEK⁺15]. LoRa beherrscht neben unterschiedlichen Frequenzen des ISM Bands, in Europa beispielsweise 433 und 868 MHz, auch eine adaptive Datenrate zwischen 0,3 und 50kbps.

LoRaWAN verwendet keine Kollisionsvermeidung, stattdessen dürfen Endgeräte zu jedem Zeitpunkt senden, solange sie dabei den Kanal zufällig wählen und die maximale Sendezeit beziehungsweise relative Frequenzbelegungsdauer nicht überschreiten. Maximale Sendezeit und relative Frequenzbelegungsdauer werden dabei durch

die länderspezifischen Regulierungsbehörden festgelegt.

LoRaWAN unterscheidet drei Geräteklassen. Klasse A Geräte halten nach dem Senden zwei kurze Empfangsfenster offen um eine Antwort des Kommunikationspartners zu empfangen, siehe dazu Abbildung 2.4. Klasse B Geräte öffnen zusätzliche Empfangsfenster zu festgelegten Zeiten, diese werden durch Beacons der Gateways festgelegt. Klasse C Geräte empfangen immer wenn sie nicht senden. Klasse C Geräte verbrauchen deshalb deutlich mehr Energie als Klasse A beziehungsweise B Geräte, haben dafür aber eine geringere Latenz bei Anfragen durch den Kommunikationspartner.

Soll eine Verbindung nicht direkt zwischen zwei Kommunikationspartnern, sondern über ein Gateway zustande kommen, muss diesem Gateway zunächst beigetreten werden, danach können bestätigte und unbestätigte Datenpakete über das Gateway und ein dahinterliegendes Netzwerk ausgetauscht werden. Tabelle 2.3 zeigt die Nachrichtentypen von LoRaWAN.

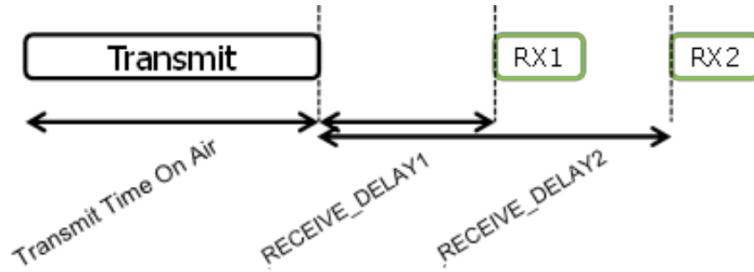


Abbildung 2.4: Senden/Empfangen-Schema von Klasse A Geräten, aus [SLEK⁺15].

Tabelle 2.3: Nachrichtentypen von LoRaWAN, aus [SLEK⁺15].

MType	Description
000	Join Request
001	Join Accept
010	Unconfirmed Data Up
011	Unconfirmed Data Down
100	Confirmed Data Up
101	Confirmed Data Down
110	RFU
111	Proprietary

3. Analyse

In diesem Kapitel werden zunächst einige verwandte Arbeiten vorgestellt und danach werden auf Basis dieser die Topologie, Protokolle und Messwerte für die Implementierungen dieser Arbeit ausgewählt.

3.1 Verwandte Arbeiten

Die verwandten Arbeiten wurden in drei Unterkategorien unterteilt. Die erste Kategorie beschäftigt sich mit Selbstlokalisierung beziehungsweise indirekter Fernlokalisierung mittels IEEE 802.11. Die Arbeiten der zweiten Kategorie basieren ebenfalls auf IEEE 802.11, hier wird jedoch eine Fernlokalisierung oder eine indirekte Selbstlokalisierung durchgeführt. Die letzte Kategorie beschäftigt sich mit Arbeiten, die nicht auf IEEE 802.11 basieren, hier sind Verfahren beschrieben, die andere Protokolle verwenden.

3.1.1 Verwandte Arbeiten - Selbstlokalisierung & indirekte Fernlokalisierung mit IEEE 802.11

Für die Selbstlokalisierung mit IEEE 802.11 werden auf der mobilen Einheit Messwerte für empfangene Pakete bestimmt und daraus die Position der mobilen Einheit berechnet. Diese Information kann anschließend an einen Ortungsserver übertragen werden, dann handelt es sich um eine indirekte Fernlokalisierung.

3.1.1.1 WiFi-LLS

Chen et al. stellen mit dem WiFi-based Local Location System (WiFi-LLS) ein System zur indirekten Fernlokalisierung vor [ChLu07]. Als Messgröße wird die Stärke des empfangenen Signals (received signal strength, RSS) genutzt. Diese wird laut IEEE 802.11 Spezifikation als Index (RSSI) von der Hardware zurückgegeben.

Für die Ortung wird zunächst der RSSI von Paketen naher Access Points gemessen und zusammen mit der MAC-Adresse der mobilen Einheit in ein Paket gepackt und an den Ortungsserver versendet. 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 $d_0 = 1\text{m}$ 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. OAF kann sogar für einen Gebäudetyp einmalig 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 entdeckter APs zusammen mit der eigenen MAC-Adresse in XML codiert und das so erzeugte Paket an den Ortungsserver versendet.

3.1.1.2 AiRISTA Flow RTLS

Ekahau bietet unter der Marke *AiRISTA Flow RTLS* eine zu WiFi-LLS ähnliche Lösung kommerziell an [AiRI17c]. Ihr Ekahau B4 Badge Tag ermittelt regelmäßig den RSSI zu nahegelegenen APs 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 [AiRI17b]. 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 [AiRI17a].

Im Umfeld des Tunnelbaus zeigte sich jedoch, dass die Tags keinesfalls wochenlange Laufzeiten aufwiesen, stattdessen entluden sie sich teilweise in unter zwölf Stunden.

3.1.1.3 AeroScout

Auch das AeroScout System von Stanley Healthcare richtet sich an den medizinischen Sektor und soll Objekte und Personen orten [Stan17a], [Stan17b]. 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 [Stan17c]. Eine Angabe zu dem verwendeten Typ, der Konfiguration oder der Kapazität des verbauten Akkus wird nicht gemacht.

3.1.1.4 Selbstlokalisierung mit Szenenanalyse

Prasithsangaree et al. stellen ein System zur Selbstlokalisierung 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 im Schnitt zehn Metern 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.

Abbildung 3.1 zeigt die gemessenen RSSI Werte für die von ihnen getesteten Netzwerk-karten mit unterschiedlichen Distanzen, für einige Karten korreliert die empfangene Signalstärke nur sehr schwach mit der Distanz zwischen Basisstation 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.

3.1.2 Verwandte Arbeiten - Fernlokalisierung & indirekte Selbstlokalisierung mit IEEE 802.11

Für die Fernlokalisierung mit IEEE 802.11 werden auf den Basisstationen Messwerte für empfangene Pakete bestimmt und daraus die Position der mobilen Einheit berechnet. Diese Information kann anschließend an die mobile Einheit übertragen werden, dann handelt es sich um eine indirekte Selbstlokalisierung.

3.1.2.1 RADAR

Das RADAR System von Bahl et al. (Microsoft Research) hat als eins der ersten WLAN-basierten Ortungssysteme viel Aufmerksamkeit erfahren [BaPa00]. Als Messgröße wird die Stärke des empfangenen Signals (received signal strength, RSS) genutzt, diese wird laut IEEE 802.11 Spezifikation als Index (RSSI) von der Hardware zurückgegeben. Das RADAR System ist auf eine offline-Phase angewiesen, in der empirisch ein Signalausbreitungsmodell aufgebaut wird. Es handelt sich also um ein System mit Szenenanalyse.

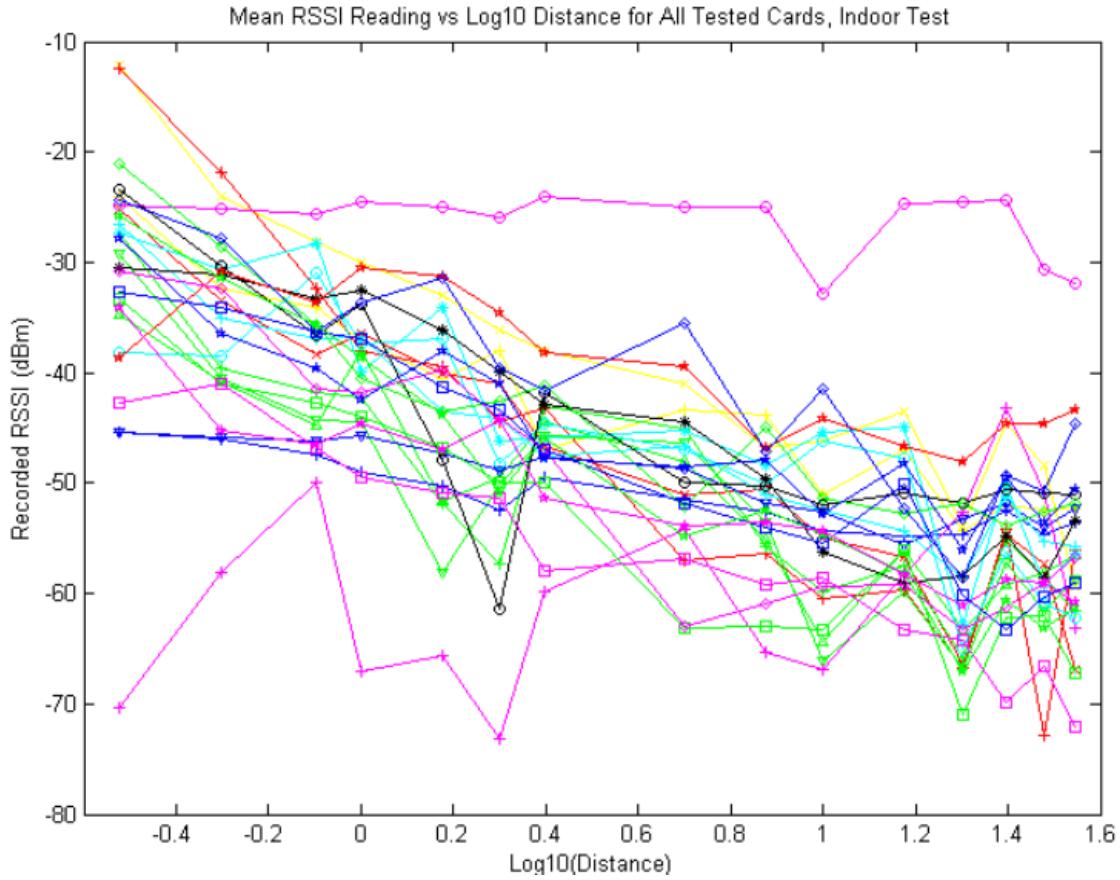


Abbildung 3.1: Gemessener RSSI mit verschiedenen Access Points und Distanzen, aus [LGKD⁺11].

Die Verwendung einer offline-Phase ist im stark veränderlichen Baustellenumfeld nicht akzeptabel. Zum einen führt der ständige Baufortschritt dazu, dass regelmäßig neu kalibriert werden muss und zum anderen wirken sich auch die großen Baumaschinen auf die Signalausbreitung aus. Damit sich dies nicht im Modell wiederfindet, müssten zunächst alle beweglichen Maschinen aus dem Bereich entfernt werden, um anschließend in der online-Phase ihren Einfluss glätten zu können. Die offline-Phase ist deshalb wirtschaftlich gesehen nicht durchführbar und das empirisch ermittelte Signalausbreitungsmodell müsste durch ein theoretisches ersetzt werden, für eine grobkörnige Bereichsortung sollte dies jedoch ausreichend sein.

Bei RADAR sendet die mobile Einheit vier UDP-Pakete pro Sekunde aus, an den Basisstationen wird dann der RSSI gemessen. Die Autoren weisen jedoch darauf hin, dass sich dieser Vorgang leicht umkehren ließe, um von einer Fernlokalisierung auf eine Selbstlokalisierung zu kommen. Bezuglich des Energieverbrauchs äußern sie sich jedoch zu keiner der beiden Varianten.

Die Position wird anschließend bestimmt, indem aus den in der offline-Phase aufgenommenen Werten derjenige mit dem geringsten Abstand zu den gemessenen Werten gewählt wird. Dies wird im *nearest neighbour in signal space (NNSS)* Algorithmus beschrieben. Für die Ortung wird mehrfach gemessen und dann gemittelt, um im Median eine Genauigkeit von unter 3 Metern zu erhalten. Das kurze Sendeintervall von 0,25 Sekunden führt auch bei bewegten Personen zu einer Genauigkeit von 3,5 Metern. Gleichzeitig sorgt das kurze Sendeintervall aber auch für einen hohen

Energieverbrauch auf Seiten der mobilen Einheit, eine Reduktion der Sendevorgänge sollte im Kontext der Bereichsortung angestrebt werden, um den Energieverbrauch zu senken und die Batterielaufzeit der mobilen Einheit zu steigern.

3.1.2.2 Verbesserungen an RADAR

Bahl et al. veröffentlichten anschließend noch einige Verbesserungen für das ursprüngliche RADAR System [BaPB00]. Diese umfassen unter anderem den Einsatz von Access Points statt PCs als Basisstationen, verbesserte Ortung bewegter Personen und die Erkennung von hinzugekommenen Hindernissen wie etwa Personen. Letzteres geschieht durch die Analyse der Signalstärke von Beacons anderer APs, da diese sich nicht bewegen, können Veränderungen in der Signalstärke als Veränderungen auf dem Signalweg gesehen werden. Dies ließe sich auch auf größere Hindernisse übertragen, hängt aber stark von der strategischen Platzierung und möglichst dichten Verteilung der APs ab.

Auch hier äußern sich die Autoren nicht zum Energieverbrauch, wohl auch deshalb weil sie einen Laptop als mobile Einheit verwenden.

3.1.2.3 Time-of-flight Lokalisierung

Aufgrund der Schwächen von RSS-basierten Systemen wurde auch über solche nachgedacht, die stattdessen oder zusätzlich die time-of-flight (TOF) messen. Ein Beispiel für ein solches zeigen Wibowo et al. [WiKP09]. Sie fordern optimalerweise Zugriff auf die physische Schicht (PHY) des IEEE 802.11 Protokolls, da auf diesen aber üblicherweise kein Zugriff besteht, messen sie TOF in der darüber liegenden MAC-Schicht.

Eine Basisstation sendet einen Beacon aus und protokolliert die Sendezeit, die mobile Einheit empfängt den Beacon, protokolliert die Empfangszeit und die Sendezeit der gesendeten Antwort, die Basisstation sichert die Empfangszeit der Antwort. Nun sendet die mobile Einheit die zwei gespeicherten Zeitstempel an die Basisstation, der mit diesen die Verarbeitungszeit auf der mobilen Einheit berechnen kann, um dann die Distanz $d = c * (\frac{t_{\text{empfangen}} - t_{\text{gesendet}} - t_{\text{Verarbeitung}}}{2})$ zur mobilen Einheit zu bestimmen. Dieses Schema lässt sich leicht von einer Fernlokalisierung in eine Selbstlokalisierung umwandeln, indem man den Initiator des Vorgangs tauscht.

Die Notwendigkeit die Zeitstempel bereits in der PHY- beziehungsweise MAC-Schicht zu setzen erfordert Zugriff auf die Software des als Basisstation verwendeten Access Points. Außerdem müssen die Zeitstempel im Bereich von Nanosekunden gesetzt werden und die Verarbeitungszeit vor/nach dem Setzen muss sehr konstant sein, da eine Abweichung von 100 ns bei $c = 299.792.458 \text{ m/s}$ bereits einen Fehler von 30 Metern verursacht.

Muthukrishnan et al. beschreiben diese Problematik bei dem Versuch TOF ohne Zugriff auf die Software des APs umzusetzen [MKML06]. Sie kommen zu dem Ergebnis, dass sich die in der Spezifikation eingebauten Zeitstempelfunktionen wie das Network Time Protocol (NTP), Ping und die Zeitstempel in Beacons nicht eignen, da sie zum einen nur eine Auflösung im Millisekundenbereich bieten und zum anderen von der Blockierungskontrolle von IEEE 802.11 (CSMA/CA) abhängen.

3.1.2.4 Ortung ohne mobile Einheit

Eine Ortung ohne mobile Einheit erfüllt wegen ihrer Abwesenheit offensichtlich jede Anforderung an die Batterielaufzeit der mobilen Einheit. Mit MonoPHY stellen

Abdel-Nasser et al. ein System zur Ortung ohne mobile Einheit vor [ANSSY13]. Dazu verwenden sie einen IEEE 802.11n-fähigen Laptop und Access Point und analysieren die Channel State Information (CSI) der physischen Schicht (PHY) der zwischen AP und Laptop übertragenen Daten. Um die bestehende Struktur von APs zu nutzen, sollte das System angepasst und die CSI zwischen den APs gemessen werden. Es hat jedoch einige Aspekte, die es ungeeignet für die Aufgabenstellung machen.

Das System unterscheidet nicht zwischen Personen, sondern erkennt nur, dass jemand anwesend ist. Außerdem ist es nur für eine Person in einem 100 m^2 Apartment gestaltet worden und müsste auf Baustellengröße und die Verfolgung vieler Personen erweitert werden. Aber auch dann ist fraglich, wie gesichert werden kann, dass alle Personen durchgehend erkannt werden können, zum Beispiel wenn sich mehrere Personen auf oder in einem Transportfahrzeug aufhalten. Auch ist es ohne Identifikation schwerer Fehler zu erkennen. Wird fälschlicherweise angezeigt, dass sich noch eine Person im Tunnel befindet, kann oft durch ausrufen des Betreffenden festgestellt werden, dass dieser nicht im Tunnel ist. Hat man dagegen nur die Information, dass sich noch eine Person im Tunnel befindet, hat man keine Möglichkeit schnell herauszufinden ob dies der Wahrheit entspricht.

Weitere Probleme entstehen durch die Baumaschinen und Container. Diese haben einen starken Einfluss auf die CSI und verdecken dadurch möglicherweise nahe Personen und die Fahrzeugführer. Deshalb müssten diese Objekte ebenfalls als Entitäten angezeigt werden. Die Anzeige diverser Kommandostände, Pausenräume und stehen gelassener Baumaschinen verwirrt im Notfall jedoch, da sich in jedem Objekt potentiell eine Person befinden könnte.

Die Veröffentlichung beruht außerdem auf der Verfügbarkeit der CSI, diese sind dort durch die Auswahl einer bestimmten Netzwerkkarte gegeben und sind nicht zwingend in einer bestehenden Struktur von APs verfügbar. Als letzter Kritikpunkt steht die Verwendung einer offline-Phase, die, wie bereits diskutiert, wirtschaftlich nicht umsetzbar ist.

Somit erfüllt die Ortung ohne mobile Einheit zwar die Anforderungen an den Energieverbrauch, jedoch nicht die Forderung nach sicherer Erkennung von Abschnittswechseln, deshalb scheidet diese Technik zumindestens für Baustellen aus.

3.1.3 Verwandte Arbeiten - Funkbasierte Lokalisierung mit weiteren Funkprotokollen

Die Arbeiten in dieser Kategorie verwenden nicht IEEE 802.11 für die Lokalisierung. Sie verwenden stattdessen andere Protokolle, die sich durch einen geringeren Energieverbrauch als IEEE 802.11 auszeichnen sollen.

3.1.3.1 Geeignete Messwerte für Bluetooth

Hossain et al. untersuchen die laut Bluetooth Spezifikation zurückgegebenen Messwerte bezüglich ihrer Eignung für die Lokalisierung [HoSo07].

Link Quality (LQ) beschreibt, wie gut die Verbindung zwischen zwei Geräten ist. Der Wert wird aus der Bitfehlerrate beim Empfänger berechnet, allerdings ist nicht spezifiziert, wie der Wert zu berechnen ist, er hängt also in hohem Maße vom Hersteller des Empfängers ab.

Der Received Signal Strength Indicator (RSSI) misst die Stärke des eingehenden Signals, die Spezifikation sieht jedoch eine Golden Receive Power Range (GRPR)

vor. Liegt der RSSI über oder unter dieser wird eine Anfrage zum erhöhen oder verringern der Sendeleistung an das andere Gerät verschickt, dies dient während einer aktiven Verbindung dazu den Energieverbrauch zu senken. Problematisch am RSSI ist, dass er relativ zur GRPR bestimmt wird. In der Untersuchung von Hossain et al. führte das dazu, dass der RSSI mit 0 gemessen wurde, wenn er innerhalb der GRPR lag.

Transmission Power Level (TPL) ist die Sendeleistung eines Geräts. TPL kann während einer bestehenden Verbindung durch Anfragen des Verbindungspartners verändert werden. Dazu muss diese Energiesparfunktion jedoch unterstützt werden, was bei dem von Hossain et al. verwendeten Gerät nicht der Fall war. Abbildung 3.2 zeigt deshalb für TPL eine waagerechte Linie.

Für Inquirys wird die Stärke des eingehenden Signals ohne die Beachtung des GRPR bestimmt. Außerdem werden Inquirys immer mit voller Sendeleistung gesendet, da sie zur Entdeckung von Ressourcen verwendet werden. Es handelt sich ebenfalls um den RSSI, um jedoch den Unterschied zum RSSI für eine Verbindung deutlich zu machen nennen Hossain et al. diesen Wert RX Power Level.

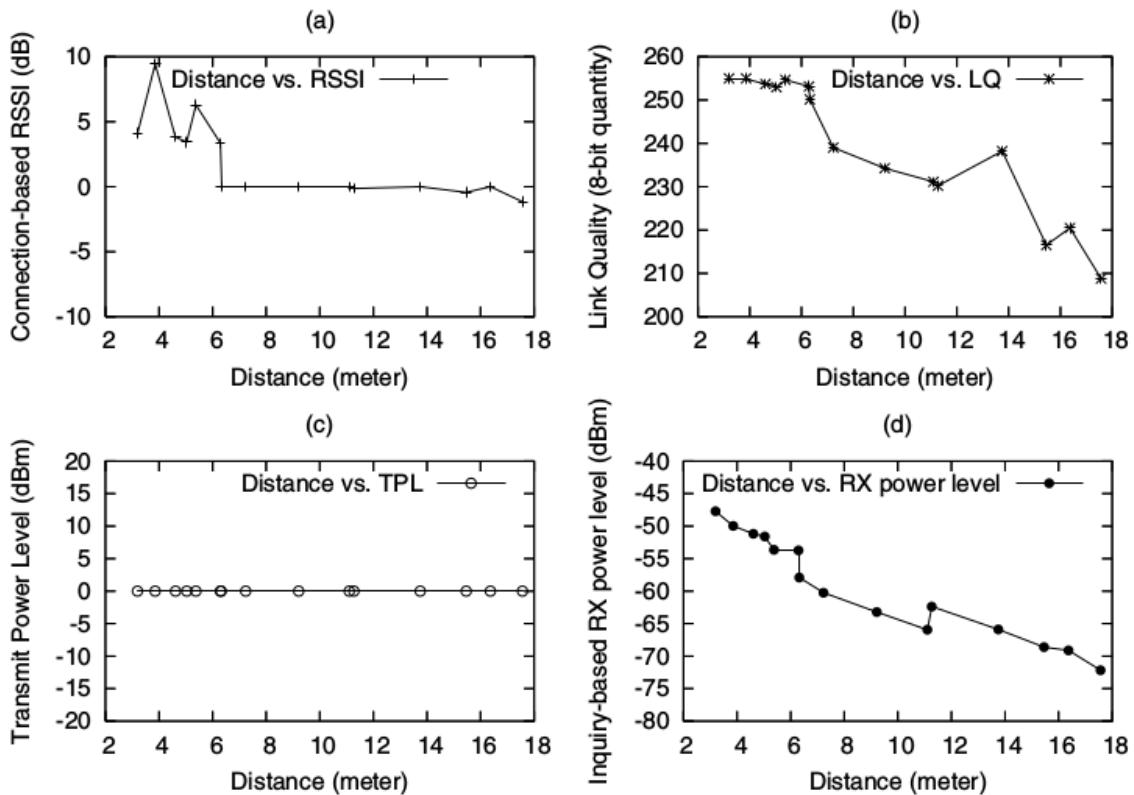


Abbildung 3.2: Korrelation der Messwerte mit der Distanz, aus [HoSo07]

3.1.3.2 Antwortbasierte Inquiry Lokalisierung

Bargh et al. stellen ein System zur Fernlokalisierung mittels Bluetooth Inquiry Scan vor [BadG08]. Die mobilen Einheiten sind dabei im discoverable ("entdeckbar") Modus. Die Basisstationen senden regelmäßig eine Inquiry Message aus, die dann von mobilen Einheiten in Reichweite mit einer Inquiry Response beantwortet werden. Anschließend werden die Antworten auf einem zentralen Ortungsserver gesammelt und die Positionen der mobilen Einheiten bestimmt. Diese Information wird aus den

beantworteten Inquiry Messages jeder mobilen Einheit gewonnen. Dazu werden vorher in einer offline-Phase Fingerabdrücke für jeden Raum gesammelt. In diesen wird gespeichert welche Inquiry Messages von der mobilen Einheit an einem bestimmten Ort beantwortet wurden. Für die Bereichsortung entfiele diese offline-Phase, da der Bereich über die Beantwortung einer einzelnen Inquiry Message implizit bestimmt werden kann. Tabelle 3.1 zeigt die abnehmende Wahrscheinlichkeit für eine Antwort auf die Inquiry Message mit steigender Distanz.

Tabelle 3.1: Rate der beantworteten Inquiry Messages (Inquiry Response Rate, IRR) gegen Distanz, aus [BadG08]

location of the object device	distance of devices	average of IRR	variance of IRR
in the room of the Bluetooth dongle	2 m	97 %	1.8
in the hall outside the dongle room	4 m	97 %	1.2
	6 m	99 %	1
	8 m	94 %	1.4
	10 m	86 %	4.6
	12 m	74 %	9.6
	14 m	67 %	4.6
in room across the hall	16 m	NULL	NULL
	18 m	NULL	NULL

3.1.3.3 RSSI-basierte Inquiry Lokalisierung

Ling et al. lokalisieren Bluetooth-fähige Geräte über den RSSI der Inquiry Response [LRJT⁺10]. Ihre Basisstationen versenden regelmäßig Inquiry Messages und messen den RSSI der Inquiry Responses. Mobile Einheiten, die geortet werden wollen beziehungsweise sollen, bewerben in der Inquiry Response einen speziellen Service. Dies erlaubt es diese herauszufiltern und die Privatsphäre anderer Personen zu wahren. Die Autoren verwenden eine anfängliche offline-Phase um Fingerabdrücke für den RSSI an gegebenen zu finden. Allerdings messen sie dazu an den Basisstationen die empfangene Signalstärke von Übertragungen anderer Basisstationen, folglich kann die offline-Phase automatisiert durchgeführt werden. Für die online-Phase werden die gemessenen RSSI Werten über eine Wahrscheinlichkeitsverteilung geglättet, um eine bessere Ortungsgenauigkeit zu erreichen. Für die eigentliche Lokalisierung werden die gemessenen RSSI mit den Wahrscheinlichkeitsverteilungen aus der offline-Phase verglichen und die Wahrscheinlichkeit für die Emission dieser Werte über die Position maximiert.

3.1.3.4 RSSI-basierte BLE Lokalisierung

Jianyong et al. stellen ein System zur Lokalisierung auf Basis von Bluetooth Low Energie (BLE, auch Bluetooth Smart) vor [JHZZ14].

Sie messen an den Basisstationen den RSSI von Advertising Paketen, die zuvor von

den mobilen Einheiten versendet wurden. Für die genaue Ortung werden die Ergebnisse mit einem Gauß-Filter geglättet und für jede Basisstation die Parameter für ein Signalausbreitungsmodell bestimmt. Die gemessene Signalstärke $P = A - 10n \log(d)$ hängt von der Referenzsignalstärke A im Abstand von einem Meter, dem Dämpfungsfaktor n und der Distanz d ab.

Jianyong et al. bestimmen die Referenzsignalstärke und den Dämpfungsfaktor für jede Basisstation. Da jedoch nur eine Bereichsortung für diese Arbeit gefordert wurde, sollten A und n nur beispielhaft für eine Basisstation bestimmt werden, um den Aufwand beim Aufbau der Infrastruktur zu reduzieren. Abbildung 3.3 zeigt die von Jianyong et al. bestimmten Parameter für das Signalausbreitungsmodell. Abbildung 3.3 zeigt außerdem, dass die verwendeten CC2540 Development Kit von Texas Instruments von einer Basisstation nur auf 20 Meter detektiert werden konnte.

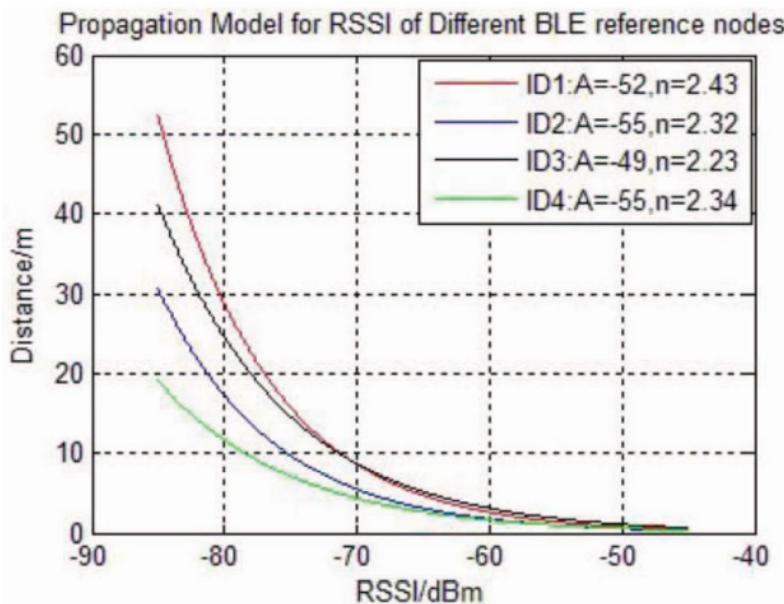


Abbildung 3.3: Signalausbreitungsmodelle aus [JHZZ14]

3.1.3.5 Lokalisierung mit LoRa

Kim et al. stellen ein System zur Lokalisierung mit LoRa vor [KiKo16]. Sie beziehen sich dabei auf eine Lokalisierung im Außenbereich in einem 30x30km Areal. Sie senden Pakete von der mobilen Einheit und messen die Time of Arrival (ToA) an den Basisstationen. Dazu müssen die Basisstationen zeitsynchron arbeiten, dies wird über GPS sichergestellt.

Eine Lokalisierung über den RSSI lehnen sie ab, da dieser im Bereich von 20 bis 30km Entfernung nur um 3-6dBm fällt und die Varianz die Korrelation von RSSI und Distanz über lange Distanzen überdeckt. Sie erreichen, abhängig von der Anzahl der verwendeten Basisstationen eine Genauigkeit zwischen wenigen Hundert und fast eintausend Metern, siehe dazu Abbildung 3.4

3.2 Auswahl des Funkprotokolls

Soll das bestehende WLAN Netzwerk genutzt werden ist die Wahl auf die IEEE 802.11 Spezifikation beschränkt.

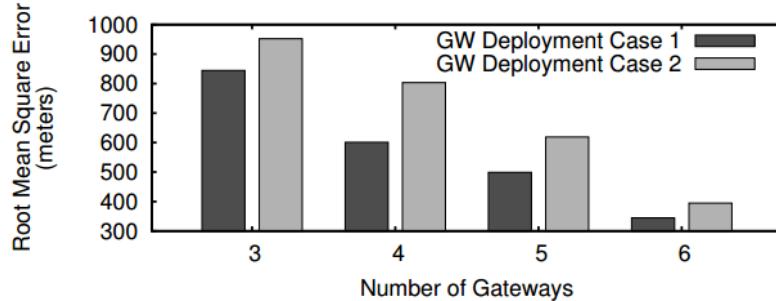


Abbildung 3.4: Quadratischer Fehler der Lokalisierung aus [KiKo16], Gateways stellen Basisstationen dar.

Kann man aber die Hardware für die Basisstationen frei wählen, kann auch das Protokoll frei gewählt werden. Es werden deshalb zusätzlich BLE und LoRa betrachtet. Bluetooth Low Energy wird gegenüber normalem Bluetooth aufgrund seiner Charakteristik als Protokoll für geringen Energieverbrauch bevorzugt.

LoRa bietet zwar theoretisch eine sehr hohe Reichweite, diese ist jedoch stark von verwendeten Antennen und den Hindernissen abhängig. Ob LoRa einen signifikanten Vorteil bei der Reichweite hat muss geprüft werden. Sollte dieser Vorteil bestehen, bietet LoRa durch seine bessere Abdeckung eine höhere Sicherheit bei der Erkennung von Abschnittswechseln. Außerdem ist es dadurch potentiell möglich auf triangulierte Positionen zu wechseln ohne mehr Basisstationen aufbauen zu müssen.

3.3 Auswahl der Topologie

Das Wissen um die Position der Nutzer soll nach der Ortung dem Sicherheitssystem der Baustelle zur Verfügung stehen. Das Sicherheitssystem fungiert daher konzeptionell auch als zentraler Ortungsserver. Es muss deshalb eine Fernlokalisierung durchgeführt werden, diese kann aber sowohl direkt als auch indirekt durchgeführt werden.

Weil laut IEEE 802.11 keine für die Lokalisierung geeigneten Messwerte vom AP in das angeschlossene Netzwerk propagiert werden, kommt keine der verwandten Arbeiten zur direkten Fernlokalisierung mit IEEE 802.11 ohne Zugriff auf die Software des AP aus. Es werden deshalb sowohl die direkte, als auch die indirekte Fernlokalisierung mit IEEE 802.11 untersucht, obwohl eine Lösung mit indirekter Fernlokalisierung wegen des nötigen Empfangs von Signalen potentiell mehr Energie verbraucht. Dürfen Veränderungen der Hardware vorgenommen werden, bietet sich ebenfalls eine direkte Fernlokalisierung an, da dort die mobilen Einheiten, abgesehen von der Kollisionsdetektion/-vermeidung, nicht empfangen müssen.

Eine Topologie ohne Basisstationen kommt nicht in Frage, da diese Topologie Einzelpersonen insbesondere in Notsituationen nicht ausreichend gut erfasst.

3.4 Auswahl der Messgrößen

Da nur eine Bereichsortung durchgeführt werden soll, sind die Anforderungen an die erzielte Genauigkeit gering. Stattdessen sollte darauf geachtet werden, dass die Anforderung für die Messung gering ist. Messgrößen, die Zeitsynchronität voraussetzen sind daher nicht geeignet.

Als Messgröße wird der Received Signal Strength Index für alle drei Technologien gewählt, da dieser bei jedem empfangenen Paket von der physischen Schicht gemessen und am empfangenden Gerät leicht ausgelesen werden kann.

Auch bei LoRa wird der RSSI entgegen der Empfehlung von Kim et al. gewählt. Da sich das Szenario im Gegensatz zu dem aus ihrer Veröffentlichung unter Tage abspielt kann keine Synchronisierung über GPS gewährleistet werden. Außerdem müssen die Distanzen zwischen den Basisstationen geringer gewählt werden, da die Ungenauigkeiten aus dieser Veröffentlichung zu hoch für das Szenario sind.

3.5 Auswahl der Hardware

Die verwendeten Radios müssen die physische Schicht des jeweils verwendeten Protokolls beherrschen. Es werden deshalb Radios für 802.11, Bluetooth 4.0 oder höher und LoRaWan benötigt.

Die Feather-Serie von Adafruit beinhaltet viele eigenständige Entwicklungs-Boards, darunter finden sich für jede der benötigten Funktechnologien ein Entwicklungs-Board. Das *Adafruit Feather HUZZAH ESP8266* wird für mobile Einheiten mit IEEE 802.11 eingesetzt. Mobile Einheiten mit Bluetooth werden mit dem *Adafruit Feather nRF52 Bluefruit* implementiert, es unterstützt Bluetooth 5.0 inklusive BLE. Unterstützung für LoRa bietet das *Adafruit Feather M0 RFM95 LoRa Radio (900MHz)*, mit diesem werden mobile Einheiten mit LoRa implementiert.

3.6 Weiteres Vorgehen

Im Folgenden werden Prototypen für die drei ausgewählten Protokolle erstellt, IEEE 802.11 ist dabei in indirekte und direkte Fernlokalisierung geteilt, da die direkte Fernlokalisierung Zugriff auf die Software der Basisstationen erfordert. Zusätzlich wird die Reichweite jeder Funktechnologie im Tunnel überprüft, da diese für das Intervall der Ortungsvorgänge und die Erkennungssicherheit wichtig ist. Abschließend werden in jedem Kapitel die Charakteristika des Stromverbrauchs der jeweiligen mobilen Einheiten überprüft.

4. Indirekte Fernlokalisierung mit 802.11

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 Basisstationen im Folgenden immer APs. Die Unveränderlichkeit bedeutet insbesondere auch, dass keine Messwerte verwendet werden können, die direkt am AP gemessen werden und nicht als Teil der 802.11 Spezifikation 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.

4.1 ESP8266

Der ESP8266 soll als Hardware für das Tag eingesetzt werden, dabei handelt es sich um einen Microcontroller von Espressif. Der ESP8266 besitzt neben einer CPU eine 802.11b/g/n/e/i-fähige WLAN-Einheit und beherrscht diverse andere, kabelgebundene Kommunikationsstandards wie zum Beispiel GPIO, I2C und SPI, siehe Abbildung 4.1.

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 bei der Funkübertragung entfalten, dies wird noch Gegenstand eines Experiments sein. Abbildung 4.2 zeigt die beiden Module nebeneinander, die unterschiedlichen Antennenformen sind deutlich zu erkennen.

Espressif gibt im Datenblatt auch Aufschluss über den Energieverbrauch des ESPs,

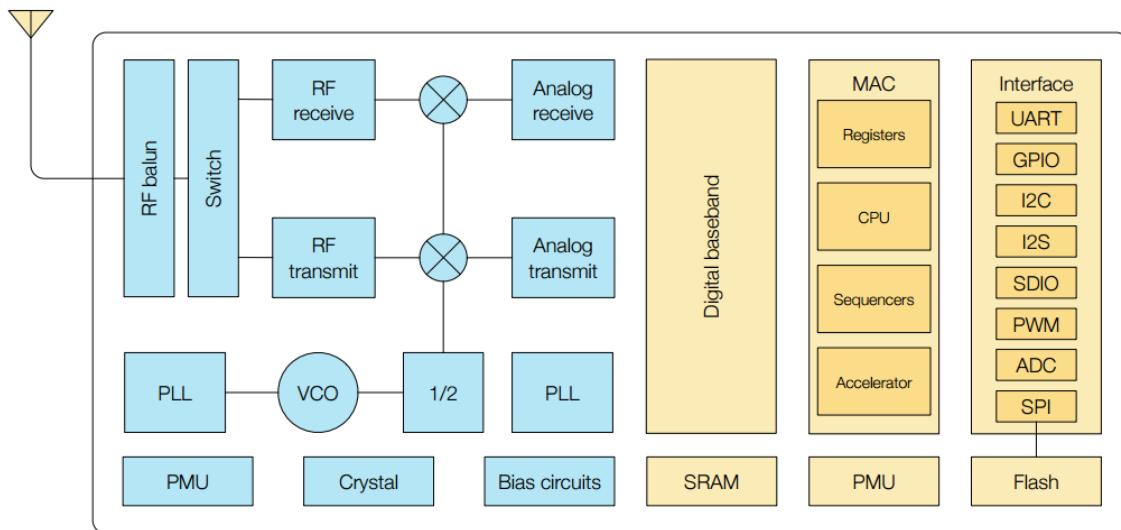


Abbildung 4.1: Blockdiagramm des ESP8266, aus [Espr17]

siehe dazu Tabelle 4.1. Für die Prototypenentwicklung wird ein ESP12-S Modul auf einem Adafruit Feather Huzzah verwendet, dieses stellt mit dem CP2104 eine serielle Verbindung zum ESP her, reguliert die Spannung für das Modul auf 3,3V und bringt den 2mm Pinabstand des ESP12-S Moduls auf die für Breadboards üblichen 2,5mm. Das Adafruit Feather Huzzah ESP8266 mit ESP12-S ist in Abbildung 4.2 links abgebildet.

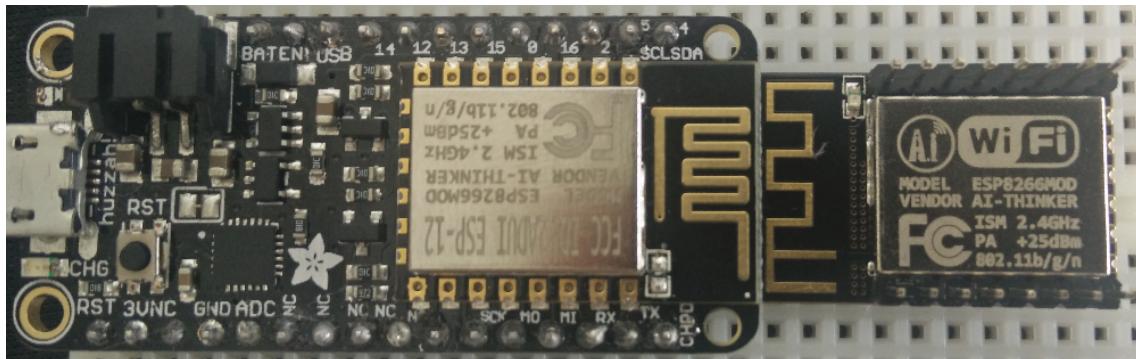


Abbildung 4.2: Vergleich der Antennen, links: ESP12-S verbaut auf einem Adafruit Feather Huzzah, rechts: ESP12-F

4.1.1 ESP8266 Arduino Core

Eine einfache Möglichkeit den ESP8266 zu programmieren stellt die bekannte Arduino IDE dar [BCIM17a].

Unter Windows muss zunächst der Treiber für den *CP2104 USB-to-Serial Chip* installiert werden, auf Linux und Mac entfällt dieser Schritt [Frie17]. 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.

Tabelle 4.1: Energieverbrauch des ESP8266 bei verschiedenen Operationen, aus [Espr17]

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

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 ESP 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 [BCIM^{+17b}]. Dabei wird möglichst die Kompatibilität zu Arduino gewahrt, das führt oft dazu, dass bereitgestellte Funktionen 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"}
```

Der ESP8266 Arduino Core wurde in der Version 2.3.0 verwendet.

4.1.2 ESP Open SDK

Statt mit der Arduino Core Umsetzung der ESP Open SDK kann natürlich auch direkt mit ihr programmiert werden [ESP 17].

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 ESP 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 optimales Programm zu erhalten. Die ESP Open SDK wurde in der Version 2.0.0 verwendet.

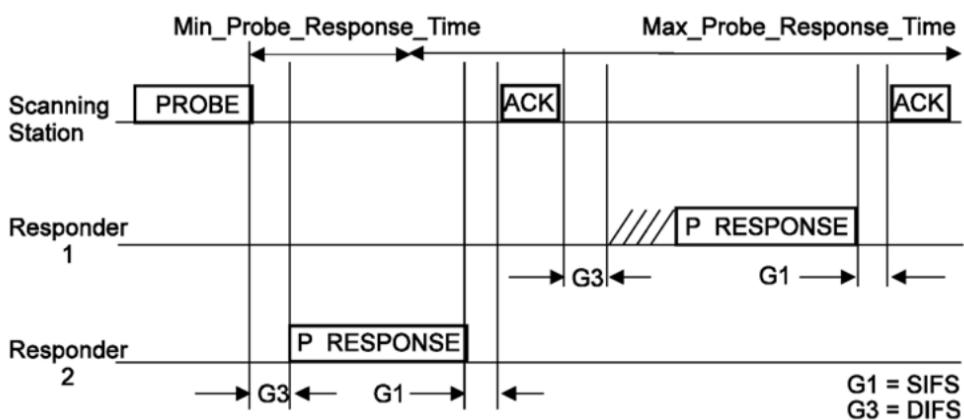


Abbildung 4.3: Ablaufdiagramm eines aktiven Scan, aus [IEEE12b].

4.2 WiFi-LLS 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 [ChLu07]. 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 das Tag dem Netzwerk beitreten (Join), einen Scan ausführen und ein UDP-Paket versenden. Der Ablauf eines Scans wird in Abbildung 4.3 gezeigt, dieser Vorgang muss für jeden nicht überlappenden Kanal durchgeführt werden.

Da die Scan-Funktion des ESP8266 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. Um den Energieverbrauch weiter zu reduzieren, soll der ESP möglichst viel Zeit in Energiesparzuständen verbringen. Der tiefste Schlafzustand, der dennoch eine Aufrechterhaltung der WLAN-Verbindung erlaubt ist der `light_sleep`. Er wird vom ESP automatisch aufgerufen, wenn er keine Aufgaben zu erledigen hat. Er kann aber auch manuell aufgerufen werden, beides wurde getestet. Einige Parameter können gewählt werden. Die Intervallzeit bestimmt, wie oft der ESP 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 Meter.

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 vier überlappungsfreie Kanäle zu verteilen. Eine Implementierung, die nur einen Kanal scannt tritt deshalb nur außer Konkurrenz an.

Im Folgenden findet eine Voruntersuchung des Energieverbrauchs statt. Tabelle 4.2 zeigt den gemessenen Energieverbrauch 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 ESP8266 verwendet, es wurde mit 5 Volt aus einer USB-Powerbank mit Energie versorgt, der Verbrauch wurde mit einem dazwischen geschalteten TM103 USB-Power-Meter der Marke Muker gemessen. Jeder Versuch wurde mindestens eine Stunde durchgeführt. Wurde in dieser Zeit der Verbrauchswert von 10 mAh nicht überschritten, wurde der Versuch verlängert, da der TM103 den Verbrauch ohne Nachkommastellen anzeigt.

Die Werte wurden stationär in einer Mietwohnung in einem fünfstöckigen Wohnhaus und damit nicht unter realen Bedingungen aufgezeichnet. Unter realen Bedingungen finden durch die Bewegung des Mitarbeiters regelmäßig Reassizierungen statt, im Gegenzug liefert ein Scan in einem Tunnel weniger Ergebnisse als in einem Wohnhaus.

Tabelle 4.2: Energieverbrauch WiFi-LLS-artiger Tags

SDK	manueller <code>light_sleep</code>	Kanäle	Versuchs- dauer in Stunden	Gesamt- verbrauch in mAh	\varnothing Ver- brauch in mA
Arduino Core	Nein	alle	1	22	22
Arduino Core	Ja	alle	1	21	21
ESP Open SDK	Nein	alle	1	19	19
ESP Open SDK	Ja	alle	1	19	19
ESP Open SDK	Ja	einer	2	13	6,5

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.

Die Implementierung in C mit manuellem `light_sleep` werden in Abschnitt 4.4.1 genauer untersucht.

4.3 Anpassungen für Bereichsortung

Bei WiFi-LLS wird der Scan durchgeführt, um den RSSI zu nahen Access Points zu erhalten und dann auf dem Ortungsserver die Position der mobilen Einheit mit einer Trilateration zu berechnen. Im Tunnel sind oft nur ein bis zwei APs in Reichweite,

außerdem wird eine Bereichsortung als ausreichend angesehen.

Werden die APs geschickt den Bereichen zugeordnet, reicht das Wissen um einen nahen AP, um die mobile Einheit einem Bereich zuzuordnen. Da der mobilen Einheit die MAC-Adresse seines Netzzugangs bekannt sein muss, kann dies als Ortungsinformation verwendet werden. Der Wechsel zwischen zwei Access Points wird exemplarisch in Abbildung 4.4 dargestellt.

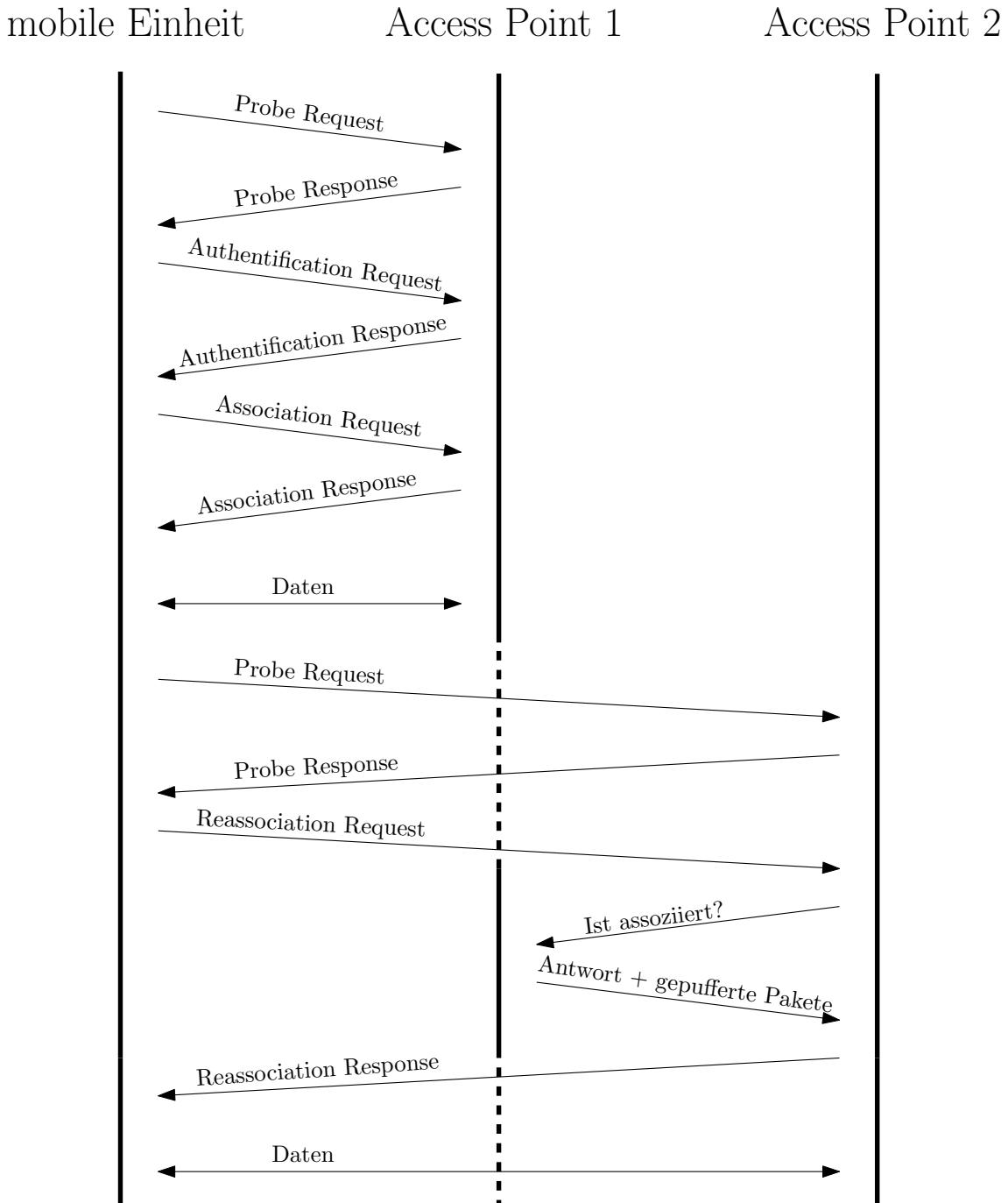


Abbildung 4.4: Vorgang von Assoziation und Reassoziation.

Die MAC-Adresse des Access Points wird nun zusammen mit der eigenen MAC-Adresse als Identifikator als String kodiert und per UDP an den Ortungsserver versendet.

Tabelle 4.3 zeigt den gemessenen Verbrauch der Implementierungen in Arduino und C, jeweils mit und ohne manuell aufgerufenen `light_sleep`.

Tabelle 4.3: Energieverbrauch der Bereichsortungstags

SDK	manueller <code>light_sleep</code>	Versuchs- dauer in Stunden	Gesamt- verbrauch in mAh	\varnothing Verbrauch in mA
Arduino Core	Nein	1	14	14
Arduino Core	Ja	3	21	7
ESP Open SDK	Nein	2	12	6
ESP Open SDK	Ja	2	11	5,5

Der Verbrauch liegt wie erwartet unter dem der WiFi-LLS Implementierung, sogar unter der Implementierung, die nur einen Kanal scannt. Als weitere Optimierung könnte ein Tag nur dann senden, wenn eine Reassoziation stattgefunden hat. Die mangelnde Transportsicherheit von UDP macht dieses Vorgehen jedoch riskant, wenn das Paket verloren geht wird kein Bereichswechsel erkannt. Um wieder eine begrenzte Transportsicherheit zu erhalten, kann entweder das UDP-Paket mehrfach versendet werden; ohne Reassoziation in einen festen, aber größeren Intervall gesendet werden oder statt eine UDP-Verbindung eine TCP-Verbindung verwendet werden. Somit ergeben sich neue Testszenarien: Ohne zusätzliche Sicherung, UDP-Paket mehrfach (dreifach) versenden, zusätzliches (30 beziehungsweise 60 Sekunden) Sendeintervall, TCP-Verbindung (offen halten oder nach dem Senden schließen).

Da der Verbrauch nun stark von der Anzahl der Reassoziationen abhängt sind im gegebenen, stationären Testszenario keine aussagekräftigen Ergebnisse möglich. Dennoch sollen die Tests einen Ausgangswert ermitteln, dieser kann als untere Grenze für den Verbrauch einer Implementierung angesehen werden. Da in den vorherigen Tests die Implementierungen mit der ESP Open SDK verbrauchsärmer waren, wurden alle in Tabelle 4.4 gezeigten Implementierungen mit ihr erstellt, der manuelle `light_sleep` ist immer aktiv.

Tabelle 4.4: Energieverbrauch der verbesserten Bereichsortungstags

Transportsicherung	Versuchs- dauer in Stunden	Gesamt- verbrauch in mAh	\varnothing Verbrauch in mA
Ohne	5	10	2
Dreifach UDP	10	14	1,4
Zusatzintervall 30s	13	34	2,62
Zusatzintervall 60s	5	8	1,6
TCP (halten)	10	12	1,2
TCP (schließen)	11	12	1,09

Der Energieverbrauch sinkt durch das Einsparen von Sendevorgänge deutlich. In Abschnitt 4.4.2 werden die Implementierungen, die eine TCP Verbindung nutzen genauer untersucht. Diese bieten eine gute Übertragungssicherheit bei geringem Verbrauch.

4.4 Untersuchung des Energieverbrauchs

Der Muker TM103 USB-Power-Meter bietet sowohl im Zeit- als auch im Wertebereich nur eine sehr geringe Auflösung. Stattdessen soll der Verbrauch mit einem INA219 Chip genauer untersucht werden. Er kann den Verbrauch mit bis zu 333Hz bestimmen und besitzt dabei eine Messgenauigkeit von 99,5% [Texa15]. Der Stromverbrauch wird über den Spannungsabfall über einen $0,1\Omega$ Widerstand bestimmt, der verwendete Widerstand besitzt eine Fertigungstoleranz von 1%. Die Messgenauigkeit sinkt deshalb auf $99,5\% * 99\% = 98,505\%$. Das über I^2C auslesbare Register löst den aktuellen Verbrauch in 0,1 Milliamper Schritten auf, Verbräuche darunter können nicht bestimmt werden.

Außerdem wird dieses mal durch den JST-Anschluss für den Akku gemessen, dadurch können eventuelle Ineffizienzen des Lithium-Polymer-Ladeschaltkreises aufgezeichnet werden. Jede Messung wurde über eine Stunde durchgeführt. Abbildung 9.1 zeigt den INA219 integriert auf einer Platine, diese wird für die Messungen verwendet.

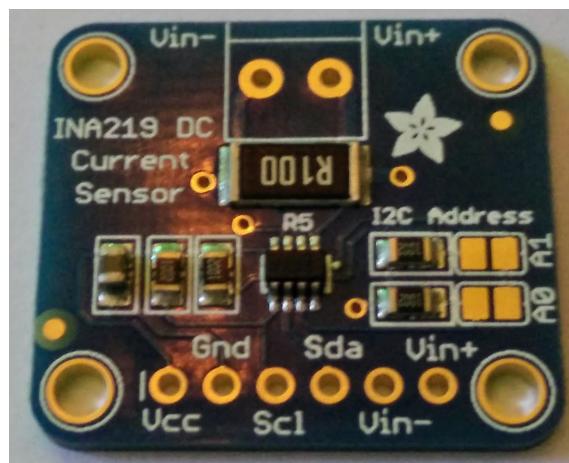


Abbildung 4.5: INA219, die mit R100 beschriftete Komponente über dem INA219 ist der Messwiderstand.

4.4.1 WiFi-LLS

Abbildung 9.2 zeigt den Lastverlauf nach Anschalten der mobilen Einheit für die Implementierung von WiFi-LLS, wenn ein AP zur Verfügung steht.

Diese beginnt bei circa einer Sekunde mit dem Scan, nachdem sie diesen beendet hat beginnt sie bei 5 Sekunden mit dem Join Vorgang.

Der ESP8266 empfängt während des Join die gesamte Zeit und verbraucht dabei circa 70 Milliamper, nachdem dieser jedoch abgeschlossen ist synchronisiert er sich mit dem AP und lauscht alle 100ms auf den Beacon des AP. Ist im Beacon eine Aufforderung zum Empfangen für den ESP8266 enthalten empfängt er länger um die Nachricht zu erhalten, ein solches Verhalten ist bei circa 19 Sekunden zu erkennen. Bei 12, 17 und 22 Sekunden werden weitere Scans ausgeführt, diese stehen im Zentrum der Implementierung, da sie implizit die Position bestimmen. Die rote Kurve in Abbildung 9.3 zeigt diesen Vorgang genauer, ein Scan besteht für jeden gescannten Kanal aus dem Versenden eines Probe Request und anschließenden Empfangen der Probe Responses. Abschließend wird ein Paket an den Ortungsserver versendet und

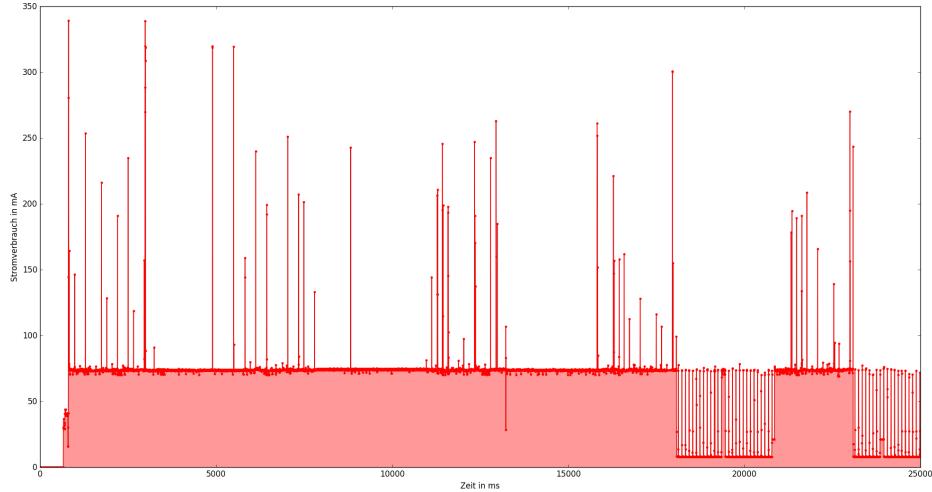


Abbildung 4.6: Lastkurve einer Implementierung von WiFi-LLS.

der Chip wechselt wieder in einen Zustand, in dem er periodisch die Beacons des AP empfängt.

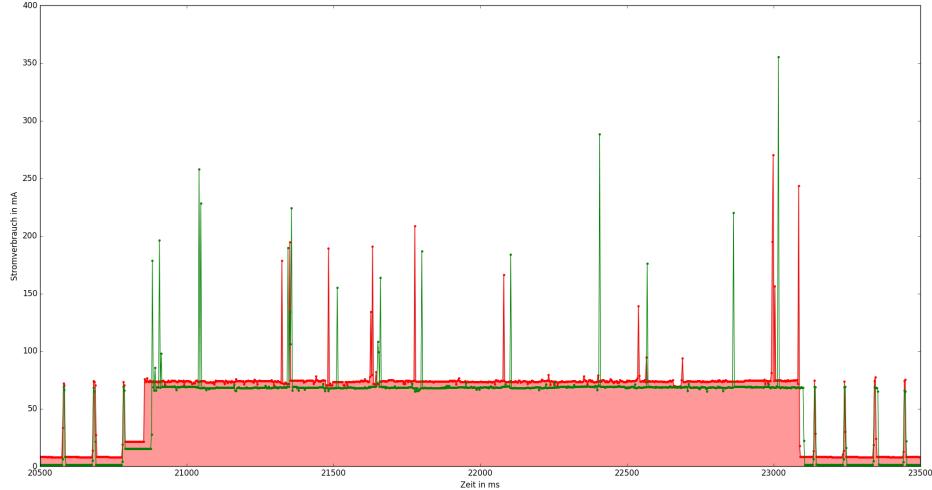


Abbildung 4.7: Lastkurve eines Ortungsvorgangs mit WiFi-LLS.

Auffällig ist, dass der Chip circa 8,2 Milliamper verbraucht wenn er nicht empfängt, dagegen gibt das Datenblatt des ESP8266 nur einen Verbrauch von 0,9 Milliamper an. Das Experiment wurde deshalb mit einem ESP-12F Modul wiederholt, welches nicht auf einem ESP8266 Feather verbaut war. Dabei zeigte sich, dass dieses in der selben Situation nur 1,2 Milliamper verbraucht. Die Lastkurve des einzelnen ESP-12F Modul ist in Abbildung 9.3 grün dargestellt. Daraus lässt sich schließen, dass die zusätzlichen Komponenten auf dem ESP8266 Feather 7 Milliamper Verbrauch erzeugen, dies ist im Zuge der Laufzeitoptimierung nicht tragbar.

Zusätzlich wurde die Implementierung von WiFi-LLS mit nur einem gescannten Ka-

nal geprüft. Abbildung 9.4 zeigt den verkürzten Ortungsvorgang. Da nur ein Kanal gescannt wird, wird nur ein Probe Request versendet. Nach Empfangen der Antworten wird ein Paket an den Ortungsserver gesendet und der ESP8266 wechselt wieder in den Zustand des periodischen Empfangens.

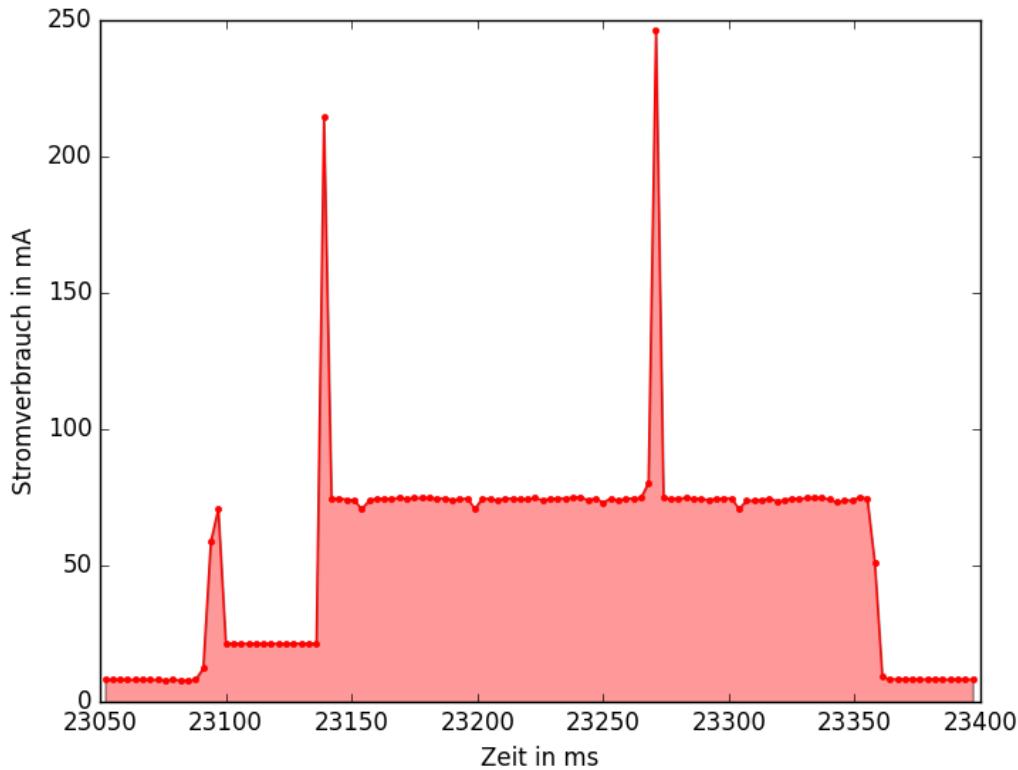


Abbildung 4.8: Lastkurve des Ortungsvorgangs mit einem gescannten Kanal.

Tabelle 9.1 listet den durchschnittlichen Verbrauch der Einheiten über eine Stunde. Die Stromversorgung der Einheiten wurden circa eine Sekunde nach Beginn des Experiments angeschaltet, anschließend treten keine Veränderungen mehr auf.

Hardware	Programm	\varnothing Verbrauch in mA	Laufzeit in Stunden
ESP8266 Feather	WiFi-LLS alle Kanäle	42,2	33,2
ESP-12F	WiFi-LLS alle Kanäle	36,5	38,3
ESP8266 Feather	WiFi-LLS ein Kanal	18,7	74,9
ESP-12F	WiFi-LLS ein Kanal	11,4	122,8

Um die finale Laufzeit zu bestimmen muss die Kapazität des Akkus bekannt sein. Ein 1400mAh Lithium-Polymer-Akku wurde als leicht genug angesehen, um um den Hals getragen werden zu können. Die Laufzeiten in Tabelle 9.1 wurden für diesen 1400mAh Akku mit $1400 \text{ mAh} / X \text{ mA} = Y \text{ h}$ bestimmt.

4.4.2 Indirekte Bereichsortung

Abbildung 9.5 zeigt den Lastverlauf nach Anschalten der mobilen Einheit für die Implementierung für Bereichsortung mit aufrecht erhaltener TCP-Verbindung, wenn ein AP zur Verfügung steht. Der Beginn des Lastverlaufs ist dem der WiFi-LLS Implementierung ähnlich, es werden ebenfalls Scan und Join durchgeführt. Da jedoch nur für das Event einer vollständigen (Re-)Assoziation gesendet wird bleibt der ESP8266 anschließend im Zustand des periodischen Empfangens von Beacons. Diese wird nur von den Keep Alive Paketen unterbrochen, welche alle 30 Minuten versendet werden.

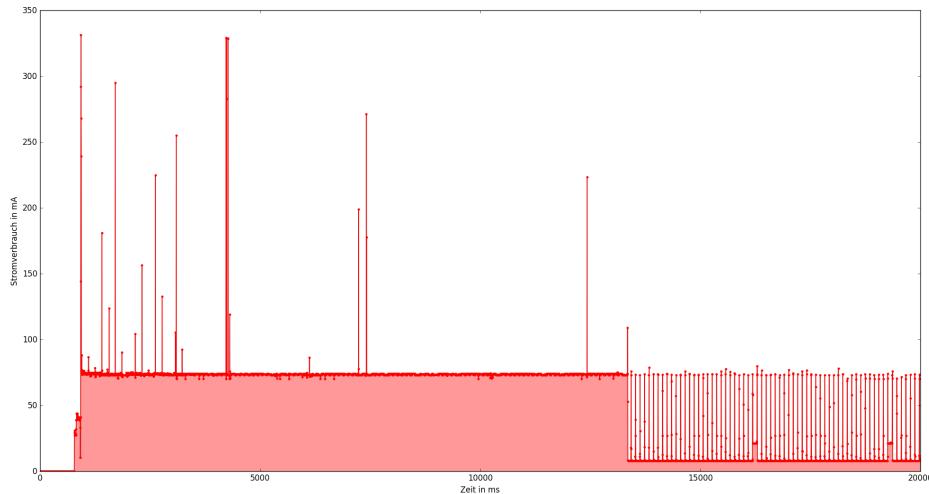


Abbildung 4.9: Lastkurve einer Implementierung indirekter Bereichsortung, welche eine TCP Verbindung offen hält.

Für die Implementierung mit anschließendem Abbau der TCP-Verbindung kommen zusätzliche Pakete direkt nach dem versenden der Assoziationsinformation an den Ortungsserver hinzu, dafür entfallen die Keep Alive Pakete. Abbildung 9.6 zeigt dieses Verhalten.

Auch diese Implementierungen wurden sowohl mit einem ESP8266 Feather, als auch mit einem einzelnen ESP-12F Modul getestet, die Ergebnisse sind in Tabelle 9.2 zu finden.

4.4.3 Kein AP in Reichweite

Ergänzen

4.5 Reichweite von WLAN

Zu Beginn dieses Kapitels wurde die Annahme getroffen, das WLAN eine Reichweite von mindestens 50 Metern hat. Da aufgrund dieser Annahme das Sendeintervall für vorherige Lösungen gesetzt wurde muss diese Annahme für den Tunnel überprüft

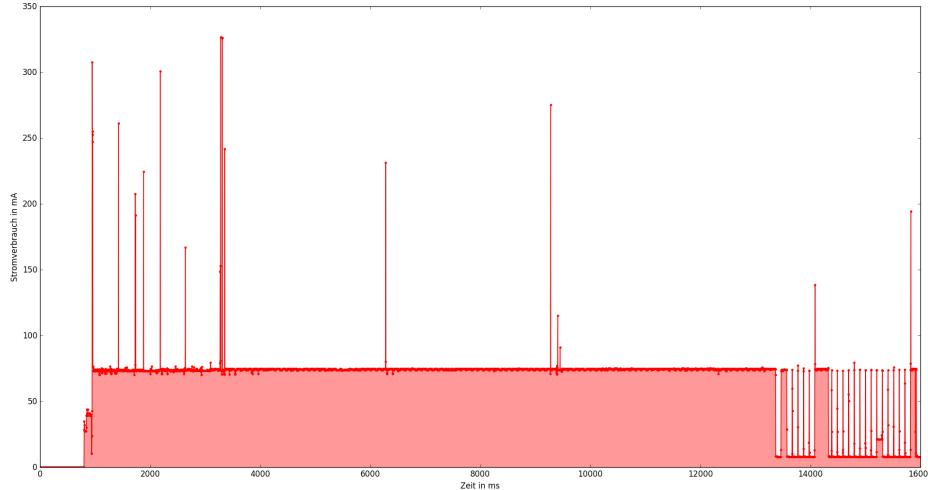


Abbildung 4.10: Lastkurve einer Implementierung indirekter Bereichsortung, welche eine TCP Verbindung nach dem Senden abbaut.

Tabelle 4.6: Energieverbrauch mobiler Einheiten mit Bereichsortung

Hardware	Programm	\varnothing Verbrauch in mA	Laufzeit in Stunden
ESP8266 Feather	Bereichsortung TCP Verbindungen halten	15,5	90,3
ESP-12F	Bereichsortung TCP Verbindungen halten	8,8	159,1
ESP8266 Feather	Bereichsortung TCP Verbindungen schließen	15,4	90,9
ESP-12F	Bereichsortung TCP Verbindungen schließen	8,8	159,1

werden. Für die Tests wurde ein LN-862 Access Point von der Firma Lancom zur Verfügung gestellt. Dieser wurde am hinteren Ende einer Tunnelbohrmaschine montiert.

Die Tunnelbohrmaschine befindet sich in der Tunnelbaustelle Rastatt. Der Durchmesser des Bahntunnels beträgt 9 Meter, das Ende der Tunnelbohrmaschine befand zum Zeitpunkt der Messungen circa 2 Kilometer weit im Tunnel.

Der AP konnte aufgrund des geringen Platzangebots und den wenigen zur Verfügung stehenden Steckdosen nicht frei platziert werden. Er wurde deshalb unter der ersten stählernen Treppe platziert, diese beeinträchtigt natürlich das Signal. Da es aber üblich ist, IT-Gerätschaften, wie die derzeit verwendeten Bluetooth-Basisstationen, in Metallboxen zu verstauen um sie vor äußeren Einflüssen zu schützen, ist eine gewisse Abschirmung durchaus realitätsnah. Die Platzierung des AP ist auf Abbildung 8.1 eingezeichnet.

Abbildung 8.2 zeigt den LN-862 hinter der Treppe.



Abbildung 4.11: Ende der Tunnelbohrmaschine, Pfeil markiert Platzierung des Access Point hinter der Treppe.

4.5.1 Methodik

Die Reichweite wurde in zwei Richtungen geprüft. Zum einen in Richtung des bereits fertig gebohrten Tunnels, hier blockiert nur wenig Stahl das Signal. Lediglich die Treppe, unter der der AP montiert wurde, stellt ein Hindernis dar. Zum anderen wurde die Reichweite in Richtung des Vortriebs geprüft. Dabei stellen eine stählerne Zwischendecke und große Container Hindernisse dar.

Außerdem wird die Abschirmung durch ein Gehäuse getestet, dazu wurde eine stabile Plastikbox verwendet.

Für die Messung wurde der Körper zwischen mobile Einheit und Basisstation gebracht und eine mobile Einheit wurde dann als "außer Reichweite" angesehen, wenn versendete Pakete der mobilen Einheit nicht mehr bei der Basisstation ankamen. In jedem Fall war es möglich durch das Entfernen des körperlichen Hindernisses wieder eine Verbindung herzustellen.

Zur Bestimmung der Distanz wurden die Tübbinge verwendet, dies sind Schalungselemente im Tunnel. Im Tunnel Raststatt sind diese fortlaufend nummeriert und genau zwei Meter breit, die Messungen sind deshalb ebenfalls in zwei Meter Schritten angegeben.

4.5.2 Ergebnisse

Tabelle 8.1 zeigt die Ergebnisse für die zwei verwendeten ESP8266 Module. Es wurde jeweils mit und ohne Gehäuse gemessen und in jede der beiden beschriebenen Richtungen. Wenige Hindernisse bezeichnet dabei die Richtung des bereits fertig gebohrten Tunnels, viele Hindernisse die Richtung des Vortriebs.

4.5.3 Bewertung

Das ESP-12F Modul hatte in jedem der vier Testszenarien eine höhere Reichweite als das ESP-12S, es ist daher im weiteren Verlauf zu bevorzugen.



Abbildung 4.12: LN-862 im Tunnel, darauf liegt der Pi Zero W.

Verwendetes Modul	Aufbau	Strecke	Maximale Einheiten	Sen-dereichweite
ESP-12S	Offen	Wenige Hindernisse	84m	
ESP-12S	In Gehäuse	Wenige Hindernisse	74m	
ESP-12S	Offen	Viele Hindernisse	26m	
ESP-12S	In Gehäuse	Viele Hindernisse	30m	
ESP-12F	Offen	Wenige Hindernisse	88m	
ESP-12F	In Gehäuse	Wenige Hindernisse	88m	
ESP-12F	Offen	Viele Hindernisse	32m	
ESP-12F	In Gehäuse	Viele Hindernisse	32m	

Die bisher angenommenen 50 Meter Reichweite sind für dieses Modul zu vorsichtig geschätzt. Um die gemessenen 88 Meter bei 30 km/h zu durchqueren benötigte ein Mitarbeiter circa 10,5 Sekunden, bei einem Sendeintervall von zehn Sekunden finden demnach zwei Sendevorgänge beim durchqueren des Einflussbereichs eines APs statt. Da eine zuverlässige Erkennung von Bereichswechseln gefordert wurde, sollte das Sendeintervall jedoch konservativer gesetzt werden, die bisher verwendeten fünf Sekunden sind daher für eine zuverlässige Erkennung sinnvoll.

Für die Teststrecke mit vielen Hindernissen wurden geringere Reichweiten gemessen, eine solche Teststrecke findet sich aber nur auf der Tunnelbohrmaschine, welche nur zu Fuß begangen werden kann. Geht man von einer maximalen Bewegungsgeschwindigkeit von 10 km/h für eine laufende Person aus durquerte diese in fünf Sekunden 14 Meter, also deutlich weniger als die gemessenen 32 Meter.

5. Direkte Fernlokalisierung mit 802.11

Alle bisher betrachteten Lösungen arbeiten mindestens auf Protokollebene vier des OSI-Modells. Die Lösungen benutzen TCP oder UDP, um ihre Position dem Ortungsserver mitzuteilen und müssen somit dem Netzwerk beitreten, da sie sonst nicht mit dem Ortungsserver kommunizieren können.

Da nun die Software der Access Points veränderbar ist, ergeben sich neue Freiheiten bezüglich der Kommunikation. Weil die Zielsetzung in Abschnitt 1.3 jedoch die Einschränkung macht, dass ohne Authorisierung nicht mit dem Ortungsserver kommuniziert werden darf, können die in Kapitel 4 vorgestellten Verfahren der indirekten Fernlokalisierung nicht von diesen Freiheiten Gebrauch machen.

Stattdessen werden in diesem Kapitel Verfahren der direkten Fernlokalisierung betrachtet. Die Veränderbarkeit der Software des AP wird dazu genutzt auf diesem Messgrößen zu ermitteln und dann über eine Datenverbindung an den Ortungsserver zu übermitteln. Da für die APs keine Beschränkungen bezüglich des Energieverbrauchs vorliegen, kann die Verbindung zum Ortungsserver regulär auf Schicht vier oder fünf aufgebaut werden. Für die Kommunikation zwischen mobiler Einheit und AP sollte jedoch auf niedrigere Protokollebenen ausgewichen werden, um den Energieverbrauch der mobilen Einheit zu senken.

5.1 RADAR Implementierung

Eine mobile Einheit mit RADAR versendet alle 0,25 Sekunden ein 6 Byte langes UDP-Paket, der RSSI der Übertragung wird dann auf dem AP gemessen. Das Sendintervall wurde so kurz gewählt, um spontane Schwankungen im RSSI durch mehrfache Messung zu glätten und sich bewegende Personen möglichst genau zu erfassen. Für eine Bereichsortung reicht ein wesentlich längeres Sendeintervall, es wird erneut ein Intervall von 5 Sekunden gewählt, in dem sich ein Mitarbeiter maximal 42 Meter bewegt. Tabelle 5.1 zeigt den mit dem TM103 gemessenen Verbrauch der Implementierung für mobile Einheiten mit RADAR jeweils in Arduino und C, mit unterschiedlich langen Sendeintervallen mit und ohne manuellen `light_sleep`.

Tabelle 5.1: Energieverbrauch RADAR-artiger mobiler Einheiten

SDK	manueller <code>light_sleep</code>	Sende- intervall in s	Versuchs- dauer in Stunden	Gesamt- verbrauch in mAh	\varnothing Ver- brauch in mA
Arduino Core	Nein	0,25	2	80	40
Arduino Core	Ja	0,25	3	119	39,66
Arduino Core	Nein	5	3	28	9,33
Arduino Core	Ja	5	3	23	7,66
ESP Open SDK	Nein	0,25	1	40	40
ESP Open SDK	Ja	0,25	1	38	38
ESP Open SDK	Nein	5	2	12	6
ESP Open SDK	Ja	5	2	10	5

Der Energieverbrauch einer Lösung die vier Pakete pro Sekunde sendet ist wie erwartet hoch. Die Implementierungen mit der ESP Open SDK und manuellem `light_sleep` unterscheiden sich ausschließlich im Sendeintervall, dies verändert den Energieverbrauch jedoch stark. Die dort besprochenen Optimierungen (nur bei AP-Wechsel senden) können auch für die RADAR Implementierung verwendet werden, das RADAR-artige mobile Einheit ist dann aber in seiner Implementierung bis auf den Inhalt des UDP-Pakets identisch mit dem der mobilen Einheiten für Bereichsortung. Der Energieverbrauch sollte sich somit kaum unterscheiden und ein System mit RADAR-artigen mobilen Einheiten benötigt Veränderungen der Software der APs, ein System mit mobilen Einheiten für Bereichsortung ist deshalb vorzuziehen. Die Implementierung in C mit einem Sendeintervall von fünf Sekunden wird in Abschnitt 5.3.1 genauer untersucht.

5.2 Anpassungen für Bereichsortung

RADAR versendet immer noch UDP Pakete und arbeitet damit auf Schicht vier (Transport) des OSI-Modells und muss im Netzwerk authentifiziert und mit einem Access Point assoziiert sein. Das ist für eine direkte Fernlokalisierung aber nicht notwendig, der RSSI wird auf Schicht eins (PHY) gemessen. Grundsätzlich kann aufgrund der möglichen Änderungen am AP ein beliebiges Paket mit einer speziellen Kennung versendet und vom AP als Positionsmitteilung der mobilen Einheit erkannt werden.

Ein Sendevorgang, der nur Schicht eins nutzt hat einen geringeren Energieverbrauch, da er nur senden und nie empfangen muss. Ein solcher Sendevorgang könnte aber die Funktion des Netzwerks beeinträchtigen und stellt nicht sicher, dass die eigene Übertragung nicht durch andere Übertragungen gestört wurde. Es sollte deshalb nicht auf Schicht eins gearbeitet werden.

Stattdessen sollte Schicht zwei (MAC) des OSI-Modells verwendet werden. Da 802.11 für den Mediumszugriff eine Kollisionsvermeidung (CSMA/CA) verwendet wird, muss die mobile Einheit vor dem Senden das Medium belauschen, um zu bestimmen ob es belegt ist. Der Energieverbrauch ist somit pro Sendevorgang höher als bei einer Lösung auf Schicht eins, stellt dafür aber die Verfügbarkeit des Mediums (der Frequenz) für die übrigen Teilnehmer sicher.

Um die Änderungen an der Software des AP gering zu halten wurde der Probe Request als zu sendender Frame gewählt. Es handelt sich dabei um einen Management

Frame (siehe Tabelle 2.1) der für den, in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen, Scan Vorgang verwendet wird. Der Probe Request hat dabei den Vorteil, dass er bereits vom AP verarbeitet und mit einer Probe Response beantwortet wird.

Es wird also lediglich gefordert, dass der AP den Empfang des Probe Request im Zuge der Verarbeitung protokolliert. Im Einzelnen müssen die Empfangszeit, der RSSI und die MAC-Adresse des Absenders protokolliert und für den Ortungsserver abrufbar gemacht werden. Manche kommerzielle APs bieten ein solches Protokoll für Probe Requests und Beacons im Zuge einer *Rogue Client/AP Detection* an [LANC17]. Abbildung 5.1 zeigt den Vorgang schematisch.

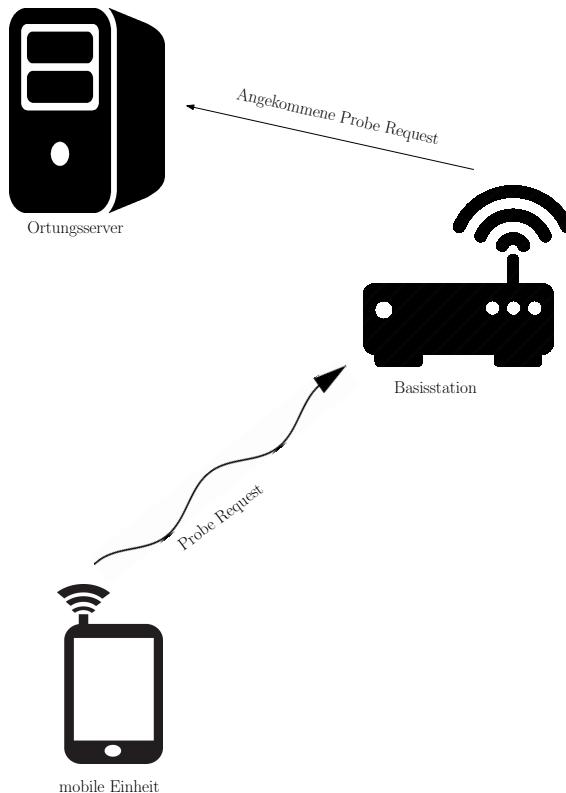


Abbildung 5.1: Schema der Bereichsortung mit Probe Request.

Die ESP Open SDK bietet über die Operationen wie Scan und Join hinaus mit `wifi_send_pkt_freedom` eine Funktion zum Senden von Paketen auf Schicht zwei an. Der ESP8266 Arduino Core implementiert diese Funktion nicht, stattdessen muss sie mit `extern "C" {#include "user_interface.h"}` importiert werden.

`wifi_send_pkt_freedom` setzt den PHY-Header selbst, der MAC-Header und Inhalt des Paketes müssen über einen Puffer übergeben werden.

```
uint8_t packet[26] = {
/*0*/ 0x40, //Version (2bit), Type (2bit), Subtype(4bit)
/*1*/ 0x00, //Flags
/*2*/ 0x00, 0x00, //Duration
/*4*/ 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, //Destination MAC
/*10*/ 0x01, 0x02, 0x03, 0x04, 0x05, 0x06, //Source MAC
/*16*/ 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, 0xff, //BSSID, all ff=broadcast
/*22*/ 0x00, 0x00, //Sequence Number (12bit), Fragment Number (4bit)
```

```
//[End of MAC-Header] [Start of Management tags]
/*24*/ 0x83, //Tag Number (Path Reply 131)
/*25*/ 0x00, //Tag length
};
```

Ein gewöhnlicher Probe Request beinhaltet noch zusätzliche Informationen bezüglich seiner technischen Möglichkeiten, wie etwa unterstützte Standards und Datenraten. Da die mobile Einheit aber nicht tatsächlich beitreten will, kann darauf verzichtet werden.

Da keine Verbindung mehr aufrecht erhalten werden muss, können tiefere Schlafzustände eingenommen werden. Statt des `light_sleep` kann der `deep_sleep` verwendet werden. Dieser schaltet den ESP und seinen Speicher fast vollständig ab, nach Ablauf der angegebenen Schlafzeit wird Pin 16 mit der Masse verbunden. Damit der ESP wieder aufwacht muss Pin 16 mit dem Reset Pin (RST) verbunden werden, bei einem Reset initialisiert der ESP neu. Bei einer Lösung auf einer höheren Schicht würde dies dazu führen, dass die mobile Einheit versucht dem Netzwerk erneut beizutreten. Hingegen kann bei einer Lösung auf Schicht zwei sofort gesendet und danach wieder geschlafen werden.

Tabelle 5.2 zeigt den Energieverbrauch der Implementierungen jeweils mit manuell herbeigeführtem Schlafzustand, das Sendeintervall liegt bei konstant 5 Sekunden.

Tabelle 5.2: Energieverbrauch mobilen Einheiten mit Probe Request

SDK	manueller Schlafzu- stand	Versuchs- dauer in Stunden	Gesamt- verbrauch in mAh	\varnothing Ver- brauch in mA
Arduino Core	Ohne	2	81	40,5
Arduino Core	<code>light_sleep</code>	2	10	5
Arduino Core	<code>deep_sleep</code>	4	17	4,25
ESP Open SDK	Ohne	5	8,33	8,33
ESP Open SDK	<code>light_sleep</code>	25	75	3
ESP Open SDK	<code>deep_sleep</code>	48	39	0,81

Zu erkennen ist, dass die Verwendung des `deep_sleep` zu einem geringeren Verbrauch führt. Allerdings benötigt die mit dem Arduino Core programmierte mobile Einheit im Vergleich zu der mit der ESP Open SDK programmierten Einheit deutlich länger zum Starten. Sie verbraucht deshalb sogar mehr Energie als die mobilen Einheiten für Bereichsortung aus Abschnitt 4.3, die Implementierung mit der ESP Open SDK verbraucht aber weniger Energie als diese. Hinzu kommt, dass sich der Verbrauch dieser mobilen Einheiten nicht durch die Bewegung des Trägers erhöht, da keine Reassoziationen stattfinden. Um die in Abschnitt 1.4 geforderten Laufzeiten zu erreichen, werden in Abschnitt 7.2 weitere Verbesserungen besprochen. Die Implementierung in C mit `deep_sleep` wird in Abschnitt 5.3.2 genauer untersucht.

5.2.1 Anzahl der verwendeten Kanäle

Eine Lösung die nicht vor dem Versenden das Spektrum nach den Access Points durchsucht muss entweder auf der Annahme beruhen, dass alle Access Points auf einem Kanal agieren oder in allen in Frage kommenden Kanälen senden.

Je nach Erweiterung der 802.11 Spezifikation ergeben sich unterschiedlich viele solcher Kanäle. 802.11b verwendet eine Kanalbreite von 22MHz, es stehen daher effektiv nur drei Kanäle zur Verfügung: 1, 7 und 13 in Europa beziehungsweise 1, 6 und 11 in Nordamerika. Für 802.11g/n mit 20MHz Kanalbreite sind zwar in Europa theoretisch vier Kanäle verfügbar (1,5,9,13), es werden aber in der Praxis meist dieselben Kanäle wie bei 802.11b verwendet um die Kompatibilität zu 802.11b zu gewährleisten. 802.11n ist auch für eine Kanalbreite von 40 MHz spezifiziert, hier stehen effektiv nur noch 2 Kanäle zur Verfügung üblicherweise werden Kanal 3 und 11 gewählt.

Die Implementierung in C mit `deep_sleep` wurde sowohl auf einem, als auch auf vier Kanälen getestet. Dabei ergab sich in 24 Stunden kein messbarer Unterschied. Es sollte daher auf eine Festlegung des Kanals verzichtet werden, weil diese die reguläre Funktionsweise des WLAN Netzwerks beeinträchtigen könnte.

5.3 Untersuchung des Energieverbrauchs

Erneut soll der Energieverbrauch mit dem INA219 genauer bestimmt werden, der INA219 und die verwendete Methodik werden in Abschnitt 4.4 beschrieben.

5.3.1 RADAR

Abbildung 9.7 zeigt den Lastverlauf nach Anschalten der mobilen Einheit für die Implementierung von RADAR, wenn ein AP zur Verfügung steht. Der Beginn des Lastverlaufs ist dem der WiFi-LLS Implementierung ähnlich, es werden ebenfalls Scan und Join durchgeführt.

Abbildung 9.8 zeigt den Sendevorgang der RADAR Implementierung. Auffällig ist, dass längerfristig empfangen wird, obwohl dies für den Versand des UDP Pakets nicht notwendig ist.

In Tabelle 9.3 ist der durchschnittliche Verbrauch der RADAR Implementierung über eine Stunde gelistet. Es wurde sowohl mit dem ESP8266 Feather, als auch mit dem einzelnen ESP-12F gemessen, die mobile Einheit wurde jeweils erst circa eine Sekunde nach Beginn mit Strom versorgt.

Tabelle 5.3: Energieverbrauch mobiler Einheiten mit RADAR Implementierung

Hardware	Programm	\varnothing Verbrauch in mA	Laufzeit in Stunden
ESP8266 Feather	RADAR	16,7	83,8
ESP-12F	RADAR	10,1	138,6

5.3.2 Probe Request Lokalisierung

Abbildung 9.9 zeigt den Lastverlauf für einen Sendevorgang der Probe Request Implementierung, der Verlauf für den ESP8266 Feather ist in Rot und der Verlauf für das ESP-12F Modul ist in Grün dargestellt.

Nachdem der ESP8266 aus dem `deep_sleep` erwacht beginnt eine circa 100ms andauernde Startphase, danach sendet er die drei Probe Requests. Anschließend soll

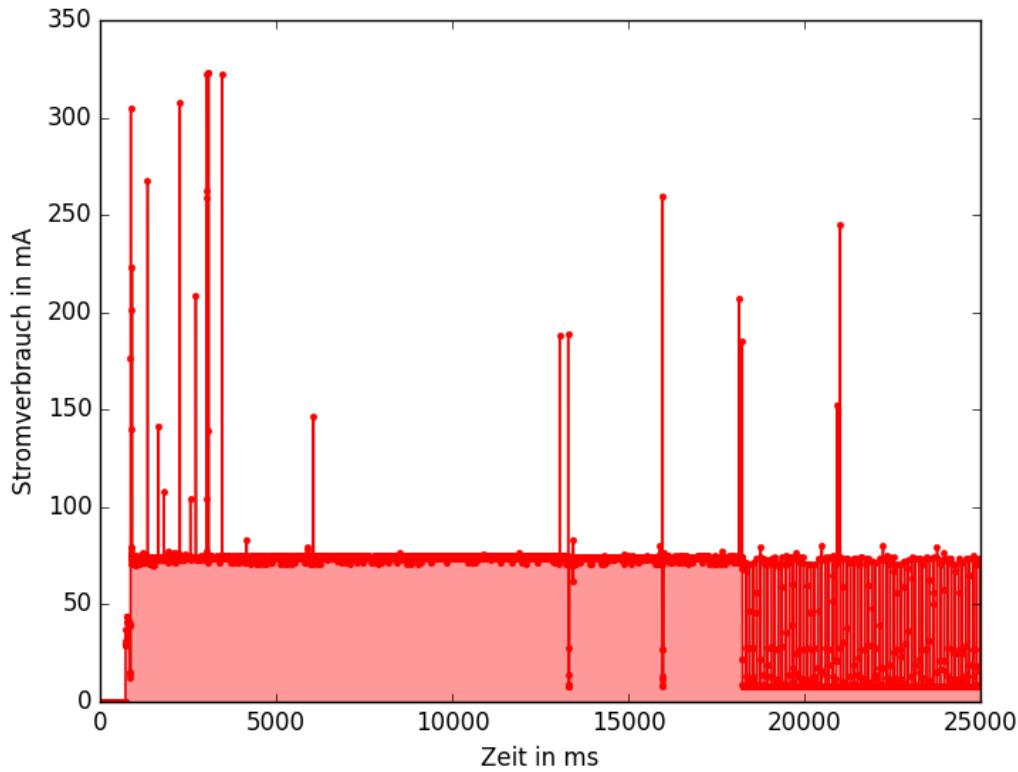


Abbildung 5.2: Lastkurve einer Implementierung von RADAR.

der ESP8266 wieder in den `deep_sleep` versetzt werden, vorher empfängt er jedoch noch 100ms. Die restliche Zeit befindet sich der ESP8266 im Tiefschlaf. Bei dem ESP-12F Modul ist der INA219 nicht in der Lage einen Vebrauch zu messen, er liegt unter 0,1 Milliamper.

Beim ESP8266 Feather misst er jedoch durchgehend einen Vebrauch von über 7 Milliamper, daraus ergeben sich die Unterschiede in den Messungen, die in Tabelle 9.4 dargestellt werden. Es wurde sowohl mit nur einem versendeten Probe Request, als auch mit drei Probe Requests getestet, die Unterschiede im Verbrauch liegen jedoch im Bereich der Messungenauigkeit.

Tabelle 5.4: Energieverbrauch mobiler Einheiten mit Probe Request Ortung

Hardware	Programm	\varnothing Verbrauch in mA	Laufzeit in Stunden
ESP8266 Feather	Probe Request drei Kanäle	9,72	144
ESP-12F	Probe Request drei Kanäle	1,8	777,8
ESP8266 Feather	Probe Request ein Kanal	9,74	143,7
ESP-12F	Probe Request ein Kanal	1,82	769,2

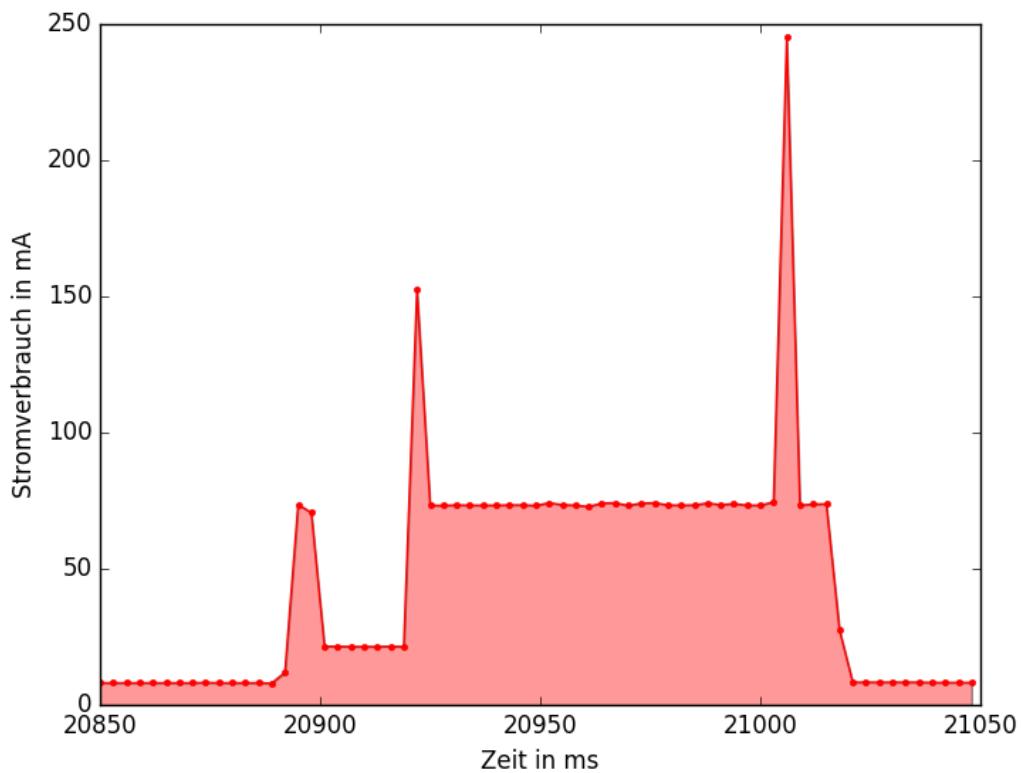


Abbildung 5.3: Lastkurve eines Ortungsvorgangs mit RADAR.

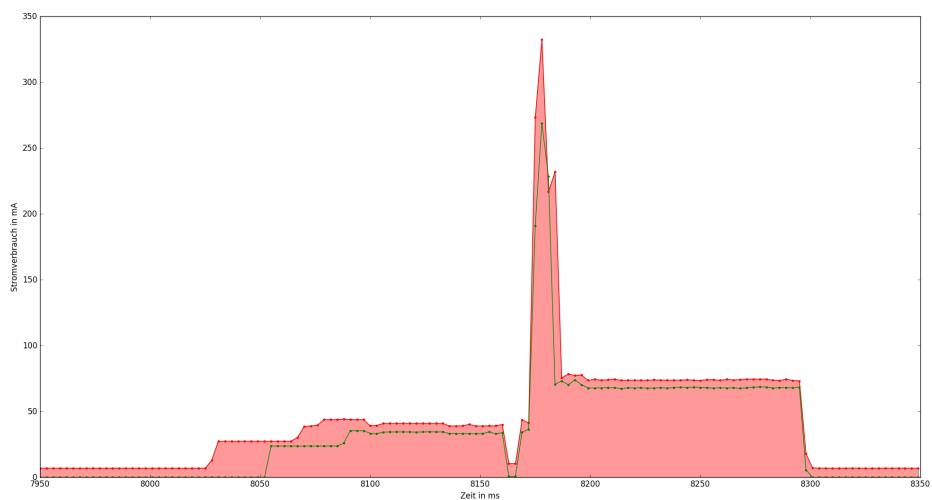


Abbildung 5.4: Lastkurve eines Ortungsvorgangs mit Probe Requests.

6. Fernlokalisierung mit Bluetooth

War die Infrastruktur von WLAN Access Points bisher gegeben und die Hardware somit unveränderlich, soll diese nun ausstauschbar beziehungsweise erweiterbar sein. Dies erlaubt die Implementierung eines Bereichsortungssystems, welches nicht an die 802.11 Spezifikation gebunden ist. Es soll eine Funkübergabe-technik gewählt werden, die es den Tags erlaubt die in Abschnitt 1.4 maximal geforderten drei Jahre Akkulaufzeit zu erreichen.

Da mehrere Topologien für das Stationsnetzwerk denkbar sind, werden die Begriffe Basisstation und AP im Folgenden nicht mehr gleichgesetzt. Eine Möglichkeit wäre, APs einzusetzen, die eine zweite Funkübergabe-technik beherrschen, optional könnte diese Fähigkeit etwa über einen USB-Port nachgerüstet werden. Stattdessen kann die neu eingesetzte Technik auch von der bestehenden Infrastruktur getrennt und eine neue Infrastruktur aus Basisstationen aufgebaut werden. Als Kompromiss der vorherigen Möglichkeiten können sich die neuen Basisstationen auch mittels LAN oder WLAN in die bestehende Infrastruktur einfügen. Die Komplexität dieses Kompromisses ist geringer als bei zwei eigenständigen Netzen.

6.1 nRF52832

Der nRF52832 ist eine System-on-Chip Lösung von Nordic Semiconductor. Er vereint eine 32-bit ARM Cortex-M4F CPU, 512kB RAM und einen 2,4GHz Transceiver, der Bluetooth 5 inklusive Low Energy und das proprietäre ANT Protokoll unterstützt [Nord17].

Für diese Arbeit wird ein Adafruit Feather nRF52 verwendet, der nRF52832 wird deshalb im Folgenden auf nRF52 abgekürzt. Das Adafruit Feather nRF52 besitzt neben dem nRF52832 Spannungswandler für die 3,3 Volt Umwandlung und einen Schaltkreis für die Verwendung mit Lithium Akkus. Die verbaute CP2104 USB-to-Serial Schnittstelle erlaubt es, den Chip über USB zu programmieren.

Abbildung 6.1 zeigt das Adafruit Feather nRF52. Auch Nordic Semiconductor gibt einige typische Stromverbräuche für ihr System-on-Chip an, diese sind in Tabelle 6.1 aufgeführt.

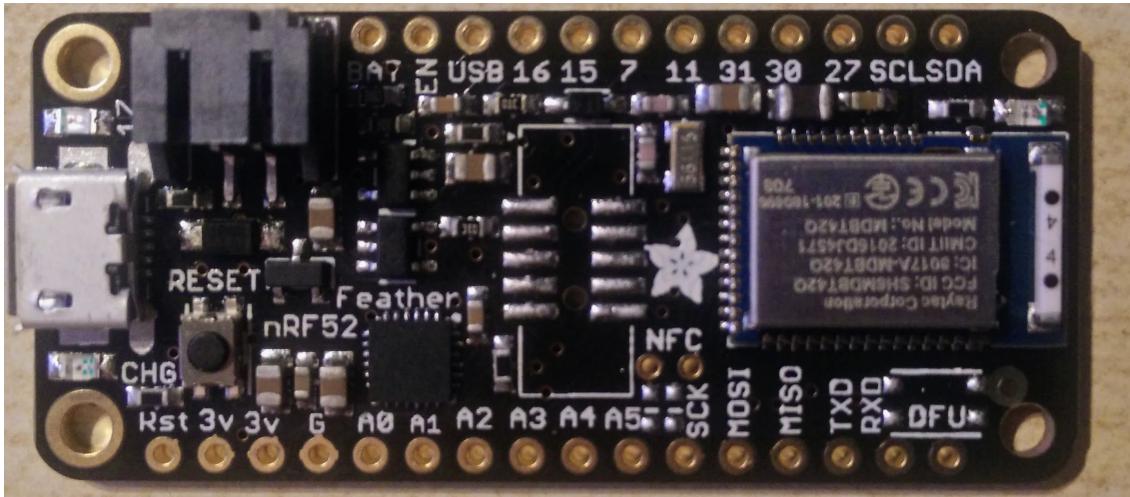


Abbildung 6.1: Adafruit nRF52 Feather

6.1.1 Arduino Bluefruit nRF52 API

Der nRF52 kann ebenfalls mit der Arduino IDE programmiert werden.

Dazu muss dieser zunächst das Board Support Package hinzugefügt werden [Town17]. In den Einstellungen wird unter *Additional Boards Manager URLs* die URL https://www.adafruit.com/package_adafruit_index.json hinzugefügt. Nach einem Neustart der Arduino IDE kann im *Boards Manager* das Paket Adafruit nRF52 installiert werden. Um das Board programmieren zu können wird zusätzlich das *nrfutil* benötigt. Dieses liegt nach der Installation der Boards in

```
./arduino15/packages/adafruit/hardware/nrf52/0.6.0/tools/nrfutil-0.5.2
```

und muss mit `sudo pip install -r requirements.txt` und `sudo python setup.py install` installiert werden. Nachdem das Board in der IDE ausgewählt und über USB mit dem Computer verbunden wurde, kann nun eigener Code oder eines der Beispiele aus *Examples for Adafruit Bluefruit nRF52 Feather* mit STRG+U auf den nRF52 geladen werden.

Es wird die Bluefruit nRF52 API Version 0.6.0 verwendet.

6.2 Reichweite von Bluetooth

Der Versuch mit Bluetooth wurde an der selben Stelle wie der mit WLAN durchgeführt, siehe dazu Abschnitt 4.5. Es wurde allerdings ein Raspberry Pi Zero W als Basisstation verwendet, dieser wurde auf dem LN-862 platziert, auf Abbildung 8.2 ist sein rotes Gehäuse zu erkennen.

6.2.1 Methodik

Die Reichweite wurde erneut in zwei Richtungen geprüft. Zum einen in Richtung der fertig gebohrten Tunnels mit wenigen Hindernissen, zum anderen in Richtung des Vortriebs durch mehrere Stahlhindernisse. Um die Abschirmung durch ein Gehäuse zu simulieren wurde eine stabile Plastikbox verwendet, leider konnte diese nicht vollends geschlossen werden.

Für die Messung wurde der Körper zwischen mobile Einheit und Basisstation gebracht und eine mobile Einheit wurde dann als äußerer Reichweiteängesehen, wenn

Tabelle 6.1: Energieverbrauch des nRF52832 in verschiedenen Zuständen, aus [Nord17]

Current consumption: Radio			
Symbol	Description	Min.	Typ.
I _{RADIO_TX0}	0 dBm TX @ 1 Mb/s Bluetooth Low Energy mode, Clock = HFXO	7.1	mA
I _{RADIO_TX1}	-40 dBm TX @ 1 Mb/s Bluetooth Low Energy mode, Clock = HFXO	4.1	mA
I _{RADIO_RX0}	Radio RX @ 1 Mb/s Bluetooth Low Energy mode, Clock = HFXO	6.5	mA

Current consumption: Radio protocol configurations			
Symbol	Description	Min.	Typ.
I _{S0}	CPU running CoreMark from Flash, Radio 0 dBm TX @ 1 Mb/s Bluetooth Low Energy mode, Clock = HFXO, Cache enabled	9.6	mA
I _{S1}	CPU running CoreMark from Flash, Radio RX @ 1 Mb/s Bluetooth Low Energy mode, Clock = HFXO, Cache enabled	9.0	mA

Current consumption: Ultra-low power			
Symbol	Description	Min.	Typ.
I _{ON_RAMOFF_EVENT}	System ON, No RAM retention, Wake on any event	1.2	µA
I _{ON_RAMON_EVENT}	System ON, Full RAM retention, Wake on any event	1.5	µA
I _{ON_RAMOFF_RTC}	System ON, No RAM retention, Wake on RTC	1.9	µA
I _{OFF_RAMOFF_RESET}	System OFF, No RAM retention, Wake on reset	0.3	µA
I _{OFF_RAMOFF_GPIO}	System OFF, No RAM retention, Wake on GPIO	1.2	µA
I _{OFF_RAMOFF_LPCOMP}	System OFF, No RAM retention, Wake on LPCOMP	1.9	µA
I _{OFF_RAMOFF_NFC}	System OFF, No RAM retention, Wake on NFC field	0.7	µA
I _{OFF_RAMON_RESET}	System OFF, Full 64 kB RAM retention, Wake on reset	0.7	µA

versendete Pakete der mobilen Einheit nicht mehr bei der Basisstation ankamen. Durch das Entfernen des körperlichen Hindernisses war es möglich wieder eine Verbindung herzustellen.

Die bestimmten Reichweiten werden in zwei Meter Schritten angegeben, da sie mit Hilfe der zwei Meter breiten Tübbing Elemente bestimmt wurden.

6.2.2 Ergebnisse

Tabelle 8.2 zeigt die Ergebnisse für den nRF52. Für diesen sind keine Ergebnisse mit geschlossenem Gehäuse aufgeführt, denn das Gehäuse ließ sich für diesen Prototyp nicht schließen. Das lose Auflegen des Deckels führte zu keiner Veränderung bei der Reichweite.

Verwendetes Modul	Aufbau	Strecke	Maximale Sen-dereichweite
nRF52	Offen	Wenige Hindernisse	32m
nRF52	In Gehäuse	Wenige Hindernisse	32m
nRF52	Offen	Viele Hindernisse	14m
nRF52	In Gehäuse	Viele Hindernisse	14m

6.2.3 Bewertung

Auch die mobile Einheit auf Bluetooth Basis hat eine höhere Reichweite als zunächst angenommen. Dennoch lohnt sich eine Anpassung des Sendeintervalls für die Lösung

nicht, da der Großteil des Verbrauchs der mobilen Einheit passiv über die angrenzenden Komponenten wie Spannungswandler und Lithium-Akku-Ladeschaltkreis erfolgt.

6.3 BLE Advertising Implementierung

Die Bluetooth Low Energy Implementierung ist an die Arbeit von Jianyong et al. angelehnt. Es wird immer nach Ablauf des Sendeintervalls ein Advertising Paket gesendet.

In der Praxis wird dazu das Advertising Interval entsprechend gesetzt, dabei handelt es sich um einen in Bluetooth 4.0 spezifizierten Parameter für die Häufigkeit des Advertisings. Da die Bluefruit nRF52 API keine Funktion zur Änderung dieses Wertes zur Verfügung stellt muss er direkt geändert werden. Die entsprechende BLEAdvertising Klasse ist in

`7.arduino15/packages/adafruit/hardware/nrf52/0.6.0/libraries/Bluefruit52Lib/src` zu finden.

In `BLEAdvertising.cpp` ist `GAP_ADV_INTERVAL_MS` auf 20 Millisekunden gesetzt, dieser Wert sollte erhöht werden, um den Energieverbrauch zu senken. Beim nRF52 handelt es sich um ein Klasse 2 Bluetooth Gerät mit einer maximalen Sendeleistung bis 4 dBm. Es wird daher eine Reichweite von 20 Metern angenommen und das Sendeintervall entsprechend der maximalen Bewegungsgeschwindigkeit von 30 km/h auf eine Sekunde gesetzt. In dieser Zeit kann sich ein Mitarbeiter maximal 9 Meter bewegen, es werden also bei der Durchquerung des Einflussbereichs mindestens drei Advertising Pakete von der mobilen Einheit versendet.

Es sollte erneut eine Voruntersuchung des Verbrauchs mit dem Muker TM103 USB-Power-Meter vorgenommen werden. Dieser ist aber nicht in der Lage den Stromverbrauch des nRF52 zu messen.. Die Sendeabschnitte sind zu kurz um einen messbaren Stromverbrauch zu erzeugen.

Deshalb wird zunächst Abbildung 6.1 für eine theoretische Betrachtung des Verbrauchs herangezogen werden.

6.3.1 Theoretische Energieverbrauchsabschätzung

Für die Zeit in der nicht gesendet wird, wird der Zustand $I_{ON_RAMOFF_RTC}$ angenommen, da dieser den höchsten Verbrauch aufweist. Für die Sendezeit wird I_{RADIO_TX0} angenommen, für ein Advertising Paket, welches zusätzlich den Gerätename "TestTag" versendet, werden 24 Bytes (192 Bit) gesendet. Um die Kollisionsvermeidung einzufügen werden vorher 2000 Bit im Zustand I_{RADIO_RX0} empfangen, der die restliche Zeit wird in $I_{ON_RAMOFF_RTC}$ verbracht. Es müssen ebenfalls die weiteren Komponenten auf dem Feather bedacht werden. Adafruit gibt für den Spannungswandler einen Verbrauch von 55 Mikroamper und für den Lithium-Polymer-Ladeschaltkreis einen Verbrauch von bis zu 100 Mikroamper an [Frie16]. Der Verbrauch des anderen Komponenten des Feather wird daher konservativ auf 155 Mikroamper geschätzt.

$$y = \left(1s - \frac{\text{Bits_gesendet}}{1000000b/s} - \frac{\text{Bits_empfangen}}{1000000b/s}\right) * (I_{ON_RAMOFF_RTC} + 155\mu A) + \frac{\text{Bits_gesendet}}{1000000b/s} * I_{RADIO_RX0} + \frac{\text{Bits_empfangen}}{1000000b/s} * I_{RADIO_RX0}$$

$$y = (1s - 0,000192s - 0,002s) * 0,1569mA + 0,000192 * 7,1mA + 0,002 * 6,5mA$$

$$y \approx 0,156556mA + 0,001363mA + 0,013mA = 0,170919mA$$

6.4 Untersuchung des Energieverbrauchs

Der Energieverbrauch soll mit dem INA219 genauer bestimmt werden, der INA219 und die verwendete Methodik werden in Abschnitt 4.4 beschrieben.

6.4.1 Bluetooth Low Energy Advertising

Abbildung 9.10 zeigt den Lastverlauf für den Start einer mobilen Einheit mit Bluetooth Low Energy Advertising.

Zu Beginn ist eine Startphase zu erkennen, ab 2 Sekunden nach Start des Experiments ist dann das regelmäßige Muster aus Verbrauch im Ruhezustand und kurzen Verbrauchsspitzen beim Senden zu erkennen. Die Kürze des Sendevorgangs bedingt die starke Schwankung bei den Lastspitzen, die Samplingrate von 333Hz reicht hier offenbar nicht aus um dem Sendevorgang vollständig zu erfassen.

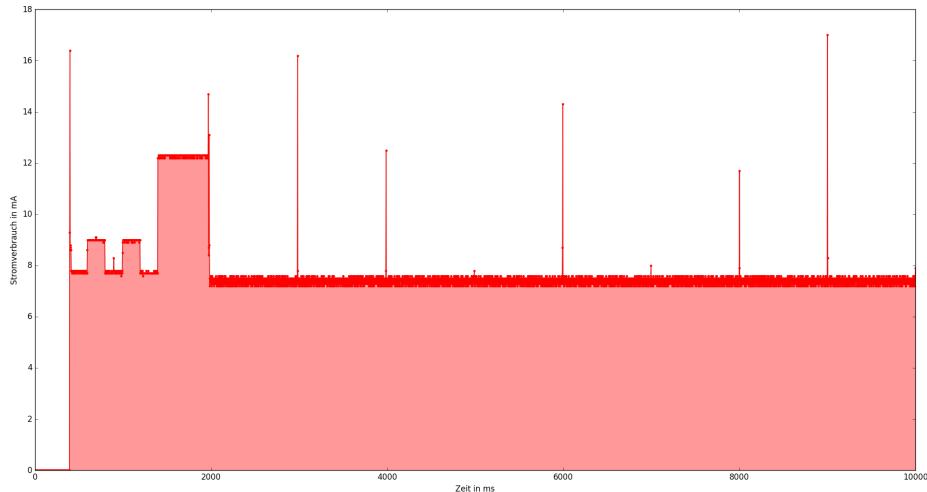


Abbildung 6.2: Lastkurve einer Implementierung von Bluetooth Low Energy Advertising.

Hauptverbrauch liegt jedoch in den 7,2 bis 7,6 Milliamper im Ruhezustand, leider ist in diesem Fall kein einzelnes Modul vorhanden, es kann nur auf dem nRF52 Feather gemessen werden. Da jedoch die selben Komponenten wie beim ESP8266 Feather zum Einsatz kommen, kann angenommen werden, dass auch der Ruheverbrauch vergleichbar ist, dieser liegt zwischen 7 und 7,1 Milliamper. Tabelle 9.5 zeigt deshalb neben dem gemessenen Verbrauch einen projektierten Verbrauch, bei dem ein Ruheverbrauch von 7,05 Milliamper subtrahiert wurde.

Tabelle 6.3: Energieverbrauch mobiler Einheiten mit Bluetooth Low Energy Advertising

Hardware	Programm	\varnothing Verbrauch in mA	Laufzeit in Stunden
nRF52 Feather	Bluetooth Low Energy Advertising	7,37	190
nRF52 (projeziert)	Bluetooth Low Energy Advertising	0,32	4375

7. Beschleunigungssensor

Um den Energieverbrauch der WLAN-basierten Lösungen zu senken wird in diesem Kapitel die Einbindung eines Beschleunigungssensors diskutiert.

Im Tunnel Rastatt, in dem auch die Versuche stattfanden, arbeiten die Bauarbeiter in zwei Schichten zu je zwölf Stunden. Nach zehn Tagen Schicht hat ein Arbeiter fünf Tage frei, jeder Arbeiter arbeitet also genau ein Drittel der Gesamtzeit.

Die mobile Einheit behält jedoch derzeit seinen Senderythmus bei, angesichts des hohen Stromverbrauchs beim Senden ist dies ineffizient. Ein Beschleunigungssensor soll bestimmen, wann die mobile Einheit in Bewegung ist. Dadurch wird sie nicht mehr senden, wenn sie nicht getragen wird.

7.1 LIS3DH

Der LIS3DH ist ein drei Achsen Beschleunigungssensor von ST Microelectronics [ST M15]. Er zeichnet sich durch einen ultra-low-power Modus und einen Pin für externe Unterbrechung (Interrupt) aus. Der Beschleunigungssensor bietet ein I^2C und ein SPI Interface um ihn zu konfigurieren. Der LIS3DH benötigt bei einer Frequenz von einem Herz nur 2 Mikroamper (0,002 mA).

Leider konnte bei einem Herz der Interrupt durch Laufbewegungen nicht sicher ausgelöst werden, die Frequenz wurde deshalb auf zehn Herz erhöht. Für eine Frequenz von zehn Herz im ultra-low-power Modus listet das Datenblatt einen Verbrauch von 3 Mikroamper. Abbildung 7.1 zeigt eine Platine mit integriertem LIS3DH.

7.2 Abschaltautomatik

Der ESP8266 besitzt einen Enable Pin, ist dieser mit der Versorgungsspannung verbunden werden die internen Spannungsgregler aktiviert und der ESP8266 mit Strom versorgt. Die eigentliche Stromversorgung bezieht er dabei jedoch aus dem Vcc Pin. Der ESP8266 soll durch den LIS3DH angeschaltet werden, der ESP8266 darf die Stromversorgung bei Bedarf trennen, sie kann danach wieder vom LIS3DH wieder aktiviert werden.

Um dieses Verhalten zu erreichen wird ein Latch eingesetzt [Texa03]. Es handelt sich dabei um einen digitalen Schalter mit einem SET Eingang (An), einem RESET



Abbildung 7.1: LIS3DH integriert auf einer Platine für die Entwicklung.

Eingang (Aus) und einem Ausgang. Der Ausgang wird mit dem Enable Pin verbunden, ist er aktiv, wird der ESP8266 aktiv. Der SET Eingang wird mit dem interrupt Pin des LIS3DH verbunden, er kann damit den den Ausgang aktivieren. Der RESET Eingang wird mit dem ESP8266 verbunden. Es wurde Pin 16 ausgewählt, da dieser für das Aufwecken aus dem Tiefschlaf zuständig ist. Stattdessen soll er nun die Stromversorgung abschalten und durch die zuvor im `deep_sleep` verbrachte Zeit das Sendeintervall abwarten.

Da das Aufwecken mit Pin 16 durch das Verbinden des Pins mit der Masse funktioniert, kann damit nicht direkt der RESET Eingang des Latches betrieben werden. Stattdessen wird das Ergebnis von Pin 16 mit der Versorgungsspannung über ein XOR Gatter verschaltet und mit dem RESET Eingang verbunden [Texa14]. Abbildung 7.2 zeigt das Schema der Verbindung von ESP8266 und LISD3H.

7.3 Bewertung

Der Verbrauch des Beschleunigungssensors ersetzt lediglich den Verbrauch des Mikrocontrollers, die anderen Komponenten bleiben davon unberührt. Zu den 3 Mikroamper Verbrauch addiert sich deshalb der Verbrauch des Spannungswandlers (55 Mikroamper) und des Lithium-Polymer-Ladeschaltkreises (bis zu 100 Mikroamper). Hinzu kommen bis zu 1 Mikroamper für das Latch und 10 Mikroamper für das XOR Gatter.

Die Integration des Beschleunigungssensor kann also den Verbrauch des ESP8266 außerhalb der Arbeitszeiten durch einen Verbrauch von 14 Mikroamper ersetzen, die bis zu 166 Mikroamper Verbrauch der umliegenden Komponenten bleibt jedoch vorhanden. Die Laufzeit für eine nicht bewegte mobile Einheit mit ESP8266 beträgt dann mindestens $1400mAh / 0,18mA = 7777,77h$, dies entspricht ca. 324 Tagen.

Für die mobile Einheit mit dem nRF52 Bluetooth-Chip macht die Integration des Beschleunigungssensors keinen Sinn, da der mittlere Verbrauch dieses Mikrocontrollers nur ca. 2 Mikroamper über dem des Beschleunigungssensors liegt.

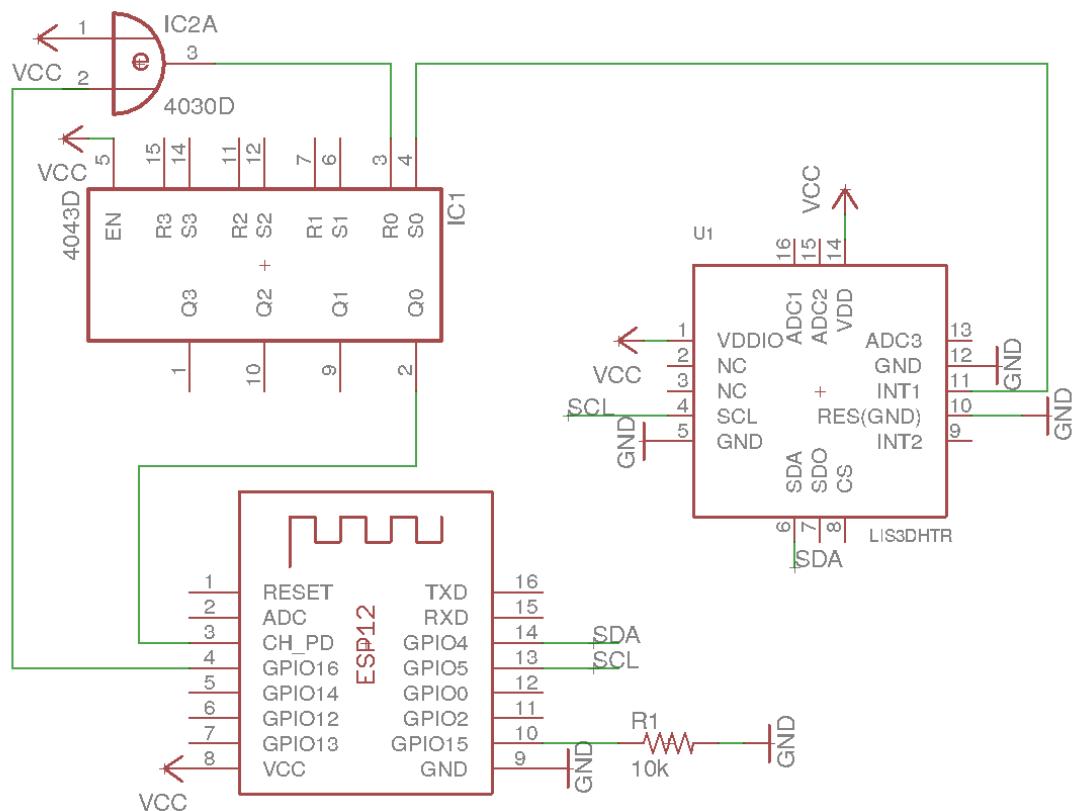


Abbildung 7.2: Schema der Verbindung von ESP8266 und LIS3DH.

Literaturverzeichnis

- [AiRI17a] AiRISTA Flow. Ekahau A4 Asset Tag. https://www.airistaflow.com/wp-content/uploads/2016/07/AiRISTAFLOW_Ekahau_RTLS_A4_DS.pdf, Mai 2017.
- [AiRI17b] AiRISTA Flow. Ekahau B4 Badge Tag. https://www.airistaflow.com/wp-content/uploads/2016/09/AiRISTAFLOW_Ekahau_B4_DS.pdf, Mai 2017.
- [AiRI17c] AiRISTA Flow. Offizielle Website von AiRISTA Flow. <https://www.airistaflow.com/#>, Mai 2017.
- [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.
- [BadG08] M. S. Bargh und R. de Groote. Indoor localization based on response rate of bluetooth inquiries. In *Proceedings of the first ACM international workshop on Mobile entity localization and tracking in GPS-less environments*. ACM, 2008, S. 49–54.
- [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.
- [BCIM17a] M. Banzi, D. Cuartielles, T. Igoe und D. A. Mellis. Arduino IDE. <https://github.com/arduino/Arduino/>, Juni 2017.
- [BCIM⁺17b] M. Banzi, D. Cuartielles, T. Igoe, D. A. Mellis, C. Klippel, I. Grokhotkov, Espressif Systems, P. Andersson, R. Hempel und C. Rich. ESP8266 Arduino Core. <https://github.com/esp8266/Arduino>, Juni 2017.
- [Blue10a] Bluetooth Special Interest Group. *Specification of the Bluetooth System 4.0*. Bluetooth SIG, Inc. 2010.

- [Blue10b] Bluetooth Special Interest Group. Volume 1 - Part A - 3.3.2.2 Advertisement broadcast channel. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 162–163.
- [Blue10c] Bluetooth Special Interest Group. Volume 2 - Part A - 3 TRANSMITTER CHARACTERISTICS. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 282.
- [Blue10d] Bluetooth Special Interest Group. Volume 2 - Part A - 4.2.2.2 Advertising Procedure. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 187.
- [Blue10e] Bluetooth Special Interest Group. Volume 2 - Part A - 4.2.2.3 Scanning Procedure. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 187–188.
- [Blue10f] Bluetooth Special Interest Group. Volume 2 - Part B - 2.5 Inquiry Scan Physical Channel. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 327–328.
- [Blue10g] Bluetooth Special Interest Group. Volume 6 - Part B - 2.3 Advertising Channel PDU. In *Specification of the Bluetooth System 4.0*, Band 0. Bluetooth SIG, Inc., 2010, S. 2202–2208.
- [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, Mai 2017.
- [ESP 17] ESP Community. ESP OpenN SDK. <https://github.com/pfalcon/esp-open-sdk>, Juni 2017.
- [Espr17] Espressif Systems IOT Team. ESP8266EX Datasheet. http://espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex-datasheet_en.pdf, Mai 2017.
- [Frie16] L. Fried. Adafruit Feather 32u4 with LoRa Radio Module - Power Management. <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-32u4-radio-with-lora-radio-module/power-management#radio-power-draw>, April 2016.
- [Frie17] L. Fried. Adafruit Feather HUZZAH ESP8266 - Using Arduino IDE. <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-huzzah-esp8266-using-arduino-ide>, Juni 2017.
- [Hope06] Hope Microelectronics. RFM95/96/97/98(W) - Low Power Long Range Transceiver Module. http://www.hoperf.com/upload/rf/RFM95_96_97_98W.pdf, Januar 2006.

- [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.
- [IEEE02] IEEE Computer Society. *Part 15.1: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Wireless Personal Area Networks (WPANs).* IEEE. 2002.
- [IEEE12a] IEEE Computer Society. 10.1.4 Acquiring synchronization, scanning. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.* IEEE, 2012, S. 977–980.
- [IEEE12b] IEEE Computer Society. 10.1.4.3.3 Active Scanning Procedure. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 980.
- [IEEE12c] IEEE Computer Society. 10.3 STA authentication and association. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 1011–1013.
- [IEEE12d] IEEE Computer Society. 6.3.5 Authenticate. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 117–121.
- [IEEE12e] IEEE Computer Society. 6.3.7 Associate. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 127–133.
- [IEEE12f] IEEE Computer Society. 6.3.8 Reassociate. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 133–144.
- [IEEE12g] IEEE Computer Society. 8.2.4.1.3 Type and Subtype fields. In *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications,* Band 1. IEEE, 2012, S. 382–383.
- [IEEE12h] IEEE Computer Society. *Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.* IEEE. 2012.
- [JHZZ14] Z. Jianyong, L. Haiyong, C. Zili und L. Zhaojun. RSSI based Bluetooth low energy indoor positioning. In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2014 International Conference on.* IEEE, 2014, S. 526–533.
- [KiKo16] S. Kim und J. Ko. Poster: Low-complexity Outdoor Localization for Long-range, Low-power Radios. In *Proceedings of the 14th Annual International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services Companion.* ACM, 2016, S. 44–44.
- [LANC17] LANCOM Systems. Rouge-Detection-Funktion. https://www.lancom-systems.de/docs/LCOS-Refmanual/9.10-Rel/DE/topics/wlanmonitor_rogue_detection.html, Juni 2017.

- [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.
- [LGGLD⁺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.
- [LRJT⁺10] P. Ling, C. Ruizhi, L. Jingbin, T. Tenhunen und H. Kuusniemi. Inquiry-based bluetooth indoor positioning via RSSI probability distributions. In *the 2nd International Conference on Advances in Satellite and Space Communications (SPACOMM)*, 2010, S. 151–156.
- [Maur16] D. Maurer. *Unterstützung der Sicherheitstechnik im Tunnelbau durch eine Applikation*. Karlsruher Institut für Technologie. 2016.
- [MKML06] K. Muthukrishnan, G. Koprinkov, N. Meratnia und M. Lijding. Using time-of-flight for WLAN localization: feasibility study. 2006.
- [Nord17] Nordic Semiconductor. nRF52832 Product Specification v1.3 - Datenblatt. http://infocenter.nordicsemi.com/pdf/nRF52832_PS_v1.3.pdf, Februar 2017.
- [NXP 16] NXP Semiconductors. LPC1102/1104 32-bit ARM Cortex-M0 microcontroller; 32 kB flash and 8 kB SRAM. http://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/LPC1102_1104.pdf, September 2016.
- [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.
- [Riga16] Rigado LLC. Practical BLE Throughput. https://rigado.zendesk.com/hc/en-us/article_attachments/211413708/Practical-BLE-Throughput.pdf, Mai 2016.
- [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.
- [SLEK⁺15] N. Sornin, M. Luis, T. Eirich, T. Kramp und O. Hersent. *LoRaWAN Specification*, Band 1.0.1. LoRa Alliance. 2015.
- [ST M15] ST Microelectronics. MEMS digital output motion sensor: ultra-low-power high-performance 3-axis "nanoäccelerometer - Datenblatt. <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/>

- document/datasheet/3c/ae/50/85/d6/b1/46/fe/CD00274221.pdf/files/CD00274221.pdf/jcr:content/translations/en.CD00274221.pdf, Dezember 2015.
- [Stan17a] Stanley Healthcare. AeroScout: Healthcare Asset Tracking & Management. <https://www.stanleyhealthcare.com/solutions/health-systems/supply-chain-asset-management/asset-management>, Mai 2017.
- [Stan17b] Stanley Healthcare. AeroScout: Staff Assist for Improved Security. <https://www.stanleyhealthcare.com/solutions/health-systems/security-protection/staff-security>, Mai 2017.
- [Stan17c] Stanley Healthcare. T14 Patient and Staff Badge. <https://www.stanleyhealthcare.com/sites/stanleyhealthcare.com/files/documents/T14%20Badge%20Data%20Sheet.pdf>, Mai 2017.
- [StTr12] T. Streichert und M. Traub. *Elektrik/Elektronik-Architekturen im Kraftfahrzeug: Modellierung und Bewertung von Echtzeitsystemen*. Springer-Verlag. 2012.
- [Texa03] Texas Instruments. CMOS Quad 3-State R/S Latches - Datenblatt. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cd4043b.pdf>, Oktober 2003.
- [Texa14] Texas Instruments. SN74AHC1G86 Single 2-Input Exclusive-OR Gate - Datenblatt. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74ahc1g86.pdf>, Dezember 2014.
- [Texa15] Texas Instruments. INA219 Zerø-Drift, Bidirectional Current/Power Monitor With I₂C Interface - Datenblatt. <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf>, Dezember 2015.
- [Torr84] D. J. Torrieri. Statistical theory of passive location systems. *IEEE transactions on Aerospace and Electronic Systems* (2), 1984, S. 183–198.
- [Town17] K. Townsend. Bluefruit nRF52 Feather Learning Guide. <https://learn.adafruit.com/bluefruit-nrf52-feather-learning-guide?view=all>, März 2017.
- [Tree16] T. Treece. Adafruit Feather M0 Radio with LoRa Radio Module - Arduino IDE Setup. <https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-radio-with-lora-radio-module/setup>, Juni 2016.
- [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.

