

Masterarbeit

**Energieeffiziente  
Lokalisierungssysteme für die  
Positionsbestimmung von Objekten  
im Innenraum auf der Basis von  
Ultra-wideband**

Fehrenbach Patrick

13.03.2017

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau  
Technische Fakultät  
Institut für Mikrosystemtechnik

Eingereichte Masterarbeit gemäß den Bestimmungen der Prüfungsordnung der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg für den Studiengang Master of Science (M. Sc.) Mikrosystemtechnik vom 19. 8. 2005.

**Bearbeitungszeitraum**

02. 05. 2016 – x. 03. 2017

**Gutachter**

Prof. Dr. Leonard Reindl

Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein

**Betreuer**

Dr. Fabian Höflinger

Für alle die mich in meinem Studium begleitet haben



## **Erklärung**

Hiermit erkläre ich, dass ich diese Abschlussarbeit selbständig verfasst habe, keine anderen als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel verwendet habe und alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten Schriften entnommen wurden, als solche kenntlich gemacht habe. Darüber hinaus erkläre ich, dass diese Abschlussarbeit nicht, auch nicht auszugsweise, bereits für eine andere Prüfung angefertigt wurde.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b>	<b>1</b>
<b>Abstract</b>	<b>3</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>7</b>
2.1. Technologien zur Innenraum-Lokalisierung . . . . .	7
2.1.1. Lokalisierung mit elektromagnetische Wellen . . . . .	7
2.1.2. Lokalisierung mit akustischen Wellen . . . . .	8
2.1.3. Sonstige Lokalisierungstechnologien . . . . .	8
2.2. Lokalisierungsverfahren . . . . .	8
2.2.1. Ortung über die Signallaufzeit (ToF bzw. RTT) . . . . .	9
2.2.2. Ortung über die Signalstärke (RSSI) . . . . .	11
2.3. Anforderungen an ein Indoor-Ortungssystem (IPS) . . . . .	13
2.3.1. Messgenauigkeit . . . . .	13
2.3.2. Reichweite . . . . .	15
2.3.3. Latenzzeit des Systems . . . . .	16
2.3.4. Verfügbarkeit . . . . .	16
2.4. Ultra-Wideband . . . . .	16
2.4.1. Einführung . . . . .	16
2.4.2. Definition von Ultra-Wideband . . . . .	17
2.4.3. Regulierung von UWB . . . . .	18
2.4.4. Impulse Radio UWB . . . . .	20
2.4.5. IEEE 802.15.4-2011 Paket Struktur . . . . .	21
2.4.6. Ranging Protokoll . . . . .	23
<b>3. Stand der Forschung und Technik</b>	<b>27</b>
3.1. Lokalisierungstechnologien . . . . .	27
3.1.1. Laserortung . . . . .	27
3.1.2. Bluetooth . . . . .	29
3.1.3. Ultra-Wideband . . . . .	30
3.1.4. Übersicht über die vorgestellten Technologien . . . . .	32
3.2. Energiesparende Funkkommunikation . . . . .	33
3.2.1. Prinzip der Aufwecktechnologie . . . . .	33

3.2.2. Vorhergehende Arbeiten an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren . . . . .	35
<b>4. Anforderungen und Ziel der Arbeit</b>	<b>43</b>
<b>5. Durchführung</b>	<b>45</b>
5.1. Hardware-Entwicklung . . . . .	45
5.1.1. Auswahl der Bauteile . . . . .	45
5.1.2. Erstellung des Platinenlayouts . . . . .	48
5.2. Software-Entwicklung . . . . .	49
5.2.1. Prinzipieller Kommunikationsablauf . . . . .	49
5.2.2. Aufbau der Kommunikationsprotokolle . . . . .	51
5.2.3. Vorstellung der Firmware . . . . .	53
<b>6. Messungen und Ergebnisse</b>	<b>63</b>
6.1. DWM1000-Modul Einstellungen . . . . .	63
6.2. Kalibrierung der Knoten/Tag Systeme . . . . .	63
6.3. Distanzmessungen im Innenraum . . . . .	67
6.4. Messung des Energieverbrauchs von Knoten und Tag für eine Distanz- messung . . . . .	69
6.4.1. Energieverbrauch des mobilen Tags . . . . .	69
6.4.2. Energieverbrauch eines Knotens . . . . .	72
<b>7. Fazit und Ausblick</b>	<b>75</b>
7.1. Fazit . . . . .	75
7.2. Ausblick . . . . .	77
<b>Danksagung</b>	<b>79</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>81</b>
A.1. Schaltpläne der UWB-V1 Platine . . . . .	83
A.2. Kalibrierungsmessungen . . . . .	88
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>93</b>

# Abbildungsverzeichnis

2.1.	Übersicht über die Technologien zur Innenraum-Lokalisierung. . . . .	7
2.2.	Übersicht über die Verfahren zur Innenraum-Lokalisierung. . . . .	9
2.3.	Messprinzip der Signallaufzeitmessung mit RTT. . . . .	10
2.4.	Ermittlung der Position eines mobilen Tags mithilfe von Trilateration. . . . .	11
2.5.	Empfangene Signalstärke in Abhängigkeit der Distanz. . . . .	12
2.6.	RSSI-Signatur bzw. RSSI- Verteilung dargestellt an einem Raumplan der Universität Hong Kong. . . . .	13
2.7.	Beispiele für systematische Messabweichungen . . . . .	14
2.8.	Frequenzbereich und maximale Sendeleistung von Ultra-Wideband. . . . .	17
2.9.	Vergleich der UWB-Regulierung von Europa und den Vereinigten Staaten. . . . .	19
2.10.	Gaußsche Monocycle im Zeit- und Frequenzbereich . . . . .	20
2.11.	Struktur eines UWB- Pakets nach IEEE 802.15.4-2011. . . . .	21
2.12.	Prinzip der einseitigen Zweiwegemessung. . . . .	24
2.13.	Prinzip der doppelseitigen Zweiwegemessung unter Verwendung von drei Nachrichten. . . . .	25
3.1.	3D LIDAR + IMU System Stencil zur Innenraum-Lokalisierung. . . . .	28
3.2.	BLE Beacon der Firma Estimote. . . . .	29
3.3.	Gegenüberstellung der vorgestellten Technologien in Bezug auf Energieverbrauch und Genauigkeit. . . . .	32
3.4.	Prinzip des OOK- Modulationsverfahren. Ein 125 kHz Aufwecksignal moduliert auf einer 868 MHz Trägerwelle. . . . .	36
3.5.	Blockschaltbild der von Joachim Keh entwickelten Beacon und Identifier Hardware. . . . .	37
3.6.	Beacon- Platine entwickelt von Joachim Keh im Rahmen seiner Bachelorarbeit. . . . .	38
3.7.	Beispiel einer Manchester- Kodierung im Vergleich zu einer Bitkodierung. . . . .	39
3.8.	Low-Noise-Amplifier zur Sensitivitätserhöhung des Aufweckempfängers. . . . .	40
3.9.	Basisstation entwickelt von Markus Haußer im Rahmen seiner Bachelorarbeit. . . . .	41
3.10.	Blockschaltbild der von Markus Hauser entwickelten Basisstation Hardware. . . . .	42
5.1.	DWM1000 Modul für die Lokalisierung mit Ultra-Wideband. . . . .	46

5.2.	Blockschaltbild der neu entwickelten UWB V1 Schaltung. . . . .	48
5.3.	Vorder- und Rückseite der neu entwickelten UWB-V1 Platine . . . . .	49
5.4.	Prinzipieller Kommunikationsablauf für einen Lokalisierungsvorgang. . . . .	50
5.5.	Protokoll für die Übertragung von Daten im HF-Band . . . . .	51
5.6.	Protokoll für die Übertragung von Aufwecksignalen im LF-Bereich . . . . .	52
5.7.	Protokolle für die die Distanzmessung mit dem DWM1000-Modul. . . . .	52
5.8.	Beispiele für einstellbare Operationsmodi für das DWM1000 Modul. . . . .	54
5.9.	Programmablaufplan der Initialisierung und Konfiguration des DWM1000-Moduls . . . . .	55
5.10.	Programmablaufplan des mobilen Tags für einen Lokalisierungsvorgang. . . . .	57
5.11.	Programmablaufplan eines Knotens für einen Lokalisierungsvorgang. . . . .	58
5.12.	Programmablaufplan der Basisstation für einen Lokalisierungsvorgang	60
6.1.	Versuchsaufbau der Kalibrierungsmessung für den mobilen Tag und einen Knoten . . . . .	64
6.2.	Histogramme für die Distanzmessungen unterschiedlicher Knoten und Referenzentfernungen . . . . .	65
6.3.	Gemessene Entfernungsdifferenz in Bezug zur Referenzentfernung mit den ermittelten Mittelwerten für den Knoten 3. . . . .	65
6.4.	Gemessene Entfernungsdifferenz gegenüber der Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 3. . . . .	67
6.5.	Grundriss des Messortes mit den zugehörigen Referenzmesspunkten. Der mobile Tag hat eine feste Position. . . . .	68
6.6.	Gemessene Entfernungsdifferenz gegenüber der Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 3. Diese Messungen wurden im Innenraum bei geöffneter und geschlossener Türe durchgeführt. . . . .	69
6.7.	Stromverbrauch des Tags während einer Distanzmessung. . . . .	70
6.8.	Stromverbrauch eines Knotens während einer Distanzmessung. . . . .	73
7.1.	Gegenüberstellung der Technologien Laser, Bluetooth und UWB für den aktuellen Stand der Forschung und Technik sowie die neu entwickelten UWB-V1 Tag und Knoten in Bezug auf Energieverbrauch und Genauigkeit. . . . .	76
A.1.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 1. . . . .	88
A.2.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 2. . . . .	88
A.3.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 4. . . . .	89
A.4.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 5. . . . .	89
A.5.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit korrigierten den Mittelwerten für Knoten 1. . . . .	90
A.6.	Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit korrigierten den Mittelwerten für Knoten 2. . . . .	90

A.7. Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit korri- gierten den Mittelwerten für Knoten 4. . . . .	91
A.8. Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit korri- gierten den Mittelwerten für Knoten 5. . . . .	91



# Zusammenfassung

Die Lokalisierung von Objekten und Lebewesen gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Dabei ist nicht nur eine Lokalisierung im Außenbereich von großer Bedeutung, sondern zunehmend auch die Bestimmung von Positionen im Innenraum. Für eine Innenraum-Lokalisierung existieren bereits Systeme, welche unterschiedliche Technologien verwenden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Stand der Forschung und Technik für die Technologien Laser, Bluetooth und Ultra-Wideband aufgezeigt. Analysiert wurden speziell die Schwachpunkte der Technologien in Bezug auf Genauigkeit und Energieeffizienz.

In dieser Arbeit wurde ein Innenraum-Lokalisierungssystem basierend auf der Ultra-Wideband Technologie entwickelt. Die Anforderung an das System bestand darin, eine hohe Genauigkeit bei einem niedrigen Energieverbrauch und kleiner Größe zu erreichen. Das gesamte System besteht aus einer Basisstation, einem mobilen Tag und mehreren Knoten. Für die energiesparende Funkkommunikation zwischen Tag und Knoten wurde ein an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren entwickelter Aufweckempfänger verwendet. Die Umsetzung der Distanzbestimmung wurde mit dem DWM1000-Modul von *Decawave* realisiert. Um diese beiden Schaltungsteile zu kombinieren, wurde ein neues Platinenlayout erstellt (UWB-V1). Diese Platine kann als Tag oder Knoten verwendet werden. Für die Lokalisierung wurde ein spezieller Kommunikationsablauf zwischen Basisstation, Tag und Knoten entwickelt. Der Tag und die Knoten befinden sich hauptsächlich im Standby-Modus. Nach einer Lokalisierungsanfrage (Aufwecksignal) von der Basisstation, wechseln die beiden Systeme für die Distanzbestimmung in den Aktivmodus. Die Distanzdaten werden vom Tag an die Basisstation übermittelt und am PC angezeigt.

Um die Genauigkeit des Tag/Knoten Systems bestimmen zu können, wurden zunächst Kalibrierungsmessungen im Freien durchgeführt. Dabei wurde eine Messgenauigkeit von etwa  $3\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$  erreicht. Messungen im Innenraum zeigten Abweichungen von den Ergebnissen der Kalibrierung aufgrund von Reflexionen und Mehrwegausbreitungen. Das System hat eine Genauigkeit im Innenraum von  $12,5\text{ cm} \pm 2,5\text{ cm}$  im Bereich von 200 bis 500 cm und  $25,5\text{ cm} \pm 5\text{ cm}$  im Bereich von 700 bis 900 cm. Durch die Messung des Stromfrofils von Tag und Knoten konnte der Energieverbrauch bestimmt werden. Bei 100 Lokalisierungsanfragen am Tag, verbraucht der mobile Tag eine Energie von 0,27 mWh und der Knoten 0,87 mWh.

Das in dieser Arbeit entwickelte System, eignet sich aufgrund der hohen Genauigkeit bei der Distanzmessung, dem niedrigen Energieverbrauch und der kleinen Größe für eine Innenraum-Lokalisierung.



# **Abstract**

Abstract/Summary text



# 1. Einleitung

Die Lokalisierung bzw. Ortung von sich bewegenden oder stillstehenden Objekten und Lebewesen, wie zum Beispiel auch die des Menschen, gewinnt in der heutigen Zeit immer mehr an Bedeutung. Präzise Positionsinformationen sind die Grundlage für die gezielte Navigation durch unbekannte Umgebungen. Schon zu Zeiten der Seefahrt war es wichtig die eigene Position genau zu kennen, um das gewünschte Ziel sicher zu erreichen. Die Anfänge der Seefahrtsnavigation bestand beispielsweise darin, dass die Seefahrer sich an markanten Landmarken an den Küsten orientierten. Zentrale Bedeutung für die Navigation hat zudem die Erfindung des Kompasses. Mit Hilfe der Nord-Süd Ausrichtung von magnetischem Eisen konnten die bereits bestehenden Methoden unterstützt werden [1].

Mit der Funk- und Radartechnik erlebte die Navigation im 20. Jahrhundert eine Revolution. Speziell das Navigationssatellitensystem GPS (Global Positioning System) wird heutzutage zur Lokalisierung im Außenbereich eingesetzt. Ein Auto kann durch die aktuelle Standortbestimmung beispielsweise auf der ganzen Welt zum gewünschten Ziel navigiert werden. Die Lokalisierungsgenauigkeit von GPS beträgt dabei ca. 2-5 m [1, 2]. Aufgrund des schnell wachsenden Marktes von mobilen Endgeräten sowie auch durch Fortschritte in der drahtlosen Datenverarbeitung und der Sensortechnik eröffneten sich viele neue Anwendungsmöglichkeiten, auch im Bereich der standortbezogenen Dienste (Location-based Services, LBS). Dazu zählt nicht nur die Navigation im Automobilbereich, sondern auch Anwendungen in den Bereichen Sport (Joggen oder Radfahren), der zivilen Luftfahrt, in der Schifffahrt oder bei der Navigation des Menschen im Freien (Geocaching). Jedoch ist nicht nur die Lokalisierung im Außenbereich von großer Bedeutung, sondern zunehmend auch die Bestimmung von Positionen im Innenraum. Die Bedeutung der Innenraum Lokalisierung kann am Beispiel einer Person gezeigt werden, die ein unbekanntes Gebäude betritt. Der Besucher hat das Problem sich im Gebäude orientieren zu müssen. Nur ein Gebäudeplan kann dabei helfen das Ziel schnellstmöglich zu erreichen. Die naheliegendste Lösung wäre das GPS auch für die Lokalisierung im Innenraum zu verwenden. Durch die starke Signaldämpfung durch Dächer und Wände sowie auch Reflexionen sind diese Systeme jedoch nur bedingt bzw. gar nicht für die Ortung innerhalb von Gebäuden geeignet. Um Positionen in einem bestimmten Raum genau bestimmen zu können, erfordert die Lokalisierung im Innenraum zudem eine viel höhere Auflösung als im Außenbereich. Ziel der Forschung muss deshalb sein, Systeme zu entwickeln, welche die Anforderungen für die Lokalisierung im Innenraum erfüllen (siehe Kapitel 2.3). Diese Systeme werden auch als Indoor-Ortungssysteme (Indoor positioning systems, IPS) bezeichnet. Sie können durch Bestimmung der Po-

sitionsinformationen zur Navigation oder zum gezielten Tracken einer Person bzw. eines Objektes verwendet werden. Anwendungen finden IPS beispielsweise in den folgenden Gebieten:

- Tracking von Patienten oder Geräten in Krankenhäusern und medizinischen Einrichtungen
- Verfolgung von Waren und Gütern in Lagerhallen oder allgemein in der Logistik
- Navigtion an Flughäfen oder in öffentlichen Gebäuden
- Überwachung und Verfolgung von Tieren
- Produktfindung in Supermärkten
- Navigation von Feuerwehrmännern in verrauchten Gebäudestrukturen

Für ein IPS bestehen verschiedene Schwierigkeiten, welche bei der Ortung im Außenbereich gar nicht auftreten. Dazu gehört beispielsweise die Mehrwegeausbreitung oder auch Reflexionen an Wänden und Objekten. Diese Herausforderungen und auch die hohen Anforderungen im Bereich der Innenraum- Lokalisierung beeinflussen bedeutend die Wahl der passenden Technologie. In den letzten Jahren wurden viele verschiedene Systeme unterschiedlicher Technologien für die Lokalisierung im Innenraum entwickelt. Diese verschiedenen Technologien werden in Kapitel 2.1 vorgestellt [2, 3, 4].

# 2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel werden die für dieses Projekt relevanten theoretischen Grundlagen erläutert.

## 2.1. Technologien zur Innenraum-Lokalisierung

Die bestehenden Technologien zur Innenraum-Lokalisierung lassen sich in verschiedene Bereiche einteilen. Diese Bereiche zeigt Abbildung 2.1. Zur absoluten Lokalisierung werden hauptsächlich elektromagnetische und akustische Systeme eingesetzt. Für die relative Positionsbestimmung wird beispielsweise eine Inertialsensorik verwendet.

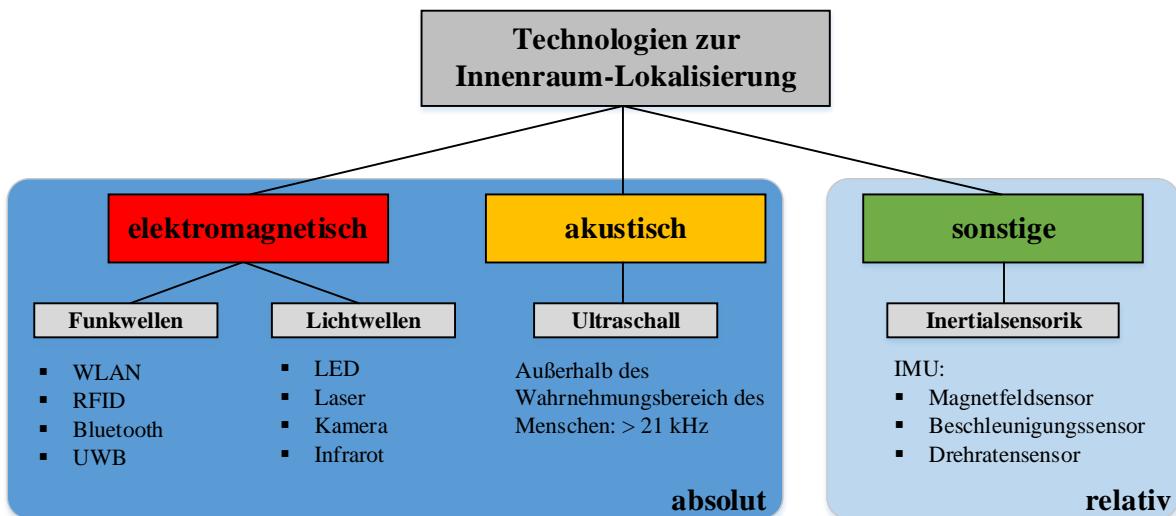


Abbildung 2.1.: Übersicht über die Technologien zur Innenraum-Lokalisierung [2].

### 2.1.1. Lokalisierung mit elektromagnetische Wellen

Die Innenraum-Lokalisierung mit elektromagnetischen Wellen wird in zwei Kategorien unterteilt. Im Bereich von Kilohertz bis Terahertz werden elektromagnetische Wellen als Funkwellen bezeichnet. Hierbei handelt es sich um auf Funkwellen basierte

Systeme. Zu diesen gehören beispielsweise Wireless Local Area Network (WLAN), Radio Frequency Identification (RFID), Bluetooth und Ultra-Wideband (UWB). Bei elektromagnetischen Wellen im Bereich von Terahertz bis Petahertz wird von den sogenannten Lichtwellen gesprochen. Genauer werden diese Frequenzbereiche auch als Infrarot (IR)- und Ultraviolett (UV)- Bereiche bezeichnet. Innerhalb dieser Frequenzbereiche befindet sich auch der Bereich des sichtbaren Lichts. Systeme zur Innenraum-Lokalisierung die auf Lichtwellen basieren sind z.B. Leuchtdiodensysteme (Light- Emitting Diode, LED), Laser, Kamara oder Infrarot [2].

### **2.1.2. Lokalisierung mit akustischen Wellen**

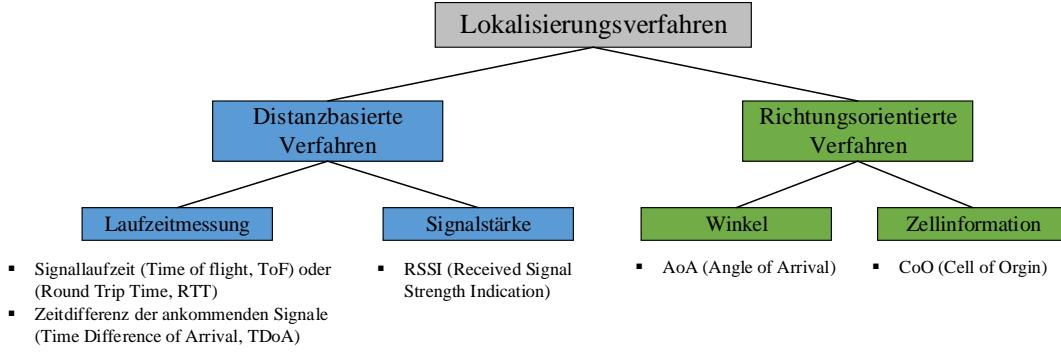
Für die Innenraum-Lokalisierung können nicht nur elektromagnetische Wellen, sondern alternativ auch akustische Wellen eingesetzt werden. Eine Möglichkeit ist dabei akustische Wellen außerhalb des Wahrnehmungsbereich des Menschen (20 Hz bis ca. 20 kHz) einzusetzen. Dieser Bereich beginnt bei ungefähr  $> 20$  kHz und wird auch als Ultraschall bezeichnet. Im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen haben akustische Wellen eine geringere Ausbreitungsgeschwindigkeit. Dadurch ist beispielsweise die Verarbeitung der Signale vereinfacht [2].

### **2.1.3. Sonstige Lokalisierungstechnologien**

Zu den sonstigen Technologien zählt die Inertial Measurement Unit (IMU). Sie besteht vorwiegend aus 3-Achsen Drehraten-, Beschleunigungs- und Magnetfeldsensoren. Eine IMU wird hauptsächlich zur Unterstützung der oben genannten Technologien eingesetzt, da der Fehler der relativen Positions berechnung mit der Zeit zunimmt. Aus diesem Grund ist bei zeitlich längeren Distanzmessungen eine Lokalisierung mit hoher Genauigkeit ohne absolute Position nicht möglich [2].

## **2.2. Lokalisierungsverfahren**

Für die Entwicklung eines IPS werden neben den vorgestellten Technologien auch Lokalisierungsverfahren zur Bestimmung der Position benötigt. Diese Verfahren oder auch Techniken unterscheiden sich hauptsächlich in der Art und Weise wie die Position eines zu lokalisierenden Objekts ermittelt wird. Die Bestimmung der Position kann beispielsweise über die gezielte Messung von Distanzen oder Richtungen erfolgen. Abbildung 2.2 zeigt die verschiedenen Lokalisierungstechniken eingeteilt in unterschiedliche Kategorien. Für die in Kapitel 2.1 vorgestellten Technologien werden teils mehrere Verfahren in Kombination angewendet [2].



**Abbildung 2.2.:** Übersicht über die Verfahren zur Innenraum-Lokalisierung [2].

Für die Anwendung dieser Verfahren kann hierzu ein System aus mobilem Tag und mehreren festen Ankerknoten eingesetzt werden. Diese Art der Lokalisierung wird auch als Device-basierte Ortung bezeichnet. Die Ankerknoten werden dabei fest in der Infrastruktur an Decken oder Wänden installiert. Die Messung der Distanz erfolgt zwischen einem Ankerknoten und dem mobilem Tag, welcher sich am zu lokalisierenden Objekt befindet [2, 3].

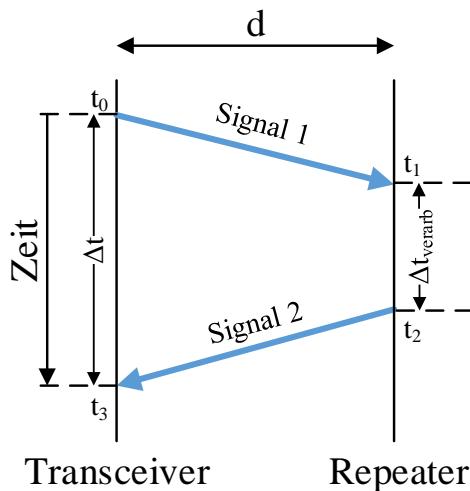
In den folgenden Abschnitten werden die beiden für diese Arbeit wesentlichen Verfahren ToF bzw. RTT und RSSI näher erläutert.

### 2.2.1. Ortung über die Signallaufzeit (ToF bzw. RTT)

Eine Möglichkeit die Distanz zwischen einem Sender und einem Empfänger zu bestimmen, ist die Messung der Signallaufzeit. Als Laufzeit  $\Delta t$  wird die zeitliche Differenz zwischen gesendetem und empfangenem Paket bzw. Signal bezeichnet. Für die Berechnung der Distanz wird zudem die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c$  der akustischen oder elektromagnetischen Welle benötigt. Die Distanz  $d$  kann mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

$$d = \Delta t \cdot c \quad (2.1)$$

Wird nur ein Signal von Sender zu Empfänger gesendet, handelt es sich um das Verfahren ToF. Bei dieser Technik zur Distanzmessung ist entscheidend, den Sendee- und Empfangszeitpunkt exakt zu bestimmen. Dies wird durch eine zeitliche Synchronisation von Sender und Empfänger realisiert, da schon die kleinsten Abweichungen in der Zeit zu großen Ungenauigkeiten führen können. Die Anforderungen an Systeme welche auf Funkwellen basieren sind dabei besonders hoch, da sich die elektromagnetischen Wellen mit Lichtgeschwindigkeit (ca.  $3 \cdot 10^8$  m/s) fortbewegen. Die präzise Synchronisation von akustischen Systemen ist aufgrund der niedrigeren Ausbreitungsgeschwindigkeit von Schall (bei Raumtemperatur ca. 343 m/s) vereinfacht [2].



**Abbildung 2.3.:** Messprinzip der Signallaufzeitmessung mit RTT [2].

Ein Verfahren welches keiner Synchronisation von Sender und Empfänger bedarf, ist die Lokalisierung über die Signallaufzeit mithilfe der Round Trip Time (RTT). Das Messprinzip, auch „Ping-Pong-Prinzip“ oder Zweiwegemessung genannt, ist in Abbildung 2.3 dargestellt. Bei dieser Methode werden zwei Signale gesendet. Wie Abbildung 2.3 zeigt, sendet der Transceiver das erste Signal an den Repeater. Dieser antwortet nach einer internen Verarbeitungszeit  $\Delta t_{verarb}$  mit dem zweiten Signal. Die Sende- und Empfangszeiten  $t_0$ -  $t_3$  werden auch als Zeitstempel bezeichnet. Diese werden vom Transceiver und Repeater aufgenommen, wobei der Repeater seine beiden Zeitstempel mit dem zweiten Signal zum Transceiver zurücksendet. Um nun die Distanz berechnen zu können, muss zunächst die reine Signallaufzeit  $\Delta t_{ges}$  mit:

$$\Delta t_{ges} = \Delta t - \Delta t_{verarb} \quad (2.2)$$

berechnet werden. Mithilfe der reinen Signallaufzeit kann die Distanz  $d$  mit der folgenden Gleichung bestimmt werden:

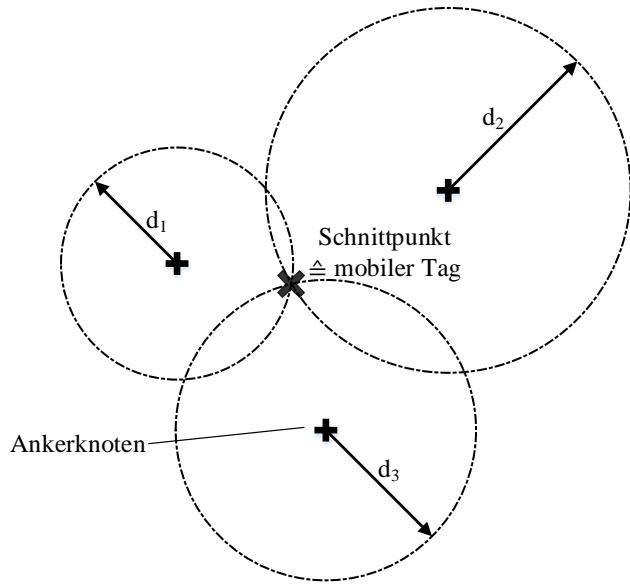
$$d = \frac{\Delta t_{ges} \cdot c}{2} \quad (2.3)$$

Dieses relativ genaue Verfahren wird beispielsweise als Sonderform beim Radar oder auch bei Lasersystemen angewendet. Der Repeater ist hierbei ein einfacher Reflektor. Die Reflektion an einem Objekt ermöglicht somit die Distanzmessung [2].

### 2.2.1.1. Positionsbestimmung mithilfe der Lateration

Um die genaue Position berechnen zu können wird die sogenannte Lateration angewendet. Für die exakte Ortung eines mobilen Tags bzw. Objekts in einer zweidimensionalen Ebene werden mindestens drei Distanzen von drei fixen Ankerknoten

benötigt. Abbildung 2.4 zeigt den Spezialfall der Trilateration mit drei Ankerknoten bzw. auch Referenzpunkte genannt.



**Abbildung 2.4.:** Ermittlung der Position eines mobilen Tags mithilfe von Trilateration [2].

Für jede gemessene Distanz  $d$  eines Knotens wird ein Distanzkreis gebildet. Der gesuchte Punkt und somit die Position des mobilen Objekts befindet sich im Schnittpunkt dieser Kreise. Werden mehr als drei Ankerknoten verwendet wird dies als Multilateration bezeichnet. Diese ermöglicht beispielsweise eine höhere Messgenauigkeit im 2D Fall oder bietet die Möglichkeit Positionen im 3D-Raum zu bestimmen [2].

## 2.2.2. Ortung über die Signalstärke (RSSI)

Ein weiteres Verfahren Distanzen zwischen Sender und Empfänger zu bestimmen, bietet die Messung bzw. Auswertung der Signalstärke. Eine elektromagnetische Welle mit einer bekannten Sendeleistung wird vom Sender zum Empfänger geschickt. Durch die Dämpfung der Welle im Medium wird das Signal mit zunehmender Strecke abgeschwächt. Um die Distanz zwischen Funksender und Funkempfänger bestimmen zu können, wird die sogenannte Friis-Gleichung verwendet [5]:

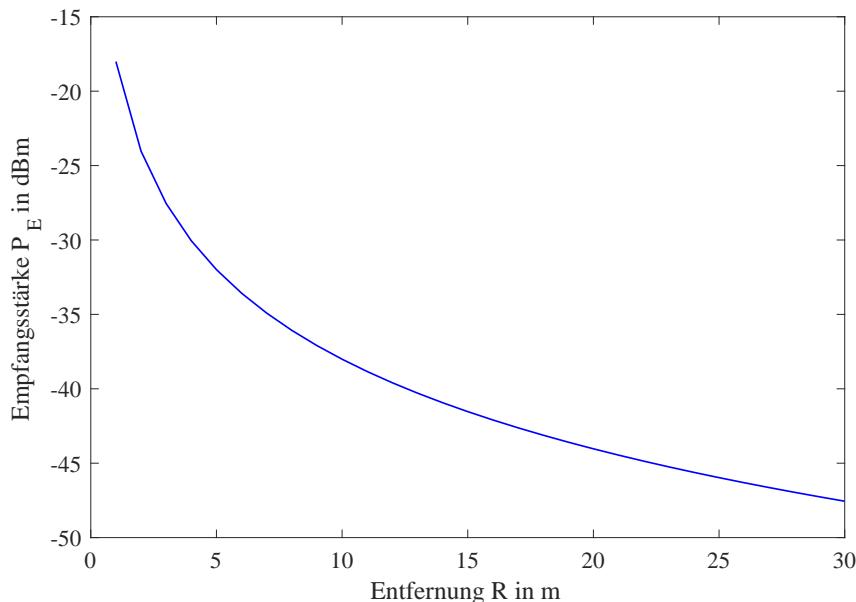
$$P_E = G_S \cdot G_E \cdot P_S \cdot \left( \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot R} \right)^2 \quad (2.4)$$

- mit:  $f$  = Frequenz in Hz  
 $R$  = radialer Abstand zur Sendeantenne in m  
 $c$  = Lichtgeschwindigkeit im Medium in m/s  
 $P_E$  = empfangene Wirkleistung  
 $P_S$  = gesendete Wirkleistung  
 $G_E$  = Antennengewinn des Empfängers  
 $G_S$  = Antennengewinn des Senders

Hier werden die ins System eingekoppelten Leistungsparameter betrachtet. Wird für die Antennen ein isotroper Kugelstrahler ( $G_E = G_S = 1$ ) angenommen, handelt es sich beim Verhältnis von  $P_E / P_S$  um die sogenannte Freiraumdämpfung  $L_{Frei}$ . Über diese kann die Distanz  $R$  mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$R = \frac{c}{4 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{L_{Frei}}} \quad (2.5)$$

Abbildung 2.5 zeigt die empfangene Wirkleistung  $P_E$  in dBm in Abhängigkeit der Distanz  $R$  mit  $P_S = 10$  dBm,  $G_S = G_E = 1,6$  dBi,  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s und  $f = 868$  MHz (siehe Gleichung 2.4).



**Abbildung 2.5.:** Empfangene Signalstärke in Abhängigkeit der Distanz.

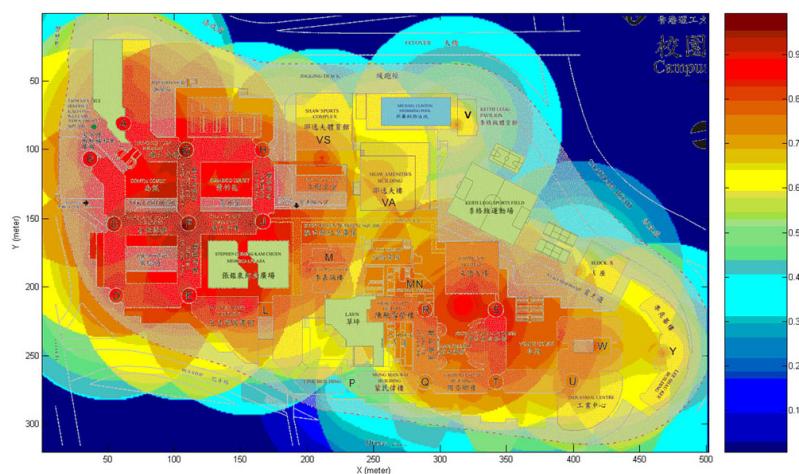
Für kurze Distanzen liefert die Friis-Gleichung eine gute Abschätzung über die Distanzen. Bei größer werdender Distanz jedoch zeigt sich der Nachteil dieses Verfahrens. Die Kurve wird sichtlich flacher, was zu einer kleiner werdenden Sensitivität des Systems führt. Dies führt zu großen Ungenauigkeiten und macht die Distanzmessung teilweise unbrauchbar. Für reale Anwendungen im Innenraum gibt es durch die

## 2.3 Anforderungen an ein Indoor-Ortungssystem (IPS)

sogenannte Mehrwegeausbreitung zusätzlichen Einfluss auf die Signalstärke. Auch die Abstrahlcharakteristik von Antennen spielt bei diesem Verfahren eine wichtige Rolle, da je nach Winkel oder Ausrichtung der Empfangs- und Sendeantenne die Signalstärke variieren kann [2].

### 2.2.2.1. Fingerprinting

Beim Fingerprinting wird eine sogenannte RSSI-Signatur erstellt. Die RSSI-Signatur sind gemessene RSSI-Werte an bestimmten Punkten eines Raumes oder Gebietes, welche in einer Datenbank oder Karte dargestellt werden. Ein Beispiel einer solchen Karte zeigt Abbildung 2.6. Die Position kann dabei ermittelt werden, indem der aktuell gemessene RSSI-Wert eines mobilen Tags mit den Werten der aufgenommenen Datenbank verglichen wird [4].



**Abbildung 2.6.:** RSSI- Signatur bzw. RSSI-Verteilung dargestellt an einem Raumplan an der Universität Hong Kong [6].

Dieses Verfahren findet hauptsächlich Anwendung bei der Indoor-Lokalisierung mit Wi-Fi wie z.B dem WLAN oder auch bei Bluetooth. Der Nachteil des Fingerprinting liegt jedoch darin, dass durch dynamische Veränderungen im aufgenommenen Raum die RSSI-Signatur immer wieder neu aufgenommen und kalibriert werden muss.

## 2.3. Anforderungen an ein Indoor-Ortungssystem (IPS)

### 2.3.1. Messgenauigkeit

Eine der wichtigsten Eigenschaften eines Indoor-Ortungssystems ist die Messgenauigkeit bei der Bestimmung einer Position. Diese wird definiert als Summe aller Messab-

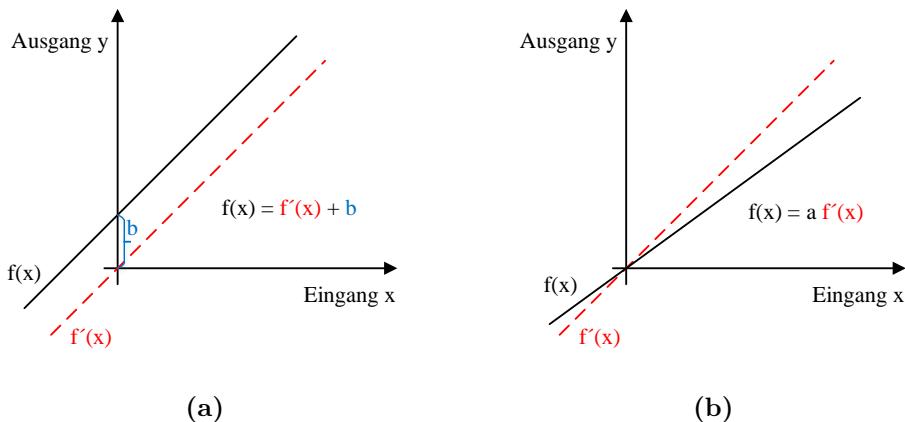
weichungen, welche in einem Messsystem auftreten können [7]. Das heißt ausgehend von einem Erwartungswert weicht der gemessene Wert durch Abweichungen ab. Die geforderte Positionsgenauigkeit eines Innenraum-Lokalisierungssystems kann sich je nach Anwendung unterscheiden. Die Genauigkeit um beispielsweise ein Restaurant oder ein Geschäft in einem großen Einkaufszentrum zu finden, liegt im Bereich von mehreren Metern. Im Gegensatz dazu ist in einem Supermarkt eine Lokalisierungsgenauigkeit im Dezimeterbereich notwendig, um zum Beispiel einzelne Produkte finden zu können.

Die absolute Messabweichung  $\Delta x$  ist die Differenz aus den Messwerten  $x$  und dem wahren Wert  $x_W$  [7]:

$$\Delta x = x - x_W \quad (2.6)$$

Die Summe aus systematischen Messabweichungen  $\Delta x_s$  und den zufälligen Messabweichungen  $\Delta x_r$  stellt die absolute Messabweichung  $\Delta x$  dar.

### Systematische Messabweichung $\Delta x_s$



**Abbildung 2.7.:** a) Offsetfehler (Nullpunktfehler) einer Messung [2]. b) Skalierungsfehler einer Messung [2].

Systematische Messabweichungen treten infolge des Messverfahrens, der Messanordnung oder auch durch die jeweiligen Messbedingungen wie beispielsweise Temperaturinflüsse auf. Wird eine Messung am gleichen System unter den gleichen Bedingungen wiederholt, tritt die Abweichung immer in der gleichen Größenordnung und mit dem selben Vorzeichen auf. Die systematische Messabweichung kann nur dann bestimmt werden, wenn genauere Messverfahren oder Messgeräte verwendet werden. Systematische Messabweichungen sind zum Beispiel der Skalierungsfehler oder auch der Offsetfehler (Nullpunktfehler). Diese beiden sind in Abbildung 2.7. dargestellt. Wird die jeweilige systematische Abweichung festgestellt, so kann sie im System miteinbezogen und somit kompensiert werden [7, 8].

### Zufällige Messabweichung $\Delta x_r$

Bei den zufälligen Messabweichungen streuen die gemessenen Messwerte aufgrund von zufälligen Abweichungen um einen Erwartungswert  $\mu$ . Im Gegensatz zum systematischen Fehler ist das Vorzeichen und auch die Größe der Messabweichung nicht immer gleich. Ursache dafür sind nicht beeinflussbare Faktoren wie zum Beispiel Umwelteinflüsse (Temperaturschwankungen) oder veränderte Messbedingungen. Dazu gehört beispielsweise auch das thermische Rauschen von elektronischen Bauteilen. Bei der Streuung der Messwerte um den Erwartungswert  $\mu$  handelt es sich um eine statistische Verteilung, einer Gaußschen Normalverteilung. Diese Normalverteilung zeigt in ihrer Darstellung wie häufig beziehungsweise wahrscheinlich es ist, dass ein gemessener Messwert  $x_i$  vorkommt. Um den Erwartungswert  $\mu$  bestimmen zu können, müssten unendliche viele Messwerte bestimmt werden. Da dies in der Praxis nicht der Fall ist, werden durch N Messungen der sogenannte arithmetische Mittelwert  $\bar{x}$  bestimmt [7, 8]:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2.7)$$

Um nun ein Maß dafür zu bekommen, wie stark die Streuung der N Messwerte  $x_i$  gegenüber dem Mittelwert  $\bar{x}$  ist, wird die sogenannte Standardabweichung  $\sigma$  betrachtet. Diese wird mit der folgenden Gleichung berechnet [7]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N-1} \cdot \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.8)$$

Bei einer Standardabweichung von einem  $\sigma$  liegen nach der Normalverteilung 68% der Messwerte innerhalb von  $\bar{x} \pm \sigma$ .

### 2.3.2. Reichweite

Die Reichweite beziehungsweise auch Raumabdeckung ist ein wichtiges Merkmal eines Innenraum-Lokalisierungssystems. Dies bedeutet, je größer die Reichweite eines Systems ist, desto weniger Systeme müssen eingesetzt werden um in einem fest definierten Bereich oder Raum lokalisieren zu können. Die Raumabdeckung wird in drei Kategorien unterteilt:

- Lokale Raumabdeckung
- Vergrößerbare Raumabdeckung
- Globale Raumabdeckung

Die lokale Raumabdeckung beschränkt sich auf einen nicht erweiterbaren Raum oder bestimmten Bereich. Im Gegensatz dazu kann bei der vergrößerbaren Raumabdeckung der Bereich erweitert werden. Die Reichweite eines Systems wird beispielsweise durch den Einsatz zusätzlicher Hardware vergrößert. Die globale Raumabdeckung bezieht sich auf die globale Lokalisierung oder gar Navigation wie es beispielsweise bei GPS der Fall ist [9].

### 2.3.3. Latenzzeit des Systems

Bei Anwendungen von Lokalisierungssystemen im Sicherheitsbereich wie der Rettung von Menschen aus brennenden Häusern oder auch bei der Überwachung von Patienten in Krankenhäusern, ist es wichtig, dass dem Benutzer eines Systems möglichst schnell die gemessenen Positionen zur Verfügung gestellt werden. Das bedeutet kurze, definierte Antwortzeiten beziehungsweise Verzögerungszeiten zur Bereitstellung der Systemdaten sind für zeitkritische Anwendungsfälle von großer Bedeutung. Es gibt jedoch Anwendungsfälle, bei welchen eine Lokalisierung mit kurzen Antwortzeiten nicht benötigt wird [9].

### 2.3.4. Verfügbarkeit

Bei der Verfügbarkeit wird angegeben, in wie viel Prozent der Zeit das Lokalisierungssystem zur Verfügung steht beziehungsweise erreicht werden kann. In dieser Zeit muss die geforderte Messgenauigkeit des Systems immer gewährleistet sein. Limitierende Einflüsse auf die Verfügbarkeit sind zum Beispiel Kommunikationsfehler bei der Übertragung von Daten oder auch Überlastungen des Systems. Kommt es beispielsweise zu Ausfällen aufgrund von Wartungsarbeiten, so wird auch dadurch die Verfügbarkeit minimiert. Es gibt drei verschiedene Level der Verfügbarkeit [9]:

- Geringe Verfügbarkeit: <95%
- Normale Verfügbarkeit: >99%
- Hohe Verfügbarkeit: >99,9%

## 2.4. Ultra-Wideband

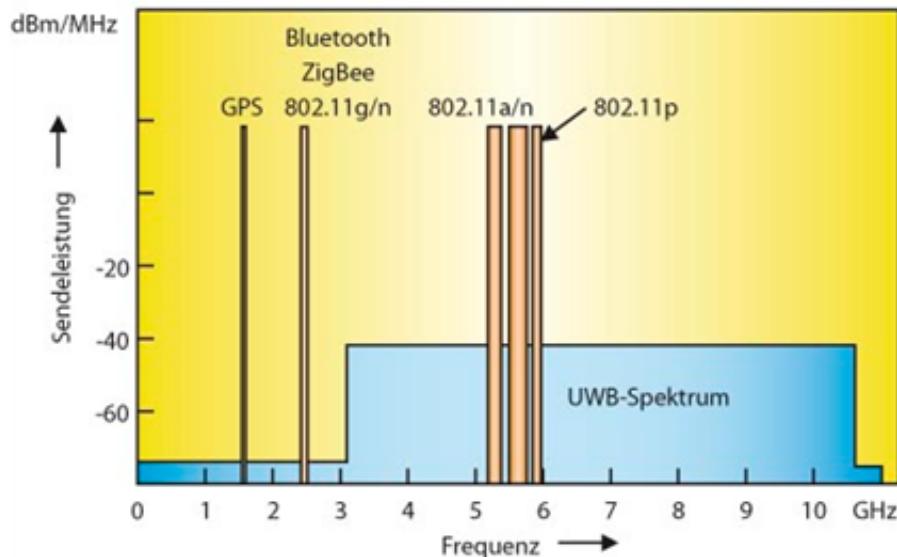
### 2.4.1. Einführung

Die Bedeutung von drahtlosen Kommunikationssystemen hat in den letzten Jahren immer mehr zugenommen. Auch in Zukunft ist zu erwarten, dass der Markt stetig wächst da der Bedarf an drahtlosen Diensten steigt. Dies führt dazu, dass neue Funktechnologien entstehen müssen, welche ermöglichen flexibel Datenraten bereitzustellen. Das eröffnet breite Anwendungsmöglichkeiten in den Bereichen Video, Datenkommunikation und auch im Bereich der Lokalisierung. Das Problem besteht jedoch darin, dass heutzutage das gesamte Frequenzspektrum durch viele schmalbandige Funktechnologien wie zum Beispiel GSM, 3G, LTE, oder auch Bluetooth zunehmend belegt ist. Die Frequenz und auch die jeweilige Sendeleistung in einem Funkspektrum sind Ressourcen, die immer kostbarer werden. Um aber hohe Datenraten erreichen zu können, ist es notwendig die Bandbreite des Frequenzspektrums zu erhöhen. Dies zeigt das sogenannte Shannon-Theorem (Gleichung 2.9). Hier wird

der Zusammenhang zwischen der Bandbreite  $B$ , des Signal zu Rausch Verhältnis  $SNR$  und der Kanalkapazität  $C$  einer Funkübertragung dargestellt. Bei der Kanalkapazität handelt es sich dabei um die maximal mögliche Datenübertragungsrate in bit/s [10, 11].

$$C = B \cdot \log_2(SNR) \quad (2.9)$$

Die maximale Datenrate kann entweder linear mit einer höheren Bandbreite oder logarithmisch mit einer Erhöhung des Signal zu Rausch Verhältnis vergrößert werden. Die Erhöhung der Bandbreite erweist sich jedoch als schwierig, da es dadurch zu Interferenzen mit den bereits bestehenden schmalbandigen Spektren kommen kann.



**Abbildung 2.8.:** Frequenzbereich und maximale Sendeleistung von Ultra-Wideband [12].

Ein Lösungsansatz besteht dennoch darin, die Sendeleistung so niedrig zu halten, dass die breitbandige Funktechnologie mit den anderen schmalbandigen etablierten Technologien co-existieren kann (siehe Abbildung 2.8). Diese Lösung bietet die Ultra-Wideband Kommunikation. Hierbei handelt es sich um eine Funktechnologie bei welcher Signale mit geringer Sendeleistung gepulst abgestrahlt werden. Dies führt zu einer hohen Bandbreite und ermöglicht hohe Datenraten im Bereich von Mbit/s bis Gbit/s [11, 13].

## 2.4.2. Definition von Ultra-Wideband

Die amerikanische Regulierungsbehörde Federal Communication Commission (FCC) legte im Jahr 2002 Regeln für die freie Nutzung der Ultra-Wideband Technologie

fest. Dabei wurde das Frequenzband, sowie auch das maximal ausgesendete Leistungsdichtespektrum festgelegt. Die FCC definiert Ultra-Wideband als ein Signal mit einer absoluten Bandbreite  $B$  von [11, 13]:

$$B \geq 500 \text{ MHz} \quad (2.10)$$

Zudem muss die **relative Bandbreite**  $B_f$  größer als 0,2 sein. Die relative Bandbreite wird mit der folgenden Gleichung berechnet [11]:

$$B_f = 2 \cdot \frac{f_H - f_L}{f_H + f_L} \quad (2.11)$$

Die Mittenfrequenz  $f_c$  des Spektrums kennzeichnet den Punkt des Systems mit der maximalen Leistungsdichte und wird definiert als [11]:

$$f_c = \frac{f_H + f_L}{2} \quad (2.12)$$

Bei den beiden oberen und unteren Frequenzen  $f_H$  und  $f_L$  handelt es sich um die Punkte des Frequenzspektrums bei welchem das maximale Leistungsdichtespektrum um 10 dB abgesunken ist.

### 2.4.3. Regulierung von UWB

Da durch die breitbandige Abstrahlung von UWB-Signalen Interferenzen mit anderen schmalbandigen Technologien entstehen können, wird diese Technologie durch strenge Bestimmungen reguliert. Um andere Systeme nicht zu stören wurden zum Beispiel für die folgenden Punkte Regulierungen festgelegt [11]:

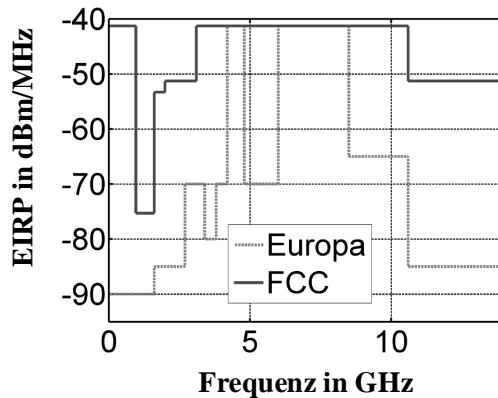
- Anwendung in oder außerhalb von Gebäuden
- Verwendbarer Frequenzbereich
- Grenzwerte des Leistungsdichtespektrums
- Schutzmaßnahmen gegen Interferenzen

Für die Regulierung von UWB in den Vereinigten Staaten ist die FCC zuständig [14]. Im europäischen Raum reguliert die ECC die Ultra-Wideband Kommunikation [15]. Dies zeigt, dass noch keine weltweit einheitliche Regulierung besteht. In den 2002 erstmals festgelegten Regulierungen der FCC wurde der Frequenzbereich für die Anwendung von UWB im Innenraum auf 3,1 GHz bis 10,6 GHz festgelegt (siehe Abbildung 2.8). Die maximal zulässige isotrop abgestrahlte Leistung EIRP (Equivalent Isotropically Radiated Power) im Innenraum wird dabei in Tabelle 2.1 dargestellt. Im nutzbaren Frequenzbereich liegt der EIRP-Wert bei -41,3 dB/MHz.

**Tabelle 2.1.:** Übersicht der maximal zulässigen isotrop abgestrahlten Leistung EIRP der FCC für den Innenraum [14].

Frequenzbereich in GHz	EIRP in dBm/MHz
0- 0,96	-41,3
0,96- 1,61	-75,3
1,61- 1,99	-53,3
1,99- 3,1	-51,3
3,1- 10,6	-41,3
>10,6	-51,3

Die europäische Regulierung von 2006 (ECC/DEC/(06)04) beschreibt zwei verschiedene Frequenzbänder für die Nutzung von UWB in Innenräumen bei einem EIRP von -41,3 dBm/MHz. Es handelt sich um die beiden Bereiche 4,2 GHz bis 4,8 GHz und 6,0 GHz bis 8,5 GHz [15].

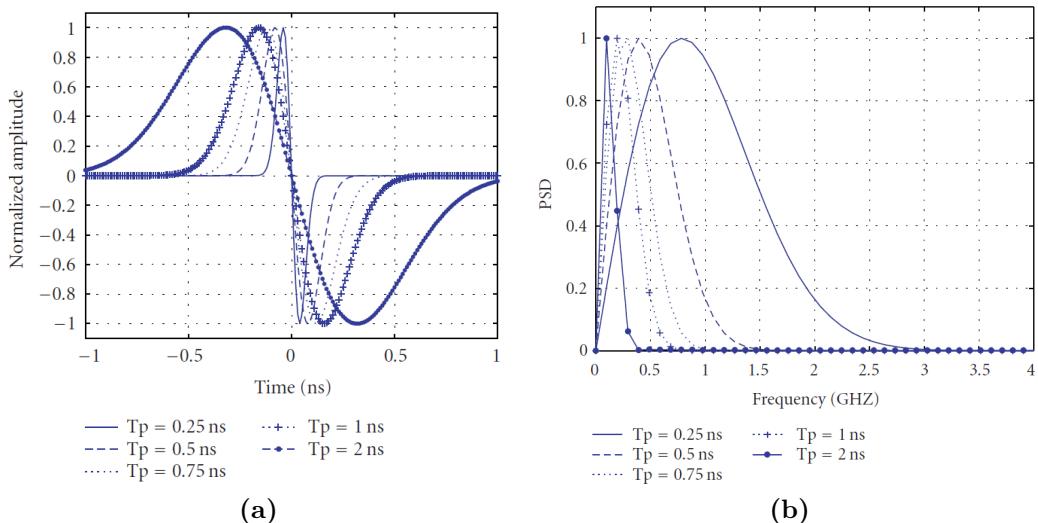


**Abbildung 2.9.:** Vergleich der UWB-Regulierung von Europa und den Vereinigten Staaten [11].

Wobei im Bereich von 4,2 GHz bis 4,8 GHz seit 2011 Schutzmaßnahmen zur Vermeidung von Interferenzen getätigt werden müssen. Der zweite Frequenzbereich ist von dieser Regelung nicht betroffen und kann weiterhin ohne Schutzmaßnahmen verwendet werden. Ein Vergleich der EIRP- Werte in Abhängigkeit der Frequenz für die Vereinigten Staaten (FCC) und Europa (ECC) zeigt Abbildung 2.9. Zu sehen ist, dass die Regulierungen im europäischen Raum sehr viel stärker sind als die in den Vereinigten Staaten [11, 15].

## 2.4.4. Impulse Radio UWB

Zur Erzeugung eines UWB-Signals werden verschiedene Impulserzeugungstechniken eingesetzt. Diese müssen die Regulierungen aus Kapitel 3.1.3 einhalten. Dazu gehört die Grenzwerte der isotrop abgestrahlten Leistung sowie auch den vorgegebenen Frequenzbereich nicht zu übertreten. Eine Möglichkeit ein UWB-Signal zu erzeugen bietet das Impulse Radio Konzept. Dieses kommt in vielen UWB-Systemen zum Einsatz und wird auch als IR-UWB bezeichnet. Beim Impulse Radio wird eine Folge von ultrakurzen Impulsen erzeugt. Diese Impulse haben eine Zeitdauer im Bereich von mehreren hundert Picosekunden. Jeder einzelne kurze Impuls hat nicht nur eine breite Bandbreite (Ultra-Wideband) im Frequenzbereich, sondern durch die Regelung der abgestrahlten Leistung von Ultra-Wideband auch eine niedrige Energie. Bei den kurzen Impulsen handelt es sich beispielsweise um kurze Gaußsche Impulse (Monocycles). Es sind jedoch auch andere Pulsformen möglich. Einzige Bedingung ist, die in Abbildung 3.1 dargestellte Maske der FCC beziehungsweise des FCC einzuhalten [11, 13].



**Abbildung 2.10.:** a) Gaußsche Monocycles bei verschiedenen Pulslängen  $T_p$  im Zeitbereich [16]. b) Gaußsche Monocycles bei verschiedenen Pulslängen  $T_p$  im Frequenzbereich [16].

Bei der Übertragung von Daten werden  $N$  dieser Monocycles für die Darstellung eines einzigen Bits verwendet. Abbildung 2.10.(a) zeigt mehrere Gaußsche Monocycles mit verschiedenen Pulslängen im Zeitbereich. In Abbildung 2.10.(b) sind die Impulse im Frequenzbereich dargestellt, wobei der PSD-Wert (Power Spectral Density) über der Frequenz aufgetragen ist [11, 13].

Die Modulation der Daten wird beispielsweise über Verfahren wie Pulse Position Modulation (PPM), Pulse Amplitude Modulation (PAM) oder auch durch eine BPM/B-

PSK Modulation (Burst Position Modulation/Binary Phase-Shift Keying) realisiert. IR-UWB hat den Vorteil, dass die Impulse direkt im Basisband auf die Antenne gegeben werden kann. Es wird also keine Trägerfrequenz benötigt, bei welcher die Information aufmoduliert werden müsste. Dies führt zu preiswerten Systemen mit einfachem Aufbau [13].

## 2.4.5. IEEE 802.15.4-2011 Paket Struktur

Bei einer Datenkommunikation zwischen Sender und Empfänger werden mit Ultra-Wideband Pakete nach dem IEEE 802.15.4-2011 Standard gesendet und empfangen. Die UWB-Paket Struktur zeigt Abbildung 2.11. Das Paket startet mit dem Synchronisations-Header (**SHR**). Dieser Header beinhaltet die Präambel und den SFD (**Start of Frame Delimiter**). Direkt nach der Synchronisation kommt der PHR-beziehungsweise PHY-Header (**Physical Layer**). Dieser definiert Eigenschaften wie beispielsweise die Länge und Datenrate der Payload Daten. Der PHY-Header hat eine Länge von 19 Bits. Diese Bits werden mithilfe der BPM/ BPSK-Modulation moduliert [17, 18].

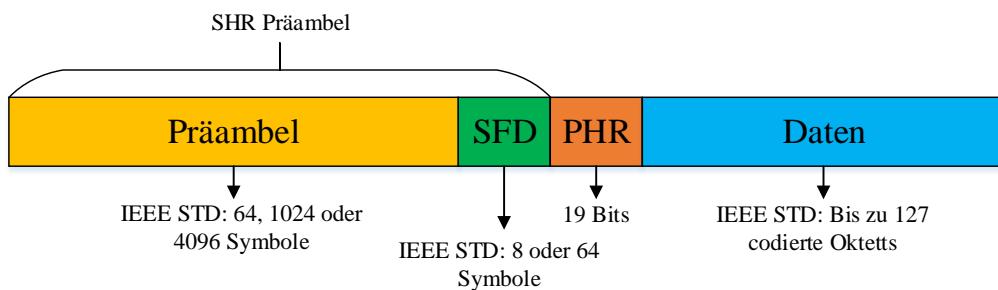


Abbildung 2.11.: Struktur eines UWB- Pakets nach IEEE 802.15.4-2011 [17].

### 2.4.5.1. Synchronisations-Header (**SHR**)

Wie bereits erwähnt besteht der Synchronisations-Header aus Präambel und SFD. Bei dieser Sequenz wird keine BPM/BPSK Modulation eingesetzt, sondern einzelne Impulse gesendet. Ein Symbol des Headers besteht aus ungefähr 500 „chip“ Zeitintervallen. Jedes chip-Intervall hat eine Frequenz von 499,2 MHz, in welchem entweder ein negativer, postiver oder gar kein Impuls gesendet wird. In Abhängigkeit der PRF (**Pulse Repetition Frequency**), also der Frequenz bei welcher die Impulse wiederholt werden, werden unterschiedliche viele „chip“ Zeitintervalle für ein Symbol gesendet. Für die festgelegten PRF-Frequenzen von 16 MHz und 64 MHz bestehen entweder 496 oder 508 „chip“ Zeitintervalle [17, 18].

## Präambel

Die sogenannte **Präambel** wird zur **Synchronisation** der Systeme verwendet. Sie kennzeichnet den Start eines ankommenden Datenpakets. Die Präambellänge können nach dem IEEE 802.15.4-2011 Standard 16, 64, 1024 oder 4096 Symbole sein. Die einzelnen Impulse, welche während eines Symbolintervalls gesendet werden sind feste, vorgegebene Zahlenfolgen die auch als Präambelcode bezeichnet werden. Dieser Präambelcode hat je nach PRF entweder eine Bitfolgelänge von 31 (16 MHz) oder 127 (64 MHz). Die Präambelcodes nach IEEE 802.15.4-2011 für eine PRF von 16 MHz sind in Tabelle 2.2 dargestellt. In Abhängigkeit der verwendeten Ultra-Wideband Frequenz (Sendekanal) wird einer dieser Codes verwendet [17, 18].

**Tabelle 2.2.:** Übersicht der Präambelcodes beziehungsweise der gesendeten Impulse während eines Symbolintervalls bei einer PRF von 16 MHz. Die Länge eines Präambelcode beträgt 31 und je nach verwendeter Ultra-Wideband Frequenz wird ein anderer Index eingesetzt [17].

Index	Präambelcode
1	-1000010-1011101-10001-111100-110-100
2	0101-10101000-1110-11-1-1-10010011000
3	-11011000-11-11100110100-10000-1010-1
4	00001-100-100-1111101-1100010-10110-1
5	-101-100111-11000-1101110-1010000-00
6	1100100-1-1-11-1011-10001010-11010000
7	100001-101010010001011-1-1-10-1100-11
8	0100-10-10110000-1-1100-11011-1110100

Bei dieser Präambel Folge handelt es sich um eine perfekt periodische Autokorrelation. Diese Besonderheit des HF-Kanal führt dazu, dass der kohärente Empfänger die Impulsantwort genau bestimmen kann. Dies bietet Vorteile für die Lokalisierung, da der Empfänger das erste empfangene Signal genau auflösen kann. Die Ankunftszeit kann dadurch auch bei abgeschwächten Signalen genau bestimmt werden [17, 18].

## SFD

Beim SFD (Start of Frame Delimiter) handelt es sich wie auch bei der Präambel um eine Folge von einzelnen negativen oder positiven Impulsen oder gar um keinen Impuls. Die Länge dieser Sequenz ist abhängig von der Datenrate des Systems. Bei einer Datenrate von 110 kbit/s wird eine Folge von 64 Symbolen gesendet, bei allen anderen Raten eine Länge von 8 Symbolen. Die SFD Sequenz kennzeichnet den Anfang des PHR. Das heißt ab diesem Zeitpunkt wird präzise auf

eine BPM/BPSK-Modulation geschaltet. Für Lokalisierungsanwendungen wird genau dieser Zeitpunkt, während der Symbolzeit des SFD, genutzt um den genauen Zeitstempel beim Senden und Empfangen eines UWB-Pakets zu bestimmen. Die beiden SFD-Bitfolgen für ein Symbol nach dem IEEE 802.15.4-2011 Standard sind in Tabelle 2.3 dargestellt [17, 18].

**Tabelle 2.3.:** Übersicht der SFD Sequenzen bei verschiedenen Datenraten. Für eine Datenrate von 110 kbit/s wird die Sequenz der Länge 64 verwendet, bei allen anderen eine Sequenz von 8 [17].

Symbol-länge	SFD Sequenz
8	0, +1, 0, -1, +1, 0, 0, -1
64	0, +1, 0, -1, +1, 0, 0, -1, 0, +1, 0, -1, +1, 0, 0, -1, -1, 0, 0, +1, 0, -1, 0, +1, 0, +1, 0, 0, 0, -1, 0, -1, 0, 0, -1, 0, 0, +1, 0, -1, -1, 0, -1, +1, 0, 0, 0, +1, +1, 0, 0, -1, -1, -1, +1, -1, +1, +1, 0, 0, 0, +1, +1

## 2.4.6. Ranging Protokoll

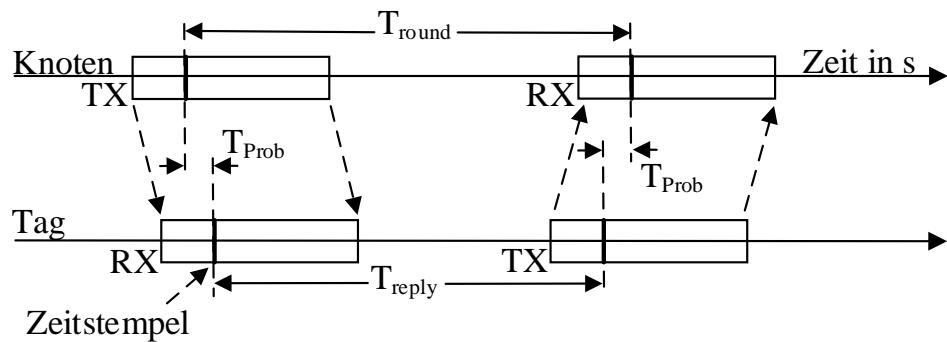
Für die Bestimmung einer Distanz mit Ultra-Wideband wird die in Kapitel 2.2.1 vorgestellte Ortung über die Signallaufzeit mithilfe der Round Trip Time (RTT) verwendet. Es gibt dabei zwei verschiedene Möglichkeiten dieses Lokalisierungsverfahren anzuwenden. Diese werden in den folgenden Abschnitten näher erläutert.

### 2.4.6.1. Einseitige Zweiwegemessung

Das Prinzip der einseitigen Zweiwegemessung (Single-Sided Two-Way Ranging, SS-TWR) beruht auf dem einfachen RTT-Verfahren (Kapitel 2.2.3). Hier sendet der Sender (Knoten) ein Signal, woraufhin der Empfänger (Tag) das Signal empfängt und mit einem weiteren Signal antwortet. Durch die Bestimmung aller Sende- und Empfangszeitstempel können die Signallaufzeiten bestimmt werden. Über die Berechnung der Ausbreitungszeit  $T_{Prop}$  (2.13) kann mithilfe der Lichtgeschwindigkeit  $c$  die Distanz  $d$  zwischen Sender und Empfänger ermittelt werden (2.14). Die einseitige Zweiwegemessung ist nochmals vereinfacht in Abbildung 2.12 dargestellt [18].

$$T_{Prop} = \frac{T_{round} - T_{reply}}{2} \quad (2.13)$$

$$d = T_{Prop} \cdot c \quad (2.14)$$



**Abbildung 2.12.:** Prinzip der einseitigen Zweiwegemessung [18].

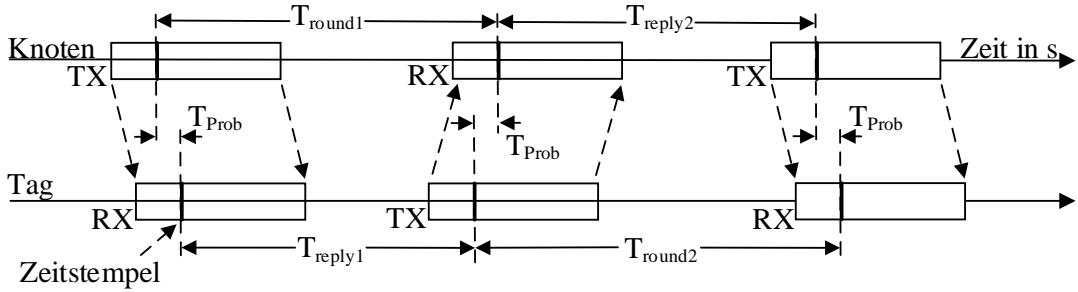
Ein Nachteil dieser Distanzbestimmung ist, dass durch den Offset der Oszillatorkonstante Fehler bei Ermittlung der Zeiten entstehen können. Der Knoten und auch der Tag bestimmen ihre Zeitstempel unabhängig voneinander mit ihrem eigenen Oszillator. Steigt die Zeit  $T_{reply}$ , so wird auch der Fehler bei der Distanzberechnung immer größer. Durch den Offsetfehler des Tags  $e_T$  und den Fehler des Knotens  $e_K$ , lässt sich für den gesamten Zeitfehler die folgende Gleichung aufstellen [18]:

$$\text{Fehler} \approx \frac{e_T - e_K}{2} \cdot T_{reply} \quad (2.15)$$

Dies zeigt, dass der Zeitfehler nur dann klein ist, wenn der Oszillatorkonstante und auch die  $T_{reply}$  niedrig sind. Aus diesem Grund eignet sich dieses Verfahren nur bedingt für Lokalisierungen mit hoher Messgenauigkeit. Eine weitaus bessere Lösung bietet die doppelseitige Zweiwegemessung (Double-Sided Two-Way Ranging, DD-TWR), welche im nächsten Abschnitt näher erläutert wird.

#### 2.4.6.2. Doppelseitige Zweiwegemessung

Bei der Methode der doppelseitigen Zweiwegemessung werden insgesamt drei Nachrichten zwischen einem Knoten und einem Tag ausgetauscht. Das bedeutet, dass zwei Umlaufzeiten  $T_{round}$  und zwei Rückantwortzeiten  $T_{reply}$  mithilfe von sechs Zeitstempeln bestimmt werden können. Das Prinzip der doppelseitigen Zweiwegemessung zeigt Abbildung 2.12. Die Ausbreitungszeit  $T_{prop}$  lässt sich entweder mit einer sogenannten asymmetrischen Formel oder wie in 2.4.6.1 mit einer symmetrischen Formel berechnen [18].



**Abbildung 2.13.:** Prinzip der doppelseitigen Zweiwegemessung unter Verwendung von drei Nachrichten [18].

### Asymmetrische Berechnung

Bei der asymmetrischen Berechnung der Ausbreitungszeit  $T_{\text{Prop}}$  ist es nicht notwendig, dass die beiden Zeiten  $T_{\text{reply}1}$  und  $T_{\text{reply}2}$  den selben Wert haben. Dadurch kann der durch den Oszillator initiierte **Offsetfehler** der Frequenz **vernachlässigt werden**. Die Ausbreitungszeit  $T_{\text{Prop}}$  wird mit der folgenden asymmetrischen Gleichung berechnet [18]:

$$T_{\text{Prop}} = \frac{T_{\text{round}1} \cdot T_{\text{round}2} - T_{\text{reply}1} \cdot T_{\text{reply}2}}{T_{\text{round}1} + T_{\text{round}2} + T_{\text{reply}1} + T_{\text{reply}2}} \quad (2.16)$$

Hier muss einzig der Fehler beim aufnehmen der Zeitstempel betrachtet werden. Mit den beiden Fehlerkoeffizienten  $k_T$  und  $k_K$  von Tag und Knoten, den beiden Abweichungen der Frequenz der Oszillatoren (zum Beispiel 20 ppm) von der idealen Frequenz, lässt sich der Gesamtfehler folgendermaßen berechnen [18]:

$$\text{Fehler} = T_{\text{Prop}} \cdot \left( 1 - \frac{k_T + k_K}{2} \right) \quad (2.17)$$

Dieses Verfahren ist geeignet für die Lokalisierung mit hoher Messgenauigkeit. Nachteil ist jedoch, dass bei der Berechnung der Ausbreitungszeit  $T_{\text{Prop}}$  Multiplikationen und Divisionen benötigt werden.

### Symmetrische Berechnung

Bei der symmetrischen Berechnung der Ausbreitungszeit  $T_{\text{Prop}}$  müssen die beiden Zeiten  $T_{\text{reply}1}$  und  $T_{\text{reply}2}$  gleich sein, um keinen Fehler bei der Berechnung zu bekommen. Dies ist in der Praxis jedoch schwer realisierbar. Die Ausbreitungszeit  $T_{\text{Prop}}$  kann symmetrisch mit der folgenden Gleichung berechnet werden [18]:

$$T_{\text{Prop}} = \frac{T_{\text{round}1} - T_{\text{reply}2} + T_{\text{round}2} - T_{\text{reply}1}}{4} \quad (2.18)$$

Einiger Vorteil gegenüber der asymmetrischen Berechnung sind die einfachen mathematischen Rechenoperationen.



# **3. Stand der Forschung und Technik**

## **3.1. Lokalisierungstechnologien**

In den nächsten Abschnitten wird der aktuelle Stand von Wissenschaft und Technik für die Lokalisierung im Innenraum basierend auf den Technologien Laser, Bluetooth und Ultra-Wideband aufgezeigt. Es wird hauptsächlich auf die folgenden Schlüsselerforderungen eingegangen:

- Genauigkeit
- Energieeffizienz
- Reichweite

Diese Anforderungen an ein Innenraum- Lokalisierungssystem werden gezielt beim Vergleich dieser Möglichkeiten betrachtet.

### **3.1.1. Laserortung**

Bei dieser Lokalisierungstechnologie werden Positionen mithilfe von Lichtwellen bestimmt. Der Begriff Laser steht für *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Abhängig vom Anwendungsfall werden Lasertypen aus dem gesamten Lichtspektrum verwendet. Die Distanzen werden hier beispielsweise über die Laufzeit von gesendeten und reflektierten Laserimpulsen (siehe Kapitel 2.2.1) oder auch über konstruktive und destruktive Interferenzen der Lichtwelle ermittelt. Auf Laser basierende Lokalisierungssysteme lassen sich in die folgenden beiden Kategorien unterteilen:

- Selbstständige Laser- Lokalisierung
- Kooperative Laser- Lokalisierung

Bei den selbstständigen Laser-Lokalisierungssysteme handelt es sich um eine Ortung die ausschließlich vom mobilen Objekt initiiert wird. Das bedeutet keine fixen Ankerknoten kommunizieren mit dem mobilen Objekt, sondern die Infrastruktur selbst oder angebrachte reflektierende Landmarken sorgen dafür das Distanzinformationen bezogen werden können. Hauptsächlich wird dabei das LIDAR-Prinzip (Light detection and ranging), auch LaDAR-Prinzip (Laser detection and ranging) genannt, angewendet. Die Umgebung wird durch relative Laserdistanzmessungen aufgenommen bzw. gescannt. Mithilfe von Raumkarten können die Messdaten verwendet werden um die Position des mobilen Objekts zu bestimmen. Werden keine Raumkarten

bereit gestellt, wird auch der sogenannte SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) Algorithmus verwendet. Dieser erstellt gleichzeitig zur Distanzmessung eine Karte der Umgebung. Auf LIDAR basierende kommerzielle 1D Laserdistanzmesssysteme sind beispielsweise Micro LM-100 [19] oder Leica Dista S910 [20] mit einer Genauigkeit von bis zu  $\pm 0,1$  mm. Auch viele Forschungsgruppen wie beispielsweise [21, 22, 23, 24] nutzen die Laser- Lokalisierung basierend auf dem LIDAR- Prinzip speziell im Bereich der Robotik.



**Abbildung 3.1.:** 3D LIDAR + IMU System *Stencil* zur Innenraum- Lokalisierung [25].

Bei der Microsoft *Indoor Localization Competition- IPSN 2016* wurde zudem ein System zur Innenraum-Lokalisierung vorgestellt, welches mit einem 3D-LIDAR und einer IMU arbeitet [26]. Dieses wurde speziell für die zuverlässige Navigation von Robotern in 3D Umgebungen entwickelt. Es arbeitet außerdem mit einem speziellen SLAM Algorithmus. Abbildung 3.1 zeigt das von Zhang et al. entwickelte System *Stencil*. Es besitzt eine Genauigkeit von 0,16 m mit einer Reichweite von bis zu 100 m [25]. Die selbständigen Laser- Lokalisierungssysteme haben den Nachteil, dass bei spiegelnden Oberflächen Probleme bei der Distanzmessung auftreten können. Weitere Nachteile dieser Systeme sind zudem die Größe und auch der Energieverbrauch. Der von Zhang et al. entwickelte *Stencil* ist mit einer Größe von 11,45 cm x 11,18 cm x 5,84 cm für die Befestigung an kleinen mobilen Objekten ungeeignet. Der Energieverbrauch beträgt teilweise über 10 Wh.

Findet eine Kommunikation zwischen dem mobilen Objekt und der Infrastruktur statt, handelt es sich um die kooperativen Laser-Lokalisierungssysteme. Ein System welches nach diesem Prinzip arbeitet, ist beispielsweise das Indoor-GPS (iGPS) von *Nikon* [27]. Es besitzt eine Lokalisierungsgenauigkeit von 0,1 mm bei einem nicht näher benannten Energieverbrauch. Ein weiteres kooperatives System, ist das an der Professur für Elektrische Mess- und Prüfverfahren entwickelte System *GaLocate* [28]. Hier wird ein Laserscanner als Ankerknoten an der Decke befestigt, welcher

den Raum nach mobilen Tags abgesucht. Dieses System hat eine Lokalisierungsgenauigkeit im Millimeter Bereich. Der mobile Tag hat dabei einen Energieverbrauch von 111 mWh. Auch hier sind die Größe und vor allem der Energieverbrauch des Laserscanners ein zu beachtender Nachteil.

#### 3.1.2. Bluetooth

Die Lokalisierung mithilfe von Bluetooth gehört zu den auf Funkwellen basierten Technologien (siehe Kapitel 2.1). Bei Bluetooth handelt es sich um eine standardisierte Funkschnittstelle speziell entwickelt für die Kommunikation von mobilen Endgeräten im Nahfeldbereich. Deshalb findet es beispielsweise Anwendungen bei Freisprechanlagen in Autos oder bei Headsets. Bluetooth arbeitet, wie beispielsweise auch WLAN (IEEE 802.11b), im lizenzenfreien 2,4 GHz ISM- Band. Dies hat den Nachteil, dass es durch konkurrierenden Bänder zu Störungen kommen kann. Für die Innenraum-Lokalisierung war das klassische Bluetooth (BT Classic) aufgrund einer zu langen Scanzeit ( $\sim 10$  s) stets ungeeignet. Die Ortung im Innenraum wurde erst durch das 2010 neu entwickelte Bluetooth Low Energy (BLE) Protokoll möglich. Dieses hat nicht nur einen schnellen Verbindungsauflauf (ms- Bereich), sondern ist durch einen niedrigen Stromverbrauch auch sehr energiesparend. Die maximale Ausgangsleistung des BLE Standard beträgt dabei 1 mW (0 dBm), was zu Reichweiten im Bereich von 5 m bis 10 m führt. Dadurch ist es möglich kleine, kostengünstige und vor allem batteriebetriebene Lokalisierungssysteme zu entwickeln [29, 30, 31].

Bei der Innenraum-Lokalisierung mit BLE werden hauptsächlich Smartphones als mobile Objekte eingesetzt [30, 32, 33, 34]. Dies liegt vor allem daran, dass das BLE Protokoll von nahezu allen Smart-Devices unterstützt wird. Als fixe, an den Decken oder Wänden befestigte Ankerpunkte werden sogenannte BLE Beacons verwendet. Ein Beispiel für einen BLE Beacon ist der von der Firma Estimote entwickelte Estimote Location Beacon (siehe Abbildung 3.2) [35]. Dieser kann mit einer 3 V Knopfzelle (1000 mAh) bei einem Lokalisierungsintervall von 950 ms bis zu 5 Jahre betrieben werden. Dies bedeutet, dass der Energieverbrauch des Beacons etwa 0,0205 mWh beträgt.



Abbildung 3.2.: BLE Beacon der Firma Estimote [36].

Um die Distanz zwischen Beacon und Smartphone zu bestimmen, wird bei dieser Technologie der RSSI- Wert genutzt (siehe Kapitel 2.2.2). Die exakte Positionierung bzw. Ortung wird hauptsächlich mit den beiden Lokalisierungstechniken Fingerprinting (FP) (siehe Kapitel 2.2.2.1) und Trilateration (oder Distanz- basiert) (siehe Kapitel 2.2.1.1) realisiert. Bei der Anwendung des Trilaterationsalgorithmus werden die Distanzwerte mithilfe eines Ausbreitungsmodells der elektromagnetischen Welle (z.B Friisgleichung, siehe Kapitel 2.2.2) ermittelt. Die Lokalisierungsmethode Fingerprinting wurde beispielsweise in [37, 32, 38, 39] und Distanz- basierte Methoden in [32, 33, 34, 31] angewendet. Pei et al. zeigen in ihrer Arbeit eine Lokalisierung mit Fingerprinting und nutzen für die Verbesserung der Zuverlässigkeit und Genauigkeit eine Weibull Wahrscheinlichkeitsverteilung. Die Genauigkeit liegt im Bereich von etwa 4 m bis 6 m [39]. Auch Faragher et al. verwenden zur Lokalisierung von BLE Beacons die FP- Methode mit einer Genauigkeit von 2,6 m bis 4,8 m [37]. Eine Distanz- basierte BLE- Lokalisierung wird in der Arbeit von Thaljaoui et al. realisiert. Hier wird die Position über den speziellen Algorithmus iRingLA (inter Ring Localization Algorithm) ermittelt. Der iRingLa verwendet Ringe anstatt Kreise für die Triangulation [33].

Die Lokalisierung mit Bluetooth Low Energy bietet den Vorteil Ankerknoten mit kleiner Größe zu entwickeln, welche aufgrund des niedrigen Stromverbrauchs mit einer Knopfzelle mehrere Jahre betrieben werden können (Abbildung 3.2). Der Nachteil dieser Lokalisierungstechnologie liegt jedoch darin, dass die Lokalisierungsgenauigkeit mit etwa 2 m bis 6 m für viele Innenraumanwendungen zu ungenau ist.

### 3.1.3. Ultra-Wideband

Bei Ultra-Wideband (UWB) handelt es sich um eine Funktechnologie, welche ursprünglich für die drahtlose Kommunikation, wie z.B. für Anwendungen im Militärbereich, verwendet wurde. Heutzutage wird UWB vermehrt auch zur Innenraum- Lokalisierung und zum Tracking eingesetzt. Im Gegensatz zu den bestehenden schmalbandigen Funktechnologien wie WLAN oder auch GPS, werden UWB-Funkwellen mit einer großen Bandbreite gesendet. Diese entspricht ultrakurzen Impulsen (Nanosekunden) im Zeitbereich und garantiert eine sehr hohe zeitliche Auflösung [9, 13].

Die große Bandbreite und die hohe zeitliche Auflösung der UWB-Signale bieten die folgenden Vorteile für die Innenraum-Lokalisierung [9]:

- Positionierungsgenauigkeit im Zentimeter-Bereich
- UWB- Signale können Gebäudematerialien wie zum Beispiel Beton, Glas oder Holz durchdringen
- Mehrwege-Effekte werden durch hohe Bandbreite teilweise unterdrückt

Durch die Regulierung (FCC) von Ultra-Wideband und der Einführung des IEEE 802.15.4 Standards, ist es heutzutage möglich preiswerte UWB-Chips zu erhalten. Ein Beispiel dafür ist der von der Firma Decawave entwickelte UWB-Chip *DW1000*

### 3.1 Lokalisierungstechnologien

---

(~20 \$) [40]. Dieser wird aktuell von vielen Forschungsgruppen für die Innenraum-Lokalisierung verwendet [41, 42, 43]. Laut Hersteller können mit diesem Sensor theoretische Positionierungsgenauigkeiten von  $\pm 10$  cm sowie eine Reichweite von 300 m erreicht werden. Nachteil ist jedoch der Stromverbrauch. Im Sende- und Empfangsmodus verbraucht der Chip etwa 150 mA, im sogenannten Idle-Mode beträgt der Stromverbrauch etwa 10 mA [40].

Die zunehmende Fokussierung auf Lokalisierungssysteme basierend auf der UWB-Technologie, zeigt der 2016 von *Microsoft* ausgetragene Wettbewerb *Indoor Localization Competition- IPSN 2016*. 7 der 16 Teilnehmergruppen präsentierten ein 3D UWB-Lokalisierungssystem hauptsächlich bestehend aus festem Ankerknoten und mobilem Tag [26]. Tabarovsky et al. und auch Dadari et al. zeigten beispielsweise in ihrer Arbeit ein UWB-Lokalisierungssystem basierend auf dem *DW1000* Chip von *Decawave*. Mithilfe der beiden Lokalisierungsverfahren RTT und auch TDOA wurde eine Genauigkeit im Zentimeterbereich erzielt. Die Sieger des Wettbewerbs im Bereich der UWB-Lokalisierung, Günes et al., haben mit ihrem System *IntraNav* eine Positionierungsgenauigkeit von etwa 23 cm erreicht. Es gibt jedoch auch auf dem Markt erhältliche UWB- Lokalisierungslösungen von Firmen wie zum Beispiel *Ubisense* [44], *eliko* [45] oder auch *Zebra Technologies* [46]. Tabelle 1.1 zeigt eine Übersicht über die mobilen Tags dieser Firmen und deren wichtigsten Eigenschaften.

**Tabelle 3.1.:** Übersicht der auf dem Markt erhältlichen UWB-Lokalisierungslösungen (mobiler Tag).

System	Positionsgenauigkeit	Reichweite	Größe	Technik	Energieverbrauch
eliko Kio	<30 cm	40 m	85x55x18 mm	ToF	7 Tage, 1 Hz (5 V Lipo, 750 mAh) $\hat{=}$ 23 mWh
Ubisense Mini Tag	10-15 cm	20 m	54x40x14 mm	AoA, TDoA	5 Jahre, 1 Hz (3,6 V, 750 mAh) $\hat{=}$ 0,06 mWh
Zebra Tech. Dart Tag	30 cm	200 m	d = 40 mm	TDoA	7 Jahre, 1 Hz (3 V Knopfzelle, 300 mAh) $\hat{=}$ 0,015 mWh

Wie die Tabelle 3.1 zeigt sind die mobilen Tags sehr energiesparend und werden bei kleiner Baugröße deshalb hauptsächlich mit einem Akku oder einer Knopfzelle betrieben. Die angegebenen Verbrauchswerte vom *Mini Tag* und auch dem *Dart Tag* sind nicht zu hundert Prozent plausibel. Der *Dart Tag* beispielsweise müsste einen

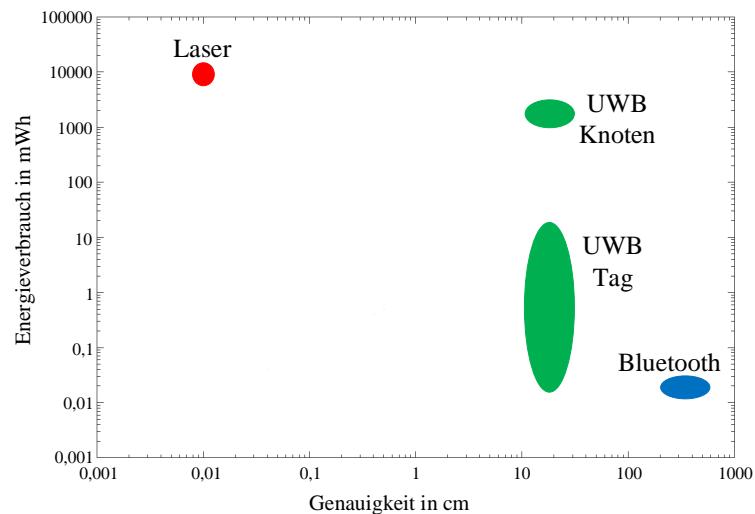
durchschnittlichen Stromverbrauch von etwa  $5 \mu\text{A}$  haben, um mit einer 3 V Knopfzelle 7 Jahre betrieben werden zu können. Dieser Stromverbrauch müsste demnach nicht nur den Standby-Strom beinhalten, sondern auch Sende- und Empfangsstrom des UWBs für eine Positionsabfrage pro Sekunde. Diese Annahme ist nicht möglich.

Werden nun die fixen Knoten dieser Firmen betrachtet, so zeigen diese einen weitaus höheren Energieverbrauch als ihre Tags. Die Knoten werden nicht über einen Akku betrieben, sondern über USB (*Zebras Dart Wand*) oder Power-over-Ethernet (*Ubisense 7000*). Beim *Ubisense 7000* bedeutet dies, dass bei 12 V und maximal 1 A der maximale Energieverbrauch bei 12 Wh liegt. Da jedoch keine Stromwerte bekannt sind, ist davon auszugehen, dass der Energieverbrauch im Bereich von 1 Wh bis 3 Wh liegt. Das Gleiche gilt für den Knoten von *Zebra Tech*. Der eher hohe Energieverbrauch ist damit zu erklären, dass der Knoten die Berechnung der Position übernimmt und dadurch sehr viel mehr Strom verbraucht als der mobile Tag.

Lokalisierungssysteme basierend auf Ultra-Wideband haben eine Genauigkeit im Zentimeterbereich bei einem Energieverbrauch im Bereich von mehreren mWh bis Wh. Wobei beim Betrachten des Energieverbrauchs ein Unterschied zwischen energiesparendem mobilen Tag und dem über Kabel versorgten Knoten besteht. Natürlich spielt zudem auch die Häufigkeit der Positionsabfrage eine entscheidende Rolle.

### 3.1.4. Übersicht über die vorgestellten Technologien

Der Vergleich zwischen den vorgestellten Technologien in Bezug auf Genauigkeit und Energieeffizienz bzw. Energieverbrauch ist in Abbildung 3.3 dargestellt. Die Energieverbräuche der einzelnen Technologien können nur bedingt miteinander verglichen werden, da teilweise unterschiedliche Positionsupdate-Raten verwendet werden.



**Abbildung 3.3.:** Gegenüberstellung der vorgestellten Technologien in Bezug auf Energieverbrauch und Genauigkeit.

Es ist zu erkennen, dass laserbasierte Systeme einerseits eine sehr hohe Positionierungsgenauigkeit (Millimeter) haben, aber andererseits auch einen starken Energieverbrauch aufweisen. Bei Bluetooth-Systemen ist genau das Gegenteil der Fall. Sie haben eine Genauigkeit im Bereich von 2-6 m, jedoch einen durch das Bluetooth Low Energy Protokoll sehr niedrigen Energieverbrauch. Ultra-Wideband-Systeme haben eine gute Genauigkeit im Zentimeterbereich. Beim Vergleich des Energieverbrauchs muss jedoch zwischen Tag und Knoten unterschieden werden.

## 3.2. Energiesparende Funkkommunikation

### 3.2.1. Prinzip der Aufwecktechnologie

Um drahtlos Daten über eine bestimmte Entfernung austauschen zu können, werden immer mehr Funksysteme eingesetzt. Dadurch ist es möglich ganz einfach Informationen wie zum Beispiel Sensorwerte (aktuelle Außentemperatur) von einem Funksender zu einem Funkempfänger zu übermitteln. Bei einem Funksystem handelt es sich entweder um einen mobilen (Tag) oder fest installierten Funkknoten. Dies bedeutet, dass sie sich an einem mobilen Objekt im Raum befinden oder fest an Decken oder Wänden befestigt sind. Um ein energiesparendes Funkkommunikationssystem entwickeln zu können, muss zunächst die Energieversorgung der Funksender und Funkempfänger betrachtet werden.

#### Energieversorgung von Funkknotensystemen

Zur Energieversorgung von Funkknotensystemen bestehen zwei Möglichkeiten. Entweder werden diese über das vorhandene Stromnetz der Infrastruktur betrieben oder über eine mobile Energieversorgung wie Akkus oder Batterien. Eine mobile Energieversorgung bietet den Vorteil, dass beispielsweise der Installationsaufwand minimiert wird und so Kosten gespart werden können. Ist der Energieverbrauch jedoch zu hoch, führt dies zwangsläufig zu einer kürzeren Betriebsdauer. Somit müsste der Akku oder die Batterie sehr viel häufiger als gewünscht gewechselt werden. Diese kurzen Wartungsintervalle führen wiederum zu erhöhten Kosten. Deshalb ist es wichtig die Energiebilanz eines Funksystems zu betrachten. Befindet sich das drahtlose System im Sende- oder Empfangsmodus, so wird sehr viel Energie verbraucht. Das bedeutet, dass der Energiebedarf des Netzwerks steigt, umso höher die Senden- und Empfangsdatenrate ist. Soll beispielsweise nur jede Minute ein Datenaustausch stattfinden, so ist es nicht notwendig die Funksysteme dauerhaft im energieintensiven Empfangsmodus zu halten. Zwischen den Sendevorgängen können diese in einen energiesparenden Standby- Modus wechseln. Befinden sich nun Sender und Empfänger im Standby- Modus, besteht jedoch das Problem das beide zur gleichen Zeit diesen energiesparenden Modus wieder verlassen müssen. Nur so ist es möglich das eine Kommunikation erfolgreich stattfinden kann. Für dieses Problem gibt es verschiedenen Lösungsansätze, welche in [47] beschrieben werden. Der Ansatz der asynchronen Kommunikation wird im folgenden Abschnitt betrachtet.

## Die asynchrone Kommunikation

Bei der rein asynchronen Kommunikation handelt es sich um ein Konzept, welches die erfolgreiche Kommunikation zwischen einem Sender und Empfänger unter Verwendung eines Energiesparmodus gewährleistet. Ein Empfänger, welcher sich in einem Standby- Modus befindet, wechselt nur dann in den aktiven Modus wenn der Sender eine Kommunikation beziehungsweise einen Datenaustausch fordert. Dieser gezielte Wechsel vom energiesparenden zum aktiven Modus wird auch als „Aufwecken“ bezeichnet. Durch eine Adressierung, also der Zuweisung von Identifikationen (IDs), können zudem nur die Funkempfänger aufgeweckt werden, welche für eine Kommunikation verwendet werden sollen. Diejenigen die nicht über ihre ID angesprochen werden bleiben im Energiesparmodus. Dieses Konzept hat den **Vorteil**, dass die Zeiten von Sender und Empfänger **nicht synchronisiert werden müssen**, um gleichzeitig in den aktiven Modus zu wechseln (synchrone Kommunikation). Ein gezieltes Aufwecken kann beispielsweise über ein externes Funksystem wie zum Beispiel einer Basisstation realisiert werden. Befinden sich die Funksysteme hauptsächlich im Energiesparmodus und werden nur durch ein Aufwecksignal aktiv, kann der Energieverbrauch gesenkt und die Akkulaufzeit erhöht werden [47, 48].

### Aufweckstrategie

Um Empfängerknoten gezielt aufwecken zu können, werden sogenannte Aufweckstrategien eingesetzt. Vier geeignete Strategien werden in [47] vorgestellt:

- **Time Diversity**

Jeder Sensorknoten bekommt einen bestimmten, festen Zeitbereich, bei welchem er mit dem Host kommunizieren und seine Daten senden darf. Um sicher zu gehen, dass die festen Zeiten eingehalten werden müssen bei dieser Methode der Host und die Sensorknoten synchronisiert werden. Dies wird über eine Systemuhr realisiert.

- **Space Diversity**

Bei dieser Methode wird eine drehbare Richtantenne verwendet. Der Raum um die Antenne wird in mehrere Abschnitte eingeteilt. So können beispielsweise nur Funkknoten aufgeweckt werden die sich in einem bestimmten Raumwinkel oder Abschnitt befinden. Alle anderen bleiben im energiesparenden Modus.

- **Code Diversity**

Jeder Funkempfänger bekommt eine feste Adresse zugewiesen. Bei einem Aufwecksignal mit einer festgelegten Aufweckadresse wachen zunächst alle Empfänger auf. Diese vergleichen die gesendete Adresse mit der eigenen Adresse. Stimmt die Adresse überein, bleibt der angesprochene Empfänger im Aktivmodus und eine Kommunikation mit dem Host findet statt. Im Falle einer Nichtübereinstimmung wechseln die betroffenen Knoten in den energiesparenden Modus zurück.

- **Frequency Diversity**

Um den Empfängerknoten bei dieser Methode aufzuwecken wird ein zweiter

Frequenzkanal eingesetzt. Dieser ist ausschließlich für das Senden und Empfangen der Aufwecksignale zuständig und arbeitet beispielsweise bei sehr niedrigen 125 kHz. Für den Austausch der Daten beziehungsweise der Kommunikation von Host und Knoten wird zurück auf den sehr viel schnelleren ersten Kanal gewechselt. Dies kann zum Beispiel ein (U)HF-Funkchip mit einer Frequenz von 2,4 GHz sein. Diese Methode hat den Vorteil, dass der Stromverbrauch bei niedrigen Frequenzen sehr viel kleiner ist als bei hohen Frequenzen. In [47] wird dies anhand eines Beispiels gezeigt. Der Stromverbrauch eines 2,4 GHz Funkchips (250 kbps) beträgt etwa 18.8 mA @3,3 V. Ein 125 kHz Receiver (4 kbps) hingegen hat lediglich einen Stromverbrauch von 3,5  $\mu$ A @3,3 V.

Für energiesparende Funksysteme sind die beiden Aufweckstrategien Frequency Diversity und Code Diversity relevant. Frequency Diversity ermöglicht einen geringen Energieverbrauch aufgrund des zweiten, niederfrequenten Aufweckkanals. Gleichzeitig können aufgrund des hochfrequenten ersten Kanals hohe Datenraten während der eigentlichen Kommunikation zwischen Host und Funkknoten erreicht werden. Damit nicht alle Funkknoten bei dem niederfrequenten (LF) Aufwecksignal aufwachen, bekommen die Knoten eine feste ID zugewiesen (Code Diversity).

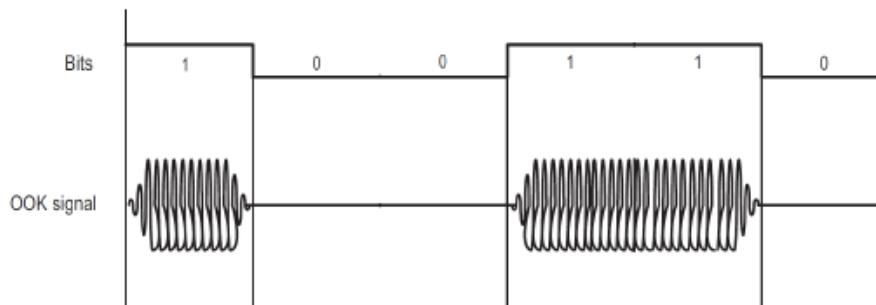
#### 3.2.2. Vorhergehende Arbeiten an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren

##### Beacon-Aufweckempfänger

Der Beacon-Aufweckempfänger wurde im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Imtek Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg von B.Sc Joachim Keh entwickelt [48]. Hier wird eine Kombination aus den beiden vorgestellten Aufweckstrategien Frequency Diversity und Code Diversity verwendet. Das Grundkonzept, auf welchem dieser Aufweckempfänger beruht, wird in der Doktorarbeit von Dr. Gerd Ulrich Gamm beschrieben [5]. Hier wird für die Datenkommunikation das 868 MHz SRD- Band (Short Range Devices) verwendet. Es ermöglicht eine hohe Datenrate bei kleiner Antennengröße ( $\lambda/2 = 17$  cm). Für das Aufwecksignal wird ein 125 kHz Signal eingesetzt. Der Einsatz dieser niederfrequenten Welle bietet einzig den Vorteil des geringen Stromverbrauchs (2-6  $\mu$ A), ansonsten hat die Verwendung hauptsächlich negative Eigenschaften. Eine  $\lambda/4$  Antenne beispielsweise hätte bei 125 kHz eine Länge von fast 600 m. Auch die Datenrate ist bei dieser Frequenz mit < 1kBit/s sehr klein. Aus diesem Grund wird in [5] das 125 kHz Aufwecksignal mithilfe der Trägerfrequenz von 868 MHz erzeugt. Dazu wird das Modulationsverfahren OOK (On Off Keying) eingesetzt. Beim OOK wird das hochfrequente, zu modulierende 868 MHz Trägersignal gezielt ein- und ausgeschaltet um dadurch das niederfrequente 125 kHz Aufwecksignal zu erzeugen (siehe Abbildung 3.4). Dies vereint die guten Eigenschaften der 868 MHz Welle, wie die hohe Datenrate, die kleine Antenne oder die Mehrwegeausbreitung, mit dem niedrigen Stromverbrauch bei einer 125 kHz Welle. Durch zusätzliche Integration einer 16

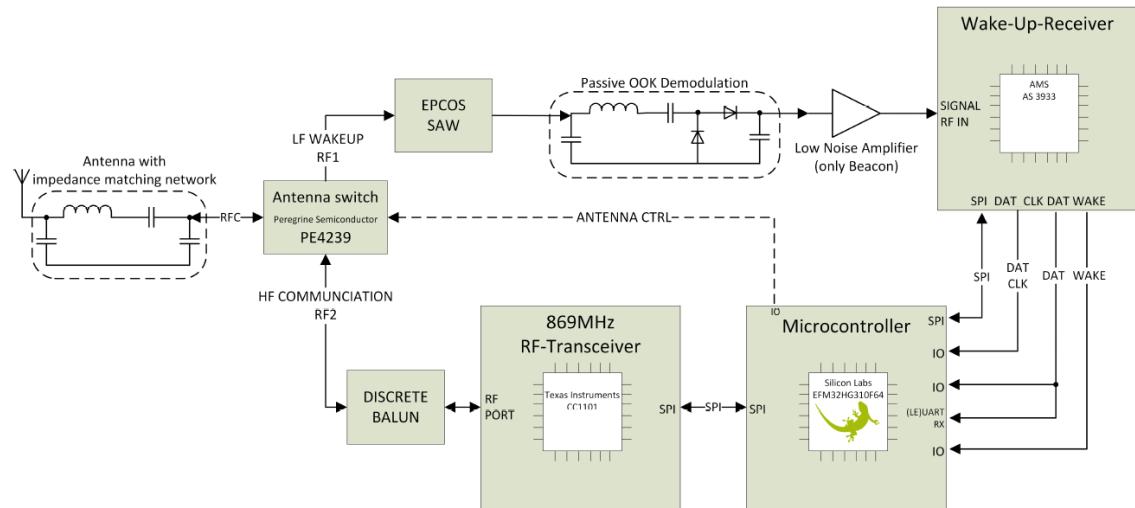
Bit Adressinformation, können mit dem Aufwecksignal zudem gezielt Funkknoten aufgeweckt werden.

In der Arbeit von Joachim Keh handelt es sich um eine Weiterentwicklung der in [5] erstellten Hardware. Das Grundkonzept bleibt weitestgehend erhalten, einzig die Frequenz des Aufwecksignals wird von 125 kHz auf 19,2 kHz geändert. Dies führt zu einem schmäleren Spektrum und erlaubt so 869 MHz als Trägerfrequenz zu verwenden. Das hat den Vorteil, dass die Trägerfrequenz im Frequenzbereich von 869,4 MHz bis 869,65 MHz liegt, welche eine maximal erlaubte Strahlungsleistung (ERP, Effective Radiated Power) von bis zu 500 mW erlaubt [49].



**Abbildung 3.4.:** Prinzip des OOK- Modulationsverfahren. Ein 125 kHz Aufweck- signal moduliert auf einer 869 MHz Trägerwelle [48].

Das Blockschaltbild des Beacon-Aufweckempfängers zeigt Abbildung 3.5. Hauptkomponente des Aufweckempfängers ist der Mikrocontroller EFM32HG310F64 von Silicon Labs (ARM Cortex-M0+ Prozessor). Er übernimmt die Rolle der zentralen Steuereinheit des Systems. Das in Abbildung 3.5. gezeigte Blockschaltbild zeigt zwei Kommunikationspfade. Beim oberen Pfad handelt es sich um den sogenannten Wake-Up-Pfad. Dieser besteht aus einem 869 MHz SAW Filter (Filterung des Spektrums), einer passiven OOK-Demodulationsschaltung, aus einem Low-Noise Amplifier und dem Wake-Up-Receiver AS3933 von Austria Microsystems. Der untere Pfad ist für die 869 MHz Datenkommunikation zuständig. Dieser besteht aus einem Antennenanpassnetzwerk (Balun) und dem Funktransceivermodul CC1101 von Texas Instruments. Die Kommunikation von AS3933-Chip und CC1101-Funkchip mit dem Mikrocontroller wird über die SPI-Schnittstelle realisiert. Um zwischen diesen beiden Pfaden schalten zu können wird der Antennenschalter ADG918 von Analog Devices eingesetzt. Dies hat den Vorteil, dass nur eine Antenne für den Empfang von Aufwecksignalen (Wake-Up-Pfad) und dem Versenden von Daten (Datenkommunikationspfad) benötigt wird. Die Antenne wird über ein  $50 \Omega$  Anpassnetzwerk mit dem Antennenschalter verbunden [48].

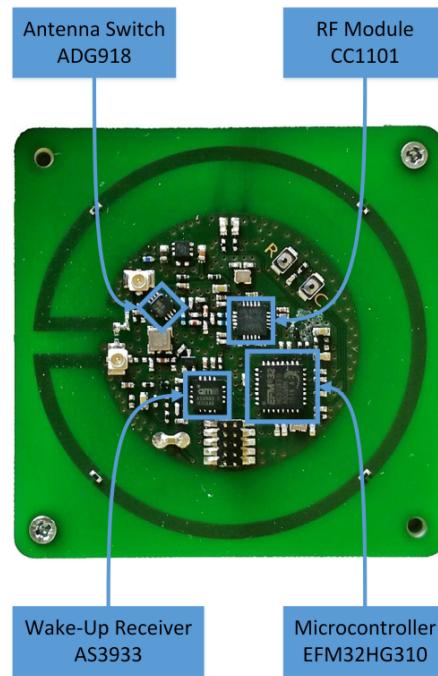


**Abbildung 3.5.:** Blockschaltbild der von Joachim Keh entwickelten Beacon und Identifier Hardware [48].

Befindet sich der Funkknoten im Schlafmodus, sind mit Ausnahme des Mikrocontrollers und des Wake-Up-Receiver alle Komponenten im ausgeschalteten Zustand. Der Mikrocontroller wird im Schlafmodus betrieben während der Aufweckempfänger-Chip die Umgebung nach niederfrequenten (19,2 kHz) Aufwecksignalen abhört. Der Antennenschalter wird auf den Wake-Up-Pfad gesetzt. Ein eingehendes Aufwecksignal wird zunächst über die passive OOK-Demodulationsschaltung geführt. Hierbei handelt es sich um eine passive Gleichrichter-Schaltung welche die 869 MHz Trägerfrequenz entfernt. Zur Erhöhung der Sensitivität im Aufweckpfad wird das demodulierte, niederfrequente Aufwecksignal mit dem Low-Noise Amplifier verstärkt. Erst danach wird es dem Wake-Up-Receiver zugeführt. Ist die im demodulierten Signal enthaltene Adressierung korrekt, setzt der Aufweckempfänger-Chip die an den Mikrocontroller angeschlossene Interrupt-Leitung in einen aktiven Zustand. Dadurch wird der Mikrocontroller aus dem Energiesparmodus aufgeweckt und in den aktiven Modus versetzt. Wird der Antennenschalter mittels eines Steuersignals des Mikrocontrollers auf den Datenkommunikationspfad gesetzt, kann der Funkknoten mit dem anfragenden System kommunizieren beziehungsweise Daten über Funk austauschen. In dieser Antennenschalterstellung ist es zudem möglich den Funktransceiver CC1101 zu verwenden um Aufwecksignale zu senden.

Der von Joachim Keh entwickelte Beacon hat im Energiesparmodus einen Stromverbrauch von  $16,5 \mu\text{A}$ . Der Energieverbrauch im Listen-Mode beträgt  $39 \mu\text{W}$  und im Decode-Mode  $52 \mu\text{W}$  bei einer Sensitivität von  $-60 \text{ dBm}$  [48].

Die wichtigsten in [48] verwendeten Hardwarekomponenten, welche in Blockschaltbild 3.5 dargestellt sind, werden in den nachfolgenden Abschnitten näher betrachtet. Abbildung 3.6 zeigt außerdem die entwickelte Beacon-Platine.



**Abbildung 3.6.:** Beacon- Platine entwickelt von Joachim Keh im Rahmen seiner Bachelorarbeit [48].

### Mikrocontroller

Mit einem Stand-by Stromverbrauch von nur  $1,35 \mu\text{A}$  (Energiesparmodus 2 (EM2)) handelt es sich beim EFM32HG310F64 von Silicon Labs (ARM Cortex-M0+ Prozessor) um einen geeigneten Prozessor für Low-Power Anwendungen. Dieser taktet außerdem mit 25 MHz bei einem Programmspeicher von 64 kB und einem RAM von 8 kB. Zusätzlich wird ein externer 32,768 kHz Quarz für die Real-Time-Clock (RTC) des Prozessors eingesetzt. Dieser Mikrocontroller ermöglicht zudem mit einer Hardware AES 128CBC-Einheit eine sichere Funkübertragung durch Verschlüsselung der Daten.

### Funktransceiver

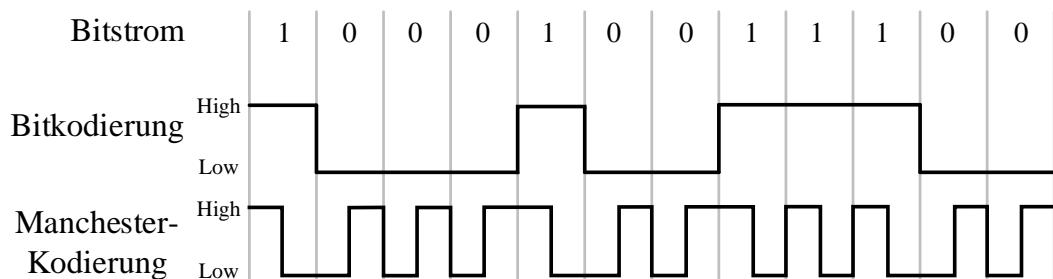
Beim CC1101 von Texas Instruments handelt es sich um einen sparsamen Funktransceiver. Im 869 MHz ISM-Band verbraucht der Chip im Sendemodus bei einer maximalen Sendeleistung von +12 dBm einen Strom von 34,2 mA und im Empfangsmodus 14,6 mA. Wird der Chip in den energiesparenden Stand-by Modus geschaltet, liegt der Verbrauch bei  $1 \mu\text{A}$ . Der CC1101 unterstützt das Modulationsverfahren OOK, welches für die Erzeugung des niederfrequenten Aufwecksignals benötigt wird.

Dies hat den Vorteil, dass dadurch kein weiterer Funktransceiver in der Schaltung verwendet werden muss.

### Aufweckempfänger

Der AS3933 von Austria Microsystems ist ein sparsamer Aufweckempfänger mit drei Empfangskanälen. Bei einem aktivierten Empfangskanal verbraucht der Chip einen Strom von  $2,7 \mu\text{A}$ . Er hat zudem eine Eingangsempfindlichkeit von  $100 \mu\text{V}_{RMS}$  (etwa  $-54 \text{ dBm}$ ). Mit dem AS3933 Chip ist es möglich bis zu 65535 (16 bit) Aufweckadressen zu erkennen. Eine Erweiterung der Adresserkennung auf 24 bit wird in der Arbeit von [48] umgesetzt, ist jedoch für diese Arbeit nicht relevant.

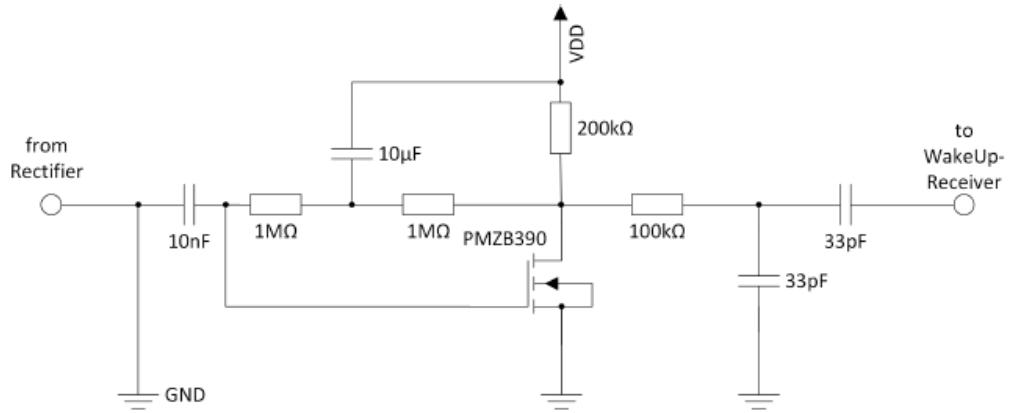
Für die stabile Erkennung von Aufweckadressen wird eine sogenannte Manchester-Kodierung durchgeführt. Durch Oszillatoredrifts ist es möglich, dass beispielsweise aufgrund des falschen Timings die digitalen Low- und High-Pegel nicht in der korrekten Reihenfolge erkannt werden. Dadurch können Aufweckadressen falsch interpretiert werden. Die Manchester-Kodierung ist ein Verfahren welches ermöglicht, dass unabhängig vom externen Taktgeber der Anfang und das Ende eines Datenpakets erkannt wird. Hierzu wird, im Gegensatz zur einfachen Bitkodierung, jedes Bit eines Datenpakets in zwei gleichlange Intervalle aufgeteilt. Eine digitale Eins wird als fallende Flanke von High nach Low erkannt, eine steigende Flanke von Low nach High entspricht einer digitalen Null. Die Manchester-Kodierung im Vergleich zur Bitkodierung zeigt Abbildung 3.7. Dieser Spannungswechsel in der Mitte jedes Bit-Wechsels ermöglicht eine stabile Erkennung der Bitfolge eines Aufweckpakets, da Fehler leichter zu erkennen sind. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch, dass die doppelte Bandbreite für die Übertragung von Daten verwendet werden muss [50].



**Abbildung 3.7.:** Beispiel einer Manchester- Kodierung im Vergleich zu einer Bitkodierung [50].

### Low-Noise-Amplifier

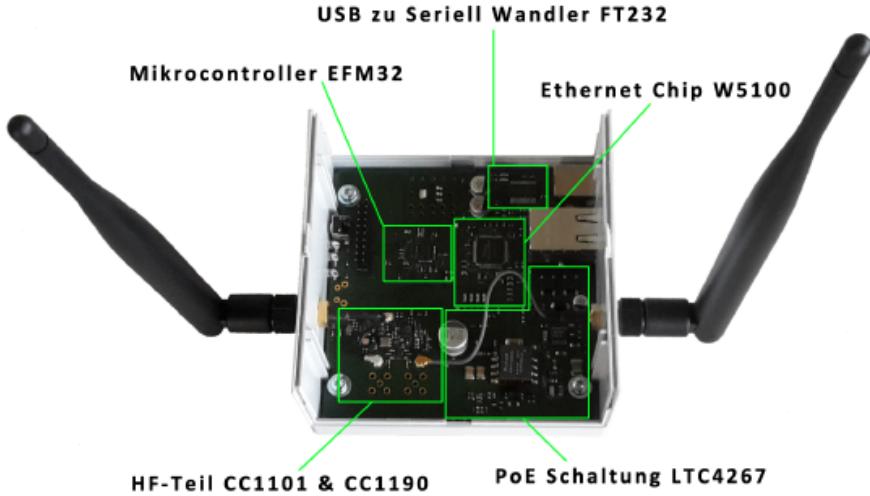
Mithilfe eines Verstärkers im Wake-Up-Pfad wird die Sensitivität des Aufweckempfängers erhöht. Gibt es zum Beispiel dynamische Veränderungen im Raum kann es dazu führen, dass der Funkempfänger aufgrund der Signaldämpfung das Aufwecksignal nicht mehr korrekt erkennen und somit dekodieren kann. Die Verstärkerschaltung ermöglicht eine Verbesserung der Aufweckreichweite sowie auch der Aufweckzuverlässigkeit. Bei dieser Low-Noise-Amplifier-Schaltung (Abbildung 3.8) handelt es sich um einen Bandpass, welcher an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg entwickelt wurde. Dieser verstärkt die mit einer Frequenz von 19,2 kHz eingehenden Aufweckspannungssignale mit einem Faktor von 22 dB. Der Stromverbrauch beträgt zudem nur  $10 \mu\text{A}$ , weshalb sich diese Schaltung ausgezeichnet für die in dieser Arbeit geforderte Low-Power Anwendung eignet [48].



**Abbildung 3.8.:** Low-Noise-Amplifier zur Sensitivitätserhöhung des Aufweckempfängers [48].

### Basisstation

Um die mobilen oder auch fix angebrachten Funkknotensysteme aufwecken zu können, wird ein externes Funksystem verwendet. Ein solches System, auch als Basisstation bezeichnet, wurde von BSc. Markus Hauser im Rahmen seiner Bachelorarbeit an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren entwickelt [51]. Diese Station ermöglicht es, gezielt die Beacon-Aufweckempfänger vom Energiesparmodus in den aktiven Modus zu schalten. Bei den Aufwecksignalen handelt es sich auch hier um die niederfrequenten 19,2 kHz Signale. Zudem ist es möglich, Daten über das 869 MHz Band zu senden und zu empfangen. Die entwickelte Basisstation zeigt Abbildung 3.9.



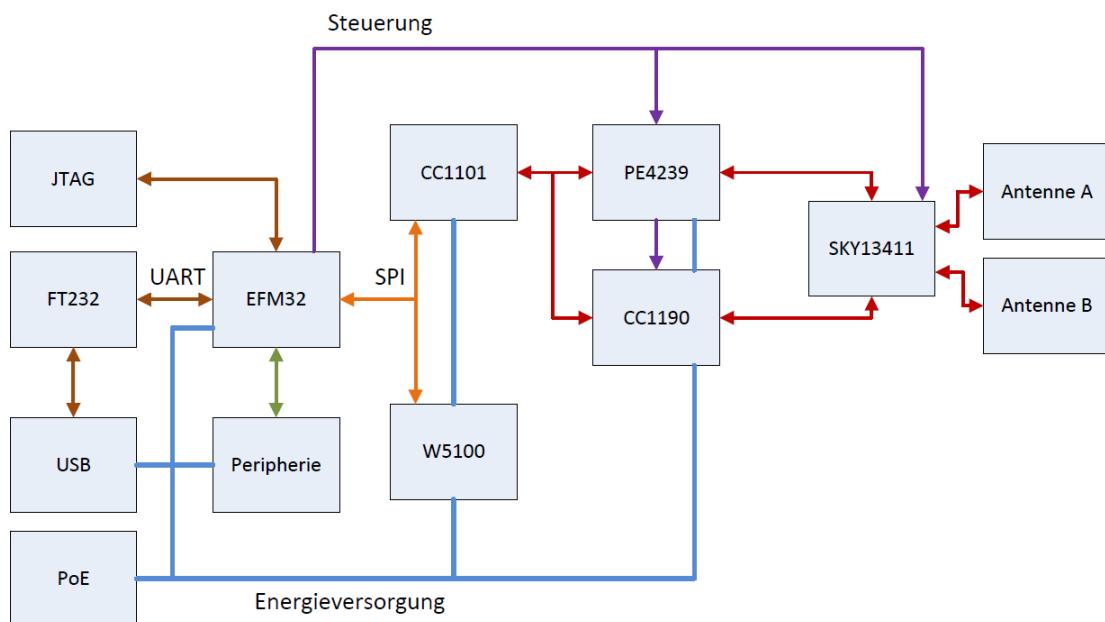
**Abbildung 3.9.:** Basisstation entwickelt von Markus Haußer im Rahmen seiner Bachelorarbeit [51].

Wie auch beim Beacon-Aufweckempfänger wird als zentrale Steuereinheit der Mikrocontroller EFM32HG310F64 von Silicon Labs eingesetzt. Zur Erzeugung des Aufwecksignals dient auch hier der Funktransceiver CC1101 von Texas Instruments. Da es sich um eine externe Funkstation handelt, muss es möglich sein, Funkknoten oder auch mobile Tags über große Entfernung ansprechen zu können. Das bedeutet, die Sendeleistung muss erhöht werden um eine höhere Reichweite zu erzielen. Um dies zu ermöglichen wird bei diesem System der CC1190 RF Front End Verstärker von Texas Instruments eingesetzt. Dieser Chip wurde speziell für das 850 bis 950 MHz ISM-Band entwickelt. Die maximale Ausgangssendeleistung des Verstärkers beträgt +24 dBm (circa 251 mW). Diese Sendeleistung ist nur dann erlaubt, wenn die verwendete Frequenz nach [49] im Bereich von 869,4 MHz bis 869,65 MHz liegt. Aus diesem Grund wird wie auch beim Beacon- Aufweckempfänger eine Frequenz von 869 MHz verwendet. Da der CC1190 hauptsächlich zur Verstärkung des Aufwecksignals gebraucht wird und nicht etwa für das Empfangen von Daten, wird der Antennenschalter PE4239 von Peregrine Semiconductor eingesetzt. Dieser ermöglicht zwei verschiedene Kommunikationspfade. Beim Senden des Aufwecksignals wird der Verstärker zugeschaltet, beim Empfangen von Daten wird die Kommunikation einzig über den CC1101 geführt. Dadurch kann der CC1190 ausgeschaltet und somit Energie gespart werden.

Wie Abbildung 3.9 zeigt, werden außerdem für das Senden und Empfangen von Daten zwei Antennen verwendet. Dieser Ansatz wird auch als Antennendifferenzialität bezeichnet. Durch die Verwendung mehrerer Antennen ist es möglich Interferenzen bei der Funkausbreitung zu verhindern und die Raumabdeckung zu erhöhen. Interferenzen können durch die Mehrwegeausbreitung der Funkwellen auftreten und führen teilweise bis zur Auslöschung des Signals. Um zwischen diesen beiden Anten-

nen wechseln zu können, wird der Dual-Schalter SKY13411 von Skyworks eingesetzt. Die Steuerung der beiden Antennenschalter wird über den Mikrocontroller realisiert.

Für die Kommunikation zwischen Basisstation und PC wird der USB-zu-Seriell-Wandler FT232 der Firma FTDI eingesetzt. Dieser ermöglicht es über die serielle Schnittstelle entweder Daten zu empfangen oder Befehle an den Mikrocontroller der Basisstation zu senden. Bei den Befehlen handelt es sich um Konfigurations- oder auch Funktionsbefehle, die zum Beispiel die Basisstation auffordert ein Aufwecksignal zu senden. Die Basisstation kann zudem über den Netzwerkchip W5100 von der Firma WIZNet mit einem lokalen Netzwerk verbunden werden. Über diese sogenannte Ethernet-Schnittstelle können wie bei der seriellen Schnittstelle Funktionsbefehle übermittelt werden. In [51] wurde eine große Anzahl an möglichen Befehlen realisiert. Für die Spannungsversorgung der Basisstation bestehen zwei Möglichkeiten. Die erste Möglichkeit bietet die direkte Versorgung über die USB-Schnittstelle. Da es jedoch nicht überall möglich ist die Basisstation via USB zu betreiben, kann das System alternativ auch über Power-over-Ethernet (PoE) mit Strom versorgt werden. Abbildung 3.10 zeigt ein Blockschaltbild der entwickelten Basisstation. Der Ethernet-Chip W5100 und das Funktransceivermodul CC1101 kommunizieren mit dem Mikrocontroller via SPI-Schnittstelle [51].



**Abbildung 3.10.:** Blockschaltbild der von Markus Hauser entwickelten Basisstation Hardware [51].

Die in den Kapitel 5.1 und 5.2 entwickelte Hard- und Software zur energiesparenden und genauen Lokalisierung baut auf diesen beiden vorgestellten Systemen, Beacon-Aufweckempfänger und der Basisstation, auf.

## 4. Anforderungen und Ziel der Arbeit

Die Anforderung an diese Arbeit besteht darin, ein energiesparendes Innenraum-Lokalisierungssystem mit hoher Positionierungsgenauigkeit und kleiner Größe zu entwickeln. Dabei wird das Gesamtsystem aus mobilem Tag und fixem Ankerknoten betrachtet. Das heißt, dass nicht nur der mobile Tag einen niedrigen Energieverbrauch und eine kleine Baugröße haben soll, sondern auch der fixe Ankerknoten.

Zur Umsetzung der Lokalisierung wird die Ultra-Wideband Technologie gewählt. Diese Wahl wird aufgrund der guten Eigenschaften der Technologie für eine Lokalisierung im Innenraum getroffen. Wie Kapitel 3.1.4 zeigt, ist die Bluetooth Technologie aufgrund der schlechten Genauigkeit ungeeignet. Auch der Stand der Technik erlaubt es aktuell nicht eine Verbesserung dieser Eigenschaft zu erreichen. Ein Lasersystem kommt nicht in Frage, da der hohe Energieverbrauch sowie auch die große Größe die entscheidenden Kriterien sind, welche gegen diese Technologie sprechen. Wie die Übersicht der vorgestellten Technologien (siehe Kapitel 3.1.4) zeigt, bestehen bereits teilweise auf UWB basierende mobile Tags, die sehr energieeffizient sind. Einzig die fixen Ankerknoten verbrauchen viel Energie. Deshalb ist das Ziel mobile Tags und vor allem fixe Ankerknoten basierend auf UWB mit einer hohen Genauigkeit und niedrigem Energieverbrauch zu entwickeln. Dabei soll eine Genauigkeit von <20 cm bei einem Energieverbrauch von etwa 0,05 mWh bis 25 mWh erreicht werden.

Ziel dieser Arbeit ist außerdem ein geeignetes Konzept für die Kommunikation zwischen Basisstation, mobilem Tag und mehreren Knoten zu entwickeln.



# 5. Durchführung

In den folgenden Abschnitten werden die praktischen Tätigkeiten dieser Arbeit aufgezeigt. Diese unterteilen sich in die Hardware-Entwicklung, welche in Kapitel 5.1 erläutert wird, sowie die in Kapitel 5.2 gezeigte Software-Entwicklung.

## 5.1. Hardware-Entwicklung

Der erste Schritt dieser Masterarbeit bestand darin, ein Platinenlayout mit dem Programm Target3001! zu erstellen. Die entworfene Hardware baut auf den im vorangegangenen Kapitel 3.2.2 erwähnten Beacon-Aufweckempfänger auf. Das Ziel bei der Realisierung der Platine war nicht nur eine kleine Gesamtgröße zu erreichen, sondern für den mobilen Tag und auch den fixen Knoten nur ein einziges Platinenlayout zu erstellen. Das heißt die realisierte Hardware sollte je nach Programmierung sowohl als Tag als auch als Knoten verwendbar sein.

Für die Realisierung der gezielten Distanzmessung mit Ultra-Wideband Technologie musste zunächst eine geeignete Harware-Lösung gefunden werden. Wie bereits in Kapitel 3.1.3 gezeigt, bietet die Firma *Decawave* mit dem DW1000-Chip einen kostengünstigen Transceiver für die präzise Lokalisierung mit UWB. Für die Umsetzung der Ziele dieser Arbeit wurde deshalb das auf dem DW1000 basierende, fertige Modul DWM1000 gewählt. Der bereits vorhandene Beacon-Aufweckempfänger Stromlaufplan wurde um den Schaltungsteil des DWM1000 erweitert (siehe Anhang). Zudem wurden vereinzelt Schaltungsteile auf die neuen Anforderungen des Systems angepasst. Im nächsten Abschnitt wird zunächst die Auswahl der Bauteile aufgezeigt. Anschließend wird auf die Erstellung des Platinenlayouts eingegangen.

### 5.1.1. Auswahl der Bauteile

Wie bereits erwähnt wurde für die Realisierung der Platine der Beacon- Aufweckempfänger, wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, verwendet. Dies bedeutet, dass viele der Hauptbauteile dieser Arbeit übernommen wurden. Dazu gehören die folgenden Komponenten:

- Mikrocontroller EFM32HG310F64 von Silicon Labs als zentrale Steuereinheit
- Externer 32,768 kHz Quarz für die Real-Time-Clock des Prozessors

- Funktransceiver CC1101 von Texas Instruments + externer 26 MHz Oszillator zur Erzeugung der 869 MHz Referenzfrequenz
- Sparsamer Aufweckempfänger AS3933 von Austria Microsystems
- Low-Noise-Amplifiers Schaltung zur Verstärkung des Aufwecksignals
- Diskretes  $50 \Omega$  Balun-Anpassnetzwerk
- SAW-Filter

Um die Leiterplatte mit einer kleinen Größe erstellen zu können, wurden für die passiven Bauteile wie Widerstände, Spulen und Kondensatoren hauptsächlich die Gehäuseform 0402 gewählt. Nur vereinzelte Kondensatoren und Spulen wurden als 0603 Baugröße realisiert. In den nächsten Abschnitten wird speziell auf die zusätzlich gewählten beziehungsweise veränderten Bauteile eingegangen.

### DWM1000-Modul

Das von der Firma *Decawave* entwickelte DWM1000-Modul für die präzise Lokalisierung mit UWB besteht aus verschiedenen Schaltungsteilen. Als Hauptkomponente dient dabei das DW1000 Transceiver IC. Zudem wird ein 38,4 MHz Oszillator, ein HF-Schaltungsteil aus diskreten Bauteilen, eine Ultra-Wideband Chipantenne sowie eine Power Management Einheit eingesetzt. Das  $23 \times 13 \times 2.9$  mm große Modul ist in Abbildung 5.1 dargestellt.



**Abbildung 5.1.:** DWM1000 Modul für die Lokalisierung mit Ultra-Wideband [52].

Bei dem Modul handelt es sich um ein Produkt, welches mit dem IEEE 802.15.4-2011 Standard konform ist (siehe 2.4.5). Es ermöglicht die Verwendung von vier verschiedenen UWB-Funkkanälen im Bereich von 3,5 GHz bis 6,5 GHz mit einer Bandbreite von 500 MHz. Das Sensorsystem hat die folgenden Eigenschaften:

- Unterstützt die Zweiwegmessung (RTT) und TDOA

## 5.1 Hardware-Entwicklung

---

- Positionsbestimmung über TX/RX Zeitstempel mit einer Auflösung von 15 ps pro Bit
- Datenraten von 110 kbit/s, 850 kbit/s oder 6.8 Mbit/s einstellbar
- Programmierbare Ausgangssendeleistung
- Unterstützt das MAC-Layer Nachrichtenformat nach IEEE 802.15.4
- Stromverbrauch bei der typischen 3,3 V Versorgungsspannung:  
Sleep: 550 nA  
Idle: 13,4 mA  
TX: 140 mA  
RX: 160 mA
- Theoretische Genauigkeit der Distanzmessung von 10 cm

Das DWM1000-Modul wird über eine SPI-Schnittstelle mit dem Mikrocontroller verbunden. Dadurch können zum Einen alle wichtigen Einstellungen des Moduls getroffen werden und zum Anderen auch die für die Lokalisierung wichtigen Zeitstempel ausgelesen werden.

### **Antennenschalter**

Um zwischen dem Aufweck-Pfad und dem HF-Datenkommunikationspfad schalten zu können, wird der Antennenschalter PE4239 von *Peregrine Semiconductor* eingesetzt. Der auf dem Beacon-Aufweckempfänger verwendete ADG918 ist ungeeignet, da dieser nicht für die Versorgungsspannung von 3,3 V ausgelegt ist. Mit einem SC-70 Gehäuse ist der PE4239 besonders klein. Außerdem eignet sich der Antennenschalter aufgrund des maximalen Stromverbrauchs von nur 500 nA für die energiesparende Anwendung.

### **Spannungsregler**

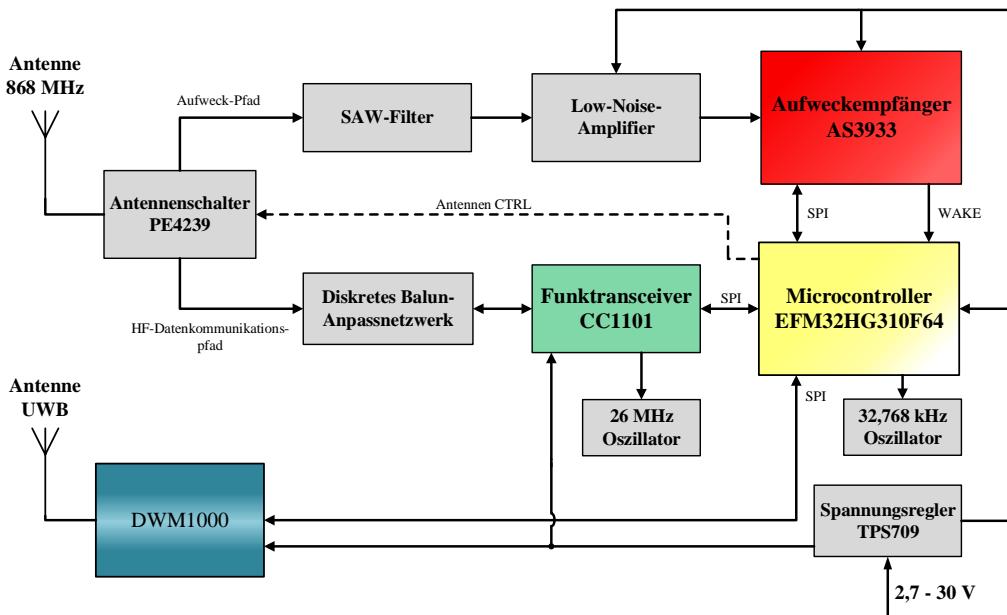
Zur stabilen Spannungsversorgung von Mikrocontroller, AS3933, DWM1000 und auch dem CC1101 wird der Spannungsregler TPS70933 von Texas Instruments eingesetzt. Bei der Auswahl des Reglers musste besonders auf einen niedrigen Ruhestrom geachtet werden. Dieser beträgt  $1 \mu\text{A}$ , weshalb sich der Spannungsregler optimal für die Spannungsversorgung mit einem Akku oder einer Batterie eignet. Mit einem maximalen Ausgangsstrom von 200 mA ist er zudem geeignet für die hohen Ströme im TX/RX Betrieb des DWM1000 Moduls.

### **Antenne**

Bei der Auswahl der Antenne muss zwischen Knoten und Tag unterschieden werden. Für den mobilen Tag wurde die Chipantenne ILA.02 von *Taoglas antenna solutions* ausgewählt. Diese wurde für den Einsatz im Frequenzbereich von 868 MHz bis 870 MHz entwickelt. Mit der geringen Größe von  $10 \times 3,2 \times 0,5 \text{ mm}$  eignet sie sich für die gewünschte kleine Gesamtgröße der Platine. Die Chipantenne besitzt einen Antennengewinn von  $G = 1 \text{ dBi}$  bei einer Impedanz von  $50 \Omega$ .

Für den Knoten wird eine gerade Peitschenantenne von *Linx Technologies Inc.* eingesetzt. Diese hat eine Länge von 84 mm und kann über ein Kabel mit einem U.FL Steckverbinder angeschlossen werden. Die Antenne besitzt einen Antennengewinn von  $G = 1,6 \text{ dBi}$  bei einer Impedanz von  $50 \Omega$ . Die Abstrahlcharakteristik der Peitschenantenne ist gleichmäßig rundum die Antenne. Dies ermöglicht Signale in einem weiten Raumwinkel zu senden oder auch zu empfangen. Im Gegensatz dazu hat die Chipantenne den Nachteil einer sehr richtungsabhängigen Abstrahlcharakteristik.

Abbildung 5.2 zeigt das Blockschaltbild der neu entwickelten UWB-V1 Schaltung.



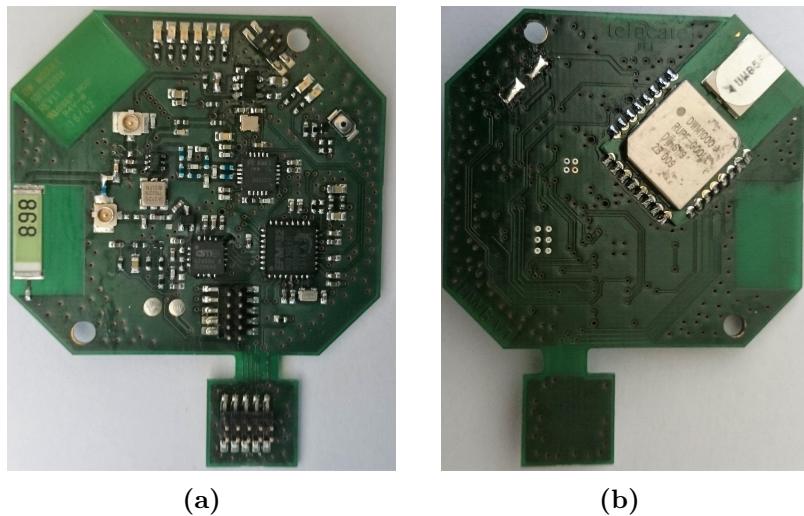
**Abbildung 5.2.:** Blockschaltbild der neu entwickelten UWB V1 Schaltung mit Aufweckempfänger- und Lokalisierungsschaltungsteil.

### 5.1.2. Erstellung des Platinenlayouts

Mithilfe des Programms Target3001! wurde basierend auf dem gezeichneten Schaltplan das Platinenlayout erstellt. Wie auch beim Beacon-Aufweckempfänger wurde eine 4-Lagen Multilayer Platine gewählt. Dies hat den Vorteil, dass die beiden Zwischenlagen für die Versorgungsspannung, die Masseanbindung sowie auch für diverse Steuerleitungen genutzt werden können. Auf der Vorderseite wurden alle Bauteile der Aufweckempfängerschaltung platziert. Dazu gehört der Mikrocontroller, der gesamte Funkteil bestehend aus CC1101 Funktransceiver, SAW-Filter, Chipantenne, diskretem Balun-Anpassnetzwerk, Antennenschalter und Aufweckempfänger-Chip sowie der 3,3 V Spannungsregler zur Spannungsversorgung der Schaltung. Auf der Rückseite wurden das DWM1000-Modul und die Lötpads für die Anbindung der

externen Spannungsversorgung (Akku) angebracht. Um beim Debuggen der Schaltung wichtige Signale abgreifen zu können, wurde auf der Vorderseite der Platine ein Steckverbinder eingesetzt. Dieser Verbinder ist unabhängig von der Funktion der Schaltung und kann bei Nichtverwendung abgetrennt werden. Außerdem werden mehrere LEDs verwendet, um wichtige Zustände des Programms bei der Programmierung anzeigen zu können. Für die Anbindung der Peitschenantenne (Knoten) wurde außerdem ein U.FL Steckverbinder (SMD) platziert.

Abbildung 5.3 zeigt die Vorder- und Rückseite der neu entwickelten und bestückten UWB-V1 Platine. Die Größe der Platine beträgt 44 x 40 x 3,9 mm.



(a)

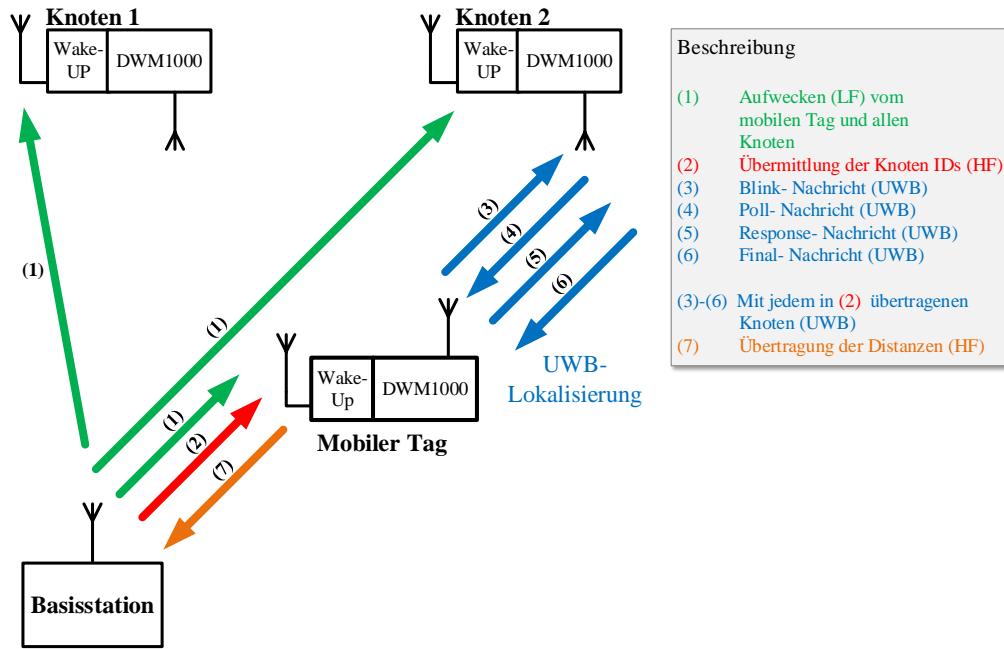
(b)

**Abbildung 5.3.:** a) Vorderseite der neu entwickelten UWB-V1 Platine. b) Rückseite der neu entwickelten UWB-V1 Platine.

## 5.2. Software-Entwicklung

### 5.2.1. Prinzipieller Kommunikationsablauf

Der prinzipielle Kommunikationsablauf für einen Lokalisierungsvorgang zwischen der Basisstation, mehreren Knoten und einem mobilen Tag ist in Abbildung 5.4 dargestellt. In einem bestimmten Lokalisierungsbereich werden mehrere Knoten an Decken und Wänden befestigt. Ein mobiler Tag, welcher sich entweder an einem Objekt im Raum befindet oder von einem Nutzer getragen wird, soll durch drahtlose Funkkommunikation mit den Knoten gefunden bzw. lokalisiert werden. Eine Positionsbestimmung wird erst dann ausgeführt, wenn eine Lokalisierungsanfrage von der entfernten Basisstation gestellt wird.



**Abbildung 5.4.:** Prinzipieller Kommunikationsablauf für einen Lokalisierungsvorgang.

Im ersten Schritt der Kommunikation sendet die Basisstation ein niederfrequentes Aufwecksignal (1, LF) an den mobilen Tag sowie auch an alle Knoten im System. Dadurch wechseln alle Teilnehmer vom Energiesparmodus in den aktiven Modus. Dies ist möglich, da sowohl der mobile Tag als auch die Knoten die gleiche Aufweckadresse aufweisen. Im Gegensatz zur gemeinsamen Aufweckadresse besitzt jeder Teilnehmer (Knoten, Tag) eine eigene, persönliche Identifikationsnummer (ID). Um die Knoten für eine Distanzmessung direkt ansprechen zu können, muss der mobile Tag die Anzahl sowie auch die IDs der Knoten kennen. Deshalb werden diese beiden Informationen im nächsten Schritt der Kommunikation von der Basisstation über die HF-Datenkommunikation an den mobilen Tag übermittelt (2, HF). Anschließend startet die Messung der Distanz zwischen Tag und Knoten (UWB). Der mobile Tag sendet zuerst eine gezielte Blink-Nachricht (3, UWB). Nur der Knoten mit der passenden Adresse initiiert eine Ultra-Wideband Distanzmessung. Wie in Kapitel 2.4.6.2 wird die Distanz mithilfe der doppelten Zweiwegemessung bestimmt. Dazu dienen Poll- (4, UWB), Response- (5, UWB) und die Final-Nachricht (6, UWB), bei welchen die einzelnen TX und RX Zeitstempel aufgenommen werden. Nach Abschluss der Distanzmessung startet der mobile Tag die nächste Distanzmessungsanfrage an den nächsten Knoten mit einer weiteren Blink-Nachricht. Zuletzt werden alle ermittelten Knoten/Tag Distanzen zurück zur Basisstation gesendet (7, HF). Die Basisstation beziehungsweise der seriell angeschlossene Computer kann mithilfe der Distanzen die Position des mobilen Tags berechnen (siehe Kapitel 2.2.1.1).

### 5.2.2. Aufbau der Kommunikationsprotokolle

Für die verschiedenen Funkübertragungen wie HF-Datenübertragung, Aufwecksignal und UWB-Distanzmessung wurden verschiedene Kommunikationsprotokolle implementiert. Das Protokoll der HF-Datenübertragung sowie auch das des Aufwecksignals baut auf die in der Arbeit von Joachim Keh implementierten proprietären Kommunikationsprotokollen auf [48]. Hier wurde ein UDP-Protokoll (User Datagram Protocol) in abgewandelter Form verwendet. Das eigentliche UDP-Protokoll besteht aus einem Header mit Quell-Port, Ziel-Port, Prüfsumme sowie den eigentlichen Nutzdaten.

#### Protokoll für die HF-Datenkommunikation

Das Protokoll für die Übertragung von Daten im HF-Band ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Es besteht aus einem Header und dem Datenpaket. Um eine eindeutige Adressierung zu gewährleisten, wird mit jedem Paket die Absender- und Zieladresse mitgesendet (SOURCE ID, DESTINATION ID). Außerdem wird ein definiertes Option-Byte übermittelt, welches die Möglichkeit bietet den Typ der Nachricht festzulegen (OPTION). Für das sichere Senden der Daten werden außerdem ein Byte für die Länge der Nutzdaten des Pakets (DATENLÄNGE), ein Byte um zu zeigen um welches Paket es sich handelt (AKTUELLES PAKET) sowie ein Byte für die gesamte Anzahl an Paketen (ERWARTETE PAKETE) gesendet. So können mehrere Pakete mit einer beliebigen Größe (bis zu 226 Bytes) direkt hintereinander versendet werden. Um die Übertragung gegen Störungen und Fehler abzusichern wird zusätzlich eine 16 Bit lange CRC-Prüfsumme (Header + Nutzdaten) eingesetzt (CRC).

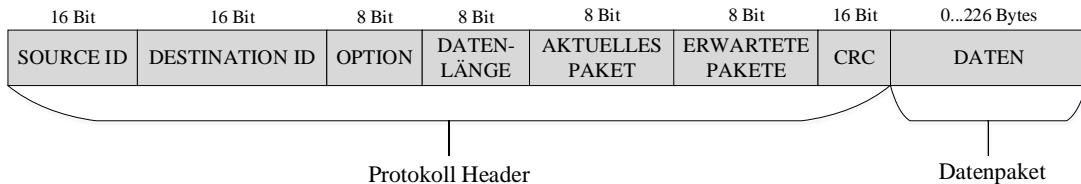
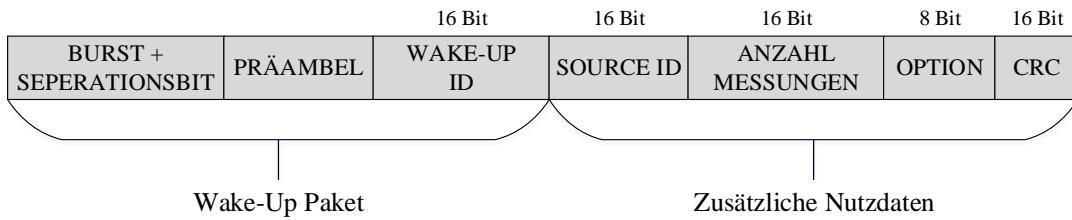


Abbildung 5.5.: Protokoll für die Übertragung von Daten im HF-Band [48].

#### Protokoll für die Aufweckkommunikation (LF)

Das für die Aufweckkommunikation verwendete Protokoll ist vom AS3933 Aufweckempfängerchip weitestgehend vorgegeben. Beim ersten Teil des Aufweckpakets handelt es sich um das in [53, ?] dargestellte Wake-Up Paket. Es besteht aus einem Burstignal + Separationsbit, der Präambel und der 16 Bit Aufweckadresse (WAKE-UP ID). Beim zweiten Teil des Pakets werden die Nutzdaten übermittelt. Dazu gehört die AbsenderAdresse (SOURCE ID), die Anzahl an Messungen, das Options-Byte sowie eine 16 Bit lange CRC-Prüfsumme (gesamte Nutzdaten). Mit der Anzahl der Messungen kann den Empfängern (Tag, Knoten) des Aufwecksignals mitgeteilt

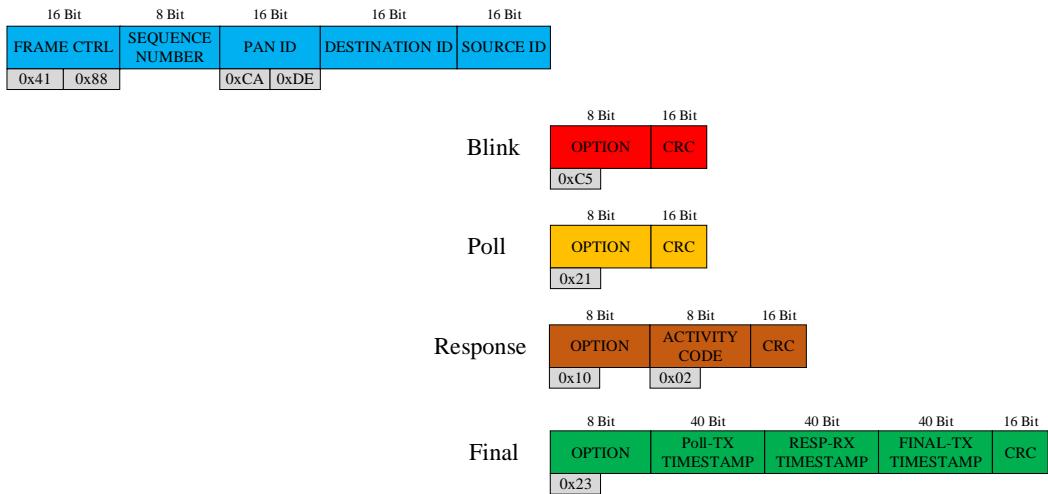
werden, wieviele Distanzmessungen bei einer Lokalisierungsanfrage ermittelt werden sollen.



**Abbildung 5.6.:** Protokoll für die Übertragung von Aufwecksignalen im LF-Bereich [48].

### Protokolle für die UWB-Distanzmessung

Für die UWB-Distanzmessung beziehungsweise Kommunikation wird der sogenannte MAC-Layer eingesetzt. Dieses Protokoll wird im IEEE 802.15.4- 2011 Standard definiert [17]. Das MAC-Layer Protokoll wurde implementiert, da es vom *DW1000* Chip unterstützt wird. Der DW1000 bietet beispielsweise die Möglichkeit, dass beim Senden des Nachrichtenprotokolls automatisch eine 16 Bit CRC-Prüfsumme generiert und beim Empfangen überprüft wird [18]. Bei der UWB-Distanzmessung werden wie in Kapitel 5.2.1 vier verschiedene Nachrichten gesendet. Dies bedeutet, dass für die Blink-, Poll-, Response und Final-Nachricht vier verschiedenen aufgebaute Protokolle versendet werden. Diese sind in Abbildung 5.7 dargestellt.



**Abbildung 5.7.:** Protokolle für die die Distanzmessung mit dem DWM1000-Modul [18].

Der Header beginnt immer mit dem Frame-Control, der Sequence-Number, der PAN-ID und mit der Absender- und Ziel-Adresse. Je nach Typ der Nachricht wird anschließend das zugehörige Optionsbyte übermittelt. Beginnt beispielsweise wie in Kapitel 5.2.1 der Knoten mit der Poll-Nachricht, so muss er für die spätere Berechnung der Distanzen (Tag) alle seine aufgenommenen Zeitstempel mit der Final-Nachricht zurück zum Tag schicken. Die Übertragung wird zudem bei allen Nachrichten durch die automatisch generierte 16 Bit lange CRC-Prüfsumme abgesichert.

### 5.2.3. Vorstellung der Firmware

In diesem Kapitel wird die in dieser Arbeit entwickelte Software vorgestellt. Dazu zählen die Programme für einen mobilen Tag, für den Knoten und für die Basisstation. Diese werden vereinfacht für einen Lokalisierungsvorgang, wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt, dargestellt. In allen Programmen läuft im Hintergrund ein sogenannter Watchdog. Wenn sich das Programm in einem unerwünschten Zustand befindet, löst dieser nach einer vorgegebenen Zeit aus und setzt das System zurück. Zunächst wird die Initialisierung und Konfiguration des DWM1000 näher vorgestellt, da dieses Modul viele Einstellungsmöglichkeiten für die Lokalisierung bietet. Generell wird das Modul über die SPI-Schnittstelle angesprochen und eingestellt.

#### Initialisierung und Konfiguration des DWM1000-Modul

Für die Initialisierung ist zunächst wichtig, dass das DWM1000-Modul bei der Betriebnahme mehrere verschiedene Betriebszustände einnimmt. Wird das Modul mit Spannung versorgt, wechselt es vom **OFF-Zustand (0  $\mu$ A)** in den **WAKEUP-Zustand**. In diesem Einschaltzeitraum (etwa **4 ms**) wird der externe XTAL Oszillator (**38,4 MHz**) eingeschaltet und die **Reset-Leitung RSTn** auf einer digitalen **Null** gehalten. Erst wenn der Oszillator eingeschwungen ist und stabil läuft, wechselt das **DWM1000** in den **INIT-Zustand** und setzt zusätzlich die **Reset-Leitung in den High-Zustand**. Zudem dient hier eine Frequenz von **19,2 MHz** ( $34,4 \text{ MHz}/2$ ) solange als Systemclock, bis die sogenannte **124 MHz CLKPLL-Clock** eingeschaltet und **gelockt** (**5  $\mu$ s**) wurde. Über die SPI Leitungen können im INIT-Zustand bereits Einstellungen getroffen werden, jedoch ist die maximale SPI Frequenz auf **3 MHz** limitiert. Nachdem die CLKPLL gelockt wurde wechselt das Modul in den **IDLE-Zustand**. Die maximal verwendbare SPI Frequenz steigt nun auf **20 MHz**. Aus dem IDLE-Zustand ist es nun möglich das DWM1000 entweder in einen Schlafmodus (SLEEP) zu versetzen oder in den Sende- bzw. Empfangsmodus (TX/RX) zu schalten. Für die gezielte Initialisierung des Moduls wird zunächst im Programm ein **Hard-Reset durchgeführt**. Die Reset-Leitung wird solange abgefragt bis der **High-Zustand** erreicht wurde. Anschließend werden alle wichtigen **Register auf die Default-Werte** gesetzt. Dazu gehört beispielsweise das **System Configuration Register** oder auch das zurückgesetzten aller **Interrupts im System Event Mask Register**. Außerdem muss das sogenannte LDELOAD Bit nach jedem Einschaltvorgang sowie auch nach dem Aufwachen aus dem Schlafmodus gesetzt werden, um den LDE-Microcode vom internen ROM in den RAM zu laden. Dies ist notwendig, da nur so der exakte RX-

**Zeitstempel erzeugt werden kann.** Bei der Initialisierung des DWM1000 kann außerdem die Frequenz des externen Oszillators durch die Einstellung von internen Trimmkondensatoren feinjustiert werden. Um sicher zu gehen, dass die Funktion des Moduls gewährleistet ist, wird die **Bauteil-ID 0xDECA0103** ausgelesen. Handelt es sich um eine falsche ID, kann keine Konfiguration des Moduls durchgeführt werden. Hier löst nach einer definierten Zeit der im Hintergrund des Programms laufende Watchdog des Mikrocontrollers aus und startet das Programm neu. Für die Funktionalität des DWM1000-Moduls müssen anschließend einige Einstellungen getroffen werden. Bei dieser sogenannten Konfiguration werden hauptsächlich die folgenden Parameter eingestellt [18]:

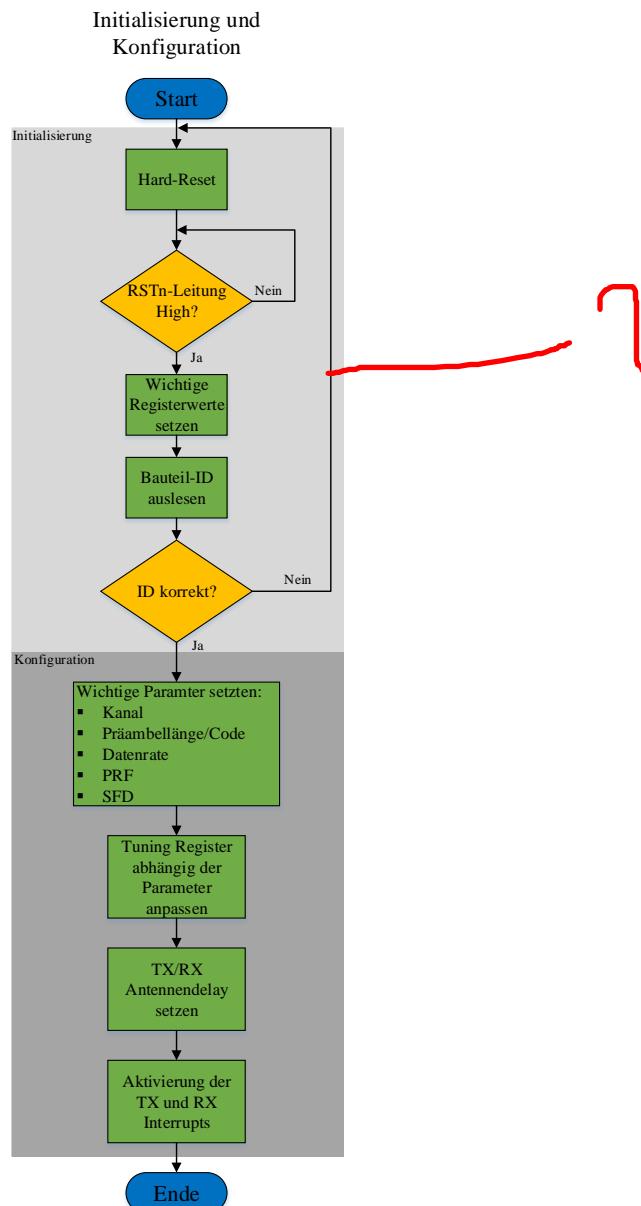
- Funkkanal (1, 2, 3 oder 5) beziehungsweise Funkfrequenz zwischen 3,5 GHz und 6,5 GHz
- PRF (Pulse Repetition Frequency): 16 MHz oder 64 MHz
- Präambellänge: 64, 128, 256, 512, 1024, 2048 oder 4096 Symbole
- SFD Länge: 8, 16 oder 64 Symbole
- TX/RX Präambelcode
- Datenrate: 110 kbit/s, 850 kbit/s oder 6,8 Mbit/s

In Abbildung 5.8 sind einige mögliche Operationsmodi dargestellt, die mit dem DWM1000-Modul eingestellt werden können. Hier werden die wichtigen Parameter wie die Datenrate, die Präambellänge oder auch die PRF konfiguriert. Die dargestellten Modi sind in [54] gegebene Konfigurationsbeispiele, es sind jedoch auch andere Einstellungen möglich. Die Modi 1 bis 8 sind mit dem gleichen Verwendungszweck auch mit einer PRF von 64 MHz anwendbar. Der Stromverbrauch im Senden- und Empfangsmodus ist außerdem abhängig vom verwendeten Modus. Mit kleiner Datenrate (110 kbit/s), einer PRF von 16 MHz und großer Präambellänge ist der Stromverbrauch am geringsten [54].

Mode	Data Rate	PRF (MHz)	Preamble (Symbols)	Data Length (Bytes)	Packet Duration (μs)	Typical Use Case
Mode 1	110 kbps	16	1024	12	2084	RTLS, TDOA Scheme, Long Range, Low Density
Mode 2	6.8 Mbps	16	128	12	152	RTLS, TDOA Scheme, Short Range, High Density
Mode 3	110 kbps	16	1024	30	3487	RTLS, 2-way ranging scheme, Long Range, Low Density
Mode 4	6.8 Mbps	16	128	30	173	RTLS, 2-way ranging scheme, Short Range, High Density
Mode 5	6.8 Mbps	16	1024	1023	1339	Data transfer, Short Range, Long Payload
Mode 6	6.8 Mbps	16	128	127	287	Data transfer, Short Range, Short Payload
Mode 7	110 kbps	16	1024	1023	78099	Data transfer, Long Range, Long Payload
Mode 8	110 kbps	16	1024	127	10730	Data transfer, Long Range, Short Payload

**Abbildung 5.8.:** Beispiele für einstellbare Operationsmodi für das DWM1000-Modul [54].

Im Default-Mode, also im Auslieferungszustand, wird das Modul auf den Mode 2 gesetzt. Außerdem wird der Funkkanal 5 zum senden der Pakete verwendet. Werden andere Einstellungen benötigt, müssen mehrere Tuning-Registerwerte abhängig von den gewählten Parameter angepasst werden. Es ist zudem möglich Parameter so einzustellen, dass sie nicht dem IEEE 802.15.4-2011 Standard entsprechen. Dies bietet teilweise Verbesserungen in der Performance des Moduls. Die gesamte Initialisierung und Konfiguration ist vereinfacht in Abbildung 5.9 dargestellt.



**Abbildung 5.9.:** Programmablaufplan der Initialisierung und Konfiguration des DWM1000-Moduls

## Programmablauf mobiler Tag

Der Programmablauf des mobilen Tags für einen typischen Lokalisierungsvorgang ist in Abbildung 5.10 dargestellt. Zunächst wird das gesamte System initialisiert und das DWM1000-Modul in den **Schlafmodus** versetzt. Danach wird der Wake-Up Receiver vom Mikrocontroller für den Empfang von Aufwecksignalen konfiguriert. Sowohl das **Funkmodul** als auch der **Mikrocontroller** werden anschließend in den **Energiesparmodus** versetzt. Dieser Modus wird solange beibehalten, bis ein von der Basisstation gesendetes **Aufweckpaket** (siehe Abbildung 5.5) empfangen wird. Dadurch wird der Mikrocontroller aufgeweckt, welcher anschließend auch das Funkmodul aktiviert. Nun wird die gesendete **Aufweckadresse** mit der eigenen, im **Aufweckempfänger** konfigurierten Adresse verglichen. Stimmen die beiden Adressen nicht überein, wird der Wake-Up Receiver erneut konfiguriert und das Gesamtsystem anschließend zurück in den **Standby-Modus** versetzt. Kommt es zu einer Übereinstimmung der Adresse, sendet der Tag über den **HF-Kommunikationspfad** ein **ACK** (Acknowledge) zurück an die **Basisstation**. Dies ist eine Bestätigung dafür, dass der Tag erfolgreich aufgeweckt wurde. Durch das Aufwecksignal sind zusätzlich auch die **Anzahl** an Messungen bekannt (siehe Abbildung 5.6). Wird keine Anzahl angegeben, werden standardmäßig **25 Messungen** je Knoten durchgeführt. Danach wartet der Tag auf den Empfang der von der **Basisstation** gesendeten Knoten IDs. Werden diese empfangen, bestätigt der Tag auch hier den Empfang mit einem ACK. Der Tag besitzt nun die Information über die Gesamtanzahl der Knoten im Lokalisierungsbereich und deren Adressen, weshalb jeder einzeln angesprochen werden kann. Zunächst wird das DWM1000-Modul aus dem **Schlafmodus** in den **Aktivmodus** versetzt und erneut initialisiert. Jeder einzelne Knoten im System wird nacheinander über seine ID durch die Blink-Nachricht des DWM1000-Moduls aufgefordert eine Distanzmessung zu starten. Ist der Knoten jedoch außer Reichweite für das Blink-Paket, steht dieser nicht bereit für eine gezielte Messung. In diesem Fehlerfall wird nach einer festgelegten Zeit der nächste Knoten im System angesprochen. Kann eine Messung mithilfe der drei Nachrichten Poll, Response und Final durchgeführt werden, so kann die Distanz zwischen mobilem Tag und dem jeweiligen Knoten mit den ermittelten TX/RX Zeitstempeln direkt berechnet werden (siehe Formel 2.16, Kapitel 2.4.6.2). Das Senden der drei Nachrichten wird solange wiederholt bis die vorgegebene Anzahl an Distanzmessungen pro Knoten erreicht wird. Die dabei ermittelten Distanzen werden mit der zugehörigen Knoten ID in einem Array zwischengespeichert. Dadurch können die Werte jedem Knoten eindeutig zugewiesen werden. Nachdem der Tag die Distanzmessungen mit dem **letzten Knoten** abgeschlossen hat, wird das DWM1000-Modul sofort zurück in den **Schlafmodus** versetzt. Aus den im Array gespeicherten Messwerten wird das Datenpaket (siehe Abbildung 5.5) zur Funkübertragung der Distanzen gebildet. Dieses wird an die entfernte Basisstation gesendet. Der Erhalt jedes gesendeten Datenpakets wird von der Basisstation durch das **Senden eines ACK** bestätigt. Nach der Aktivierung des **Aufweckempfängers**, wechselt der Tag wieder zurück in den **Standby-Modus**. Darin verbleibt der Tag wiederum solange, bis der nächste Lokalisierungsvorgang mit einem Aufwecksignal gestartet wird.

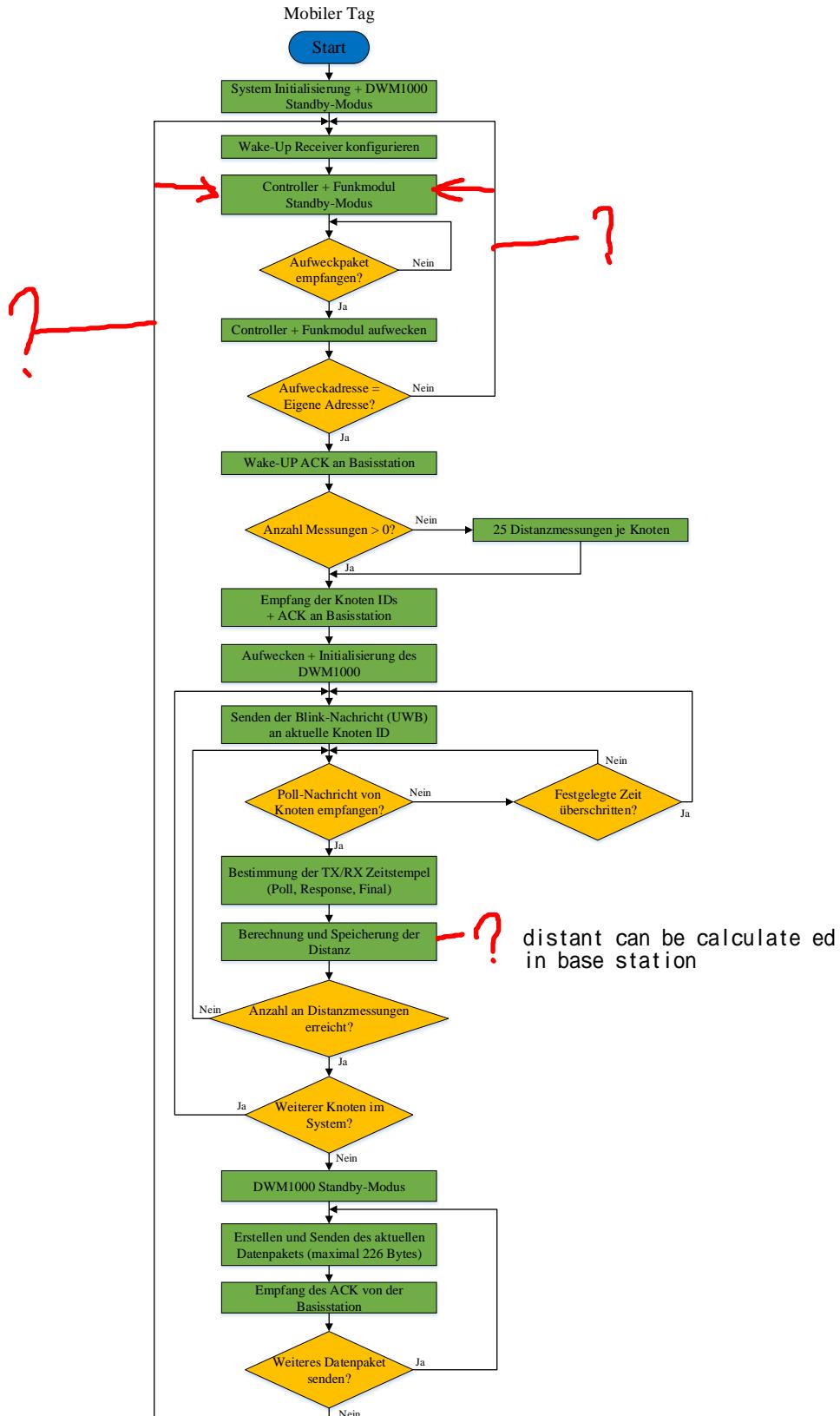
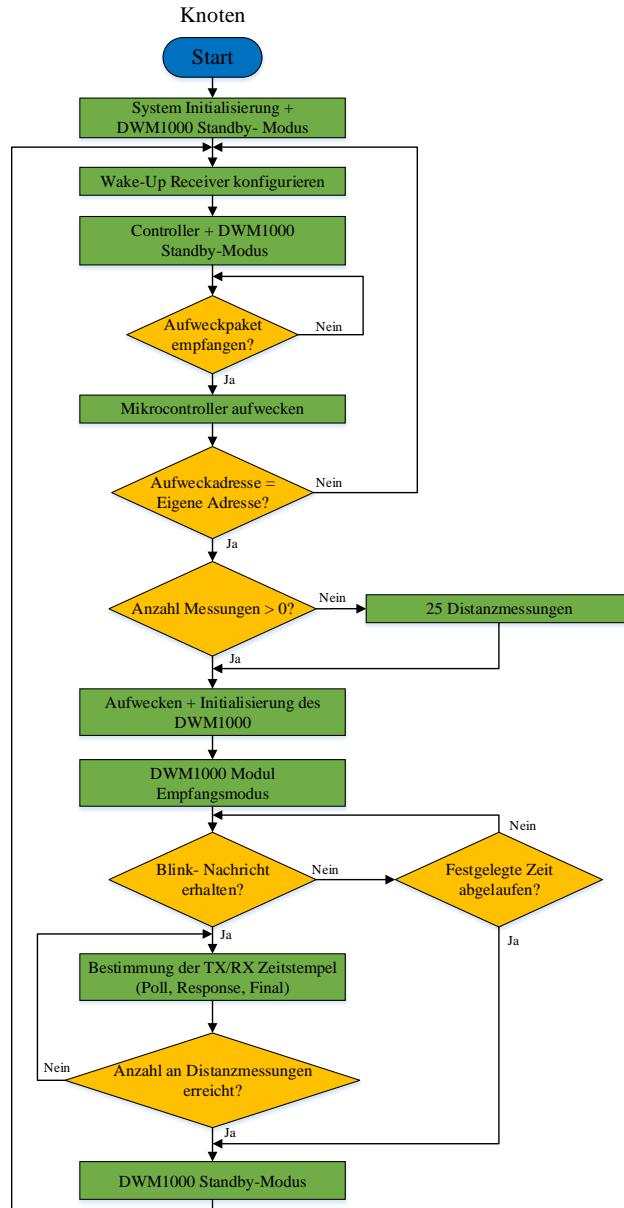


Abbildung 5.10.: Programmablaufplan des mobilen Tags für ein Lokalisierungsvorgang.

## Programmablauf Knoten

Der Programmablauf eines einzelnen Knoten für einen typischen Lokalisierungsvorgang ist in Abbildung 5.11 dargestellt.



**Abbildung 5.11.:** Programmablaufplan des eines Knotens für ein Lokalisierungsvorgang.

Wie auch beim mobilen Tag wird zunächst das System initialisiert und das DWM1000-Modul in den Schlafmodus versetzt. Anschließend konfiguriert auch hier der Con-

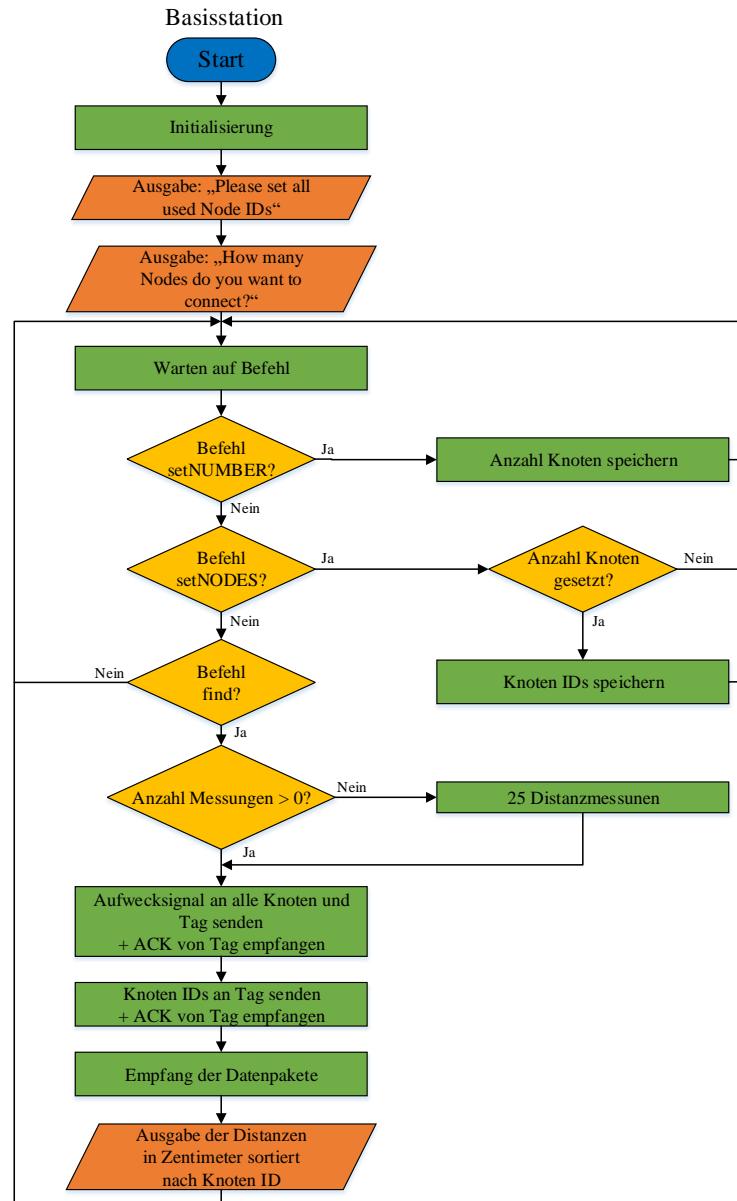
troller den Wake-Up Receiver für den Empfang eines Aufwecksignals. Der Mikrocontroller wird daraufhin in den Standby-Modus versetzt. Empfängt der Wake-Up Receiver ein von der Basisstation gesendetes Aufwecksignal wird der Mikrocontroller vom Standby-Modus in den aktiven Modus geschaltet. Stimmt die konfigurierte Adresse nicht mit der gesendeten Adresse überein, wechselt das System zurück in den Energiesparmodus. Bei Übereinstimmung der Adressen wird das DWM1000-Modul aufgeweckt und erneut initialisiert. Auch hier wird die Anzahl der Distanzmessungen je Knoten mit dem Aufwecksignal mitgesendet. Ist diese Anzahl Null, so werden exakt 25 Distanzmessungen durchgeführt. Das DWM1000-Modul wird zunächst in den Empfangsmodus geschaltet. In diesem Modus bleibt es, bis eine Blink-Nachricht vom mobilen Tag gesendet wird. Wird nach einer festgelegten Zeit keine Nachricht detektiert, wechselt das System ohne eine Distanzmessung auszuführen zurück in den Standby-Modus. Empfängt der Knoten jedoch ein Blink-Paket wird mit dem Senden der Poll-Nachricht die Distanzmessung zwischen Knoten und dem Tag initiiert. Wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt werden mit der Poll-, Response- und Final-Nachricht die TX/RX Zeitstempel aufgenommen. Wobei der Knoten alle seine aufgenommenen Zeitstempel mit der letzten Final-Nachricht zum mobilen Tag sendet. Nur so ist es möglich, dass der Tag die Distanz direkt berechnen kann. Anzumerken ist hier, dass der TX-Zeitstempel der Final-Nachricht nicht vom DWM1000-Modul bestimmt wird, sondern berechnet wird. Nachdem die vorgegebene Anzahl an Distanzmessungen durchgeführt wurde, wechselt das System in den Standby-Modus. Das heißt Mikrocontroller und DWM1000-Modul werden zurück in den Schlafmodus versetzt. Zuvor wird erneut der Wake-Up Receiver für das Empfangen der Aufwecksignale konfiguriert. Erst beim nächsten Lokalisierungsvorgang kann der Knoten erneut aufgeweckt werden und somit Distanzen bestimmt werden. Wie der Programmablauf zeigt wird beim Knoten kein Funkmodul benötigt, da bei der Kommunikation keine HF-Datenpakete gesendet werden müssen.

### Programmablauf Basisstation

Der typische Ablauf des Programms ist in Abbildung 5.12 dargestellt. Zunächst muss die Basisstation über USB an den PC angeschlossen werden. Mit dem Anlegen der Spannungsversorgung wird das System initialisiert. Mithilfe einer Software wie beispielsweise *Hterm* können nun über die serielle Schnittstelle Funktionsbefehle an den Mikrocontroller übermittelt werden. Jeder gesendete Befehl muss mit einem [CR][LF] abgeschlossen werden. Für die gezielte Lokalisierung werden die Anzahl an Knoten im System und die zugehörigen IDs benötigt. Diese Informationen müssen dem Mikrocontroller direkt vor einem Lokalisierungsvorgang mitgeteilt werden. Zuerst muss die Anzahl der Knoten angegeben werden zu denen die Distanz bestimmt werden soll. Dazu muss der folgende Befehl eingegeben und übermittelt werden:

- setNUMBER: "Anzahl"

Werden drei Knoten eingesetzt, so lautet der Befehl **setNUMBER: 3**. Anschließend müssen die 16 Bit IDs der Knoten in HEX angegeben werden.



**Abbildung 5.12.:** Programmablaufplan der Basisstation für einen Lokalisierungsvorgang

Die Reihenfolge bestimmt hier auch die spätere Reihenfolge mit der der mobile Tag die Distanzen ermittelt. Die IDs werden folgendermaßen der Basisstation übermittelt:

- **setNODES:** [0x...., 0x...., 0x...., ...]

Bei drei Knoten lautet der Befehl **setNODES:** [0x1E1E, 0x2020, 0x3A3A]. Um nun die Distanzmessungen zu starten muss der gewünschte mobile Tag angesprochen

werden. Angesprochen wird er mit seiner 16 Bit ID in HEX-Format. Zusätzlich kann die Anzahl an gewünschten Distanzen pro Knoten angegeben werden. Die Distanzmessungen werden mit dem folgenden Befehl gestartet:

- **find 0x310F, "Anzahl"**

Wird keine "Anzahl" angegeben, so werden 25 Distanzen fix eingestellt. Mit dem **find**-Befehl wird zuerst das Aufwecksignal an alle Knoten und an den mobilen Tag gesendet. Das Signal wird mit abwechselnder Antenne insgesamt viermal gesendet, um sicher zu gehen das alle Knoten und der Tag aufwachen. Der Tag bestätigt sein Aufwachen mit einem ACK. Anschließend werden **Anzahl** sowie auch die **IDs** der **Knoten** über den **HF-Kommunikationspfad** an den **Tag** übermittelt. Auch dieser Empfang wird vom Tag mit einem ACK bestätigt. Während der Tag die Distanzmessungen zu allen Knoten im System durchführt, wartet die Basisstation auf den Empfang der **Messwertdatenpakete**. Handelt es sich um mehrere Pakete, werden die Daten zusammengefügt und anschließend über die serielle Schnittstelle auf einem Fenster der Hterm Software dargestellt. Die ermittelten Distanzen sind in Zentimeter angegeben und werden den jeweiligen Knoten IDs zugeordnet.



# 6. Messungen und Ergebnisse

## 6.1. DWM1000-Modul Einstellungen

Für alle durchgeführten Messungen wurden die folgenden DWM1000-Modul Einstellungen getroffen:

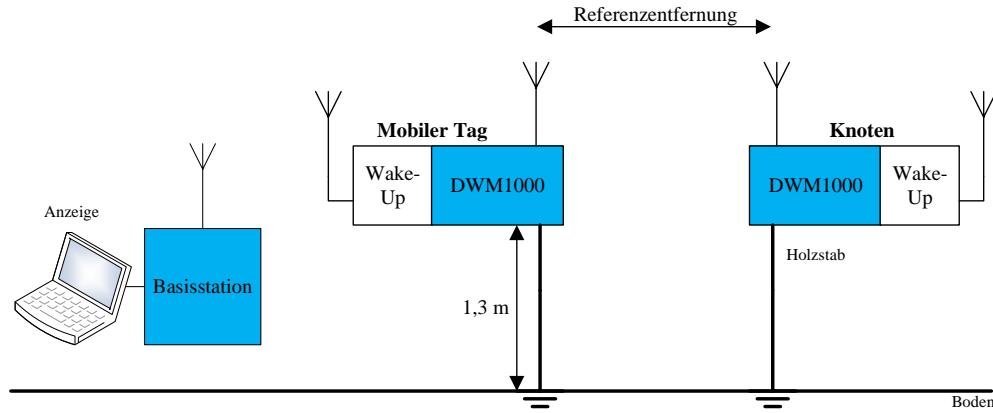
- Funkkanal: 1 mit einer Frequenz von 3494,4 MHz und einer Bandbreite von 499,2 MHz
- PRF: 16 MHz
- Präambellänge: 2048 Symbole
- SFD: 64 Symbole
- Datenrate: 110 kbit/s

Der Parameter PRF wurde auf 16 MHz eingestellt, da dadurch die Sensitivität des Receivers erhöht und auch eine größere Reichweite erreicht wird. Außerdem ist der Leistungsverbrauch bei 16 MHz kleiner als bei einer 64 MHz PRF. Eine Präambellänge von 2048 Symbolen wurde eingestellt, um auch hier die Performance im Bereich der Reichweite verbessern zu können. Jedoch ist hier mit einem erhöhten Leistungsverbrauch zu rechnen, da die TX/RX Zeiten erhöht werden. Die kleinste mögliche Datenrate des Systems sowie der Funkkanal wurden gewählt, um auch hier eine maximale Reichweite zu erreichen.

## 6.2. Kalibrierung der Knoten/Tag Systeme

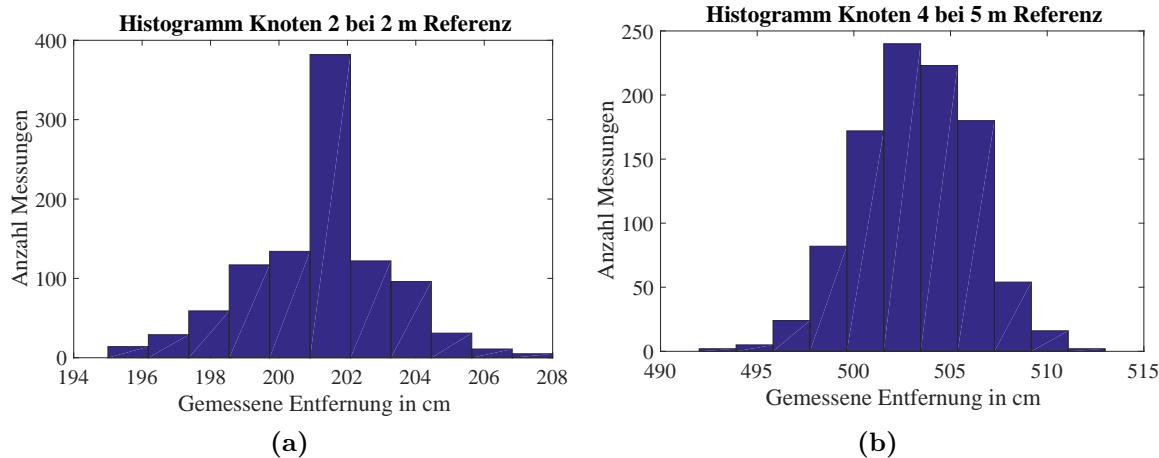
Um eine hohe Lokalisierungsgenauigkeit des Gesamtsystems zu erreichen wurden zunächst Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Bei der Kalibrierung werden die so genannten systematischen Fehler kompensiert. Dazu gehört der Offsetfehler und der Skalierungsfehler einer Messung (siehe Kapitel 2.3.1). Für die Messungen wurden fünf Knoten und ein mobiler Tag eingesetzt. Der Versuchsaufbau für die Distanzmessung ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Ein mobiler Tag und jeweils ein Knoten wurden im Freien auf 1,3 m hohe Holzstäbe befestigt und in den Abständen 25 cm, 50 cm, 75 cm, 100 cm, 200 cm, 300 cm, 500 cm, 700 cm und 900 cm platziert. Die Messung der Referenzentfernung zwischen Tag und Knoten wurde mit dem Lasermessgerät *Leica Disto D3aBT* realisiert. Für jeden Entfernungsmesspunkt wurden

je 1000 Distanzmessungen durchgeführt. In diesem Fall handelt es sich um eine begrenzte Anzahl an Messungen.



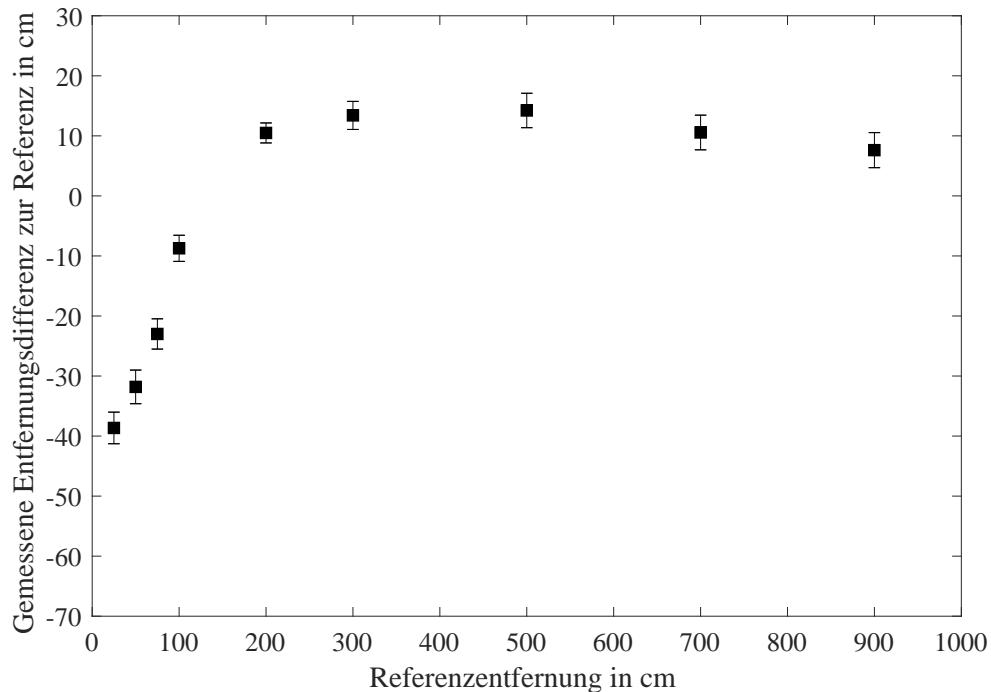
**Abbildung 6.1.:** Versuchsaufbau der Kalibrierungsmessung für den mobilen Tag und einen Knoten

Bei begrenzter Stichprobenanzahl  $N$  wird anstatt einer Gaußschen Normalverteilung eine sogenannte Student-Verteilung angenommen. Diese ist um einen Faktor  $t$  breiter als die Normalverteilung. Für große Stichprobenzahlen  $N > 200$  nähert sich die Studentverteilung der Gaußschen Normalverteilung an. Durch die gewählte Anzahl an Distanzmessungen von  $N = 1000$  kann bei diesen Kalibrierungsmessungen zunächst von einer Gaußschen Verteilung ausgegangen werden. Ein Korrekturfaktor für die Standardabweichung ist in diesem Fall nicht notwendig[7]. Abbildung 6.2.(a) und 6.2.(b) zeigen in einem Histogramm die gewichteten Verteilungen der Messwerte für zwei durchgeführte Distanzmessungen unterschiedlicher Knoten und Referenzdistanzen. Um zu überprüfen, ob es sich bei der Verteilung der Distanzdaten um eine Gaußsche Normalverteilung handelt, wird der sogenannte Chi-Quadrat-Test angewendet. Bei einer Signifikanzgrenze von 5% ist die Verteilung entweder gaußverteilt oder die Gaußhypothese wird aufgrund von einer zu großen Abweichung der gemessenen Häufigkeit gegenüber der erwarteten Häufigkeit der Daten abgelehnt[7]. Wird der Chi-Quadrat-Test auf die in Abbildung 6.2.(a) und (b) dargestellten Verteilungen angewandt, handelt es sich in (b) um eine Gaußsche Normalverteilung, wogegen (a) nicht normalverteilt ist. Diese unterschiedlichen Ergebnisse sind auf die Berechnung der Distanzen in der Basisstation zurückzuführen. Hier werden die ermittelten Distanzwerte von Meter in Zentimeter umgerechnet. Bei der Umrechnung werden die Werte nicht gerundet, sondern auf eine Genauigkeit von 1 cm abgeschnitten.



**Abbildung 6.2.:** a) Verteilung der gemessenen Distanzwerte bei einer Referenzentfernung von 2 m mit dem Knoten 2 b) Verteilung der gemessenen Distanzwerte bei einer Referenzentfernung von 5 m mit dem Knoten 4

Dieser selbst initiierte Fehler führt dazu, dass Distanzwerte häufiger vorkommen, obwohl sie eigentlich auf einen höheren Wert aufgerundet werden müssten. Dies bedeutet, dass es sich in 6.2.(a) vermutlich auch um eine Gaußverteilung handelt, wenn dieser Fehler nicht auftreten würde.



**Abbildung 6.3.:** Gemessene Entfernungsdifferenz in Bezug zur Referenzentfernung mit den ermittelten Mittelwerten für den Knoten 3.

Für die Kalibrierung des Systems wurde zunächst mithilfe der Software Matlab aus den ermittelten Distanzwerten der Mittelwert und die Standardabweichung für jeden einzelnen Entfernungsmesspunkt und Knoten bestimmt. Abbildung 6.3. zeigt am Beispiel von Knoten 3 die Differenzen der Mittelwerte gegenüber der Referenzentfernung mit den zugehörigen Standardabweichungen (Fehlerbalken). Die Abbildungen der restlichen vier Knoten werden im Anhang dargestellt. Das Ergebnis der Mittelwertberechnung zeigt, dass die Abweichung zur Referenzentfernung nicht konstant ist. Somit ist auch der Offsetfehler über die gemessenen Distanzen nicht konstant. Die in Abbildung 6.3. dargestellten Messergebnisse bei 25 cm, 50 cm, 75 cm und auch 100 cm zeigen, dass die Abweichung zur Referenzdistanz mit kleiner werdender Distanz zwischen Knoten und Tag stetig zunimmt. Im Bereich der Messpunkte von 200 cm bis 900 cm dagegen, bleibt die Abweichung konstant zwischen 7,6 cm und 14,2 cm. Dies bedeutet, dass zwei verschiedene systematische Fehler in diesem System auftreten. Der stark ansteigende Fehler im Bereich der kleinen Distanzen ist vermutlich darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung der Distanz die Messabweichung der Chipzeit ( $T_{reply}$ ) gegenüber der RTT-Zeit ( $T_{round}$ ) dominiert (siehe Kapitel 2.4.6). Mit größer werdender Entfernung wird der Einfluss dieses systematischen Fehlers geringer.

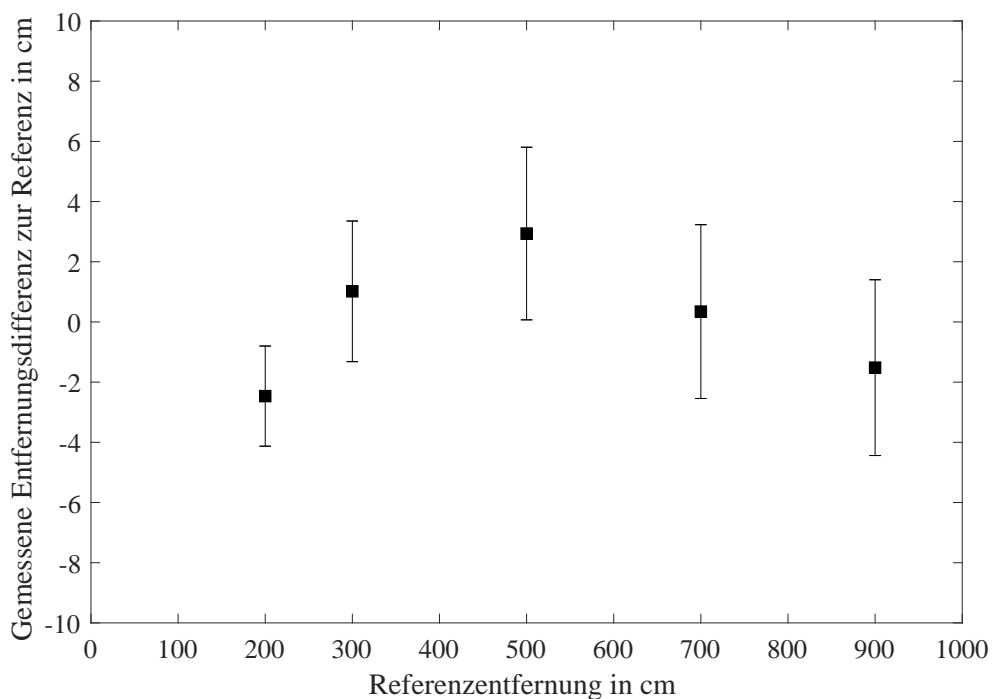
Da die Knoten zumeist an der Decke befestigt werden, ist eine hohe Genauigkeit im Bereich von 0 cm bis 100 cm nicht erforderlich. Aus diesem Grund wird die Kalibrierung der Knoten/Tag Systeme mit den Entfernungsmesspunkten im Bereich von 200 cm bis 900 cm realisiert. Dazu wurde in diesem Bereich für jeden Knoten zunächst eine lineare Regression mit den berechneten Mittelwerten durchgeführt. Mithilfe der daraus entstandenen Geraden in der Form  $y = m \cdot x + b$ , können die beiden Korrekturfaktoren  $b$  und  $m$  bestimmt werden. Dadurch ist es möglich den Offsetfehler ( $b$ ) und den Skalierungsfehler ( $m$ ) zu kompensieren und sich der idealen Referenzdistanzgerade der Form  $y = x'$  anzunähern. Die Korrekturfaktoren für jeden einzelnen Knoten sind in Tabelle 6.1 dargestellt.

**Tabelle 6.1.:** Übersicht der einzelnen Korrekturfaktoren für die Kalibrierung der Knoten.

Knoten	Korrekturfaktor für Skalierungsfeh- ler $m$	Korrekturfaktor für Offsetfehler $b$
Knoten 1	0.99250	-5.20500
Knoten 2	0.99930	-0.24217
Knoten 3	1.00547	-14.1030
Knoten 4	1.01452	-8.12530
Knoten 5	1.01015	-4.9066

Bei den in Abbildung 6.4 dargestellten Werten handelt es sich um die Korrektur der in Abbildung 6.3. gezeigten Mittelwerte mit den Korrekturfaktoren für Knoten 3 aus Tabelle 6.1 (weitere Knoten siehe Anhang). Die Differenz zur Referenzdistanz der einzelnen Messwerte ist nach der Kalibrierung im Bereich zwischen etwa  $\pm 3$  cm. Mit Knoten 3 kann somit eine Genauigkeit von etwa  $\pm 3$  cm bei einer Standardabweichung von etwa  $\pm 3$  cm erreicht werden.

Da dieses System als Innenraum-Lokalisierungssystem eingesetzt werden soll, müssen weitere Messungen im Innenraum durchgeführt werden. Diese im nächsten Abschnitt dargestellten Messungen werden zeigen, welchen Einfluss dynamische Veränderungen im Raum sowie Mehrwegeausbreitung und Reflektionen auf die Genauigkeit der Distanzmessungen haben.

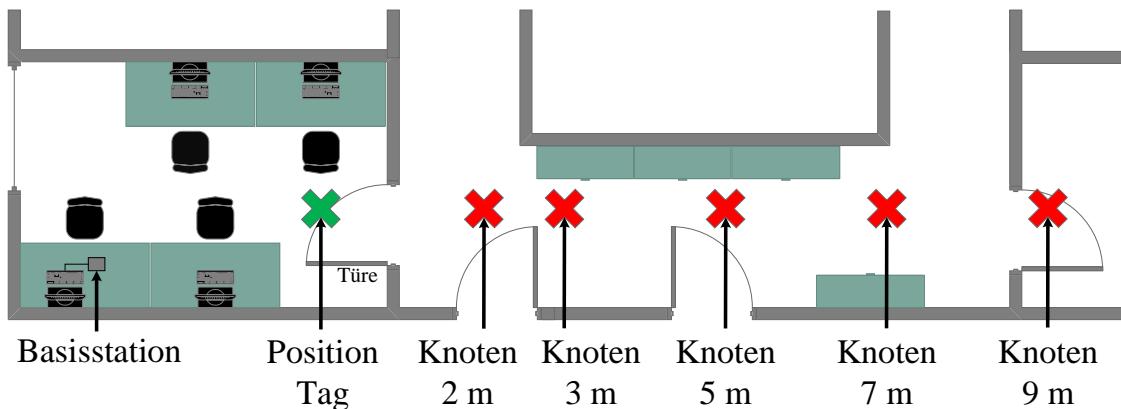


**Abbildung 6.4.:** Gemessene Entfernungsdifferenz gegenüber der Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 3.

## 6.3. Distanzmessungen im Innenraum

Für die Distanzmessungen im Innenraum wurde wie in Kapitel 6.2 der Versuchsaufbau aus Abbildung 6.1 gewählt. Ein mobiler Tag sowie ein Knoten (Knoten 3) wurden für die Messungen auf die 1,3 m hohen Holzstäbe befestigt und in den Referenzentfernungen 200 cm, 300 cm, 500 cm, 700 cm und 900 cm platziert. Die Referenzfernungsmeßungen zwischen Tag und Knoten 3 wurden wiederum mit dem Lasermessgerät *Leica Disto D3aBT* durchgeführt. Sowohl der Messaufbau als

auch die Abstände wurden gewählt, um die bei dieser Messung ermittelten Ergebnisse mit den Werten aus Kapitel 6.2 vergleichen zu können. Abbildung 6.5 zeigt den Grundriss des Messortes mit den zugehörigen Referenzmesspunkten.

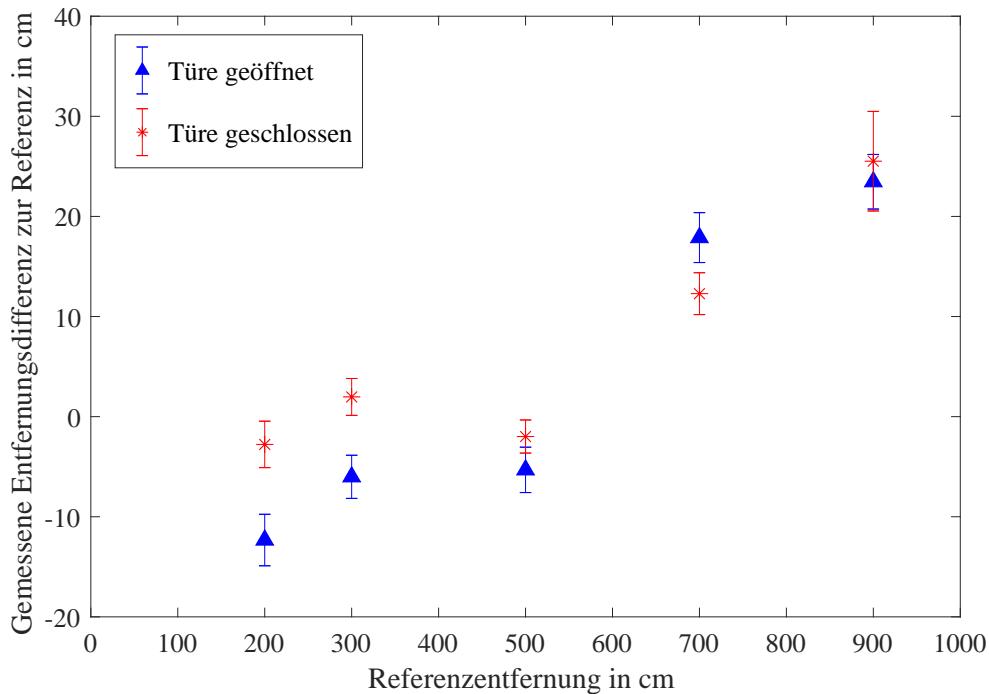


**Abbildung 6.5.:** Grundriss des Messortes mit den zugehörigen Referenzmesspunkten. Der mobile Tag hat eine feste Position, wogegen der Knoten 3 auf die einzelnen Referenzentfernungen platziert wird.

Um eine Messung mit dynamischer Umgebung zu realisieren, wurden Distanzmessungen mit offener und geschlossener Holztür durchgeführt. Die Türe befindet sich im Abstand von etwa 1 m zum mobilen Tag (siehe Abbildung 6.5) und hat eine Dicke von 4 cm. Wie auch in Kapitel 6.2 wurden 1000 Messungen pro Referenzentfernung durchgeführt. Die Mittelwerte und Standardabweichungen der Distanzmessungen wurden wiederum mit Matlab berechnet. In Abbildung 6.6 sind die Differenzen der Mittelwerte gegenüber der Referenzentfernung mit den zugehörigen Standardabweichungen (Fehlerbalken) bei geöffneter und geschlossener Tür dargestellt. Die in Tabelle 6.1 ermittelten Korrekturfaktoren wurden bei der Berechnung miteinbezogen. Wie Abbildung 6.6 zeigt, gibt es unabhängig davon, ob die Türe geöffnet oder geschlossen ist einen Unterschied zwischen den ermittelten Werten im Innenraum und den Ergebnissen der Kalibrierungsmessungen im Freien (siehe Abbildung 6.4). Dies ist auf Effekte wie Reflektionen an Decken, Wänden oder auch Gegenständen sowie auf die Mehrwegeausbreitung zurückzuführen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss dieser Effekte mit größer werdender Distanz zunimmt. Bei 700 cm liegt die Abweichung zur Referenzdistanz bei etwa  $12 \text{ cm} \pm 2 \text{ cm}$  bis  $18 \text{ cm} \pm 2,5 \text{ cm}$ , bei 900 cm steigt sie auf etwa  $23,5 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$  bis  $25,5 \text{ cm} \pm 5 \text{ cm}$  an. Im Bereich von 200 cm bis 500 cm ist eine Genauigkeit von  $12,5 \text{ cm} \pm 2,5 \text{ cm}$  möglich. Werden nun die Messungen mit geschlossener und geöffneter Tür betrachtet, so besteht auch hier ein Unterschied in den Ergebnissen. Bei den Referenzdistanzen von 200 cm, 300 cm und 500 cm beträgt der Unterschied bis zu 10 cm. Mit größeren Distanzen wird der Einfluss der Türe geringer.

Die Ergebnisse zeigen, dass Mehrwegeausbreitungen und Reflektionen durchaus Einfluss auf die Messungen der Distanzen mit Ultra-Wideband haben. Materialien wie

zum Beispiel Holz können von UWB-Signalen durchdrungen werden, jedoch hat auch dies einen Einfluss auf die Distanzmessung.



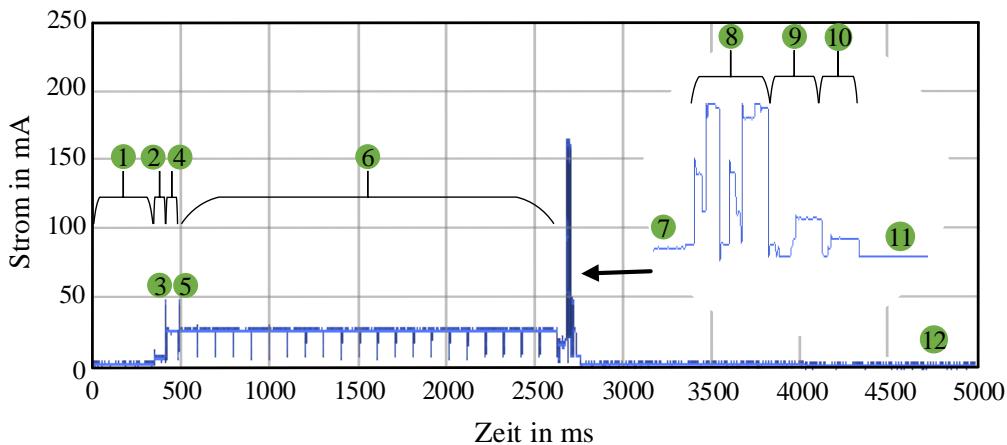
**Abbildung 6.6.:** Gemessene Entfernungsdifferenz gegenüber der Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 3. Diese Messungen wurden im Innenraum bei geöffneter und geschlossener Tür durchgeführt.

## 6.4. Messung des Energieverbrauchs von Knoten und Tag für eine Distanzmessung

Um eine lange Akkulaufzeit zu erreichen, ist es wichtig, dass die Stromaufnahme von Knoten und Tag niedrig ist. In den beiden nächsten Abschnitten werden die Stromprofile von Knoten und Tag aufgenommen und der Energieverbrauch für eine Distanzmessung ermittelt.

### 6.4.1. Energieverbrauch des mobilen Tags

Für die Berechnung des Energieverbrauchs wurde zunächst das Stromprofil des mobilen Tags für eine Distanzmessung zwischen einem Knoten aufgenommen. Dazu wurde das Oszilloskop *DSO-X 2024A* von *Agilent Technologies* verwendet. Die Anzahl an Distanzmessungen wurde auf eins festgelegt.



**Abbildung 6.7.:** Stromverbrauch des Tags während einer Distanzmessung.

Im Folgenden werden die einzelnen Punkte aus Abbildung 6.7 näher erläutert:

1. Das System befindet sich hier im Energiesparmodus. Nur der Aufweckempfänger hört die Umgebung nach Aufweckpaketen ab. Der Stromverbrauch in diesem Standby-Modus liegt bei etwa  $20 \mu\text{A}$ .
2. Wird ein Aufwecksignal detektiert, weckt der Aufweckempfänger den Mikrocontroller auf. Die Nutzdaten des Aufweckpaketes werden eingelesen. Dieser Vorgang benötigt etwa 60 ms bei einer Stromaufnahme von ca. 3,6 mA.
3. Der Tag schickt ein Acknowledge (ACK) zur Basisstation um das erfolgreiche Aufwachen zu bestätigen. Dieses Signal wird mit einer Sendeleistung von +12 dBm gesendet, da die Entfernung zwischen Tag und Basisstation groß sein kann. Der Stromverbrauch liegt hier bei ca. 40 mA. Das Senden des ACK-Signals dauert etwa 7,5 ms.
4. Der Funktransceiver CC1101 befindet sich etwa 60 ms lang im Receiver On-Mode um das Datenpaket mit den Knoten IDs zu empfangen. Der Stromverbrauch liegt bei ca. 21,8 mA.
5. Für die Bestätigung zum Erhalt der Knoten IDs, sendet der Tag ein ACK an die Basisstation. Auch hier wird mit einer Sendeleistung von +12 dBm gesendet. Dafür benötigt das System etwa 11,38 ms bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch von etwa 24,4 mA.
6. Hier befindet sich das System etwa 2125 ms lang im Empfangsmodus des Funkmoduls. In dieser Zeit wird das DWM1000-Modul aufgeweckt und initialisiert. Der Strombedarf liegt hier bei 21,8 mA.
7. Nach dem erfolgreichen Aufwachen des DWM1000-Moduls, befindet sich dieses

im Idle-Modus. In diesem Modus verbraucht der Tag etwa 50 ms lang einen Strom von 13,2 mA.

8. Anschließend beginnt die Distanzbestimmung mit dem DWM1000-Modul. Der Tag sendet das Blink-Signal, empfängt das Poll-Signal, sendet das Response-Signal und empfängt schließlich die Final-Nachricht. Bei diesem Vorgang hat das System einen durchschnittlichen Strombedarf von etwa 104,66 mA. Die Distanzbestimmung dauert ca. 21,25 ms. Das DWM1000-Modul wird danach zurück in den Standby-Modus versetzt.
9. In diesem Bereich wird das Paket mit dem ermittelten Distanzwert vorbereitet und anschließend an die Basisstation gesendet. Bei einer Dauer von ca. 16 ms wird im Durchschnitt ein Strom von etwa 25 mA verbraucht.
10. Nachdem das Datenpaket versendet wurde, empfängt der Tag ein ACK von der Basisstation. Dieser Empfangsvorgang dauert etwa 11 ms bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch von ca. 18,58 mA.
11. Das System bereitet sich auf den Erhalt eines Aufwecksignals vor, während das Funkmodul weiterhin angeschaltet ist. Der Strombedarf hier liegt bei etwa 5,45 mA. Der Vorgang benötigt eine Zeit von 30 ms.
12. Das Funkmodul und der Mikrocontroller befinden sich wieder im Energiesparmodus (ca. 20  $\mu$ A).

### **Energieverbrauch des Tags für eine Distanzmessung**

Um den Energieverbrauch des Tags für eine Distanzmessung bestimmen zu können, wird zunächst die elektrische Ladungsmenge ermittelt. Für die Bestimmung der elektrischen Ladungsmenge wird das in Abbildung 6.7 aufgenommene Stromprofil über die Zeit integriert. Die einzelnen Werte für die Berechnung sind noch einmal in Tabelle 6.2 dargestellt. Mit den Werten aus Tabelle 6.2 ergibt sich ein Ladungsbedarf von  $Q_{Tdist} = 0,01445$  mAh pro Distanzmessung. Der durchschnittliche Stromverbrauch für eine Distanzmessung liegt bei  $I_{Tdist} = 21,77$  mA, bei einer Dauer von 2392,13 ms. Werden für eine Lokalisierung drei Distanzen mit drei verschiedenen Knoten bestimmt, wird der Bereich (8) vom Tag insgesamt dreimal durchgeführt. Der Ladungsbedarf steigt dadurch auf etwa  $Q_{Tlok} = 0,01569$  mAh an. Der durchschnittliche Strom für eine Lokalisierung steigt auf  $I_{Tdist} = 23,22$  mA (Dauer: 2434,63 ms). Befindet sich der Tag eine Stunde im Standby-Modus, beträgt die Ladungsmenge  $Q_{Standby/Stunde} = 20 \mu A \cdot 1 h = 0,02$  mAh. Der Tag wird zum Beispiel mit einem LiPo-Akku mit einer Kapazität von 1200 mAh betrieben. Liefert der Akku bei 80% der Kapazität die benötigte Spannung und den Strom (960 mAh), so kann die Akkulaufzeit in Abhängigkeit der Lokalisierungsanfragen berechnet werden. Mit dem Stromverbrauch im Standby-Modus von  $I_{Standby} = 20 \mu A$  ergibt sich für keine Anfrage eine Akkulaufzeit von etwa 5,5 Jahren. Werden zum Beispiel 100 Lokalisierungsanfragen am Tag gestellt (drei Knoten) verringert sich die Akkulaufzeit auf etwa 1,325 Jahre.

**Tabelle 6.2.:** Approximierter Stromverbrauch des Tags für die verschiedenen Bereiche (Abbildung 6.7).

Bereich	Stromverbrauch	Dauer
(2)	3,6 mA	60 ms
(3)	40 mA	7,5 ms
(4)	21,8 mA	60 ms
(5)	24,4 mA	11,38 ms
(6)	21,8 mA	2125 ms
(7)	13,2 mA	50 ms
(8)	104,66 mA	21,25 ms
(9)	25 mA	16 ms
(10)	18,58 mA	11 ms
(11)	5,45 mA	30 ms

Der Energieverbrauch des Tags nimmt mit der Anzahl an Lokalisierungsanfragen zu. Wird zum Beispiel mit der maximal möglichen Rate von etwa 0,42 Hz abgefragt, so verbraucht der Tag bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V eine Energie von etwa 76,6 mWh. Der Energieverbrauch bei keiner Abfrage liegt bei etwa 0,066 mWh. Werden 100 Lokalisierungsanfragen am Tag durchgeführt, das bedeutet alle 15 min, verbraucht das System etwa 0,27 mWh. Im Allgemeinen bedeutet dies für den Tag, dass der Energieverbrauch in Abhängigkeit der Lokalisierungsanfragen zwischen 0,066 mWh und 76,6 mWh liegt.

#### 6.4.2. Energieverbrauch eines Knotens

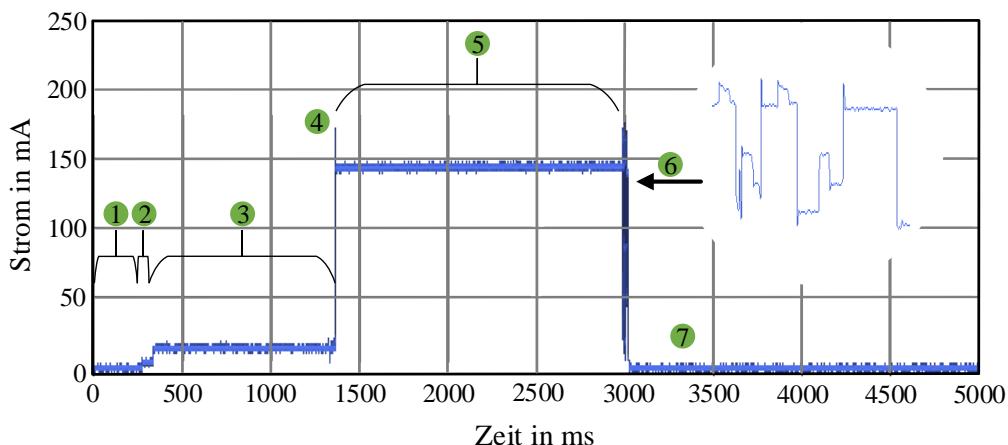
In Abbildung 6.8 ist das mit dem Oszilloskop *DSO-X 2024A* von *Agilent Technologies* aufgenommene Stromprofil des Knotens dargestellt. Auch hier wurde lediglich ein Distanzwert bestimmt.

Im Folgenden werden die in Abbildung 6.8 dargestellten Punkte näher erläutert:

1. Der Knoten befindet sich im Energiesparmodus. DWM1000-Modul und Mikrocontroller sind im Schlafmodus, während der Aufweckempfänger die Umgebung nach Wak-Up Paketen abhört. Wie beim Tag verbraucht der Knoten einen Strom von etwa  $20 \mu\text{A}$ .
2. Der Aufweckempfänger weckt nach gültigem Aufwecksignal den Mikrocontroller. Dieser wechselt vom Standby-Modus in den aktiven Modus. Außerdem

werden die restlichen Nutzdaten des Aufweckpaketes eingelesen. Das System benötigt hierfür etwa 60 ms bei einem Strombedarf von ca. 3,6 mA.

3. Das DWM1000-Modul wird aufgeweckt und anschließend initialisiert und konfiguriert. Im Idle-Modus des Moduls befindet sich der Knoten etwa 1000 ms lang, bei einem Strom von ca. 13,2 mA.
4. Bei diesem Stromimpuls wird der Receiver des DWM1000-Moduls angeschaltet. Der Knoten verbraucht etwa 1 ms lang einen Strom von ca. 154 mA.
5. In diesem Bereich wartet der Knoten auf die vom Tag gesendete Blink-Nachricht. Der Receiver ist dabei 1600 ms angeschaltet. Der Stromverbrauch beträgt hierbei ca. 127 mA.
6. Mit dem Erhalt der Blink-Nachricht beginnt hier die Distanzbestimmung mit dem DWM1000-Modul. Der Knoten initiiert diese mit dem Senden der Poll-Nachricht. Anschließend wird die Response-Nachricht empfangen und die Final-Nachricht an den Tag gesendet. Nachdem die Distanzmessung erfolgt ist, wird das DWM1000-Modul in den Standby-Modus versetzt. Der Vorgang der Distanzbestimmung benötigt etwa 25,5 ms bei einem durchschnittlichen Stromverbrauch von ca. 85,65 mA.
7. Der Mikrocontroller und das DWM1000-Modul befinden sich wieder im Energiesparmodus (ca. 20  $\mu$ A).



**Abbildung 6.8.:** Stromverbrauch eines Knotens während einer Distanzmessung.

### Energieverbrauch eines Knotens für eine Distanzmessung

Um auch hier die elektrische Ladungsmenge für eine Distanzmessung bestimmen zu können, wird das in Abbildung 6.8 aufgenommene Stromprofil über die Zeit integriert. Mithilfe der in Tabelle 6.3 noch einmal dargestellten Werte aus kann

die Ladungsmenge für eine Distanzmessung berechnet werden. Diese beträgt für den Knoten  $Q_K = 0,06082 \text{ mAh}$  bei einem durchschnittlichen Strombedarf von etwa 81,5 mA (Dauer: 2686,5 ms). Der Ladungsbedarf des Knotens ist höher als der des Tags. Dies ist ausschließlich auf die lange Wartezeit im Bereich (5) zurückzuführen. Der Grundverbrauch des Knotens im Standby-Modus für eine Stunde beträgt wie auch beim Tag  $Q_{Standby/Tag} = 0,48 \text{ mAh}$ . Wird auch hier das System mit einem LiPo-Akku mit einer Kapazität von 1200 mAh betrieben (80%), beträgt die Akkulaufzeit für einen Grundverbrauch von  $I_{Standby} = 20 \mu\text{A}$ , wie beim Tag, etwa 5,5 Jahre. Werden 100 Distanzmessungen an einem Tag durchgeführt, verringert sich die Akkulaufzeit auf 0,42 Jahre.

Der Energieverbrauch des Knotens ist auch hier abhängig von der Anzahl an Lokalisierungsanfragen. Bei der maximal möglichen Rate von etwa 0,37 Hz und dem dabei durchschnittlichen Strom von 81,5 mA, verbraucht der Knoten bei einer Versorgungsspannung von 3,3 V eine Energie von etwa 269 mWh. Bei keiner Abfrage beträgt der Verbrauch wie beim Tag 0,066 mWh. Werden 100 Lokalisierungsanfragen am Tag gestellt, ist der Energieverbrauch des Systems 0,87 mWh. Dies bedeutet auch hier für den Knoten, dass der Verbrauch zwischen 0,066 mWh und 269 mWh liegt.

**Tabelle 6.3.:** Approximierter Stromverbrauch eines Knotens für die verschiedenen Bereiche (Abbildung 6.8).

Bereich	Stromverbrauch	Dauer
(2)	3,6 mA	60 ms
(3)	13,2 mA	1000 ms
(4)	154 mA	1 ms
(5)	127 mA	1600 ms
(6)	85,65 mA	25,5 ms

# **7. Fazit und Ausblick**

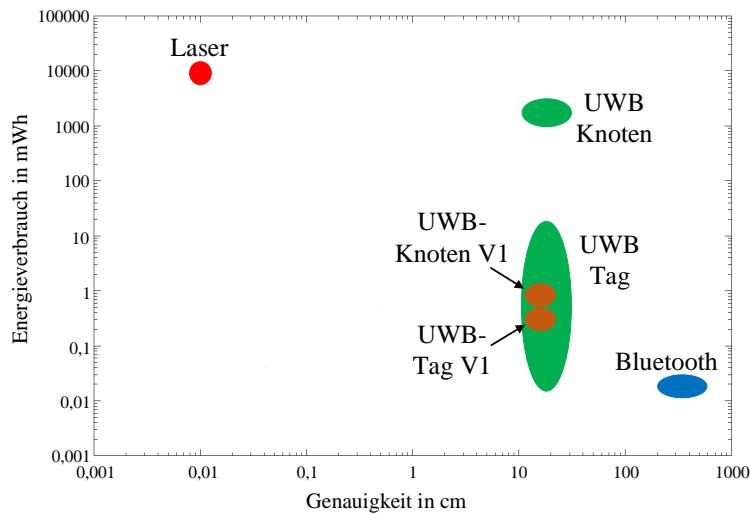
## **7.1. Fazit**

In dieser Masterarbeit wurde ein Innenraum-Lokalisierungssystem basierend auf der Ultra-Wideband Technologie entwickelt. Dieses besteht aus einer Basisstation, einem mobilen Tag und mehreren Knoten. Bei der Entwicklung wurden hauptsächlich die Schlüsselanforderungen Genauigkeit und Energieeffizienz betrachtet. Für die energiesparende Funkkommunikation zwischen dem mobilen Tag und dem Knoten wurde ein an der Professur für elektrische Mess- und Prüfverfahren entwickelter Aufweckempfänger eingesetzt. Die Distanzmessung zwischen Tag und Knoten wurde mit dem DWM1000-Modul von *Decawave* realisiert. Diese beiden Schaltungsteile wurden auf einer neu entwickelten Platine kombiniert. Im Rahmen dieser Arbeit wurde zudem ein spezieller Kommunikationsablauf zur Lokalisierung entwickelt. Knoten und Tag befinden sich hierbei vorwiegend im Standby-Modus. Erst wenn eine Lokalisierungsanfrage (Aufwecksignal) von der Basisstation gestellt wird, wechseln die beiden Systeme gleichzeitig in den Aktivmodus. Nachdem die Distanzen zwischen dem mobilen Tag und den einzelnen Knoten mittels UWB bestimmt wurden, werden diese an die Basisstation übertragen und beide Komponenten wechseln zurück in den Energiesparmodus. Die Distanzen werden anschließend an einem PC angezeigt und können dort für die Lokalisierung weiter verarbeitet werden.

Um die Genauigkeit des Systems bestimmen zu können, wurden Kalibrierungsmessungen durchgeführt. Die Messungen der Tag/Knoten Systeme haben gezeigt, dass im Freien eine Messgenauigkeit des Systems von etwa  $3\text{ cm} \pm 3\text{ cm}$  möglich ist. Da es sich jedoch um ein Innenraum-Lokalisierungssystem handelt, müssen die Distanzmessungen im Innenraum betrachtet werden. Diese zeigen, dass die Genauigkeit aufgrund von Mehrwegeausbreitungen und Reflexionen im Raum mit größeren Distanzen abnimmt. Auch dynamische Veränderungen während der Messungen im Raum, wie zum Beispiel das Öffnen oder Schließen einer Türe, haben Einfluss auf die Distanzbestimmung des Systems. Im Bereich von 200 cm bis 500 cm ist eine Genauigkeit von  $12,5\text{ cm} \pm 2,5\text{ cm}$  möglich, wogegen im Bereich von 700 cm bis 900 cm die Genauigkeit des Systems auf maximal  $25,5\text{ cm} \pm 5\text{ cm}$  ansteigt. Das Ziel dieser Arbeit war eine Genauigkeit bei der Distanzbestimmung von  $<20\text{ cm}$  zu erreichen. Dieses wurde nur bedingt erfüllt, da die Genauigkeit nur im Bereich von 200 cm bis 500 cm unter dem geforderten Wert bleibt.

Die Messungen des Stromprofils von Knoten und Tag haben gezeigt, dass es sich um energieeffiziente Systeme handelt. Der Energieverbrauch des Tags für eine Loka-

lisierung liegt im Bereich von etwa 0,066 mWh und 76,6 mWh, der des Knotens im Bereich von 0,066 mWh und 269 mWh. Werden 100 Lokalisierungsanfragen am Tag gestellt, verbraucht der Tag eine Energie von 0,27 mWh und der Knoten 0,87 mWh. Das Ziel dieser Arbeit war, einen Energieverbrauch für Knoten und Tag von etwa 0,05 mWh bis 25 mWh zu erreichen. Dieses Ziel wurde auch hier nur bedingt erfüllt, da der Energieverbrauch den festgelegten Bereich mit zunehmender Anzahl an Lokalisierungsanfragen übersteigt. Wird der Wert für 100 Anfragen betrachtet erfüllt das System die Zielsetzung. Abbildung 7.1 zeigt erneut die Übersicht der Lokalisierungs-technologien Laser, Bluetooth und Ultra-Wideband aus Kapitel 3.1.4. Zusätzlich ist der Energieverbrauch von UWB-Tag V1 und UWB-Knoten V1 des neu entwickelten Ultra-Wideband-Systems dargestellt. Dabei werden die beiden Werte für 100 Lokalisierungsanfragen verwendet.



**Abbildung 7.1.:** Gegenüberstellung der Technologien Laser, Bluetooth und UWB für den aktuellen Stand der Forschung und Technik sowie die neu entwickelten UWB-V1 Knoten und Tag in Bezug auf Energieverbrauch und Genauigkeit.

Werden die neu entwickelten Systeme mit den bereits bestehenden Ultra-Wideband Systemen verglichen, so zeigt sich, dass der Energieverbrauch des neu entwickelten UWB-Tag V1 zwischen den Verbrauchswerten der im Stand der Forschung vorgestellten Systeme liegt. Der Energieverbrauch der neu entwickelten UWB-Knoten V1 dagegen, ist um mehrere Größenordnungen (>Faktor 1000) geringer als der Verbrauch der in Kapitel 3.1.4 vorgestellten Knoten. Auch hier lassen sich die einzelnen Energieverbräuche aufgrund der unterschiedlichen Positionsupdate-raten der Systeme nur schwer miteinander vergleichen.

Die beiden in dieser Arbeit entwickelten UWB-Tag V1 und UWB-Knoten V1 zur Innenraum-Lokalisierung haben nicht nur eine kleine Baugröße (44 x 40 x 3,9 mm),

sondern auch einen niedrigen Energieverbrauch im mWh-Bereich bei einer Genauigkeit von etwa 12,5 cm  $\pm$ 2,5 cm bis 25,5 cm  $\pm$ 5 cm.

## 7.2. Ausblick

Das gesamte System aus Basisstation, Tag und Knoten kann durch verschiedene Maßnahmen verbessert werden. Dazu gehören die folgenden Ansätze:

### ***1. Die Baugröße der UWB-V1 Platine verkleinern***

Beispielsweise ist es möglich, die Größe der Platine zu verkleinern, indem anstatt dem mit diskreten Bauteilen aufgebauten Balun-Anpassnetzwerk ein fertiger Baustein verwendet wird. Zudem könnten die einzelnen Bauteile des verwendeten DWM1000-Modul auf der eigentlichen Platine platziert werden. Der verwendete fertige Baustein müsste nicht mehr verwendet werden, was zu einer Verringerung der Platinendicke führen würde.

### ***2. Konstruieren eines geeigneten Gehäuses***

Um die entwickelte Platine vor äußeren Einflüssen zu schützen, muss ein geeignetes Gehäuse konstruiert werden. In Abhängigkeit des Einsatzortes und des Zwecks der Verwendung, könnte ein passendes Gehäusematerial ausgewählt werden. Für die Befestigung der Knoten an Decken und Wänden sind eventuell spezielle Befestigungen notwendig. Dies könnte dazu führen, dass für den Tag und den Knoten verschiedene Gehäuse entwickelt werden müssen.

### ***3. Verbesserung der Positionsupdate rate und des Energieverbrauchs***

Die beiden Stromprofile von Tag und Knoten für eine Distanzmessung/Lokalisierung aus Kapitel 6.4.1 und 6.4.2 zeigen, dass eine Distanzmessung mehrere Sekunden dauert. Der Tag braucht für einen Lokalisierungsvorgang etwa 2,4 s und der Knoten für eine Distanzmessung etwa 2,7 s. Dies führt zu einer maximal möglichen Positionsupdate rate von etwa 0,4 Hz für das Tag/Knoten System. Die Verbesserung der Rate ist möglich, wenn zum Beispiel beim Tag die benötigte Zeit für den Bereich (6) in Abbildung 6.7 verkürzt wird. In diesem Bereich wird das DWM1000-Modul nach jedem Wechsel von Schlaf- zu Aktivmodus neu initialisiert und konfiguriert. Müsste das Modul nicht neu initialisiert werden, dauert der Lokalisierungsvorgang des Tags im besten Fall insgesamt nur noch etwa 0,3 s. Dies führt zu einer maximal möglichen Positionsupdate rate von ca. 3,3 Hz. Das System könnte dadurch nicht nur schneller lokalisieren, sondern auch der Energieverbrauch des Tags würde verringert werden. Wird Bereich (6) in Abbildung 6.7 vernachlässigt, führt dies zu einem durchschnittlichen Stromverbrauch von 32,95 mA pro Lokalisierungsanfrage. Bei 100 Anfragen am Tag und einem LiPo-Akku mit 1200 mAh (80%), bedeutet dies eine Verbesserung des Energieverbrauchs von 0,27 mWh auf 0,10 mWh. Die prozentuale Verbesserung beträgt 63%. Die Verbesserung des Tags hat Auswirkungen auf den Knoten. Das Stromprofil des Knotens aus Abbildung 6.8 zeigt, dass dieser auf

die Blink-Nachricht des Tags wartet. In dieser Zeit ist das UWB-Funkmodul des Knotens angeschaltet (siehe Abbildung 6.8, Bereich (5)). Sendet der Tag sofort die Blink-Nachricht, kann der Bereich (5) im besten Fall vernachlässigt werden. Die maximal mögliche Updaterate des Knotens steigt auf etwa 0,9 Hz. Auch hier könnte sich der Energieverbrauch bei 100 Lokalisierungsanfragen von 0,87 mWh auf etwa 0,12 mWh (86%) verringern bei einem durchschnittlichen Strom von 14,5 mA pro Lokalisierungsanfrage. Voraussetzung für diese Verbesserung ist, dass das Timing bei der Lokalisierung zwischen Basisstation, Tag und Knoten stimmt.

#### ***4. Optimierung der Aufweckempfängerreichweite***

Durch Verbesserung der Sensitivität des Aufweckempfängers könnte die Reichweite des Lokalisierungssystems verbessert werden. Dies könnte beispielsweise über eine Optimierung der Vorverstärkerstufe oder durch eine verbesserte Demodulationsstufe erreicht werden.

# Danksagung

Zunächst möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Entstehung dieser Arbeit unterstützt und motiviert haben. Ich danke Herrn Prof. Dr. Leonhard M. Reindl für die Möglichkeit, diese Masterarbeit an der Professur für Elektrische Mess- und Prüfverfahren durchzuführen. Ein Dank geht auch an meinen Zweitkorrektor Herrn Prof. Dr. Jürgen Wöllenstein.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Betreuer Dr. Fabian Höflinger bedanken, der mir ermöglichte, dieses interessante Masterarbeitsthema zu schreiben. Außerdem möchte ich mich bei ihm bedanken für die Hilfe und Unterstützung während der gesamten Arbeit. Bedanken möchte ich mich auch bei den Technikern des Lehrstuhls Hans Baumer, Christoph Bohnert und Uwe Burzlaff, die mir bei schwierigen Fragen immer geholfen haben. Ein ganz großer Dank geht auch an alle Mitarbeiter der Firma Telocate.

Ein ganz besonderer Dank geht an M.Sc Sebastian Sester und MSc. Sebastian Stöcklin, die mir mit ihrem großen Wissen bei wichtigen Fragen zu Soft- und Hardware immer weiterhelfen konnten.

Auch möchte ich mich bei meinen Kommilitonen und allen Mitarbeitern des Lehrstuhls bedanken.

Mein Dank geht auch an die Personen, die in zahlreichen Stunden diese Masterarbeit Korrektur gelesen haben.

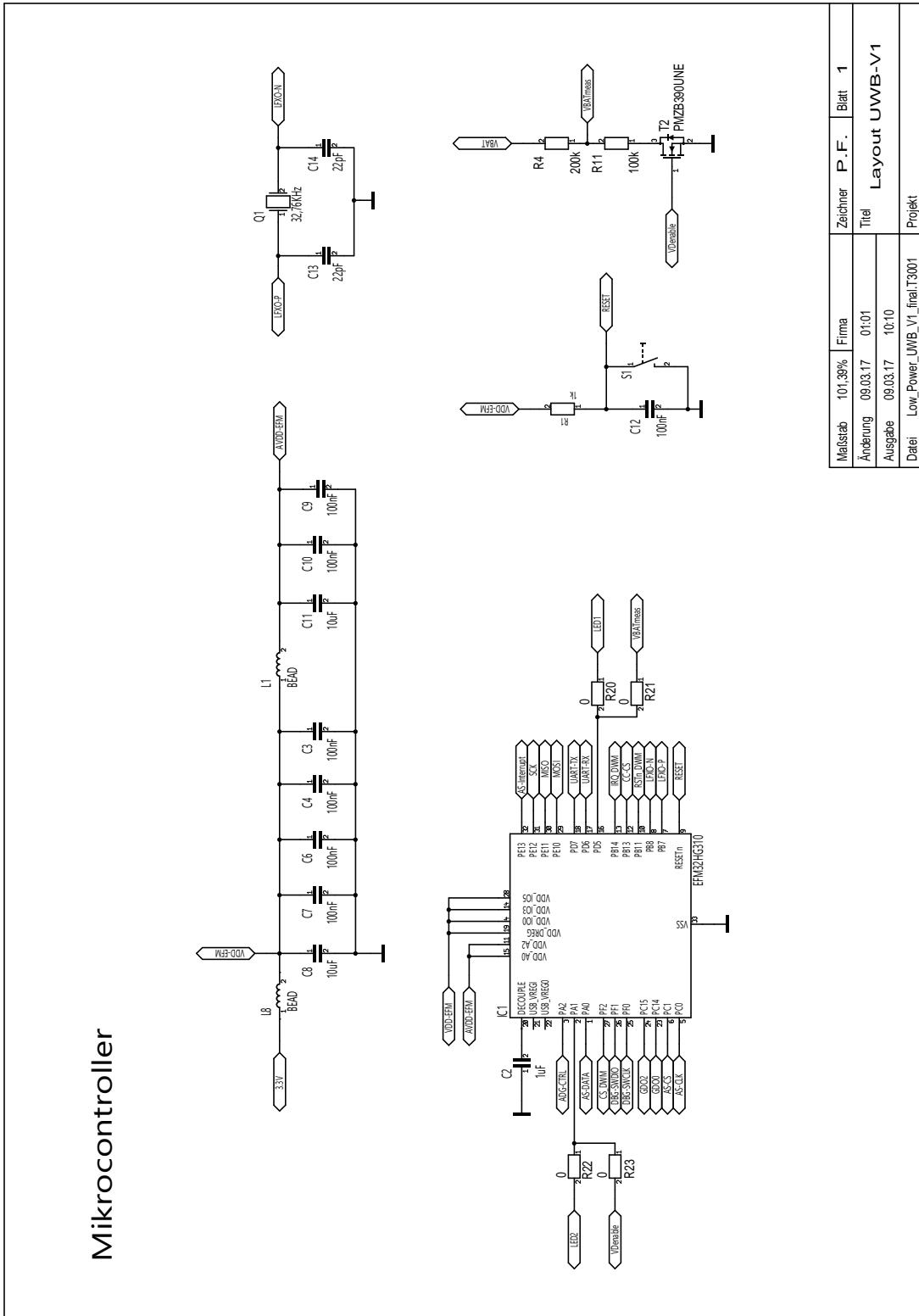
Zum Schluss möchte ich ganz besonders meinen Eltern für ihre Unterstützung danken, denn ohne sie wäre dieses Studium nicht möglich gewesen.



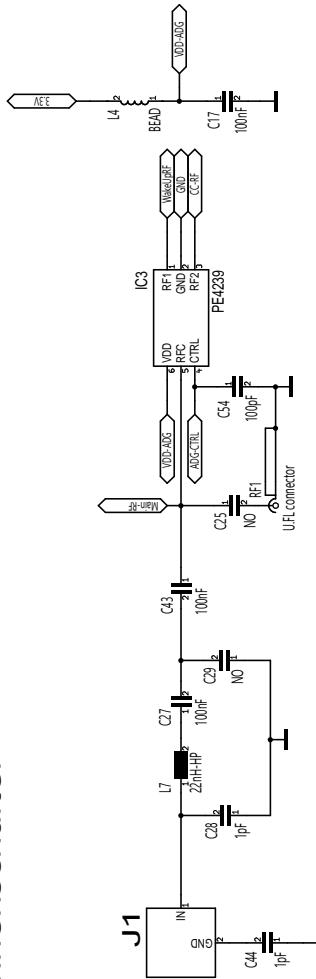
## **A. Anhang**



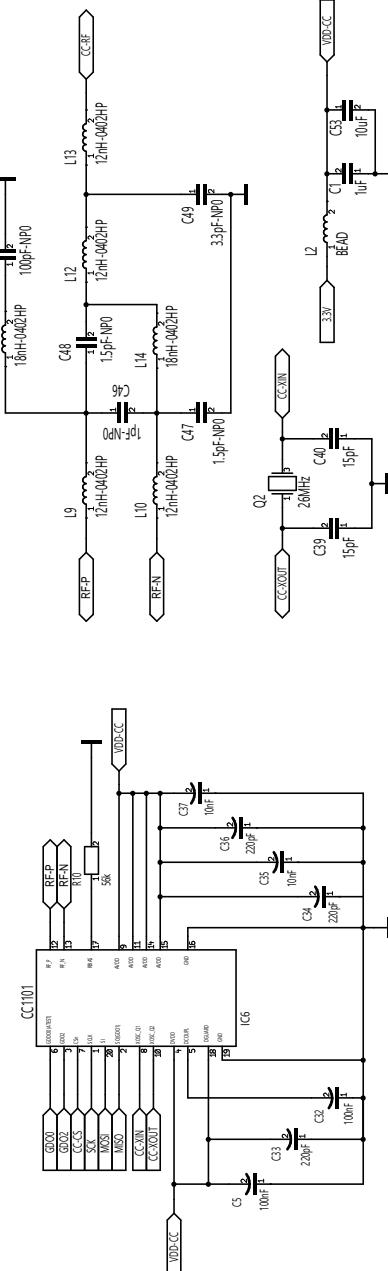
## A.1. Schaltpläne der UWB-V1 Platine



## Antenne + Antennenschalter

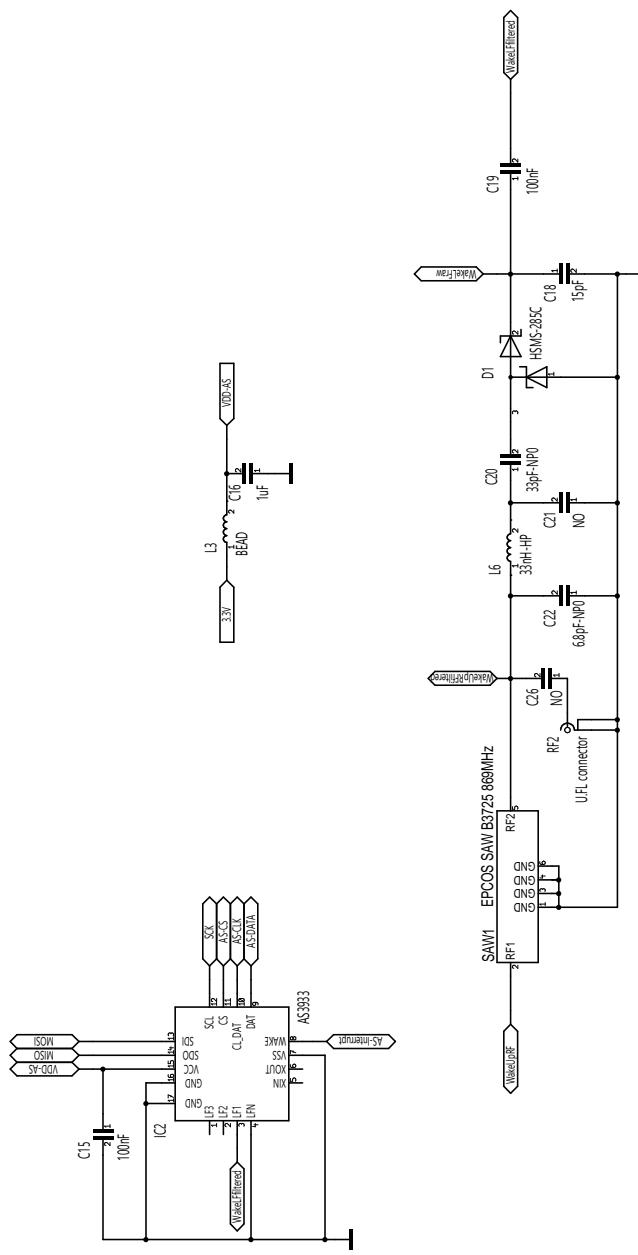


## RF-Transceiver



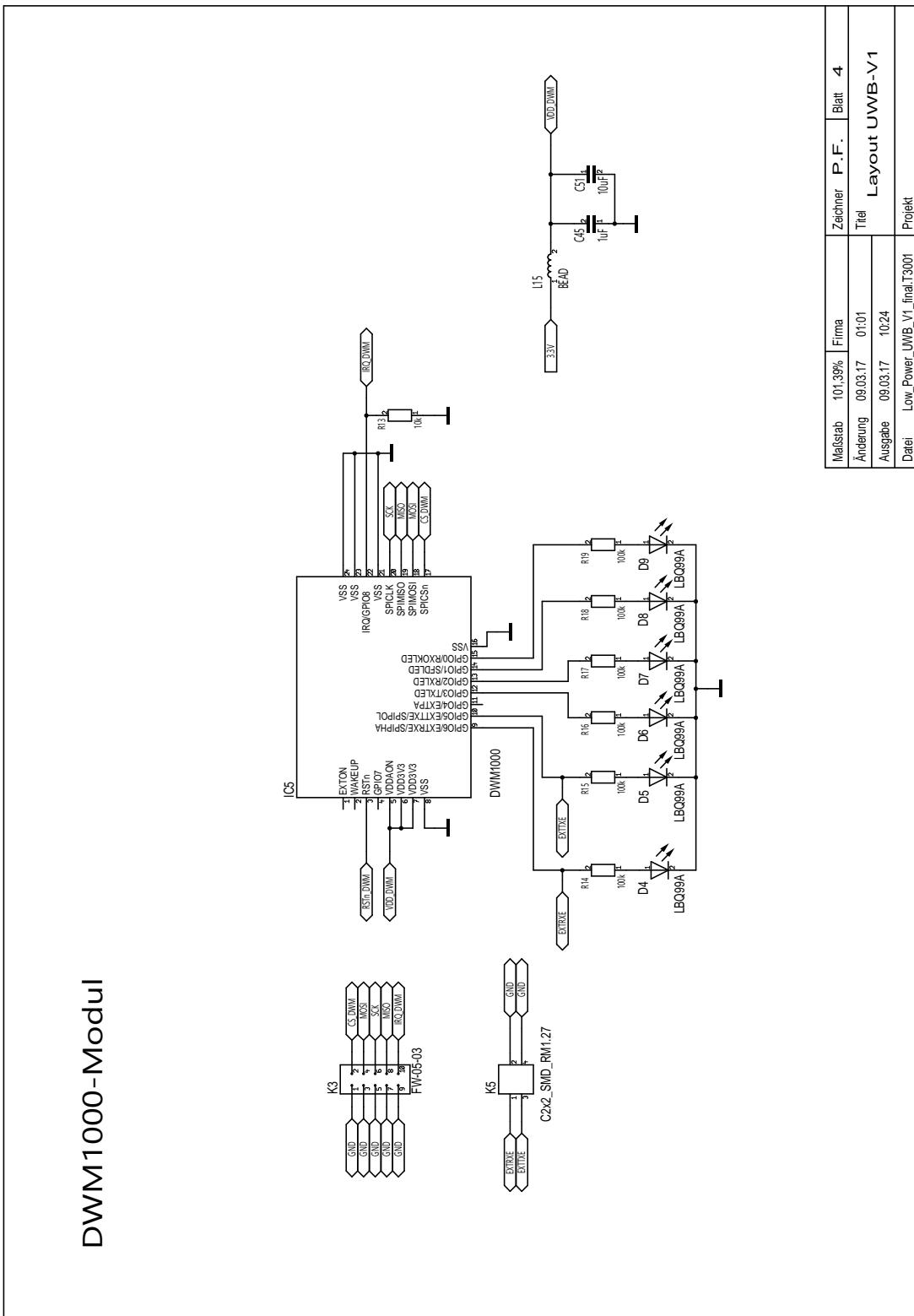
Maßstab	10:139%	Firma		Zeichner	P. F.	Blatt	2
Änderung	09.03.17	01:01		Titel	Layout UVWB-V1		
Ausgabe	09.03.17	10:17					
Datei	Low_Power_UVWB_V1_final.T3001			Projekt			

## Aufweckempfänger



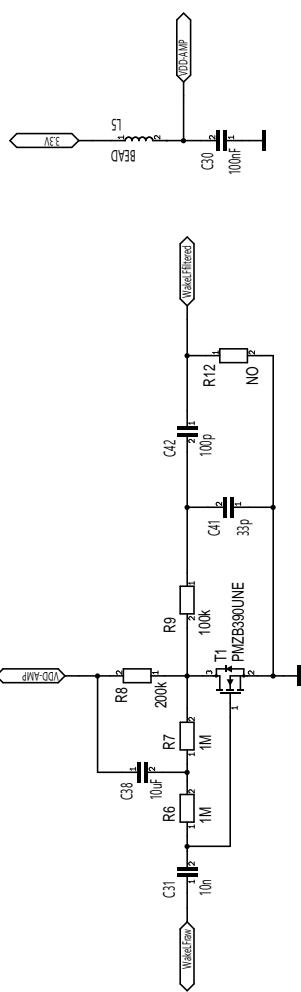
Maßstab	101,39%	Firma		Zeichner	P.F.	Blatt
Änderung	09.03.17	01:01		Tiel	Layout UWB-V1	3
Ausgabe	09.03.17	10:21				
Datei	Low_Power_UWB_V1_final.T3001			Projekt		

## DWM1000-Modul

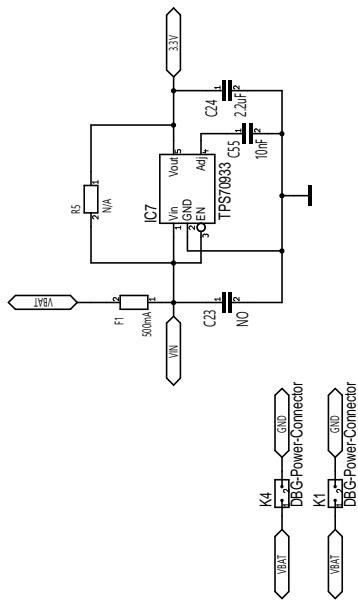


Maßstab	10:1 (39%)	Firma		Zeichner	P.F.	Blatt	4
Änderung	09.03.17	01:01		Titel			
Ausgabe	09.03.17	10:24		Layout UWVB-V1			
Datei	Low_Power_UWB_V1_final_73001			Projekt			

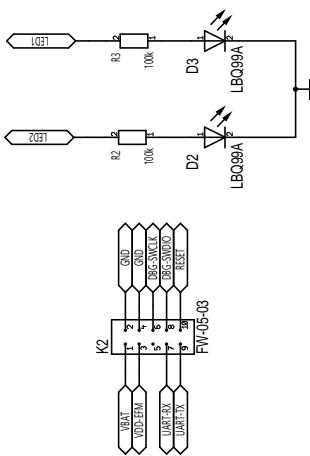
### Low-Noise-Amplifier



### Spannungsversorgung

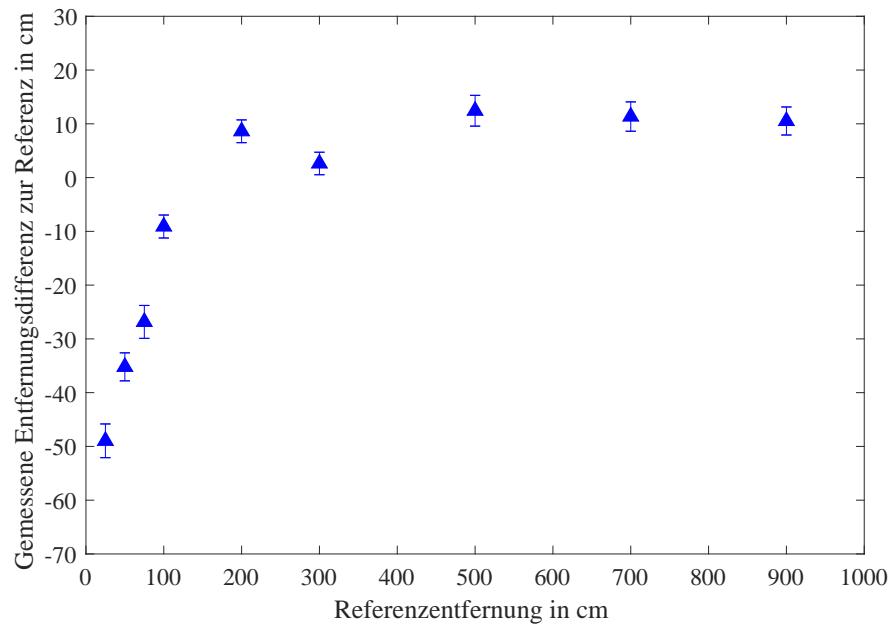


### Externe Schnittstelle

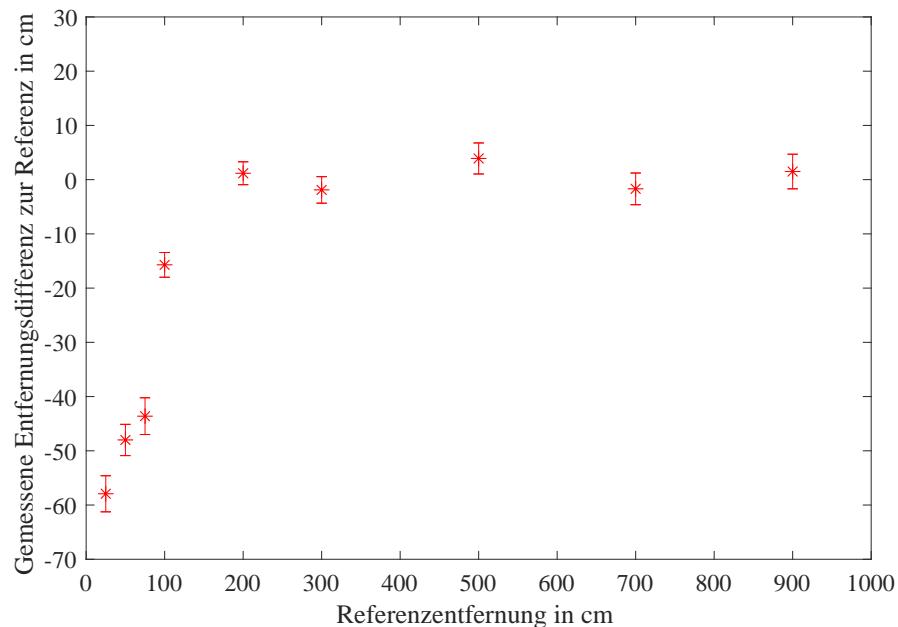


Maßstab	10:139%	Firma	Zeichner P.F.	Blatt 5
Änderung	09.03.17	01:01	Tiel	Layout UWB-V1
Ausgabe	09.03.17	10:26		
Datei	Low_Power_UWB_V1_final.T3001		Projekt	

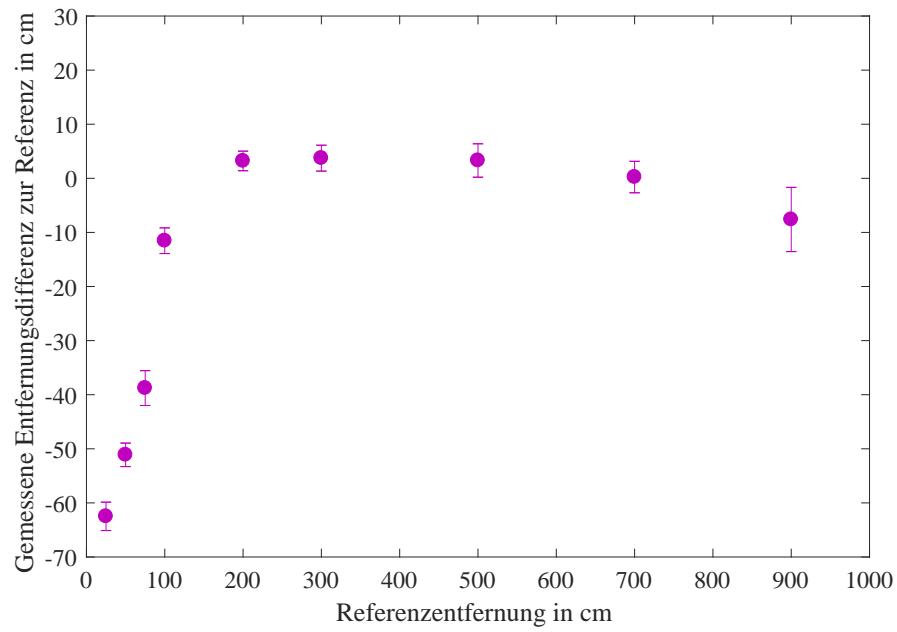
## A.2. Kalibrierungsmessungen



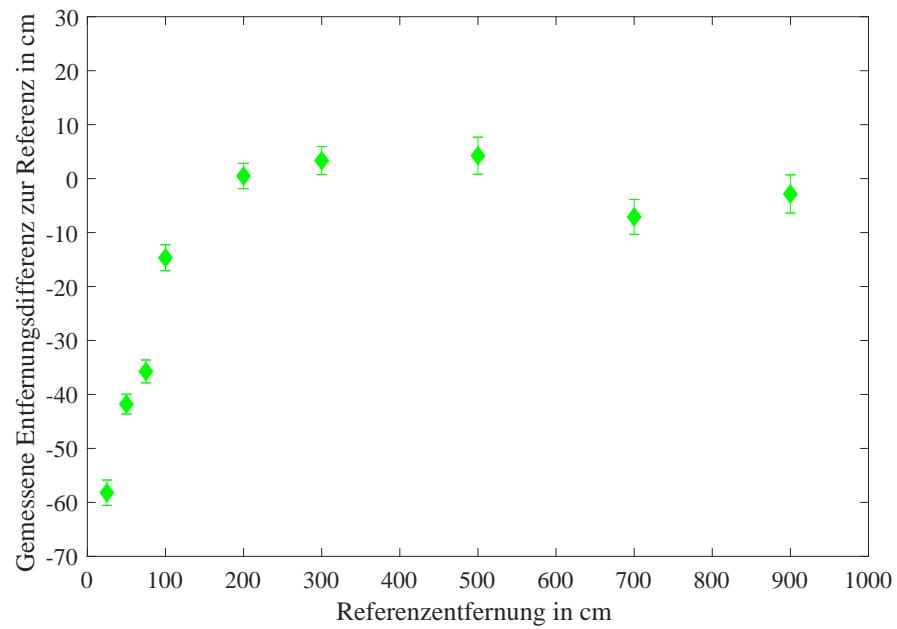
**Abbildung A.1.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 1.



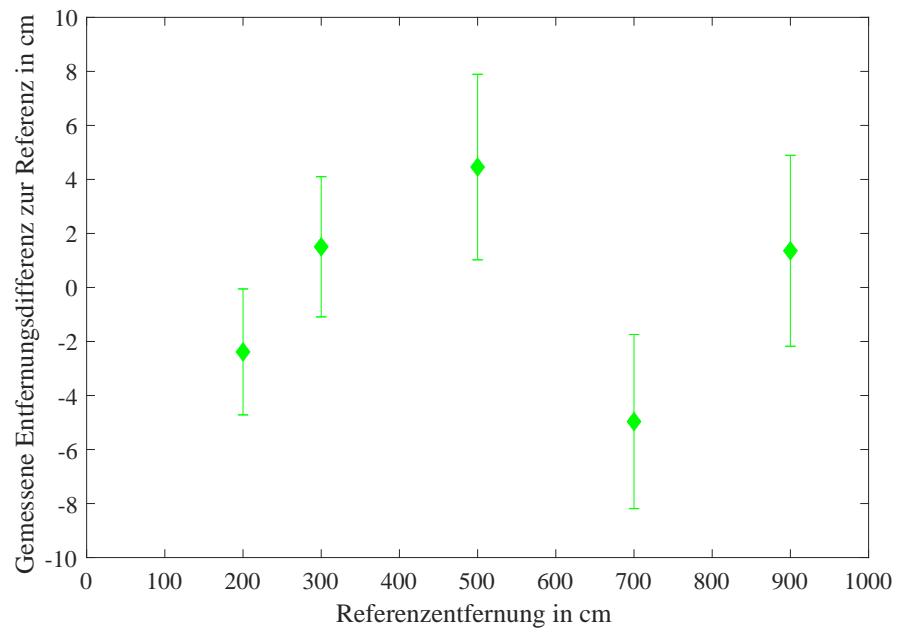
**Abbildung A.2.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 2.



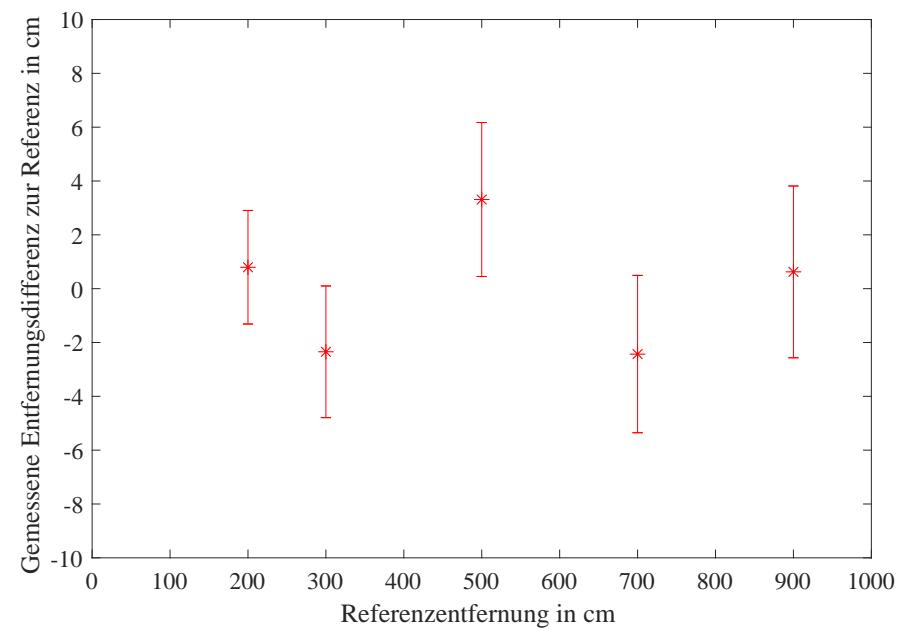
**Abbildung A.3.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 4.



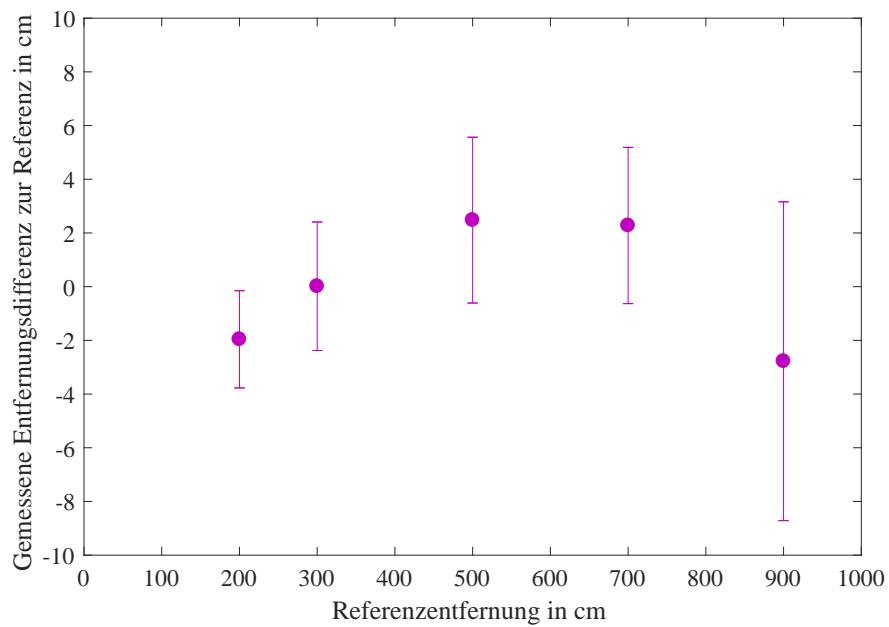
**Abbildung A.4.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung Knoten 5.



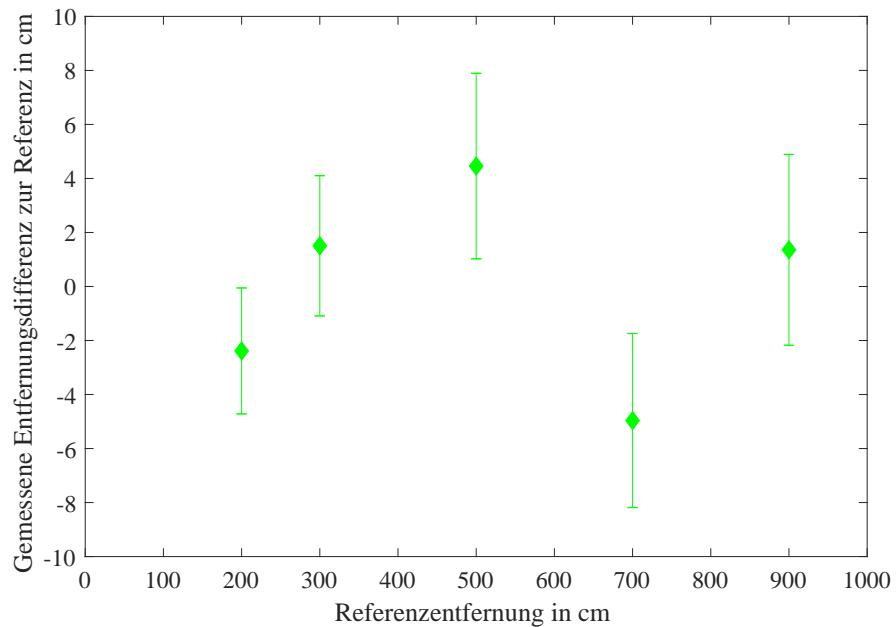
**Abbildung A.5.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 1.



**Abbildung A.6.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 2.



**Abbildung A.7.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 4.



**Abbildung A.8.:** Gemessene Entfernungsdifferenz zur Referenzentfernung mit den korrigierten Mittelwerten für Knoten 5.



# Literaturverzeichnis

- [1] Gudrun Wolfschmidt. *Navigare necesse est-Geschichte der Navigation: Begleitbuch zur Ausstellung 2008/09 in Hamburg und Nürnberg*, volume 14. BoD-Books on Demand, 2008.
- [2] F. Höflinger. *Lokalisierungssysteme für die Positionsbestimmung von Personen und Objekten im Innenraum*. Dissertation, IMTEK, Albert- Ludwig Universität Freiburg, 2013.
- [3] Jiang Xiao, Zimu Zhou, Youwen Yi, and Lionel M Ni. A survey on wireless indoor localization from the device perspective. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 49(2):25, 2016.
- [4] Enrico Köppe. *Lokalisierung sich bewegender Objekte innerhalb und außerhalb von Gebäuden*. PhD thesis, Freie Universität Berlin, 2014.
- [5] G. U. Gamm. *Sensorknoten mit Ultra Low Power Aufweckempfänger*. Dissertation, IMTEK, Albert- Ludwig Universität Freiburg, 2013.
- [6] Eddie CL Chan, George Baciu, and SC Mak. Wireless tracking analysis in location fingerprinting. In *2008 IEEE International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications*, pages 214–220. IEEE, 2008.
- [7] Prof. Dr. techn. L. Reindl. *Skript zur Vorlesung Messtechnische Grundlagen und Verfahren*. IMTEK, Albert- Ludwig Universität Freiburg, 2012.
- [8] Ekbert Hering and Gert Schönfelder. Sensoren in wissenschaft und technik. *Funktionsweise und Einsatzgebiete*, page 323, 2012.
- [9] Rainer Mautz. Indoor positioning technologies, 2012.
- [10] Vijaya Parampalli Yajnarayana. *Ultra Wideband: Communication and Localization*. PhD thesis, KTH Royal Institute of Technology, 2017.
- [11] Jens Timmermann. *Systemanalyse und Optimierung der Ultrabreitband-Uebertragung*, volume 58. KIT Scientific Publishing, 2010.
- [12] Prof. Dr. Dieter BräEckmann. Grundlagen, Technik und Anwendungen aktueller Wireless-Standards. <http://www.elektroniknet.de/elektronik-automotive/sonstiges/grundlagen-technik-und-anwendungen-aktueller-wireless-standards-1396.html>, Abruf: 24.01.2017.

- [13] Ian Oppermann, Matti Hämäläinen, and Jari Iinatti. *UWB: theory and applications*. John Wiley & Sons, 2005.
- [14] Washington FCC. Dc, federal communications commission revision of part 15 of the commissions rules regarding ultra-wideband transmission systems. *First Report Order FCC*, 2:V48, 2002.
- [15] Decision. ECC/DEC/(06)04. März 2006.
- [16] Maria-Gabriella Di Benedetto. *UWB communication systems: a comprehensive overview*, volume 5. Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [17] IEEE 802 Working Group et al. Ieee standard for local and metropolitan area networks part 15.4: Low-rate wireless personal area networks (lr-wpans). *IEEE Std 802.15.4-2011*, pages 1–314, 2011.
- [18] Decawave. User manual. *Version 2.08*, 2016.
- [19] RIDGID. LM-100. <https://www.ridgid.eu/de/de/micro-lm-100-laser-entfernungsmaesser1>, Abruf: 14.01.2017.
- [20] Leica. Disto S910. [http://www.leica-geosystems.de/de/Leica-DISTO-S910\\_106377.htm](http://www.leica-geosystems.de/de/Leica-DISTO-S910_106377.htm), Abruf: 14.01.2017.
- [21] Z Riaz, A Pervez, M Ahmer, and J Iqbal. A fully autonomous indoor mobile robot using slam. In *Information and Emerging Technologies (ICIET), 2010 International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2010.
- [22] Mayank Bansal, Bogdan Matei, Ben Southall, Jayan Eledath, and Harpreet Sawhney. A lidar streaming architecture for mobile robotics with application to 3d structure characterization. In *Robotics and Automation (ICRA), 2011 IEEE International Conference on*, pages 1803–1810. IEEE, 2011.
- [23] Xia Yuan, Chun-Xia Zhao, and Zhen-Min Tang. Lidar scan-matching for mobile robot localization. *Information Technology Journal*, 9(1):27–33, 2010.
- [24] Marc J Gallant and Joshua A Marshall. Estimating the heading of a husky mobile robot with a lidar compass based on direction maps. 2016.
- [25] Ji Zhang, Volker Grabe, Brad Hamner, Dave Duggins, and Sanjiv Singh. Compact, real-time localization without reliance on infrastructure.
- [26] Microsoft. Indoor localization competition IPSN 2016. <https://www.microsoft.com/en-us/research/event/microsoft-indoor-localization-competition-ipsn-2016/>, Abruf: 24.01.2017.
- [27] Nikon Instrument. LTD. iGPS user guide. 2010.
- [28] Jan Kokert, Fabian Höflinger, and Leonhard M Reindl. Indoor localization system based on galvanometer-laser-scanning for numerous mobile tags (galo-cate). In *Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN), 2012 International Conference on*, pages 1–7. IEEE, 2012.

- [29] Ralf Gessler and Thomas Krause. Wireless-netzwerke für den nahbereich. *Eingebettete Funksysteme: Vergleich von standardisierten und proprietären Verfahren*. Vieweg+ Teubner, Wiesbaden, 2015.
- [30] Yuan Zhuang, Jun Yang, You Li, Longning Qi, and Naser El-Sheimy. Smartphone-based indoor localization with bluetooth low energy beacons. *Sensors*, 16(5):596, 2016.
- [31] Xiaojie Zhao, Zhuoling Xiao, Andrew Markham, Niki Trigoni, and Yong Ren. Does btle measure up against wifi? a comparison of indoor location performance. In *European Wireless 2014; 20th European Wireless Conference; Proceedings of*, pages 1–6. VDE, 2014.
- [32] Elena Simona Lohan, Jukka Talvitie, Pedro Figueiredo e Silva, Henri Nurminen, Simo Ali-Löytty, and Robert Piché. Received signal strength models for wlan and ble-based indoor positioning in multi-floor buildings. In *2015 International Conference on Location and GNSS (ICL-GNSS)*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [33] Adel Thaljaoui, Thierry Val, Nejah Nasri, and Damien Brulin. Ble localization using rssи measurements and iringla. In *Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on*, pages 2178–2183. IEEE, 2015.
- [34] Filippo Palumbo, Paolo Barsocchi, Stefano Chessa, and Juan Carlos Augusto. A stigmergic approach to indoor localization using bluetooth low energy beacons. In *Advanced Video and Signal Based Surveillance (AVSS), 2015 12th IEEE International Conference on*, pages 1–6. IEEE, 2015.
- [35] Estimote. <http://estimote.com/>, Abruf: 7.03.2017.
- [36] Estimote Team Blog. <http://blog.estimote.com/post/57087851702/preorder-for-estimote-beacons-available-shipping>, Abruf: 7.03.2017.
- [37] Ramsey Faragher and Robert Harle. Location fingerprinting with bluetooth low energy beacons. *IEEE journal on Selected Areas in Communications*, 33(11):2418–2428, 2015.
- [38] Li Zhang, Xiao Liu, Jie Song, Cathal Gurrin, and Zhiliang Zhu. A comprehensive study of bluetooth fingerprinting-based algorithms for localization. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2013 27th International Conference on*, pages 300–305. IEEE, 2013.
- [39] Ling Pei, Ruizhi Chen, Jingbin Liu, Heidi Kuusniemi, Tomi Tenhunen, and Yuwei Chen. Using inquiry-based bluetooth rssи probability distributions for indoor positioning. *Journal of Global Positioning Systems*, 9(2):122–130, 2010.
- [40] Decawave. DW1000. <http://www.decawave.com>, Abruf: 24.01.2017.
- [41] Reza Zandian and Ulf Witkowski. Performance analysis of small size and power efficient uwb communication nodes for indoor localization. In *Conference Towards Autonomous Robotic Systems*, pages 371–382. Springer, 2016.

- [42] Witsarawat Chantaweesomboon, Charuwalee Suwatthikul, Supatra Manatrianon, Krit Athikulwongse, Kamol Kaemarungsi, Ratchasak Ranron, and Prapun Suksompong. On performance study of uwb real time locating system. In *Information and Communication Technology for Embedded Systems (IC-ICTES), 2016 7th International Conference of*, pages 19–24. IEEE, 2016.
- [43] Jia Wang, Asad Khalid Raja, and Zhibo Pang. Prototyping and experimental comparison of ir-uwb based high precision localization technologies. In *Ubiquitous Intelligence and Computing and 2015 IEEE 12th Intl Conf on Autonomic and Trusted Computing and 2015 IEEE 15th Intl Conf on Scalable Computing and Communications and Its Associated Workshops (UIC-ATC-ScalCom), 2015 IEEE 12th Intl Conf on*, pages 1187–1192. IEEE, 2015.
- [44] Ubisense. RTLS. <https://ubisense.net/de/products/rtls-plattform>, Abruf: 24.01.2017.
- [45] eliko. Kio. <http://www.eliko.ee/products/kio-rtls/>, Abruf: 24.01.2017.
- [46] Zebra Technologies. Dart Ultra Wideband (UWB) Technology. <https://www.zebra.com/us/en/solutions/location-solutions/enabling-technologies/dart-uwb.html>, Abruf: 24.01.2017.
- [47] Thomas M Wendt and Leonhard M Reindl. Wake-up methods to extend battery life time of wireless sensor nodes. In *Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings, 2008. IMTC 2008. IEEE*, pages 1407–1412. IEEE, 2008.
- [48] J. S. Keh. *Wake-Up-Receiver als aktive RFID-Devices zur Positionszuordnung*. Bachelorarbeit, IMTEK, Albert- Ludwig Universität Freiburg, 2016.
- [49] Bundesnetzagentur. Fundstelle, 2014. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen\\_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/allgemeinzuteilungen-node.html](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/Telekommunikation/Unternehmen_Institutionen/Frequenzen/Allgemeinzuteilungen/allgemeinzuteilungen-node.html), Abruf: 3.03.2017.
- [50] Rao Tummala. *Electronic packaging for high reliability, low cost electronics*, volume 57. Springer Science & Business Media, 1999.
- [51] M. Haußer. *Basisstation zur RFID-basierten Positionszuordnung mit Cloud-Integration*. Bachelorarbeit, IMTEK, Albert- Ludwig Universität Freiburg, 2016.
- [52] Claire Swedberg. DecaWave Intros Ultra-wideband Active RFID Module, 2014. <http://www.rfidjournal.com/articles/view?11942>, Abruf: 3.03.2017.
- [53] Austria Microsystems. AS3933 3D Low Frequency Wakeup Receiver. Data sheet. 2015.
- [54] Decawave. Data sheet. Version 2.03, 2014.