

Lokalisierung und Genauigkeitsermittlung mittels Ultra Wideband

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science in Engineering

Fachhochschule Vorarlberg
Studiengang Master Mechatronik

Durchgeführt bei
Tridonic GmbH und Co KG

Vorgelegt von
Dusko Vukovic, BSc

Betreut von
Dr. Andre Mitterbacher
Dr. Markus Becker

Dornbirn, 16.08.2022

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Positionsbestimmung in Innenräumen mittels der Ultra Breitband Technologie, deren Genauigkeit sowie der Positionierung solcher Systeme in relevanten Beleuchtungsmodulen. Im ersten Teil der Arbeit wird die Ultrabreitband Technologie beschrieben, die sich für Ortbarkeit in Innenräumen durch die große Bandbreite, relativ gut eignet. Hierbei wird auf das UWB-Signal, die Regulierung bezüglich Frequenznutzung für Europa und USA sowie auf die UWB-Standards eingegangen. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die gegenwärtigen Positionsbestimmungs Verfahren beschrieben. Beispiele hierfür sind das Time of Flight (ToF), das Time of Arrival sowie nicht funkbasierte Methoden wie z. B. die Inertial Measurement Unit (IMU). Die Positionsbestimmung in der UWB-Technologie wird häufig mittels ToF und ToA bewerkstelligt. Im darauffolgenden Kapitel werden die gegenwärtigen Lokalisierungssysteme erklärt. Real Time Locating Systems (RTLS) kommen in vielen Lebensbereichen zum Einsatz, von Krankenhäusern bis zum Sport. Der zweite Teil der Arbeit besteht aus der Ausarbeitung von verschiedenen Konzepten zur Realisierung eines Demonstrators sowie der Ausarbeitung eines Simulationsmodells für die Positionsbestimmung, mit dem eine Ortungsgenauigkeit von 30 bis 50 cm erreicht werden kann.

Abstract

This thesis deals with indoor positioning using ultra-wideband technology, its accuracy and the positioning of such systems in relevant lighting modules. In the first part of the thesis the ultra wideband technology is described, which is relatively well suited for indoor positioning due to its large bandwidth. The UWB signal, the regulation of frequency allocation for Europe and the USA as well as the UWB standards are discussed. In the further course of the work the current position determination procedures are described. Examples are the Time of Flight (ToF), the Time of Arrival as well as non-radio based methods like the Inertial Measurement Unit (IMU). Position determination in UWB technology is often accomplished using ToF and ToA. In the following chapter, the current localization systems are discussed. Nowadays, Real Time Locating Systems (RTLS) find a wide range of applications in many areas of our life. From hospitals to sports. The second part of the thesis consists of the elaboration of different concepts for the realization of a demonstrator as well as the elaboration of a simulation model for the position determination with which a localization accuracy of 30-50cm can be achieved.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	iii
1 Einleitung	1
2 Ultra Wide Band	2
2.1 UWB Signal	3
2.2 Regulierung	4
2.3 UWB Standards	6
2.4 Senden und Empfangen	7
3 Positionsbestimmung	15
3.1 Begriffe und Definitionen	15
3.2 Verfahren zur Positionsbestimmung	15
3.2.1 Time of Flight (ToF)	17
3.2.2 Time Difference of Arrival (TDoA)	18
3.2.3 Two Way Ranging (TWR)	19
3.2.4 Symetrical Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR)	20
3.2.5 Angle of Arrival (AoA)	21
3.2.6 Fingerprinting	22
3.2.7 Inertial Measurement Unit (IMU)	22
3.2.8 Optische und Akustische Verfahren	24
3.2.9 Zusammenfassung	25
4 Lokalisierungssysteme	26
4.1 Real Time Locating Systems (RTLS)	26
4.2 Global Positioning System	27
4.3 Bluetooth Low Energy	28
4.4 Wireless Local Area Network (WLAN)	28
4.5 Chirp Spread Spectrum (CSS)	29
4.6 Infrarot	30
4.7 Radio Frequency Identification (RFID)	31
4.7.1 Zusammenfassung	32
5 Überblick über UWB-Chips	33
5.1 Überblick UWB-Chips	33
6 Ziel	34
7 Systemwahl	35
7.1 Vorgehensweise	35
7.1.1 UWB-S1 (ESP 32 DW1000)	35
7.1.2 UWB-S2 (nRF52840/DW1000)	36
7.2 Einbau in Leuchtenmodule und Positionierung	36
7.3 Bewertung und Konzeptauswahl	37
8 Positionsmessung und Modell	39
8.1 Messaufbau	39

8.2	Modell	39
8.3	Berechnungsmethoden	39
8.3.1	Positionsbestimmung mittels Cosinussatz	39
8.3.2	Positionsbestimmung mittels Trilateration	40
8.3.3	Fehlerfortpflanzung (Gauß)	42
8.3.4	Fehlerberechnung mittels Kovarianzmatrix	44
8.4	Messergebnisse	47
8.4.1	Automatische Antennen Kalibrierung	47
8.4.2	Auswertung ohne Kalibrierung	48
8.4.3	Auswertung mit Kalibrierung	50
8.5	Modellergebnisse	53
8.5.1	2D Modell	53
8.5.2	3D Modell	59
9	Anhang	66

Abbildungsverzeichnis

2.1	UWB Frequenzbereich [7]	3
2.2	Gaußimpuls UWB [2]	3
2.3	FCC-Maske [2]	4
2.4	Grenzwerte UWB FCC/ETSI [2] [10]	5
2.5	Überblick der UWB Standards [3]	7
2.6	Sender-Empfangs-Schema [4]	7
2.7	Pulspositionsmodulation [2]	8
2.8	Biphasensmodulation [2]	8
2.9	Pulsamplitudenmodulation [2]	8
2.10	LRP und HRP [5]	9
2.11	Standardisierter Impuls [1]	10
2.12	Framestructure [1]	11
2.13	Framestructure Möglichkeiten 802.15.4z Standard [1]	11
2.14	PHR Struktur Format [3]	12
2.15	HRP UWB PHY [3]	13
2.16	Datenmodulierung (PHR und PHY) [1]	13
2.17	Tabelle der Datenmodulierung [1]	14
3.1	Übersicht des elektromagnetischen Spektrums [15]	16
3.2	Übersicht Hochfrequenz Entfernungsmessung [14]	16
3.3	ToF Lokalisierungstechnik [3]	17
3.4	TDOA Lokalisierung mittels Hyperbeln [3]	18
3.5	Two Way Ranging Technik [3]	19
3.6	SDS-TWR Methode [13]	20
3.7	Einfallswinkel [6]	21
3.8	Triangulation [6]	22
3.9	Fingerprinting [15]	22
4.1	RTLS [9]	26
4.2	Anwendungsmöglichkeiten [Eigenausarbeitung]	27
4.3	Up/Down Chirps [24]	29
4.4	Infrarot-Strahlungsspektrum [27]	30
6.1	Übersicht Ziel	34
7.1	Vorgehensweise	35
7.2	Anchor Positionierung	35
7.3	Anchor Positionierung	36
7.4	Übersicht Einbau	37
8.1	Messaufbau	39
8.2	Cosinussatz	40
8.3	Kovarianz-Fehler-Ellipse	45
8.4	Entfernungsmessung	47
8.5	Kalibrierung	47
8.6	Entfernungsmessung A1782	48
8.7	Entfernungsmessung A1783	48

8.8	Entfernungsmessung A1784	49
8.9	Entfernungsmessung A1785	49
8.10	Entfernungsmessung A 1782	50
8.11	Entfernungsmessung A 1783	50
8.12	Entfernungsmessung A 1784	51
8.13	Entfernungsmessung A 1785	51
8.14	Zusammenfassung der Messungen (nicht kalibriert)	52
8.15	Zusammenfassung der Messungen (kalibriert)	52
8.16	Trilateration [29]	53
8.17	Modell Positionsbestimmung Punkt (7,2)	54
8.18	Modell Positionsbestimmung Punkt (7,2), (Zoom)	54
8.19	Modell Positionsbestimmung Punkt (2,2)	55
8.20	Modell Positionsbestimmung Punkt (2,2), (Zoom)	55
8.21	Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4)	56
8.22	Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4), (Zoom)	56
8.23	Modell Positionsbestimmung Punkt (2,6)	57
8.24	Modell Positionsbestimmung Punkt (2,6), (Zoom)	57
8.25	Modell Positionsbestimmung Punkt (3,7)	58
8.26	Modell Positionsbestimmung Punkt (3,7), (Zoom)	58
8.27	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (5,5,1.5)	59
8.28	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (5,5,1.5), Seitenanblick	59
8.29	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4,1)	60
8.30	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4,1), Seitenanblick	60
8.31	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (6,5,3)	61
8.32	3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (6,5,3), Seitenanblick	61
8.33	Dilution of Precision [23]	62
9.1	Fehlerbalken A 1782	66
9.2	Fehlerbalken A 1783	66
9.3	Fehlerbalken A 1784	66
9.4	Fehlerbalken A 1785	67

Tabellenverzeichnis

2.1	FCC Frequenzbereich [2]	5
2.2	ETSI Frequenzbereich [10]	6
2.3	Kanalbeschreibung [5]	10
3.1	Übersicht über Positionsbestimmungsverfahren	25
4.1	Übersicht verschiedener Technologien [7] [23]	32
5.1	UWB-Chip Vergleich	33
7.1	Dämpfungseigenschaften	37
7.2	Bewertungstabelle	38
8.1	Fehler im Punkt (7,2)	42
8.2	Fehler im Punkt (2,2)	42
8.3	Fehler im Punkt (2,6)	43
8.4	Fehler im Punkt (3,7)	43
8.5	Fehler im Punkt (4,4)	43
8.6	Einordnung der DOP Wert [23]	62
8.7	Tabelle PDOP/HDOP/VDOP	63

1 Einleitung

Seit den Polynesiern und anderen Seefahrernationen ist die Astronavigation, die sich durch Zeit- und Winkelmessung zur Sonne bzw. zu hellen Sternen auszeichnet, eine Methode der Positionsbestimmung, die für die Schiffsnavigation über Jahrhunderte lang von essentieller Bedeutung war. Eine weitere Erfindung, die das Navigieren über die Ozeane ermöglichte und den europäischen Seefahrernationen zu Ruhm, Reichtum und Kolonialisierung anderer Kontinente verhalf, war der sogenannte trockene Kompass, welcher auf Schiffen montiert wurde und somit eine Hilfe für das Navigieren eines Schiffes darstellte. [30] [31]

Über die Jahrhunderte hinweg genügte diese Art der Positionsbestimmung, jedoch durch den Wandel der Zeit und durch die Erfindung neuer Technologien wurde das Bestreben, die Genauigkeit in der Positionsbestimmung zu verbessern, immer größer. Der menschliche Erfindergeist ermöglichte es, eine Uhr zu erschaffen, die auf atomarer Ebene funktioniert und eine sehr präzise Zeitangabe liefern kann. Atomuhren sind Taktgeber für die Weltzeit, Messhilfen in der Forschung und sie dienen als Kernstück gegenwärtiger Positionstechnologien wie das GPS (Global Positioning System). Ohne diese Erfindung wäre das Navigieren moderner Schiffe oder auch Flugzeuge nicht möglich beziehungsweise sehr schwer umzusetzen. [32]

Satellitengestützte GPS-Dienste sind eine vertraute Technologie, wenn man auf Reisen ist oder sich im Freien aufhält. Darüber hinaus werden GPS-Dienste weitestgehend in der Automobilnavigation sowie in militärischen Bereichen eingesetzt. Aber es gibt bestimmte Umgebungen, in denen es schwierig ist, ein GPS-Signal zu empfangen oder aufrechtzuerhalten, vor allem, wenn man sich in einem Gebäude befindet. Dabei kann ein großer Einsatzbereich, wie zum Beispiel die Ortung von Geräten in Krankenhäusern (EKG, Rollstühle), automatische Inbetriebnahme von Geräten, Mitarbeiternachverfolgung im Tunnelbau oder Bergbau sowie eine präzise Navigation in Einkaufszentren, Parkhäusern und Bürogebäuden von GPS-Diensten nicht realisiert werden. Genau an diesem Punkt könnte die Ultra- Breitband-Technik eine Möglichkeit bieten, wie man die Ortung im überdachten Raum präzise ermöglicht. Aufgrund dieser Tatsachen ist die Genauigkeit verschiedener UWB Systeme zu untersuchen sowie daran anknüpfend die Untersuchung des Einbaues in gebäudetechnisch relevante Beleuchtungen durchzuführen, um eine Lagebestimmung zu ermöglichen. [18] [22]

2 Ultra Wide Band

Das Ultra Breitband oder auf Englisch Ultra Wide Band (UWB) ist eine Technologie für die Nahbereichskommunikation sowie Ortung. Ein besonderes Merkmal ist hier die Nutzung extrem großer Frequenzbereiche. Die Definition der amerikanischen Federal Communication Commission (FCC) für UWB-Übertragung beschreibt, dass jedes Signal, das eine Teilbandbreite B_f von mehr als 0,20 aufweist oder eine Bandbreite (Bandwidth BW) von mehr als 500 MHz belegt als UWB Signal definiert wird. Die Teilbandbreite ist definiert als das Verhältnis der Signalbandbreite zur Mittenfrequenz. [2]

$$B_f = \frac{BW}{f_0} \quad (2.1a)$$

$$B_f = 2 \cdot \frac{f_o - f_u}{f_o + f_u} \quad (2.1b)$$

$$BW \geq 500 \text{ MHz} \quad (2.1c)$$

$$B_f \geq 0.2 = 20\% \quad (2.1d)$$

BW	Bandbreite (Bandwith)
B_f	Teilbandbreite
f_0	Mittenfrequenz
f_o	Obere Grenzfrequenz
f_g	Untere Grenzfrequenz

Durch das hohe Frequenzspektrum bietet UWB einen Vorteil zu anderen Technologien, besonders zu den heute verbreiteten Telekommunikationsdiensten, die schon einen großen Teil des Frequenzspektrums belegen.[2]

Ein weiteres wichtiges Merkmal ist die Kanalkapazität C. Da zwischen Kanalkapazität und Bandbreite ein proportionaler Zusammenhang besteht, wird beim Ändern der Bandbreite eine höhere Kanalkapazität generiert. Dieser lineare Zusammenhang ist in der Shannon-Hartley-Gleichung (2.2a) ersichtlich. Dabei ist jedoch der Zusammenhang zwischen Bandbreite und Signalleistung logarithmisch. [4]

$$C = B \cdot \log_2\left(1 + \frac{S}{N}\right) \quad (2.2a)$$

Variablen:

C	Kanalkapazität
B	Bandbreite
S	Signalleistung
N	Rauschleistung

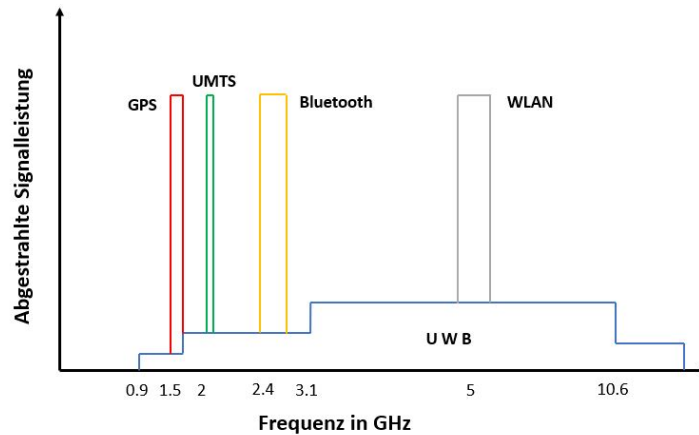


Abbildung 2.1: UWB Frequenzbereich [7]

Beim Mobilfunk sowie auch WLAN kann die Bandbreite nicht vergrößert werden. Hier nutzt man eine höhere Sendeleistung, um mehr Daten zu übertragen. In Abbildung 2.1 sind die verschiedenen Bandbreiten unterschiedlicher Technologien dargestellt sowie die große Bandbreite des UWB. Weiters bietet die große Bandbreite eine hohe Auflösung im Nanosekunden Bereich, somit kann man z.B den Sender in einem Bereich von von 3 bis 30 cm orten. Damit ist es möglich, sowohl eine präzise Positionsbestimmung als auch eine Hochgeschwindigkeits Datenkommunikation in einem Endgerät zu realisieren. [2]

2.1 UWB Signal

Grundsätzlich werden bei der Übertragung im UWB Bereich Gaußimpulse verwendet, da sie von Impulsgeneratoren einfacher zu realisieren sind. Normalerweise sind höhere Ableitungen der Gaußschen Form für die UWB-Übertragung beliebter. Dies ist hauptsächlich auf den Gleichstromwert des Gaußimpulses zurückzuführen. Da die Übertragung der Impulse direkt über die Antennen geschieht, führt dies dazu, dass die Impulse aufgrund der Eigenschaften der Antennen gefiltert werden. Diese Filterung kann als Ableitungsoperation modelliert werden. Da die Impulsdauer im Zeitbereich die Bandbreite im Frequenzbereich bestimmt, ergibt ein zeitlich kurzer Impulszug eine große Bandbreite. In der Regel breitet sich das Impuls Radio Ultra Wide Band (IR-UWB) Signal aufgrund der Pulsdauer in einem Zeitbereich der Größenordnung von Nanosekunden auf mehrere GHz aus. [2]

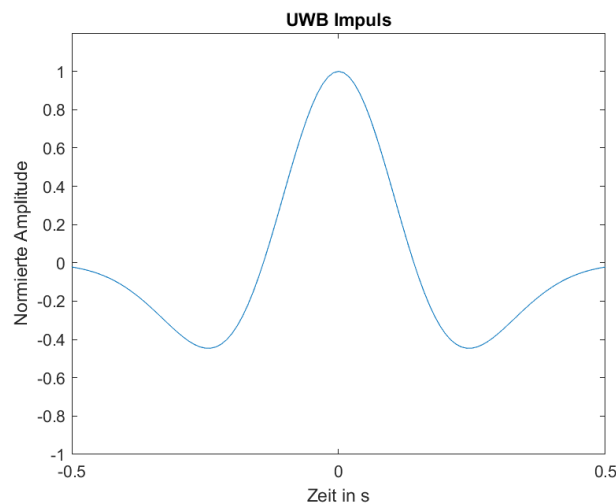


Abbildung 2.2: Gaußimpuls UWB [2]

Die Formel 2.3a beschreibt den Gaußimpuls, welcher in Abbildung 2.2 dargestellt ist.

$$p(t) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} \quad (2.3a)$$

Bei der Gestaltung der UWB-Pulsform ist das Ziel, eine Pulswellenform zu erhalten, die die FCC-Maske so gut wie möglich einhält und gleichzeitig die Bandbreite maximiert. In Abbildung 2.3 ist die FCC Maske dargestellt mit den jeweiligen Ableitungen des Gaußimpulses. Hierbei gibt n den Grad der Ableitung an. Weiters ist ersichtlich, dass mindestens eine Ableitung des vierten Grades benötigt wird, um die vorgegebenen Werte der FCC Maske nicht zu überschreiten. [2]

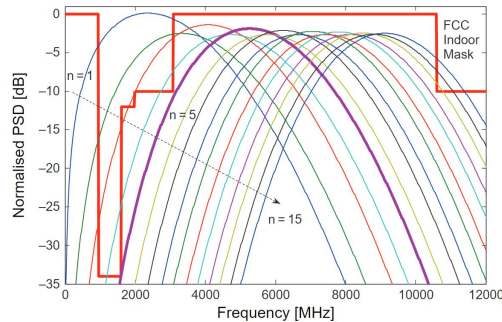


Abbildung 2.3: FCC-Maske [2]

2.2 Regulierung

Durch die Verwendung sehr großer Bandbreiten, müssen UWB-Systeme reguliert werden, um etwaige Störungen im Betrieb mit bestehenden Funkssystemen zu vermeiden. Hierbei sind die amerikanische Behörde FCC und die europäische Behörde ETSI für die Einhaltung der vorgeschriebenen Sendeleistungen und Bandbreiten bezüglich UWB zuständig. Die Grenzwerte werden über die zugrundeliegenden Parameter, welche hier die spektrale Leistungsdichte und die effektive Strahlungsleistung sind, bestimmt. [6]

FCC Federal Communications Commission Mask: Die FCC-Maske (UWB Spektral Maske) ist eine Norm, die Interferenzen mit existierenden Kommunikationssystemen verhindert (USA). Hierbei müssen verschiedene Bereiche des Spektrums unterschiedliche zulässige spektrale Leistungsdichten aufweisen. Weiters wird bei den unterschiedlichen spektralen Leistungsdichten zwischen Indoor und Outdoor unterschieden. [6]

ETSI European Telecommunications Standards Institute: Wie bei der oben erwähnten Federal Communications Commission Mask ist europaweit das European Telecommunications Standard Institute für die Norm zuständig. Die verschiedenen spektralen Dichten sowie das Spektrum werden von der ETSI für UWB-Systeme freigegeben. [10]

Spektrale Leistungsdichte: Die spektrale Leistungsdichte (Power Spectral Density) einer Strahlung oder eines Signals ist definiert als die Leistung, die auf eine bestimmte Bandbreite von Frequenzen oder Wellenlängen entfällt, dividiert durch diese Bandbreite [12]

Effektive Strahlungsleistung: Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung (Englisch: Equivalent Isotropically Radiated Power, EIRP) ist eine Rechengröße, welche im Bereich der Antennentechnik die in eine Sendeantenne eingespeiste Leistung mit deren Antennengewinn (Richtwirkung und Wirkungsgrad) multipliziert ausdrückt. Als Bezug für den Antennengewinn wird bei EIRP der Isotropstrahler genommen, eine Antenne, die theoretisch kugelförmig nach allen Seiten gleich stark abstrahlt. [11]

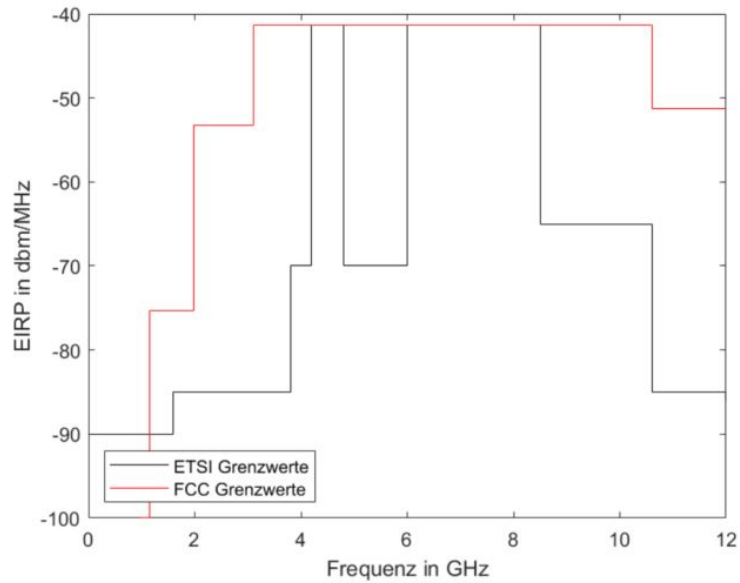


Abbildung 2.4: Grenzwerte UWB FCC/ETSI [2] [10]

In Abbildung 2.4 werden die ETSI Maske und die FCC Maske dargestellt. Ersichtlich ist hier, dass die ETSI Maske mehrere Einschränkungen bezüglich Frequenzen hat als die FCC Maske. Tabelle 2.1 zeigt die verschiedenen Frequenzbereiche der FCC-Maske sowie die Effektive Strahlungsleistung (equivalent isotropically radiated power, EIRP)

Frequenzbereich (GHz)	Indoor EIRP (dBm/MHz)
0.96 – 1.61	-75.3
1.61 – 1.99	-53.3
1.99 – 3.10	-51.3
3.10 – 10.6	-41.3
>10.6	-51.3

Tabelle 2.1: FCC Frequenzbereich [2]

Die Tabelle 2.2 unterhalb zeigt die verschiedenen Frequenzbereiche der ETSI-Maske sowie die Effektive Strahlungsleistung (equivalent isotropically radiated power, EIRP). Deutlich sind hier die strengere Regulierung zum Schutz vor Interferenzen mit den Telekommunikationssystemen zu erkennen .

Frequenzbereich (GHz)	Indoor EIRP (dBm/MHz)
< 1,6	-90.0
1,6 - 3,4	-85.0
3,4 - 3,8	-85.0
3,8 - 4,2	-70.0
4,2 - 4,8	-41.3
4,8 - 6,0	-70.0
6,0 - 8,5	-41.3
8,5 - 10,6	-65.0
>10,6	- 85.0

Tabelle 2.2: ETSI Frequenzbereich [10]

Der Vergleich zwischen der amerikanischen und europäischen Regulierung zeigt, dass es eindeutige Unterschiede in der Bestimmung gibt. Die amerikanischen Behörden erlauben die Nutzung der maximalen Leistung von -41.3 dBm/MHz über einen viel größeren Frequenzbereich als die europäischen. Diese Unstimmigkeit der Regulierung erschwert dadurch einen länderübergreifenden Einsatz von UWB-Systemen.

2.3 UWB Standards

Die UWB-Kommunikation besteht aus verschiedenen Normen, welche sich auf verschiedenen Ebenen des Open System Interconnection (OSI) Modells befinden. Für jede Schicht des OSI-Modells sind mehrere Standards definiert. Dadurch erschwert sich die Kompatibilität verschiedener UWB-Systeme sowie ihre Nutzung. In diesem Abschnitt wird kurz auf die wichtigsten Normen eingegangen. [3]

IEEE 802.15.4: Dieser Standard ist der Startpunkt der UWB-Standardisierung. Er definiert die Media Access Control Schicht (MAC) sowie die physikalische Schicht. Im Standard 802.15.4a wurde die UWB-PHY, die für die Datenkommunikation zuständig ist, vom Orthogonal Frequency Division Multiplexing zum Impuls Radio Verfahren gewechselt, welches sich besonders gut für die Entfernungsmessung eignet. 2015 wurde noch eine Verbesserung durchgeführt, in welcher zwei UWB-PHY Mode definiert wurden. Zum einen der High Rate Pulse Mode (HRP) und zum anderen der Low Rate Pulse Mode (LRP). [3]

IEEE 802.15.4z: Mit diesem Standard wurden die Integrität sowie die Genauigkeit der Entfernungsmessung verbessert.

Omlox: Hier beinhaltet die Spezifikation die Normierung der Schnittstellen für den Abruf von Standortinformationen von verschiedenen Lokalisierungstechniken (UWB, 5G, RFID, BLE usw.). Weiters bietet der Omlox-Kern standardisierte Interaktionen für UWB basierte RTLS-Systeme und ermöglicht die Vernetzung von UWB-Produkten, unabhängig vom Hersteller. [3]

FiRa: Die Spezifikation, welche die Funktionalität zwischen Geräten und Framework sowie den Komponenten bereitstellt. [3]

Car Connectivity Consortium (CCC) – Digital Key 3.0: Der Digital Key 3.0-Standard des CCC implementiert UWB-Konnektivität für freihändigen, ortsabhängigen, schlüssellosen Zugang und ortsabhängige Funktionen für Autos. Der Standard gewährleistet die höchste Sicherheit bei der Lokalisierung des Geräts in Bezug auf das Fahrzeug und ermöglicht so die Autorisierung des Benutzers für den Zugang und zum Fahren des Fahrzeugs. [3]

Apple Nearby Interaction: Ermöglicht den Sitzungsaufbau sowie die Aufrechterhaltung der UWB-Ranging-Sitzung zwischen einem Apple-Gerät und einem Zubehörteil. [3]

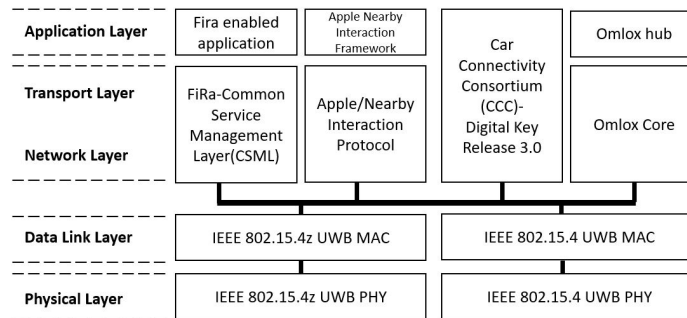


Abbildung 2.5: Überblick der UWB Standards [3]

Abbildung 2.5 zeigt einen Überblick über die UWB Standards vom Physical Layer bis zum Application Layer.

2.4 Senden und Empfangen

Die UWB-Technik kann für verschiedene Anwendungen eingesetzt werden. Dadurch ergeben sich auch unterschiedliche Übertragungsverfahren, die zum Einsatz kommen können. Eines davon ist das Impuls Radio Verfahren, welches das Grundprinzip der Ultra Breitband Technik erläutert.

Wie schon in Abschnitt 2.1 kurz erwähnt, überträgt das Impuls Radio Verfahren Informationen über zeitlich sehr kurze Impulse, die sich im Nanosekundenbereich befinden. Ein Bit entspricht einem Gaußimpuls. Will man hier ein hohes Datenübertragungsvolumen generieren, so braucht man einen ganzen Impulszug welcher für das bekannte UWB-Spektrum verantwortlich ist. Dabei wird vom Sender ein gaußförmiger Impuls direkt an die Sendeantenne geleitet. Da Sende- und Empfangsantennen jeweils frequenzabhängige Eigenschaften aufweisen, werden diese oft als mathematische Ableitungen des Signals modelliert. Dadurch ergibt sich eine zweifache Ableitung (Sendeantenne und Empfangsantenne) des Gaußsignals, was in Abbildung 2.6 ersichtlich ist. Durch die zeitlich sehr kurzen Impulse lässt sich ein sehr breites Frequenzspektrum erzeugen. Der Vorteil bei dem Impuls Radio Verfahren ist, dass ein geringer Aufwand bezüglich Modulation zu bewerkstelligen ist. [2]

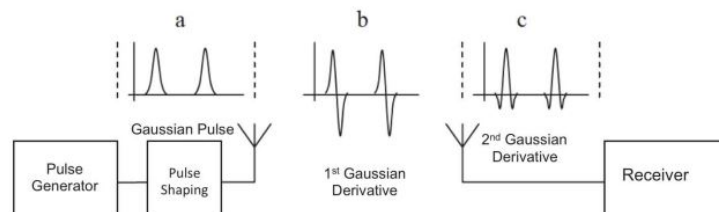


Abbildung 2.6: Sender-Empfangs-Schema [4]

Grundlegend können drei verschiedene Arten der Modulation, die für die Datenübertragung erforderlich sind, eingesetzt werden. Hierbei sind die Puls-Lage-Modulation, Bi-Phasen-Modulation sowie Puls-Amplituden Modulation von Wichtigkeit. [2]

Pulspositionsmodulation PPM: Bei der Pulspositionsmodulation erfolgt der Impuls zeitlich versetzt

zu einem Referenzwert. Eine genaue Synchronisierung vom Sender und Empfänger ist für diese Modulation notwendig. [2]

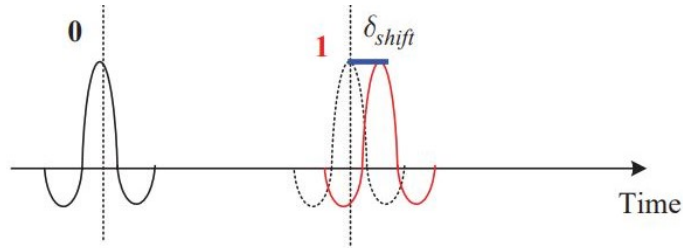


Abbildung 2.7: Pulspositionsmodulation [2]

Biphasenmodulation BPM: Bei der Biphasenmodulation wird die Phasenlage des Impulses genutzt, um 0 oder 1 zu erzeugen. [2]

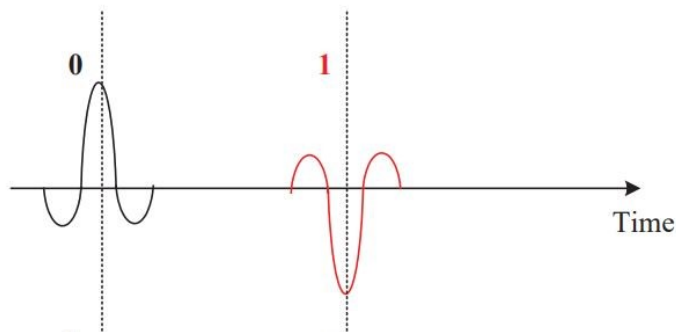


Abbildung 2.8: Biphasenmodulation [2]

Pulsamplitudenmodulation PAM: Hier wird die Amplitude des Impulses genutzt, um die Binärwerte zu generieren. [2]

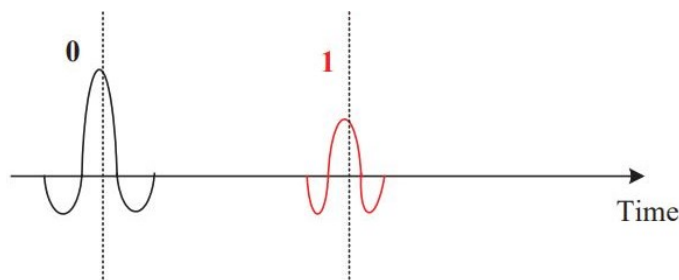


Abbildung 2.9: Pulsamplitudenmodulation [2]

Grundsätzlich kann das oben beschriebene Impuls Radio Verfahren auch durch die Verwendung spezieller Impulsformen erweitert werden, um die Form des Sendespektrums bewusst zu beeinflussen bzw. einzelne Frequenzbereiche „auszulassen“. Dies kann in der Praxis sinnvoll bzw. erforderlich sein, um beispielsweise Interferenzen mit anderen Funkdiensten zu vermeiden. Weitere UWB-Technologien, die Anwendung finden, sind das Multiband Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) UWB sowie das Direct Sequence (DS) UWB. [4]

In der UWB-Kommunikation wird ein Bit mit einer Folge von Impulsen übertragen. Die Geschwindigkeit, mit der diese Pulse gesendet werden, ist ein Parameter des UWB-Systems und wird als Pulse Repetition Frequency (PRF) angegeben. Die physikalische Schicht des UWB ist im Standard 802.15.4z in zwei Varianten möglich: zum einen die Low Rate Pulse Repetition Frequency (LRPRF) und zum anderen die High Rate Pulse Repetition Frequency (HRPRF). Die Puls Repetition Frequency beschreibt die Anzahl der Pulse eines sich wiederholenden Signals in einer bestimmten Zeiteinheit, normalerweise gemessen in Pulsen pro Sekunde. Der Begriff wird meist in der Radartechnik verwendet.[3]

$$PRT = \frac{1}{PRF} \quad (2.4a)$$

Durch die Regulierung der verschiedenen Kommissionen (FCC/ETSI) ist die Pulsenergie, welche innerhalb 1 ms gesendet wird, limitiert. Sendet man mit stärkeren Impulsen, so kann man eine größere Reichweite erreichen. Bei großen Datenraten sind jedoch viele Impulse notwendig, welche mit geringer Energie pro Impuls gesendet werden müssen, um die Limitierungen einzuhalten. [3] [5]

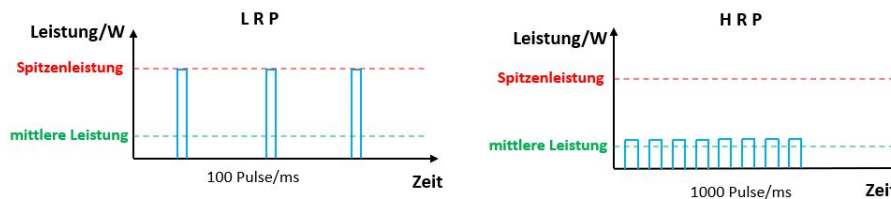


Abbildung 2.10: LRP und HRP [5]

Sowohl bei LRP als auch HRP ist die maximal übertragene Energie die gleiche. Man kann entweder viele schwache Impulse (HRP-Prinzip) oder wenige, aber stärkere Impulse (LRP-Prinzip) senden. Die Anzahl der gesendeten Impulse ist bei HRP UWB mehr als eine Größenordnung höher als bei LRP UWB, aber die Energie der einzelnen Impulse ist proportional schwächer.

Kanäle: Eine wichtige Bedingung für die Kompatibilität zweier UWB-Chips sind die gleiche Mittenfrequenz und die Bandbreite. Im Standard 802.15.4/4z werden 16 Kanäle und Frequenzen in drei Bändern definiert. Jeder Kanal besteht aus Mittenfrequenz und Bandbreite. Die Mindestbandbreite ist 499.2 MHz und einige Kanäle weisen dieselbe Mittenfrequenz auf, aber unterschiedliche Bandbreiten. Dies bezieht sich auf die Kanäle 2 und 4, 5 und 7, 9 und 11 sowie 13 und 15. Weiters unterscheidet man den Sub-GHz-Betrieb (Kanal 0), den Low-Band-Betrieb (Kanal 3) und den High-Band-Betrieb (Kanal 9). Folglich unterstützen nicht alle Chips dieselben Kanäle. Die Mehrheit der heute erhältlichen UWB-Chips unterstützt hauptsächlich Kanal 5 sowie Kanal 9. Dies ist jedoch nicht der Fall beim Qorvo DW 1000, welcher nur den Kanal 5 offen hat. [3] [5]

Kanalnummer	Mittenfrequenz (MHz)	Bandbreite (MHz)
0	499.2	499.2
1	3494.4	499.2
2	3993.6	499.2
3	4992.8	499.2
4	3993.6	1331.2
5	6489.6	499.2
6	6988.8	499.2
7	6489.6	1081.6
8	7448.0	499.2
9	7987.2	499.2
10	8486.4	499.2
11	7987.2	1331.2
12	8985.6	499.2
13	9494.8	499.2
14	9984.0	499.2
15	9484.8	1354.97

Tabelle 2.3: Kanalbeschreibung [5]

Impuls Form: Wie schon erwähnt, ist es in der Praxis notwendig, spezielle Impulsformen zu verwenden. Der Grund dafür ist die Vermeidung von Interferenzen mit anderen Funkdiensten. Im Standard 802.15.4/802.15.4z sollte die verwendete Impulsform durch die Form der Kreuzkorrelation mit einem Standardreferenzimpuls eingeschränkt werden. Dabei kann man die Ähnlichkeit bzw. Zeitverschiebung zweier Signale über die Kreuzkorrelation bestimmen. Der Referenzimpuls sollte der mathematischen Form des Raised Cosine (RRC) Impuls mit einem Roll-Off-Faktor von 0.45 entsprechen. Der Roll-Off-Faktor bestimmt jeweils die Flanken-Steilheit des Impulses. In Abbildung 2.11 ist die Darstellung des standardisierten Signals. Die FCC Bestimmungen sind ausschlaggebend für die standardisierte Impulsform. Die Impulsform darf die Grenzen nicht überschreiten, da sonst die FCC-Bestimmungen nicht eingehalten werden können. [1]

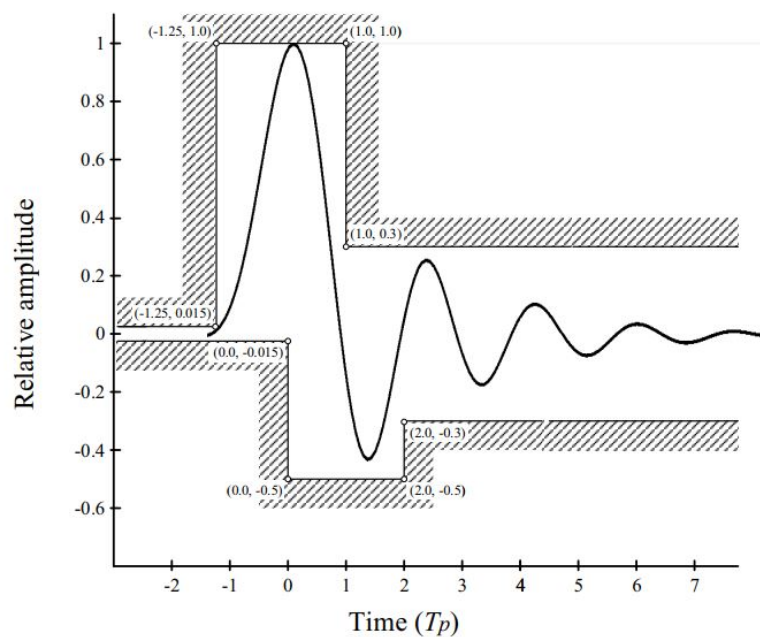


Abbildung 2.11: Standardisierter Impuls [1]

In weiterer Folge können sich die Impulse von UWB-Radio-Chip zu UWB-Radio-Chip unterscheiden. Eine unterschiedliche Impulsbreite kann die Genauigkeit der Entfernungsmessung beeinflussen, da die Zeitpunkte der Impulse unterschiedlich sein können. [1]

Framestructure: Im Standard IEEE 802.15.4 ist der UWB PHY definiert durch drei verschiedene Felder. Dieses UWB-Frame besteht aus einem Synchronisationsheader, einem physikalischen Header und einem Datenfeld. Der Standard IEEE 802.15.4z beinhaltet vier verschiedene Frames, welche bis zu fünf Felder besitzen. Das fünfte Feld in diesem Standard ist die Scrambled Timestep Sequence (STS). In Abbildung 2.12 sind die Teile des UWB-Frames dargestellt und in Abbildung 2.13 die verschiedenen Möglichkeiten der Framestructure des Standard 802.15.4z. [3]

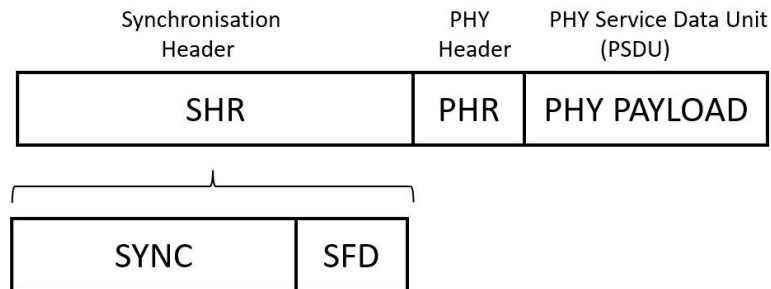


Abbildung 2.12: Framestructure [1]

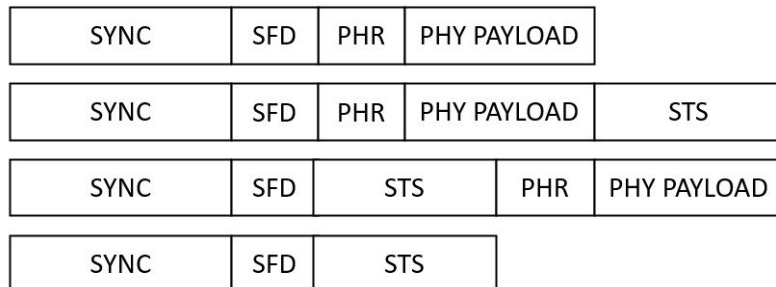


Abbildung 2.13: Framestructure Möglichkeiten 802.15.4z Standard [1]

Synchronisationsheader (SHR): Der SHR teilt sich in zwei Teile auf, das Synchronisationsfeld (SYNC) und den Start of Frame Delimiter (SFD) mit variabler Länge. Das SYNC-Feld (Präambel) besteht aus einer vorbestimmten Folge von Impulsen. Diese dienen zur Synchronisierung der Übertragungszeit zwischen zwei oder mehreren Systemen. Die Präambelsymbolwiederholungen (PSR) legen die Anzahl der wiederholten Sequenzen fest und reichen von 16 bis 4.096 Wiederholungen. [1]

Physikalischer Header (PHR): Der PHR enthält Informationen über die zu empfangenden Daten, einschließlich der Länge der Daten und der für die Übertragung der Daten verwendeten Datenrate. In Abbildung 2.14 ist das PHR Struktur Format ersichtlich. [1]

Bits: 0-1	2-8	9	10	11-12	13-18
Data Rate	Frame Length	Ranging	Reserved	Preamble Duration	SECDED

Abbildung 2.14: PHR Struktur Format [3]

- Data Rate-Feld: gibt die Datenrate des empfangenen PHY-Datenfeldes an (850 kb/s and 110 kb/s).
- Frame Length-Feld: ist eine ganze Zahl ohne Vorzeichen, die die Anzahl der Bytes der Daten angibt.
- Ranging-Feld: Bei der Entfernungsmessung wird das Feld auf 1 gesetzt ansonsten auf 0.
- Preamble Duration Feld: Gibt die Anzahl der Preamblesymbole des SYNC Feldes an.
- Single Error Correct Double Error Detect-Feld: Hier wird der Hamming-Code verwendet, welcher eine Reihe von Fehlerkorrekturcodes beinhaltet, die zur Erkennung und Korrektur von Fehlern verwendet werden können, die bei der Übertragung oder Speicherung von Daten vom Sender zum Empfänger auftreten können. [3]

Nutzdaten (Datenfeld): Die Nutzdaten der Bitübertragungsschicht sind die eigentlichen Daten, die Physical Service Data Unit (PSDU). [3]

Scrambled Time Step Sequence (STS): Die STS bietet Sicherheit bezüglich eines Angriffes von außen auf das System. Der Grund für die Implementierung der STS ist, dass die Anzahl der möglichen Präambel-Codes begrenzt ist und daher die Codes im Sync-Feld wiederholt werden müssen. Dies macht das System verletzlich. Der Vorteil der Scrambled Timestep Sequence ist der, dass diese sich im Gegensatz zur Präambel nicht wiederholt. Diese Sequenz besteht aus pseudozufälligen Pulsen, die über den Deterministic Random Bit Generator (DRBG) generiert werden. Aufgrund dieser pseudozufälligkeit ergibt sich keine Periodizität der Sequenz. Um das STS zu generieren bildet der DRBG 128 bit pseudozufällige Zahlen die durch einen Startwert den Zufallsgenerator initialisieren. Jedes Bit mit einer 0 generiert eine positive Polarität des Pulses, jedes Bit mit einer 1 generiert eine negative Polarität des Pulses. Zur Dekodierung muss der Empfänger vor Beginn des Empfangs eine Kopie der Sequenz lokal zur Verfügung haben. Dies ist nur möglich, wenn sowohl der Sender als auch der Empfänger die Schlüssel und den kryptografischen Code für die STS-Erzeugung kennen. Somit ist die STS für die Sicherheit der Kommunikation zwischen UWB-Chips sehr wichtig. Im Standard IEEE 802.15.4 ist die Scrambled Timestep Sequence nicht implementiert und somit ist auch keine Sicherheit geboten. Dies bezieht sich auf den Quorvo Chip DWM 1000. [3]

Modulation und Entschlüsselung: Die Nutzdaten des Physicalheaders müssen entschlüsselt werden sowie moduliert. Der Entschlüsselungsprozess besteht aus einem Solomon Reed Encodierer und einem Faltungskodierer (K=3). Dabei gibt K die Anzahl der verarbeiteten Bits pro Takt an. Im Standard 802.15.4z wurde die Verarbeitungskapazität des Faltungskodierers von drei auf sieben Bit Verarbeitung pro Takt erweitert. [1]

IEEE 802.15.4 UWB PHY definiert ein Modulationsschema mit Burst Position Modulation und Binary Phase-Shift Keying (BPM-BPSK), das in Abbildung 2.16 dargestellt ist. Jedes Symbol ist unterteilt in zwei Hälften, welches die Burst Position Modulation ermöglicht. In weiterer Folge wird die BPM in zwei Hälften unterteilt, wobei hier eine Hälfte aus den möglichen Impulspositionen und die zweite

Hälfte aus einem Guard Interval gebildet wird. Das Guard Intervall verhindert, dass bei der Übertragung sich Signale vermischen und erhöht die Störfestigkeit gegenüber Ausbreitungsverzögerungen. Wie schon im Punkt ... erwähnt ist die Pulse Repetition Frequency ein wichtiger Parameter des UWB Systems. Im Standard 802.15.4 wird der UWB PHY mit drei möglichen Frequenzen 4, 16 und 64 MHz definiert. Beim 802.15.4z Standard ist die Erweiterung von 128 sowie 256 MHz ermöglicht. [3]

Die 64-MHz-PRF wird mit der gleichen BPM-BPSK-Modulation wie in der Norm IEEE 802.15. modulierte und wird als Base Pulse Repetition Frequency (BPRF) Modus beschrieben. Um die höheren PRFs zu ermöglichen, wird die Binary Phase Shift Umtastung (BPSK) verwendet. Die Kombination aus einer höheren PRF und der BPSK-Modulation wird als High Pulse Repetition Frequency (HPRF)-Modus angegeben. Eine Übersicht über die verschiedenen PRFs und Modi die von jedem Standard unterstützt werden, ist in Abbildung 2.15 dargestellt.

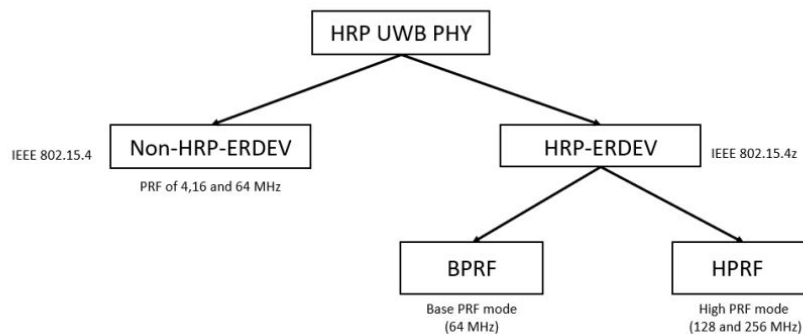


Abbildung 2.15: HRP UWB PHY [3]

Die IEEE 802.15.4z-Modi werden als High-Rate Pulse - Enhanced Ranging Device (HRP-ERDEV)-Modi bezeichnet und daher wird der IEEE 802.15.4-Standard als Non-HRP-ERDEV bezeichnet. [3]

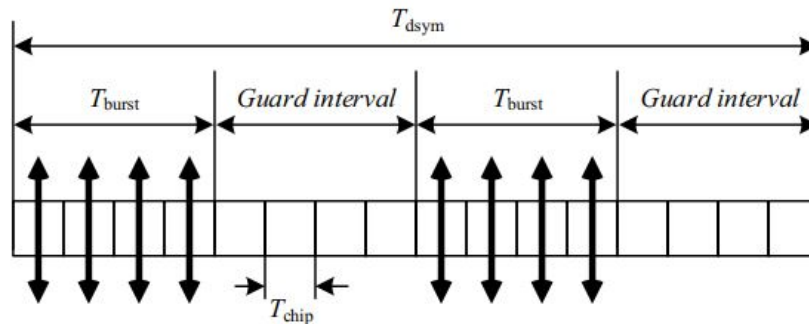


Abbildung 2.16: Datenmodulierung (PHR und PHY) [1]

In Abbildung 2.16 ist die Pulsposition durch Pfeile gekennzeichnet. Die Bezeichnung der Pulszeitdauer ist T_{chip} und ein ganzer Impulszug wird als T_{burst} angegeben.

$g_0^{(n)}$	$g_1^{(n)}$	First burst	Second burst
0	0	0 0 0 0	0 0 0 0
1	0	1 1 1 1	0 0 0 0
0	1	0 0 0 0	1 1 1 1
1	1	1 1 1 1	1 1 1 1

Abbildung 2.17: Tabelle der Datenmodulierung [1]

3 Positionsbestimmung

Das Erfassen einer bestimmten Lokalisation kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ein wesentlicher Punkt ist die weitestgehend angewendete Funktechnik, die die Erfassung der Position ermöglicht. Hierbei werden die Laufzeitmessung sowie die Winkelmessung zur Lokalisierung verwendet. Die Positionsbestimmung kann aber auch durch optische/akustische Verfahren sowie über eine Inertiale Messeinheit erfolgen.[13]

3.1 Begriffe und Definitionen

Bestimmte Begriffe sowie Definitionen, die in den nächsten Abschnitten vorkommen, werden kurz hier erläutert, um ein besseres Verständnis für die Positionsbestimmung zu bekommen.

Positionsbestimmung: Die Positionsbestimmung beschreibt den Vorgang der Ortung eines Objektes in einem bestimmten Bezugskoordinatensystem. Dabei ist die Position unbekannt. Es kann auch sein, dass nur eine grobe Schätzung der Position eines Objektes vorhanden ist. Folglich soll eine genauere Ermittlung der Position erreicht werden.

Tag: Ein elektronischer Sender, welcher an das zu verfolgende bzw. zu lokalisierende Objekt angebracht werden muss, um eine Ortung zu ermöglichen.

Anker/Anchor: Mit Anchor beschreibt man in der Positionsermittlung eine fest platzierte elektronische Einheit, die zur Ortung dient. Dabei ist der Anchor ein Referenzpunkt, anhand dessen die Position des Tags errechnet werden kann.

Line of Sight/Non Line of Sight: Line-of-Sight beschreibt die Eigenschaft, dass die Sichtlinie zwischen Tag und Anker frei ist. Unter solchen Bedingungen sind die Messergebnisse um einiges besser als bei Non-Line-of-Sight.

Tracking: Tracking beschreibt die kontinuierliche Nachverfolgung von Objekten. Es baut auf der Positionsbestimmung auf.

Relative Positionsbestimmung: Die Bestimmung einer Position erfolgt immer in einem bestimmten Bezugssystem, welches nach der Anordnung der Anchor definiert ist. Somit ist die Positionsbestimmung immer relativ.

Round Trip Time (RTT): Die Round Trip Time gibt die Zeit an, welche ein Datenpaket vom Startpunkt des Sendens zum Empfänger und wieder retour braucht. [13]

3.2 Verfahren zur Positionsbestimmung

Das Erfassen einer bestimmten Lokalisation kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ein wesentlicher Punkt ist hier die weitestgehend angewendete Funktechnik, die die Erfassung der Position ermöglicht. In der Funktechnik werden zwischen Sender und Empfänger Daten über elektromagnetische Wellen durch ein Medium z.B. Luft, übertragen, wobei hier die Ausbreitung der elektromagnetischen Welle nicht vom Medium abhängig ist. Eine Übersicht bezüglich Wellenlänge und Frequenzen findet sich im elektromagnetischen Spektrum in Abbildung 3.1. Die Frequenzen des Spektrums reichen von einigen 100 Hz bis hin zu 10^{23} Hz. [14]

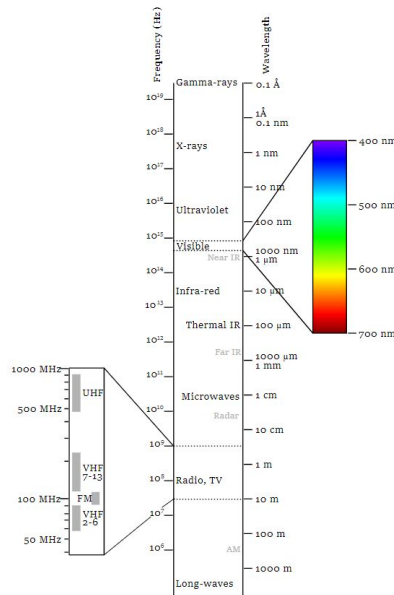


Abbildung 3.1: Übersicht des elektromagnetischen Spektrums [15]

Die UWB-Technologie nimmt einen Bereich in der Funktechnik ein und nutzt einen Frequenzbereich von 3.1 bis 10.6 GHz mit einer sehr geringen Signalstärke.

Das Ultrabreitband ermöglicht es, über die Hochfrequenzmessung ein präzises Timing eines Signals zu bestimmen. Da das UWB hauptsächlich für Entfernung- und Positionsbestimmungstechniken genutzt wird, wird der Abstand oder die relative Position zwischen zwei UWB Geräten benötigt. In dieser Technik wird bevorzugt die Time of Flight (ToF) sowie die Time Difference of Arrival genutzt, um die Position des Tags über mehrere Anchor zu bestimmen. Im Folgende werden nicht nur die ToF sowie die TDoA beschrieben sondern auch die Angle of Arrival (AoA) und der Received Signal Strength Indicator.

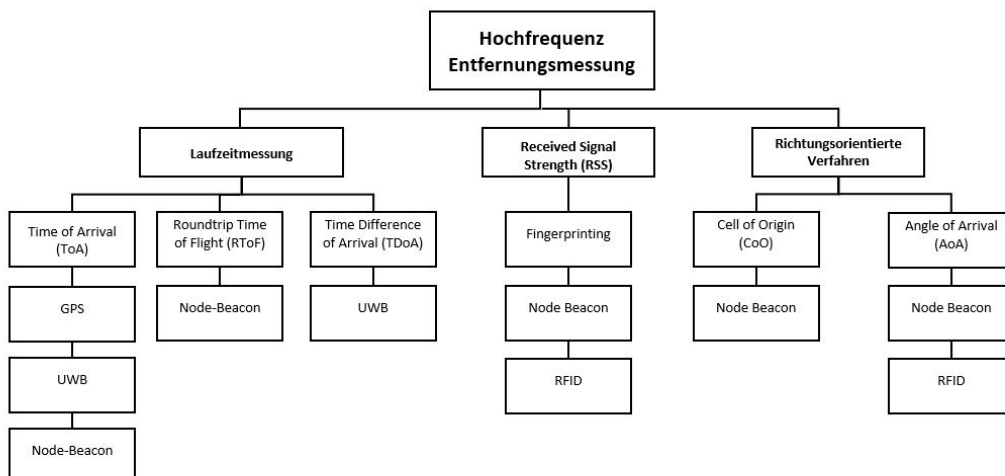


Abbildung 3.2: Übersicht Hochfrequenz Entfernungsmessung [14]

Grundsätzlich kann hier eine Übersicht wie in Abbildung 3.2 gemacht werden, basierend auf der Funktechnik. Man unterscheidet zwischen Laufzeitmessungen, Signalfeldstärke und Richtungsori-

entierten Verfahren. [14]

Laufzeitmessung: Unter Laufzeitmessung versteht man die Zeitdifferenz zwischen gesendetem und empfangenem Signal. Diese beschreibt die Zeit, welche eine magnetische Welle braucht, um vom Sender zum Empfänger zu gelangen.

RSSI (Signalstärke): Über den Received Signal Strength Indicator (RSSI) wird die Signalfeldstärke zwischen Sender und Empfänger bestimmt. Die Entfernung hängt dann von dem zu durchdringenden Medium ab (Luft, Steinwände, Glas), der Sendeleistung und der Signalstärke des Empfängers. Dabei ist die Signalfeldstärke stark von den verwendeten Antennen abhängig.

Richtungsorientierte Verfahren: Hierbei werden das Abstrahlverhalten der Antenne sowie die Antennencharakteristik ausgenutzt, um die Lokalisierung eines Gerätes zu ermöglichen. [14]

3.2.1 Time of Flight (ToF)

Das Time of Flight Verfahren verwendet die Laufzeit des Signals zur Messung der Entfernung. Der Tag sendet einen UWB-Frame mit bestimmten Daten an den Anchor zu einer bestimmten Zeit t_1 . Dieses Signal wird vom Anchor zur Zeit t_2 empfangen. Da das Signal eine elektromagnetische Welle ist, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ($c=299.8 \cdot 10^6 \frac{m}{s}$) durch den Raum bewegt, kann man die Distanz (s) über die Differenz zwischen Sende und Empfangszeit bestimmen. [3]

$$s = c \cdot (t_2 - t_1) \quad (3.1a)$$

$$s = c \cdot ToF \quad (3.1b)$$

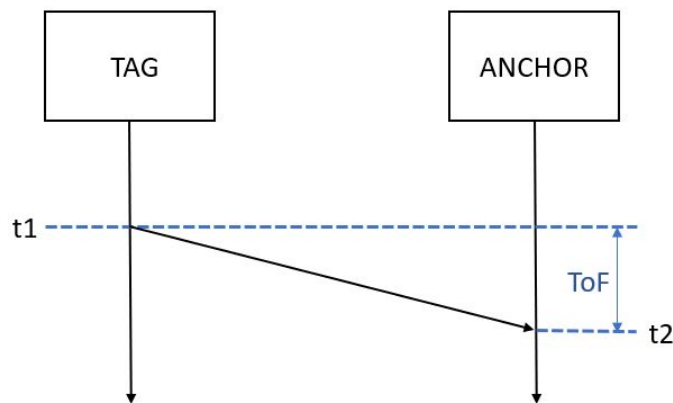


Abbildung 3.3: ToF Lokalisierungstechnik [3]

Für eine entsprechende Positionsbestimmung braucht es mindestens drei Anchor und jeweils die Distanzen zum Tag. Über diese Distanzen kann mittels der Berechnungsmethode der Trilateration die genaue Position erfolgen. Der Nachteil des Time of Flight Verfahrens ist, dass eine präzise Synchronisation zwischen den Anker sowie Tag erforderlich ist. Die Genauigkeit dieser Synchronisation wirkt sich direkt auf die Genauigkeit der Ortung aus. [3]

3.2.2 Time Difference of Arrival (TDoA)

Die Time Difference of Arrival ist wie die ToF eine weit verbreitete Methode zu Ortung von Objekten. Bei diesem Verfahren wird ein Signal vom Tag an die Anker gesendet. Aufgrund der unterschiedlichen Distanzen vom Tag zu den Ankern ist die Zeit der Ankunft des Signals an jedem Anker unterschiedlich. Durch diesen Zeitunterschied der Ankunft des Signals können Hyperbeln berechnet werden, deren Schnittpunkt den Ort des Tags angibt. Die Differenz der Laufzeiten folgt nicht einem Kreis, sondern einer Hyperbel. Angesichts der geometrischen Eigenschaften dieses Sachverhaltes kann eine höhere Genauigkeit erreicht werden. [3]

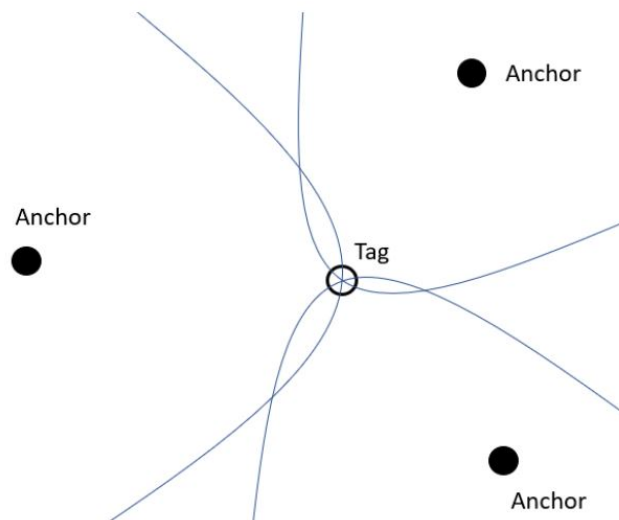


Abbildung 3.4: TDOA Lokalisierung mittels Hyperbeln [3]

Bei diesem Ortungsverfahren muss der Tag nicht mit den Ankern synchronisiert werden, sondern nur die Anker miteinander. Ein Anwendungsbeispiel für dieses Verfahren wäre der freihändige Zugang bzw. die Zugangskontrolle, z.B. für Autos, Haustüren etc. [3]

3.2.3 Two Way Ranging (TWR)

Beim Two Way Ranging-Verfahren wird die Entfernungsmessung mit zwei Laufzeitmessungen durchgeführt. Dieses Verfahren ist eine Verbesserung des ToFs. Dabei wird die Synchronisation zwischen Anker und Tag nicht benötigt. Nach der Laufzeitmessung liegt das Ergebnis der Entfernungsmessung auf der Seite, an der die Messung angeregt wurde. Näher betrachtet wird vom Anker ein Signal ausgesendet, welches mit einem Zeitstempel versehen ist. Ein Zeitstempel (Timestamp) ist eine Zeitangabe, welche ein Ereignis einem eindeutigen Zeitpunkt zuordnet. Dieses Signal wird vom Tag empfangen und nach einer definierten Antwortzeit zurückgesendet. Diese Round Trip Time (RTT) wird dann verwendet, um die Entfernung zwischen Tag und Anker zu berechnen. Wie bei der ToF kann durch den Einsatz von drei Ankern mittels Trilateration die Position bestimmt werden. [3]

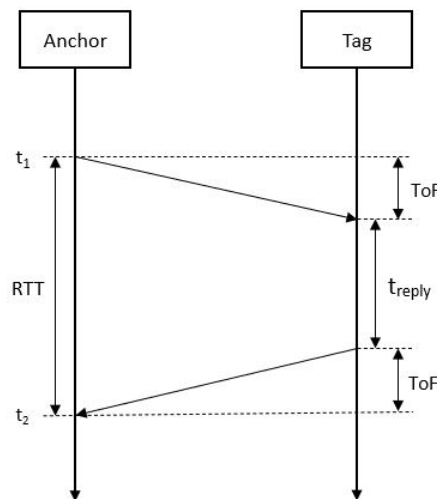


Abbildung 3.5: Two Way Ranging Technik [3]

$$RTT = 2 \cdot ToF + t_{reply} \quad (3.2a)$$

$$ToF = \frac{RTT - t_{reply}}{2} \quad (3.2b)$$

$$s = c \cdot ToF \quad (3.2c)$$

3.2.4 Symetrical Double Sided Two Way Ranging (SDS-TWR)

Double Sided Two Way Ranging (DS-TWR) ist eine Erweiterung des TWR, bei der mindestens drei statt nur zwei Datenpaketen gesendet werden. Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass sowohl über Anker als auch Tag oder Modul A sowie Modul B und der Signallaufzeit die Entfernung bestimmt werden kann. Hierbei ist die Synchronisierung der beteiligten Module nicht notwendig. [13]

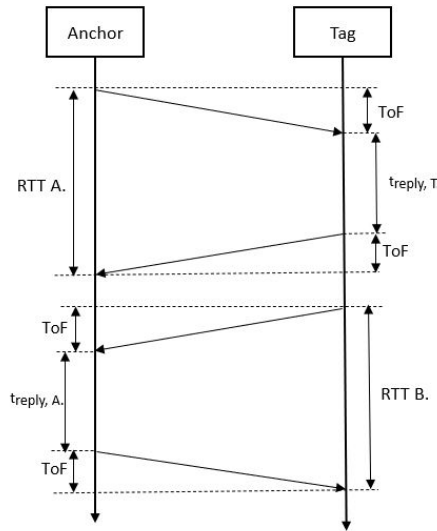


Abbildung 3.6: SDS-TWR Methode [13]

$$RTTA. = 2 \cdot ToF + t_{reply, T} \quad (3.3)$$

$$RTTB. = 2 \cdot ToF + t_{reply, A} \quad (3.4)$$

$$RTTA. + RTTB. = 4 \cdot ToF + t_{reply, T} + t_{reply, A} \quad (3.5)$$

$$ToF_{SDSTWR} = \frac{RTTA. + RTTB. - t_{reply, T} - t_{reply, A}}{4} \quad (3.6)$$

$$s = c \cdot ToF_{SDSTWR} \quad (3.7)$$

Variablen:

RTT	Round Trip Time
RTTA	Round Trip Time A
RTTB	Round Trip Time B
ToF	Time of Flight
ToF_{SDSTWR}	Time of Flight des SDSTWR
c	Lichtgeschwindigkeit
s	Weg
$t_{reply, T}$	Reply Time Tag
$t_{reply, A}$	Reply Time Anchor

3.2.5 Angle of Arrival (AoA)

Das Angle of Arrival (AoA) zur Positionsbestimmung basiert auf dem Berechnungsmodell der Triangulation und ist ein richtungsorientiertes Verfahren. Ein AoA liefert die nötige Information über die Richtung eines ankommenden Signals, also den Winkel zwischen den Nodes (Knotenpunkten), z.B. Sender und Empfänger (siehe Abbildung 3.8). Zur Messung des AoA eines Signals werden allgemein Antennenarrays benützt. In diesem Fall wird der Winkel des eintreffenden Signals an den Antennenarrays, durch die Messung verschiedener Ankunftszeiten bestimmt. Das heißt, alle Antennen empfangen das reflektierte Funksignal gleichzeitig und werten die minimale Laufzeit bzw. den Phasenunterschied aus. Das ankommende Signal kann als planare Wellenfront modelliert werden. Abbildung 3.7 zeigt ein Beispiel an einem Array mit eintreffenden Winkel Alpha. Außer den linearen Arrays gibt es noch verbesserte Strukturen wie kreisförmige Arrays oder rechteckige Gitter, deren Funktionsprinzip dasselbe ist wie bei den linearen Arrays. [6]

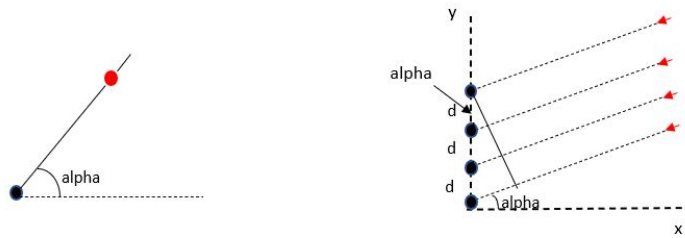


Abbildung 3.7: Einfallswinkel [6]

Für die AoA-Messung sind zwei Referenznodes ausreichend, um die Position des Zielknotens durch das Schneiden zweier Linien zu bestimmen (Triangulation). Unterhalb ist die Berechnungsmethode für x und y eines Zielpunktes in 2D, wenn α_1 und α_2 die gemessenen Winkel sind, angeführt. [6]

$$\tan(\alpha_1) = \frac{y - y_1}{x - x_1} \quad (3.8a)$$

$$\tan(\alpha_2) = \frac{y - y_2}{x - x_2} \quad (3.8b)$$

Gleichsetzen von x :

$$\frac{y - y_1 + \tan(\alpha_1) \cdot x_1}{\tan(\alpha_1)} = \frac{y - y_2 + \tan(\alpha_2) \cdot x_2}{\tan(\alpha_2)} \quad (3.9a)$$

Gleichsetzen von y :

$$\tan(\alpha_1) \cdot (x - x_1) + y_1 = \tan(\alpha_2) \cdot (x - x_2) + y_2 \quad (3.10a)$$

x -Koordinate:

$$x = \frac{\tan(\alpha_1) \cdot x_1 + \tan(\alpha_2) \cdot x_2 - y_1 + y_2}{\tan(\alpha_1) - \tan(\alpha_2)} \quad (3.11a)$$

y -Koordinate:

$$y = \frac{y_1 \cdot \tan(\alpha_2) - y_2 \cdot \tan(\alpha_1) + \tan(\alpha_1) \cdot \tan(\alpha_2) \cdot (x_1 - x_2)}{\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)} \quad (3.12a)$$

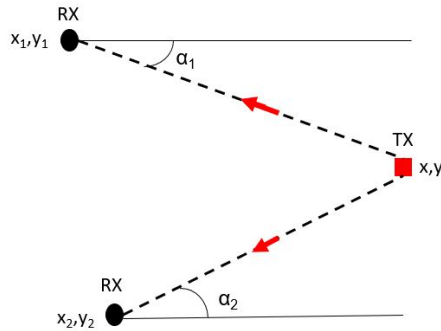


Abbildung 3.8: Triangulation [6]

3.2.6 Fingerprinting

Diese Methode basiert auf der Signalstärkemessung (Received Signal Strength Indication). Die Fingerprinting Technik wird oft genutzt, um den Standort Objekten in Innenräumen zu ermitteln. In Abbildung 3.9 ist eine Karte der Signalstärkemessung der Leistungspegel dargestellt, welche mit den Informationen des mobilen Gerätes verglichen wird. In weiterer Folge wird dann der Standort bestimmt, bei dem sich das Gerät befindet. Dies wird durch den Vergleich des tatsächlich gemessenen Leistungspegel mit den aufgezeichneten Leistungspegel angegeben. Die Positionsgenauigkeit hängt von den aufgenommenen Werten ab, aus denen sogenannte Finger-Print Karten erstellt werden können, und natürlich von den Dämpfungseinflüssen auf das Signal. [15]

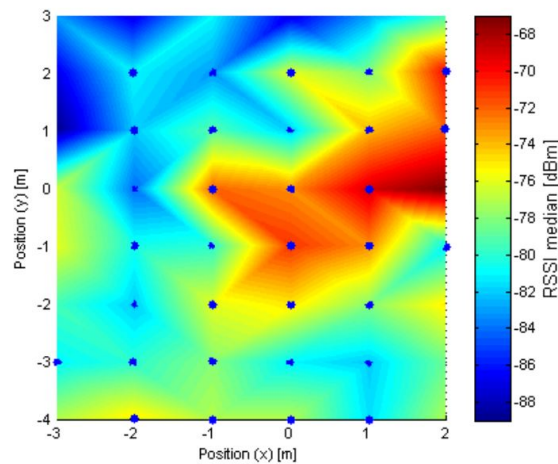


Abbildung 3.9: Fingerprinting [15]

3.2.7 Inertial Measurement Unit (IMU)

Die Positionsbestimmung kann oder muss nicht nur über die Funktechnik geschehen, sondern kann auch über die sogenannte Trägheitsnavigation erfolgen. Bei der Trägheitsnavigation wird eine sogenannte inertielle Messeinheit verwendet (Inertial Measurement Unit (IMU)). Die IMU ist eine sensorische Messeinheit aus mehreren Inertialsensoren, mit der man die Orientierung im Raum bestimmen kann. [16]

Die Erfassung der sechs möglichen Freiheitsgrade erfolgt über drei orthogonal zueinander stehende Beschleunigungssensoren für die Erfassung der translatorischen Bewegung in x- bzw. y- bzw. z-Achse. Weiters werden drei orthogonal zueinander angebrachten Drehratensensoren (Gyroskopische Sensoren) für die Erfassung der rotierenden Bewegungen in x- bzw. y- bzw. z-Achse angewendet. Eine inertielle Messeinheit liefert als Messwerte drei lineare Beschleunigungswerte für die translatorische Bewegung sowie drei Winkelgeschwindigkeiten für die rotatorische Bewegung. In einem inertialen Navigationssystem (INS) wird aus den Messwerten der IMU durch doppelte Integration der Beschleunigung und nach Unterdrückung der Erdbeschleunigung die Position im Raum zu einem Referenzpunkt bestimmt. Die Änderung des Weges gibt die Geschwindigkeit an, die Änderung der Geschwindigkeit ergibt folglich die Beschleunigung. Die Integration der drei Winkelgeschwindigkeiten liefert, bezogen auf einem Referenzpunkt, die Orientierung im Raum. [17]

Es werden oft zusätzlich Magnetfeldsensoren eingebaut, um die Orientierungsgenauigkeit zu verbessern bzw. die verschiedenen Abweichungen (Nullpunktabweichung), welche auftreten können, zu kompensieren. [17]

Ein großer Nachteil von inertialen Messeinheiten ist, dass sie für die Orientierung immer die Beschleunigung nach der Zeit integrieren, um somit die Geschwindigkeit und die Position zu bestimmen. Dadurch summieren sich alle Messfehler über die gewisse Zeitdauer der Positionsbestimmung. Das führt natürlich zu einer Abweichung, genauer gesagt zu einer immer größeren Differenz zwischen tatsächlichem Ort und dem Ort, an dem sich das System zu befinden glaubt. [17]

Die Beschleunigung hat einen konstanten Fehler. Wird dieser aufintegriert, bekommt man einen linearen Fehler, der sich auf die Geschwindigkeit auswirkt, und durch erneutes Integrieren wird aus dem linearen Fehler ein quadratischer Fehler, welcher die genaue Position verfälscht. Das gleiche Prinzip bzw. die gleiche Berechnung führt zu Verfälschung in der rotatorischen Anwendung. [17]

Translation:

$$v = \int a + c_1 dt \tag{3.13a}$$

$$s = \int v + c_1 t dt \tag{3.13b}$$

$$s = v \cdot t + c_1 \cdot \frac{t^2}{2} + c_2 \tag{3.13c}$$

Rotation:

$$\omega = \int \alpha + c_1 dt \tag{3.13d}$$

$$\varphi = \int \omega + c_1 t dt \tag{3.13e}$$

$$\varphi = \omega \cdot t + c_1 \cdot \frac{t^2}{2} + c_2 \tag{3.13f}$$

Variablen:

a	Beschleunigung
v	Geschwindigkeit
s	Weg/Position
t	Zeit
c ₁	Konstante 1
c ₂	Konstante 2
α	Winkelbeschleunigung
ω	Winkelgeschwindigkeit
φ	Winkel

Um eine genaue Positionsbestimmung zu erreichen, werden hier Algorithmen verwendet, die essentiell für eine IMU sind. Der Kalman-Filter ist einer davon und liefert auch die besten Ergebnisse in Bezug auf die Genauigkeit. Oberflächlich gesagt, werden Messwerte, die den Zustand des Systems beschreiben, geschätzt. Der Kalman ist ein bestimmter Algorithmus, der eine Reihe von Messungen und deren Messfehler über einen bestimmten Zeitraum erfasst und dabei Schätzungen von unbekannt Variablen liefert, die grundsätzlich genauer sind als die Messdaten. Dabei wird eine gemeinsame Wahrscheinlichkeitsverteilung (hauptsächlich die Normalverteilung) der Variablen für jedes Zeitintervall geschätzt. Besonderen Stellenwert hat der Algorithmus bei Flugzeugen, Schiffen und Raumfahrzeugen, wo er zur eindeutigen Positionsbestimmung genutzt wird. [16]

3.2.8 Optische und Akustische Verfahren

Weiter kann eine Positionsbestimmung auch über optische Verfahren durchgeführt werden. Dabei werden gegenwärtig hauptsächlich Kameras verwendet, um die genaue Position zu bestimmen. Diese kamerabasierten Verfahren verwenden die Bildkorrelation zur Positionsbestimmung. Weiters wird auch die Photogrammetrie eingesetzt, welche aus Fotografien eines Objektes durch Bildmessung seine Position bestimmen. [14]

Bei den akustischen Verfahren breitet sich im Gegensatz zu elektromagnetischen Wellen der Schall, welcher eine mechanischen Welle darstellt, durch die Luft bzw. ein Medium aus. Die relative Reichweite zwischen Sender und Empfänger kann hier über die Time of Flight des Schalls geschätzt werden. Zur Positionsbestimmung werden Ultraschallwellen, also Schallwellen die oberhalb des hörbaren Frequenzbereiches liegen ($>20\text{kHz}$), zur Entfernungsmessung verwendet. Aufgrund der Dämpfungseigenschaften der Ultraschallwellen ist über die ToF eine Entfernungsmessung bis zu 10m möglich. [14]

Darüber hinaus kann im Schallbereich die Echoortung benützt werden, um eine Position zu bestimmen. In der Echoortung werden Schallwellen aktiv ausgesendet. Diese werden reflektiert und anhand der gemessenen Laufzeit kann die Position bestimmt werden. Diese Ortung kommt in der Technik zum Einsatz und hat sich im Lauf der Evolution ursprünglich auch im Tierreich entwickelt z. B. bei Fledermäusen. In der Technik ist es das Sonar (sound navigation and ranging), welches zur Entfernungsmessung und Positionsbestimmung von Unterwasserobjekten verwendet wird. Dabei werden Schallwellen ausgesendet und vom jeweiligen Objekt reflektiert. Die reflektierten Schallwellen werden von Sonargeräten erfasst und die darin enthaltenen Informationen analysiert. [7]

Optische Systeme werden stark in der Fertigungsmesstechnik im Maschinenbau eingesetzt, in der Qualitätssicherung von industriellen Prozessen sowie im Reverse Engineering etc.. Akustische Systeme hingegen werden für verschiedene Anwendungen der Ortung mit cm-Genauigkeit eingesetzt. Das starke Abklingverhalten der akustischen Wellen bestimmt die Reichweite von Schallsystemen, welche sich auf einige Meter begrenzt, was für die Lokalisierung im Innenraum nicht von großer Bedeutung wäre, jedoch sind derartige Systeme relativ selten. Ein Anbieter von solchen Ultraschall Lokalisierungssystemen ist die Firma Sonitor. [7][18]

3.2.9 Zusammenfassung

Verfahren	Vorteile	Nachteile
ToF (Trilateration)	hohe Genauigkeit; geringe Beeinflussung durch Umgebungsänderungen	Zeitsynch.;Sichtkontakt; Mehrwegausbreitung
TDoA (Trilateration)	hohe Genauigkeit; Zeitsynch.	Sichtkontakt; Hardware für Zeitmessung
TWR (Trilateration)	hohe Genauigkeit	Zeitsynch.;Sichtkontakt; Mehrwegausbreitung
SDS-TWR (Trilateration)	hohe Genauigkeit	Zeitsynch.;Sichtkontakt; Mehrwegausbreitung
AoA (Triangulation)	zwei Empfänger nötig; keine Zeitsynch.	Sichtkontakt; Gruppenantenne; komplexes System
Fingerprinting (RSSI)	Hardware für Signalstärke; keine Zeitsynch.	Niedrige Genauigkeit; anfällig für Störungen
IMU (Kalmanfilter)	sehr genau; statistisches Verfahren	hauptsächliche Anwendung im Outdoor-Bereich
Optisch u. Akustisch	hohe Genauigkeit (anwendungsspezifisch)	akustische Verfahren eher im Outdoorbereich

Tabelle 3.1: Übersicht über Positionsbestimmungsverfahren

Die Tabelle 3.1 gibt lediglich einen Überblick mit kurz geschilderten Vor-und Nachteilen im Hinblick auf die gängigen Positionsbestimmungsverfahren.

4 Lokalisierungssysteme

In diesem Kapitel werden einige bestehende Technologien im Bereich der Positionsbestimmung beschrieben. Dabei ist der Fokus besonders auf den Indoor-Bereich gerichtet, da sich diese Arbeit mit der Positionsbestimmung in Innenräumen beschäftigt.

4.1 Real Time Locating Systems (RTLS)

Echtzeit-Ortungssysteme (Real-time Locating Systems, RTLS) ermöglichen die digitale Verfolgung des Echtzeit-Standorts und der Bewegungen physischer Gegenstände in Innenräumen. Das Ultrabreitband ist eine Technik, die zu den Echtzeit-Ortungssystemen zu zählen ist. Wie im letzten Kapitel beschrieben nutzen RTLS zur Positionsbestimmung überwiegend Hochfrequenztechnologien sowie andere integrierte Komponenten, um die Position von Personen und Objekten in Bereichen, die GPS nicht erreichen kann, kontinuierlich zu bestimmen. Dies liefert Standortdaten, die verwendet werden können, um den Standort von Mitarbeitern, Vermögenswerten oder Geräten auf einem digitalen Indoor Raumplan zu visualisieren oder in automatisierte Arbeitsabläufe und Systeme wie IoT-fähige Sicherheitsanwendungen, Asset- und Supply-Chain-Management Lösungen zu integrieren.

Die spezifische Funktionsweise von Echtzeit-Ortungssystemen kann sich von System zu System stark unterscheiden, aber alle RTLS nutzen ein Netzwerk aus verbundenen Hardware- und Softwarekomponenten, die miteinander interagieren. Die Anchor werden im Raum positioniert und die Tags auf dem zu verfolgenden Objekt angebracht. Über WLAN können dann die Positionsdaten an eine Verarbeitungseinheit übermittelt werden. Weiters werden neben der Echtzeit Lokalisierung auch Reichweiten bestimmt. Somit kann man auch eine Entfernungsmessung mittels RTL-Systemen bewerkstelligen.

Aufgrund der Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten der Echtzeit Lokalisierung sowie Entfernungsmessung wird prognostiziert, dass der RTLS-Markt innerhalb der nächsten fünf Jahre von 3,4 Milliarden auf 10,3 Milliarden Dollar steigen soll. Die GPS Technologie hat im Vergleich seit ihrer Einführung im Jahr 1980 bis heute über 1,4 Billionen Dollar erwirtschaftet. [19]

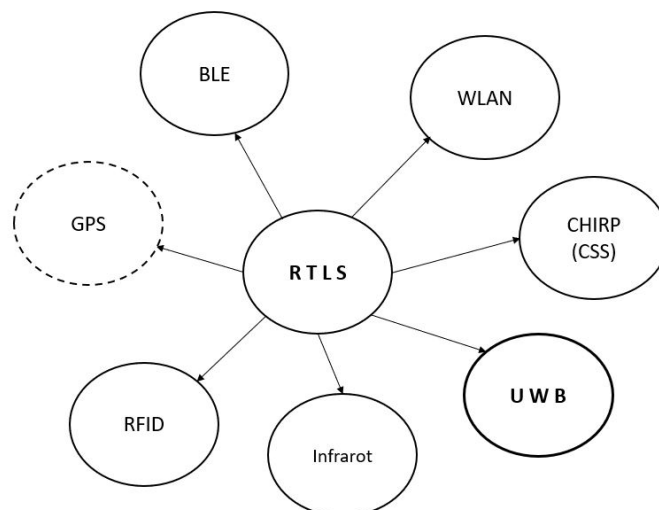


Abbildung 4.1: RTLS [9]

Abbildung 4.1 zeigt die verschiedenen Real Time Locating Systeme, die für den Innenraum in Frage kommen. GPS kommt zwar in Outdooranwendungen vor aber ist auch ein Teil der RTLS (strichliert).

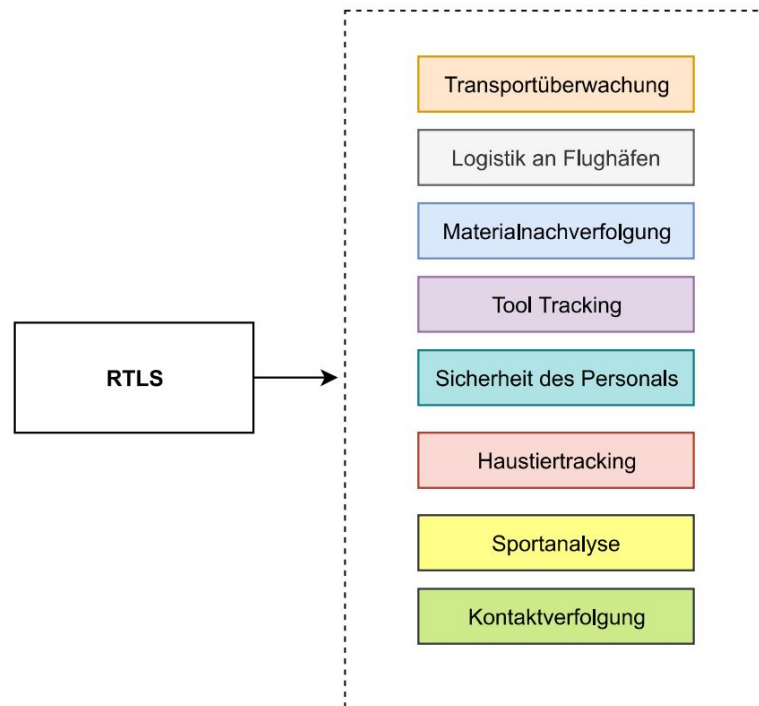


Abbildung 4.2: Anwendungsmöglichkeiten [Eigenausarbeitung]

In Abbildung 4.2 sieht man die möglichen Einsatzgebiete der RTL-Systeme. Von Transportüberwachung bis zur Sportanalyse ist der Einsatz möglich.

4.2 Global Positioning System

Das Navigational Satellite Timing and Ranging-Global Positioning System (NAVSTAR-GPS) ist ein satellitengestütztes Navigationssystem mit bis zu 30 Satelliten, die für eine einwandfreie Positionsbestimmung verantwortlich sind. Alle Satelliten umkreisen die Erde in einer Höhe von 20200 km. Einige von diesen Satelliten sind auf Reserve bzw. nicht funktionsfähig, somit sind 24 Satelliten im Einsatz. Die Umlaufzeit solcher Satelliten beträgt ca. 12 Stunden. Für eine exakte Messung der Signallaufzeiten zwischen Satellit und Erdoberfläche hat jeder Satellit in seiner Umlaufbahn mehrere Atomuhren an Bord, und kann auf 15 Stellen nach dem Komma seine Zeit angeben. Durch mehrere Monitorstationen werden die Satelliten gesteuert. Die Stationen sind an geographisch genau bekannten Fixpunkten am Boden um die Welt verteilt und übermitteln den Satelliten die Information, wo sie sich gerade befinden. Zudem sorgen sie dafür, dass alle Atomuhren an Bord aller Satelliten und in den Bodenstationen synchronisiert sind und genau gleich ticken – es findet also ein dauernder Uhrenvergleich statt. Die Positionsbestimmung findet über Trilateration statt wobei hier 4 Satelliten benötigt werden. Der Grund hierfür ist dass die Empfänger der Signale nicht mit Atomuhren ausgestattet sind, dadurch ergibt sich eine Verfälschung der Distanz. Ein kleines Beispiel verdeutlicht, dass eine Ungenauigkeit im Millisekunden Bereich schon eine Abweichung von 600 km ergibt. ($300\,000\text{ km/s} \cdot 0.002\text{s}$). Hierbei hilft der vierte Satellit, um diesen Fehler zu korrigieren. Weiters treten noch Einflüsse von der Schwerkraft, relativistische Korrekturen und Reflexionen, die das Signal beeinflussen und somit einen Positionierungsfehler verursachen. GPS ist ein mittlerweile sehr verbreitetes System, welches zur Navigation verwendet wird und heutzutage als Navigationssystem in fast jedem Auto als Grundausstattung vorhanden ist. [20]

Glonass: Globalnaya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema (Glonass) ist das russische Pendant zu dem amerikanischen NAVSTAR GPS. Dieses System ähnelt dem amerikanischen in Aufbau sowie Funktionsweise und der Anzahl der zur Verfügung stehenden Satelliten (24). Technisch basiert das

Glonass auch auf ähnlichen Prinzipien. Gründe für die parallele Entwicklung waren hauptsächlich militärstrategische. Die Umlaufbahn beträgt 25.500 km, die Bahnhöhe 19.100 km und die benötigte Umlaufzeit liegt bei 11 Stunden und 15 Minuten. [21]

Ergänzend gibt es das europäische Galileo sowie das chinesische BeiDou, welches die Navigation bzw. Positionsbestimmung im Outdoor-Bereich ermöglichen. [22]

4.3 Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) wurde 1990 zur Datenübertragung für kurze Distanzen entwickelt und zeichnet sich durch einen geringen Energieverbrauch aus. Die Kommunikationsprotokolle gehen zurück auf das Jahr 2013, als Apple seinen iBeacon Standard herausbrachte. Zwei Jahre danach wurde von Google das Beacon-Protokoll Eddystone auf den Markt gebracht. Diese beiden Beacon-Protokolle und die physischen Beacon Angebote, mit denen sie verwendet werden können, ermöglichen die Anwendung zur Lokalisierung in Innenräumen. BLE-Beacons sind kleine Bluetooth-Sender, die von drahtlosen Geräten wie BLE-fähigen Smartphones erkannt werden können. Beacons können an festen Positionen z. B. an Wänden oder Gebäuden eingesetzt, oder an mobilen Geräten angebracht werden, um Standortreferenzen für Ortungsanwendungen in Gebäuden zu liefern. [7]

Bei der BLE-Ortung werden an festen Positionen im Innenraum Beacons platziert. Diese Sensoren erkennen und lokalisieren passiv Übertragungen von Bluetooth-Geräten anhand der empfangenen Signalstärke des sendenden Geräts (RSSI). Diese Standortdaten können über ein Ortungssystem analysiert werden. Durch die Triangulationsalgorithmen kann der Standort eines Gerätes erfasst werden. Hauptsächlich wird hier die Angle of Arrival Positionsbestimmung verwendet. Diese Koordinaten können dann zur Standortbestimmung eines Geräts auf einer Innenraumkarte dargestellt werden. BLE-Lokalisierungssysteme ermöglichen je nach Systemarchitektur, Hardwareauswahl sowie der Anzahl der eingesetzten Sensoren oder Beacons unterschiedliche Genauigkeiten. Sowohl die Ortung in Innenräumen mit BLE-Sensoren als auch mit Beacons kann eine Genauigkeit von typischerweise unter fünf Metern liefern. Mit dem Standard 5.1 soll eine höhere Genauigkeit der Positionsbestimmung erreicht werden. [7]

Da BLE in vielen drahtlosen Geräten eingebaut ist, kann die Technologie relativ einfach und flexibel in vielen Anwendungen eingesetzt werden. Ein großer Nachteil ist hier die geringe Reichweite solcher System. [7]

4.4 Wireless Local Area Network (WLAN)

Wi-Fi ist eine Hochfrequenztechnologie für die drahtlose Kommunikation, die zur Erkennung und Verfolgung des Standorts von Personen und Geräten genutzt werden kann. Über verschiedene Zugangspunkte (Hotspots) kann die Ortung im Innenraum relativ leicht realisiert werden, da die Infrastruktur wie Wlan-Router, schon vorhanden ist. [23] [25]

Gerade in Ballungsgebieten senden eine Vielzahl von WLAN-Stationen Signale aus, die von Hotspots, Firmennetzwerken oder von privaten Heimnetzwerken stammen. Die Kenntnis über den Standort dieser Netzwerke (Router) erlaubt so die Berechnung des eigenen Standortes. Je mehr Netzwerksignale empfangen werden, desto exakter kann eine Lateration zur Berechnung des eigenen Standortes erfolgen. [23] [25]

Jeder WLAN-Access Point, ob Kundenhotspot, Router oder internetfähiges Kassensystem, sendet bestimmte Daten aus. Anhand von RSSI (Received Signal Strength Indication) und MAC-Adresse (Media-Access-Control) kann eine App daraus den aktuellen Standort des Endgerätes berechnen.

Voraussetzung ist eine Datenbank mit Informationen über die Standorte, mit der diese Daten abgeglichen werden. Dieses Verfahren nennt man Fingerprinting. [23] [25]

Das Wi-Fi ist in der Regel weniger genau als andere RF Technologien wie UWB und BLE. Es erreicht eine Ortungsgenauigkeit von unter 10 Metern bei optimalen Bedingungen und Einsatz. Durch den neuen Standard Wi-Fi 6 soll eine Genauigkeit im Meterbereich erreicht werden. Der größte Vorteil dieser Technologie ist, dass die benötigte Infrastruktur meistens schon vorhanden ist und man nicht weitere Hardware benötigt. [23] [25]

4.5 Chirp Spread Spectrum (CSS)

Chirp Spread Spectrum basiert auch auf der Hochfrequenz-Funktechnologie, die für große Reichweiten in der Ortungstechnik eingesetzt wird. Spread-Spectrum-Techniken sind Verfahren, mit denen ein Signal absichtlich im Frequenzbereich gespreizt wird. Der Standard Long Range (LoRa) basiert auf solch einer Technik. Diese Technik kann sowohl in Innenräumen als auch im Außenbereich großer Anlagen zum Einsatz kommen. Durch Widerstandsfähigkeit gegen Funkstörungen, Interferenzen sowie aufgrund des geringen Stromverbrauchs, eignet sich die Technik gut für Industrieanlagen. [23] Bei dieser Technik werden zwei Arten von Chirp-Impulsen eingesetzt Upchirps und Downchirps. Wenn die Frequenz mit der Zeit zunimmt, dann spricht man von Upchirps und wenn die Frequenz mit der Zeit abnimmt, dann spricht man von Downchirps. Bei der drahtlosen Kommunikation werden Chirp Impulse von einem Sende-/Empfängergerät an einen Empfänger oder zwischen Sende-/Empfängergeräten gesendet, die gleichzeitig mit einem oder mehreren Geräten kommunizieren und empfangen können. Die Chirp-Signale werden als Trägersignale verwendet, auf denen eine Nachricht kodiert wird. Die Empfängergeräte analysieren die Muster der eingehenden Impulse und setzen sie in Daten um. Dabei kann nicht nur eine Ortung von Objekten erfolgen, sondern auch eine Datenübertragung stattfinden. [23]

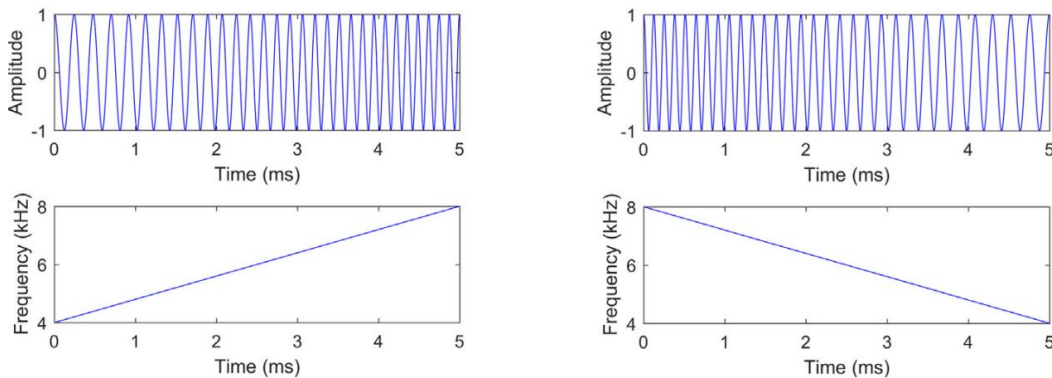


Abbildung 4.3: Up/Down Chirps [24]

In der Abbildung 4.3 sieht man auf der linken Seite den Upchirp und auf der rechten Seite den Downchirp mit den jeweiligen Zeit/Frequenz Abhängigkeiten.

Für die Positionsbestimmung mittels der Chirp Technik werden die Time Difference of Arrival sowie das Two Way Ranging (TWR) verwendet. Die Indoor-Positionierung von Chirp mit der TDoA Methode ermöglicht eine Positionsgenauigkeit von 1-2m bei einer Entfernung von bis zu 500m. Dies ermöglicht eine genaue Echtzeit-Ortung mit geringer Latenz in großen Bereichen wie Fabriken, Lagerhäusern und sogar unterirdischen Minen. Die hohe Zuverlässigkeit des Systems gewährleistet außerdem eine genaue drahtlose Kommunikation über diese großen Reichweiten. [23]

4.6 Infrarot

Infrarot ist eine Strahlungsform, welche aus elektromagnetischen Wellen besteht. Die Wellenlängen des Infrarotbereichs erstrecken sich von 1mm bis hin zu 780nm und Frequenzen von 300 GHz - 385 THz. Weiters wird die Infrarotstrahlung in ein nahes, mittleres und fernes Infrarot unterteilt, welche in Abbildung 4.4 des Infrarot-Strahlungsspektrums zu sehen ist. Bei kurzwelliger IR-Strahlung (ab 780 nm) spricht man oft von nahem Infrarot (near infrared, NIR), bei Wellenlängen von ca. 5-25 μm von mittlerem Infrarot (mid infrared, MIR). Extrem langwellige IR-Strahlung (25 μm -1 mm) bezeichnet man als fernes Infrarot (far infrared, FIR). Fast alle Körper, bei denen eine Temperatur gemessen werden kann, strahlen auch Infrarotwellen aus. Im Umkehrschluss können Temperaturmessungen durch Infrarotstrahlung gemacht werden. In vielen Bereichen ist die Infrarottechnik schon wichtiger Bestandteil, wie zum Beispiel im Militär für Nachtsichtgeräte in der Unterhaltungselektronik für Fernbedienungen sowie in allen erdenklichen Bereichen, wo eine Temperaturmessung nötig ist, die man mit einer Wärmebildkamera bewerkstelligen kann. [26]

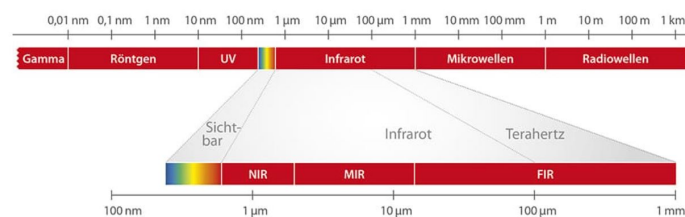


Abbildung 4.4: Infrarot-Strahlungsspektrum [27]

Infrarotsignale breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus und werden von Oberflächen reflektiert. Durch die Reflexion ist der Einsatzbereich auf eine geringe Reichweite begrenzt und somit ist die Infrarot Ortung nur auf einen Raum beschränkt. Zum einen können Infrarotsignale nicht Mauern durchdringen aber zum anderen braucht man keinen direkten Sichtkontakt zwischen Sender und Empfänger aufgrund der Reflexion. Bezieht man sich auf die sogenannte natürliche Strahlung, dann können nur grobe Lokalisierungen gemacht werden. Jedoch gibt es Verfahren, die über Wärmestrahlung, aufgrund des Einfallswinkels, der von einem Sensor gemessen wird, die Position bestimmen können. Dabei werden mehrere solcher Sensoren an Wänden montiert und dadurch eine Ortungsgenauigkeit bis zu 30 cm erzielt. Systeme, die auf hochauflösenden Infrarotsensoren basieren, können künstliche Infrarot Quellen im Millimeterbereich erfassen. [7] [25]

4.7 Radio Frequency Identification (RFID)

Beim RFID-Verfahren werden über Funkwellen die eindeutige Identitätsnummer (z. B. Seriennummer) eines Objektes oder einer Person übertragen. Dabei war das Verfahren eigentlich nicht für die Ortung vorgesehen, da es nur über geringe Distanzen senden kann. Dies beruht auch weitestgehend auf den regulatorischen Bestimmungen für das Senden sowie der Abschwächung des Signals durch verschiedene Objekte oder menschliche Körper. Für die Datenübermittlung werden ein Transponder (Tag) genutzt sowie ein Lesegeräte. Wird ein Signal in Richtung Transponder gesendet so antwortet dieser auf der gleichen Frequenz mit der Identifikationsnummer, welche vom Lesegerät wieder empfangen wird. Auf dem Tag können nicht nur Identifikationsnummern gespeichert werden, sondern auch z. B. Temperaturdaten, Luftdruck oder auch Empfangspegel. Distanzen, die mit passiven Tags (ohne Batterie) überbrückt werden können, liegen im Bereich von 8-10m. Passive Tags verwenden lediglich die Energie der Radiowellen der Lesegeräte, um zu antworten. Für größere Reichweiten braucht man aufwändige Elektronik für die Tags (Batterieverorgung), was sich auch im Preis widerspiegelt. [7] [25]

Bei der Lokalisierung müssen dementsprechend Implementierungen, Antennen sowie aktive Tags verwendet werden. Damit können Entfernungen von 5 m bis über 50 m erreicht werden. Aktive Tags senden ihr Signal immer mit derselben Leistung. Dadurch lässt sich über die Empfangsfeldstärke ein gewisser Rückschluss auf den Abstand zwischen Transponder und Empfänger zu, wobei hier auch durch die Mehrwegausbreitung die Messwerte verfälscht werden können. [7]

Eine Lokalisierung mittels RFID ist nur im Nahbereich möglich und dies auch nur mit Einsatz von mehreren Sensoren und kombinierter Verfahren wie WLAN. Im Gegensatz zu Lokalisierungstechnologien wie Wi-Fi, Bluetooth Low Energy, Beacons oder Ultrabreitband ermöglicht die RFID-Ortung aufgrund ihrer stark begrenzten Reichweite von weniger als einem Meter nur eine punktuelle Lokalisierung. Das bedeutet, dass mit RFID-Tags ausgestattete Objekte nur an bestimmten Kontrollpunkten geortet werden können, nämlich nur dort, wo RFID-Hardware installiert ist. Mögliche Anwendungen mit passiven Tags sind daher Systeme zur Zugangskontrolle, Zeiterfassung oder Bestandskontrolle in der Logistik, nicht aber die lückenlose Routenverfolgung auf größeren Flächen. Mit aktiven Tags können größere Bereiche zur Ortung aufgrund von Proximity-Algorithmen sowie Feldstärkemessungen genutzt werden. [7]

4.7.1 Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der Technologien zur Ortung ist in Tabelle 4.1 zusammengestellt.

Technologie	Genauigkeit	Messprinzip	Anwendung
UWB	cm - m	ToF/ToA	Tracking
GPS	10m	Trilateration	Navigation
BLE	< 5m	AoA	Tracking
WLAN/WI-FI	m	Fingerprinting	Fussgängernavi
CSS	1m - 2m	TDoA/TWR	Industrie (Tracking)
Infrarot	cm - m	Thermal Imaging, Active Beacons	Dedektierung
RFID	dm - m	Fingerprinting	Fussgängernavi

Tabelle 4.1: Übersicht verschiedener Technologien [7] [23]

5 Überblick über UWB-Chips

5.1 Überblick UWB-Chips

Hersteller	Chip	Standard	STS	Kanal
Apple	U1	IEEE 802.15.4z	J	5,9
Qorvo	DW1000	IEEE 802.15.4	N	1-5
Qorvo	DW3000	IEEE 802.15.4/z	J	5,9
NXP	SR040/SR150	IEEE 802.15.4z	J	5,9
NXP	NCJ 29 DS	IEEE 802.15.4/z	J	5,9
Imec	ULP IR-UWB radio	IEEE 802.15.4/z	J	5,6,8,9

Tabelle 5.1: UWB-Chip Vergleich

Die Tabelle zeigt eine Auswahl von UWB-Chips, die gegenwärtig angewendet werden. Weiters sind in der Tabelle der Standard, die Scrambled Timestamp Sequence und die Kanäle angeführt.

6 Ziel

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein Überblick über verschiedene Positionsbestimmungsmethoden und Echtzeitortungsverfahren nach dem heutigen Stand der Technik erstellt. Darauf folgend werden die unterschiedlichen UWB-Chips verglichen, die gegenwärtig auf dem Markt erhältlich sind. Aus diesen zwei Recherchegebieten sind dann Schlussfolgerungen bezüglich der Herstellung eines UWB-Systems zu treffen und die praktische Umsetzung zur Demonstration eines solchen Systems zu planen.

- Ortbarkeit in typischen örtlichen Gegebenheiten, mit der für den Anwendungsfall erforderlichen Genauigkeit
- Vergleich von zwei bis drei Demonstratoren
- Einbau in bestehende Tridonicprodukte wie Leuchtenmodule und LED Betriebsgeräte

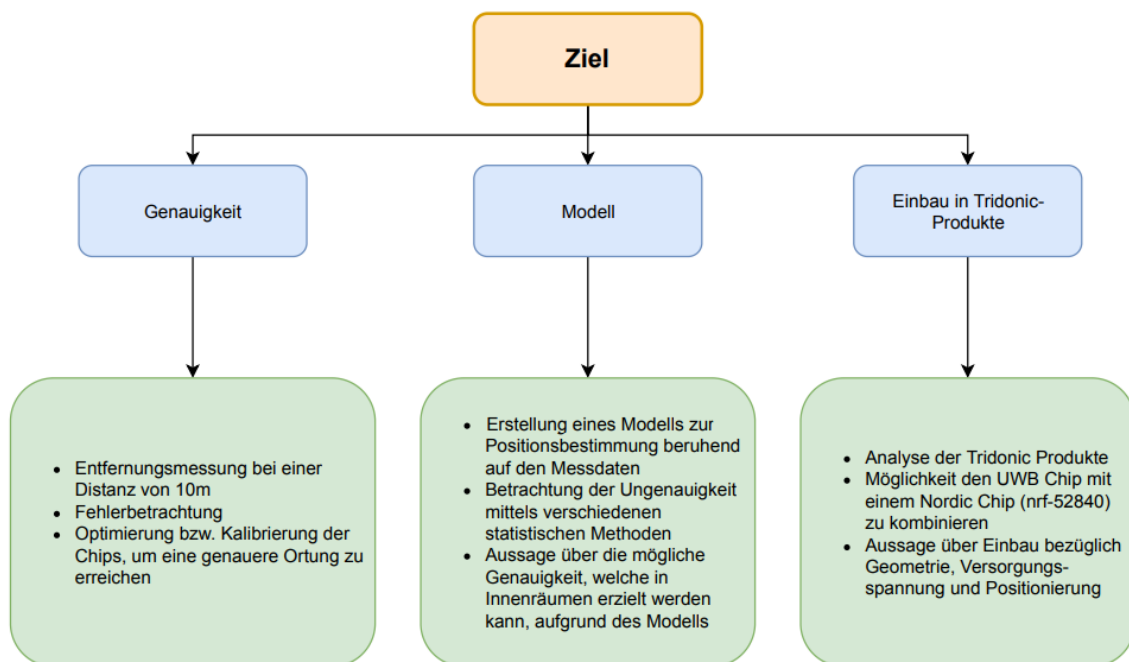


Abbildung 6.1: Übersicht Ziel

Die Abbildung 6.1 zeigt die verschiedenen Unterpunkte, die das Ziel beinhaltet. Die Betrachtung folgte nach der Genauigkeit, Modell sowie der Möglichkeit eines Einbaus in Firmen-Produkte.

7 Systemwahl

7.1 Vorgehensweise

In diesem Kapitel wird kurz die Herangehensweise bezüglich einer Demonstrator-Herstellung erläutert. Abbildung 7.1 stellt eine Blockdarstellung der Aufgabenpunkte bezüglich des Baus eines Demonstrators.

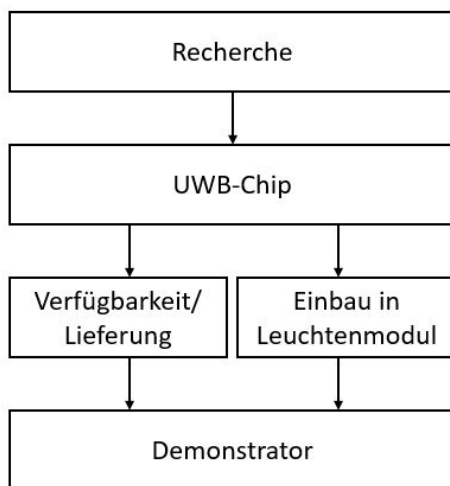


Abbildung 7.1: Vorgehensweise

Hinsichtlich der Betrachtungsweise wurden zwei Systeme gefunden, die für den Einbau in Leuchtenmodule sowie eine bestimmte Ortungsgenauigkeit aufweisen, geeignet wären. Ein weiterer Punkt war die Lieferzeit, Einbaumöglichkeit sowie die Verfügbarkeit der UWB-Chips, der durch die COVID 19 verursachte Chipshortage zum Tragen kam.

7.1.1 UWB-S1 (ESP 32 DW1000)

Das Ultra-Wideband System 1 besteht aus einem ESP 32 Board und dem UWB Chip von Decawave DW1000, welcher ein Teil des ESP Boards ist. In Abbildung 7.2 ist die mögliche Anordnung, die für die Positionsbestimmung gemacht werden kann. Hierbei werden fünf UWB-S1 verwendet. Dabei werden vier der Chips als Anchor programmiert und einer als Tag. Die Anordnung im Raum sollte so sein, dass die Anchor nicht in der selben Ebene liegen, um eine gute Positionsbestimmung zu erhalten.

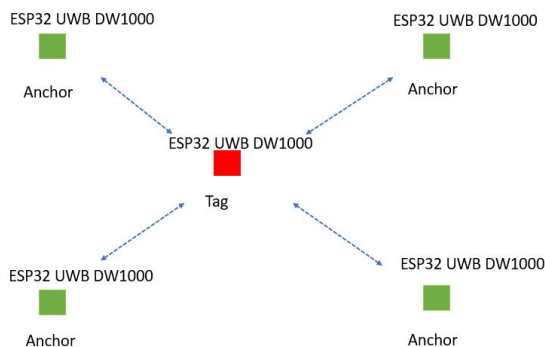


Abbildung 7.2: Anchor Positionierung

7.1.2 UWB-S2 (nRF52840/DW1000)

Das Ultra-Wideband System 2 besteht aus einem „nordic board“ nRF52840-DK und einem „qorvo shield“ mit dem UWB-Chip DW 1000. Auch hier ist für die Positionsbestimmung die Anordnung der Anchor von Bedeutung, was in Abbildung 7.3 zu sehen ist. Dabei sollten die Anchor in einer Ebene liegen.

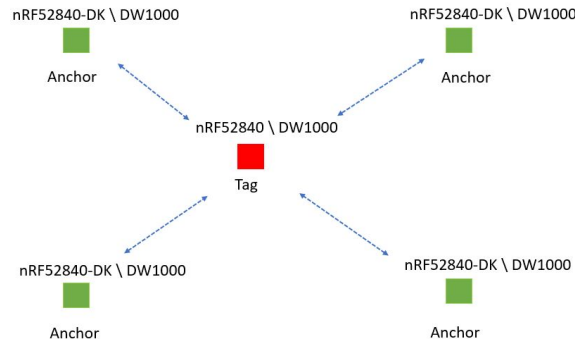


Abbildung 7.3: Anchor Positionierung

Die Programmierung beider Systeme erfolgte zum Teil über die Arduino IDE (Integrated Development Environment) und über Visual Studio Code für das nRF52840-DK Board. Weiters wurde das Echtzeitbetriebssystem Zephyr benutzt, welches für vernetzte, ressourcenbeschränkte und eingebettete Geräte verwendet wird. Zephyr enthält einen Kernel sowie alle Komponenten und Bibliotheken, Gerätetreiber, Protokollstacks, Dateisysteme und Firmware-Updates, die für die Entwicklung vollständiger Anwendungssoftware erforderlich sind.

7.2 Einbau in Leuchtenmodule und Positionierung

Die Recherche führte zur Erkenntnis, dass folgende Punkte beim Einbau zu beachten sind:

- Geometrische Abmessung und Versorgungsspannung
- Dämpfung der Funksignale (Line of Sight)
- Positionierung der Leuchtmodule mit Ankern im Raum

(siehe Abbildung 7.4)

Geometrische Abmessungen und Versorgungsspannung: Aufgrund der kleinen Bauweise der Chips sowie der Größe der Leuchtenmodule stellt eine Platzierung in Hinblick auf die geometrischen Abmessungen kein Hindernis dar. Da die Firma Tridonic nicht nur Leuchtmodule herstellt, sondern auch Wireless-Lösungen bezüglich Lichtsteuerung anbietet, die mittels nRF-Chips umgesetzt werden, kann die Versorgungsspannung über den nRF erfolgen.

Line-of-Sight/Störungen durch Dämpfung des Funksignals: Um eine gute Funktionalität zu gewährleisten, sollten Positionierungen im Raum so gewählt werden, dass möglichst Dämpfungen der Funkwellen zu vermeiden sind, da dies die Positionsinformation des Tags verfälscht. Je nach Materialbeschaffenheit und -zusammensetzung der Hindernisse ergeben sich unterschiedliche Dämpfungseigenschaften. In der Tabelle 7.1 sind einige Materialien mit der Dämpfungseigenschaft angeführt. Line-of-Sight (der gerade Weg zwischen einem Anchor und einem Tag) wäre hier (falls möglich) zu empfehlen.

Positionierung der Leuchtmodule mit Ankern im Raum: Eine wichtige Eigenschaft, die für die Positionsbestimmung zu beachten ist, ist die Anzahl der Anchor. Durch mehrere Anchor können höhere Genauigkeiten erzielt werden. Deshalb ist eine bestimmte Anzahl von Ankern je nach Anwendung und Genauigkeitsanforderung, im Raum zu positionieren. Die geometrische Verteilung der Leuchtmodule mit Ankern wäre rechteckig oder quadratisch zu bewerkstelligen.

Material	Dämpfung	Beispiele
Holz	gering	Möbel
Gips	gering	Zwischenwände ohne Metallgitter
Glas	gering	Fensterscheiben
Wasser	mittel	Mensch
Mauersteine	mittel	Wände, Decken
Beton	hoch	stahlarmierte Betonwände
Gips	hoch	Zwischenwände mit Metallgitter
Metall	sehr hoch	Brandschutztüren

Tabelle 7.1: Dämpfungseigenschaften

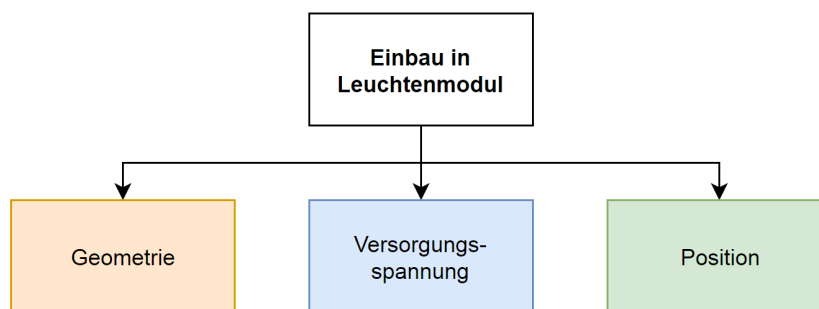


Abbildung 7.4: Übersicht Einbau

7.3 Bewertung und Konzeptauswahl

Aufgrund der verschiedenen Aspekte und Betrachtungsweisen wurden 6 Bewertungskriterien festgelegt, durchgeführt und jeweils eine Punktezahl von 0-5 Punkten vergeben. Bei fünf Punkten wurde das Kriterium als „sehr gut“ eingestuft.

Der globale Chipmangel ist hier ein wesentlicher Punkt, der zu berücksichtigen ist. Schließungen

Bewertungskriterien	UWB-S1	UWB-S2
Verfügbarkeit der Chips	2	2
Lieferzeit der Chips	2	1
Kosten	3	5
Realisierung	5	3
Zusammenspiel der Chips	5	2
Integrierbarkeit	4	5
Summe der Punkte	21	18
Prozent	70%	60%

Tabelle 7.2: Bewertungstabelle

während der COVID-19-Pandemie waren bzw. sind die Hauptursache für den weltweit temporären Chipmangel. Aufgrund dieser weltweiten Sperrungen wurden die Chip-Produktionsanlagen stillgelegt, was zur Erschöpfung der Lagerbestände führte. Somit ist die Verfügbarkeit begrenzt und die Lieferzeit entsprechend lang, was auch in die Bewertung der Konzepte einfließt.

Bezüglich der Integrierbarkeit sind beide Systeme gut in die bestehende Gebäudetechnik sowie Leuchten zu verbauen. Die Auswahl der Konzepte erfolgte anhand der Bewertung, Verfügbarkeit und der Realisierung. Aufgrund der guten Realisierung und in Anbetracht der Punkteauswertung beschloss man, beide Varianten auszuarbeiten.

8 Positionsmessung und Modell

Die Positionsbestimmung erfolgte über das Modul ESP 32 mit dem UWB Chip DW 1000. Grundsätzlich hat man die Messung so vorgenommen, dass direkte Sicht vom Anker zum Tag gegeben war (Line-of-Sight). Das ESP 32 UWB-Modul von Makerfabs funktioniert wie ein Radar, welches den Anker präzise erfasst und mit ihm kommuniziert. Die Berechnung der Distanz funktioniert über das Time-of-Flight Verfahren. Die vorgenommenen Messungen wurden einmal ohne Kalibrierung durchgeführt und einmal mit Kalibrierung der Anker.

8.1 Messaufbau

Beim Messaufbau wurden entlang der Bodenplattenfugen im Abstand von einem Meter jeweils Markierungen angebracht, was in Abbildung 8.1 schematisch dargestellt ist. Dabei wurden 30 Messungen nach jedem Meter Entfernung gemacht. Da drei bis vier Anker benötigt werden, um eine Position des Tags zu erfassen, erfolgte die Messung jeweils für jeden Anker. Die Messwerterfassung geschah über das Programm Putty mit anschließender Übertragung in eine CSV- Datei. **Messsetup:**

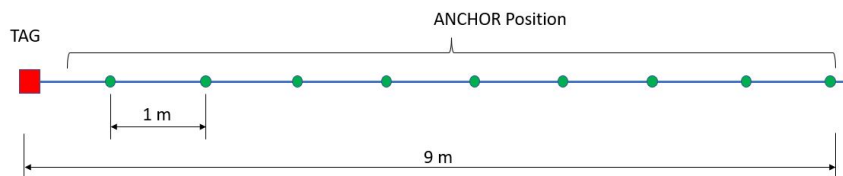


Abbildung 8.1: Messaufbau

8.2 Modell

Für die Betrachtung der Genauigkeit an verschiedenen Positionen und in Räumen unterschiedlicher Abmessung wurde ein Modell entwickelt, welches aufgrund der gemessenen Daten (im kalibrierten Zustand) eine Position des Tags errechnet. Für das Modell wurden ca. 1000 Messwerte verwendet. Grundprinzip der Modellierung ist die Trilateration, welche für Anwendungen im 3D notwendig ist. Weiters wurde noch in 2D mittels Cosinussatz ein einfaches Verfahren zur Positionsbestimmung erarbeitet. Es erfolgte jeweils die Positionsbestimmung mit drei und vier Ankern, die jeweils in den Ecken und in einer bestimmten Höhe im Raum positioniert sind. Die modellierten Werte wurden statistisch sowie mit der Gaußschen Fehlerfortpflanzung berechnet.

8.3 Berechnungsmethoden

8.3.1 Positionsbestimmung mittels Cosinussatz

Die einfachste Möglichkeit über die Entfernung des Tags die genaue Position zwischen zwei Ankern zu bestimmen, wäre der Cosinussatz. Hierbei braucht man nur ein entsprechendes Dreieck mit einer angenommenen Seite (den fixen Abstand der zwei Anchor), welches in Abbildung 8.2 zu sehen ist. Anschließend können die restlichen Seiten über die Entfernung zwischen Tag und Anchor berechnet werden.

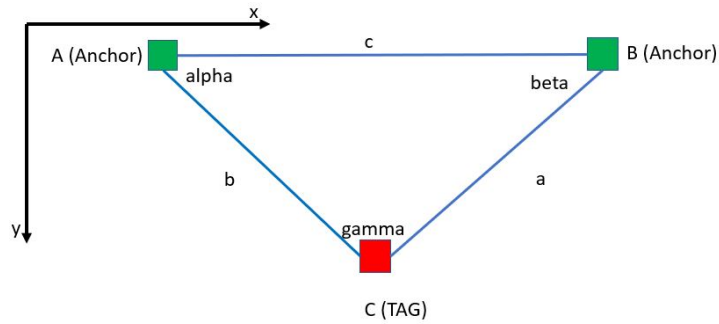


Abbildung 8.2: Cosinussatz

$$a^2 = c^2 + b^2 - 2 \cdot b \cdot c \cdot \cos(\alpha) \quad (8.1a)$$

$$\cos(\alpha) = \frac{c^2 + b^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c} \quad (8.1b)$$

$$x = b \cdot \cos(\alpha) \quad (8.1c)$$

$$y = b \cdot \sqrt{1 - \cos^2(\alpha)} \quad (8.1d)$$

Über die Umformung der Formel des Cosinussatzes kann man jeweils die x- und y- Koordinaten bestimmen und somit eine Aussage über die Position des Tags treffen, die von der Genauigkeit der verwendeten Systeme sowie der Antennen beeinflusst ist.

8.3.2 Positionsbestimmung mittels Trilateration

Die Trilateration ist ein Verfahren zur Berechnung einer Position bzw. eines bestimmten Punktes in der Ebene. Um eine Position zu bestimmen, wird eine Entfernungsmessung zu drei Punkten (Anchors) benötigt. Sind die Entfernungen bekannt, so kann man mit drei Kreisgleichungen die genaue Position des Punktes beschreiben und berechnen.

Kreisgleichungssystem 2D

$$I : (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (8.2a)$$

$$II : (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (8.2b)$$

$$III : (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (8.2c)$$

Umformung

$$2x(x_2 - x_1) + 2y(y_2 - y_1) = (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \quad (8.3a)$$

$$2x(x_3 - x_1) + 2y(y_3 - y_1) = (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \quad (8.3b)$$

Matrixdarstellung

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) \end{bmatrix} \quad (8.4)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (8.5)$$

$$b = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) \end{bmatrix} \quad (8.6)$$

$$A \cdot X = b \quad (8.7)$$

$$X = A^{-1} \cdot b \quad (8.8)$$

Kreisgleichungssystem 3D

$$I : (x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 = d_1^2 \quad (8.9a)$$

$$II : (x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 + (z - z_2)^2 = d_2^2 \quad (8.9b)$$

$$III : (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 + (z - z_3)^2 = d_3^2 \quad (8.9c)$$

$$IV : (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 + (z - z_4)^2 = d_4^2 \quad (8.9d)$$

Matrixdarstellung

$$A = \begin{bmatrix} 2(x_2 - x_1) & 2(y_2 - y_1) & 2(z_2 - z_1) \\ 2(x_3 - x_1) & 2(y_3 - y_1) & 2(z_3 - z_1) \\ 2(x_4 - x_1) & 2(y_4 - y_1) & 2(z_4 - z_1) \end{bmatrix} \quad (8.10)$$

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (8.11)$$

$$b = \begin{bmatrix} (d_1^2 - d_2^2) - (x_1^2 - x_2^2) - (y_1^2 - y_2^2) - (z_1^2 - z_2^2) \\ (d_1^2 - d_3^2) - (x_1^2 - x_3^2) - (y_1^2 - y_3^2) - (z_1^2 - z_3^2) \\ (d_1^2 - d_4^2) - (x_1^2 - x_4^2) - (y_1^2 - y_4^2) - (z_1^2 - z_4^2) \end{bmatrix} \quad (8.12)$$

Moore-Penrose Pseudoinverse: Da es hier ein überbestimmtes Gleichungssystem zu lösen gibt, muss mit einer pseudoinversen Matrix gerechnet werden. Sobald sich die Anker in der selben Ebene wie der TAG befinden, ist dies der Fall.

$$Ax = b \quad (8.13a)$$

$$A^T Ax = A^T b \quad (8.13b)$$

$$(A^T A)^{-1} A^T Ax = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (8.13c)$$

$$x = Ab \quad (8.13d)$$

$$A \text{ links} = (A^T A)^{-1} A^T \quad (8.13e)$$

$$A \text{ rechts} = A^T (AA^T)^{-1} \quad (8.13f)$$

$$\text{Python : } x = np.linalg(A, b) \quad (8.13g)$$

$$\text{Matlab : } x = lsqminnorm(A, b) \quad (8.13h)$$

8.3.3 Fehlerfortpflanzung (Gauß)

Grundsätzlich gibt es viele Messaufgaben, bei denen die Größe nicht genau messbar ist, sondern die Messwerte unterschiedlich abweichen. Dies wirkt sich auch auf die Berechnung der Position aus. Um dieses Problem in den Griff zu bekommen, wurden mittels der Fehlerfortpflanzung von Gauß die jeweiligen Fehler bezüglich einer Position im zwei- bzw. dreidim. Raum errechnet. Die Vorgehensweise ist die, dass man jeweils die Kugelgleichungen nach x,y und z ableitet und für das Δx , Δy und Δz die Standardabweichungen oder die Mittelwerte der Fehler der Messwerte einsetzt. Je nach Punkt unterscheidet sich der Fehler, da die Standardabweichungen auch unterschiedlich sind.

$$r = \sqrt{(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 + (z - z_1)^2} \quad (8.14a)$$

$$\frac{\partial r}{\partial x} = \frac{x - x_1}{\sqrt{(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2 + (y - y_1)^2}} \quad (8.14b)$$

$$\frac{\partial r}{\partial y} = \frac{y - y_1}{\sqrt{(y - y_1)^2 + (z - z_1)^2 + (x - x_1)^2}} \quad (8.14c)$$

$$\frac{\partial r}{\partial z} = \frac{z - z_1}{\sqrt{(z - z_1)^2 + (y - y_1)^2 + (x - x_1)^2}} \quad (8.14d)$$

$$\Delta r = \sqrt{\left(\frac{\partial r}{\partial x} \cdot \Delta x\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial y} \cdot \Delta y\right)^2 + \left(\frac{\partial r}{\partial z} \cdot \Delta z\right)^2} \quad (8.14e)$$

Mittelwerte und Standardabweichung für fünf unterschiedliche Punkte: Hier ist ersichtlich, dass die Fehler-Standardabweichung sowie der Fehler-Mittelwert mit der Anzahl der Anker geringer werden. Somit erhält man für den Punkt (7,2) einen Fehler von ca. 30 cm (Entfernung zu den Ankern) bei einer Raumgröße von 8.5x8m.

Berechnete Fehler-Mittelwerte mit 3 und 4 Ankern im Punkt (7,2)

Anchor	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)	s_x (m)	s_y (m)
3	0.4059	0.4229	0.4475	0.4063
4	0.2896	0.2952	0.2856	0.2362

Tabelle 8.1: Fehler im Punkt (7,2)

Berechnete Fehler-Mittelwerte mit 3 und 4 Ankern im Punkt (2,2)

Anchor	\bar{x} (m)	\bar{y} (m)	s_x (m)	s_y (m)
3	0.3343	0.2959	0.2447	0.2642
4	0.2743	0.2602	0.2034	0.1985

Tabelle 8.2: Fehler im Punkt (2,2)

Berechnete Fehler-Mittelwerte mit 3 und 4 Ankern im Punkt (2,6)

Anchor	$\bar{x}(\text{m})$	$\bar{y}(\text{m})$	$s_x(\text{m})$	$s_y(\text{m})$
3	0.1928	0.0332	0.1444	0.0273
4	0.1697	0.1370	0.1074	0.0935

Tabelle 8.3: Fehler im Punkt (2,6)

Berechnete Fehler-Mittelwerte mit 3 und 4 Ankern im Punkt (3,7)

Anchor	$\bar{x}(\text{m})$	$\bar{y}(\text{m})$	$s_x(\text{m})$	$s_y(\text{m})$
3	0.2186	0.0573	0.1081	0.0367
4	0.1415	0.0711	0.0916	0.0549

Tabelle 8.4: Fehler im Punkt (3,7)

Berechnete Fehler-Mittelwerte mit 3 und 4 Ankern im Punkt (4,4)

Anchor	$\bar{x}(\text{m})$	$\bar{y}(\text{m})$	$s_x(\text{m})$	$s_y(\text{m})$
3	0.2221	0.3447	0.1327	0.2738
4	0.2031	0.2519	0.1490	0.1831

Tabelle 8.5: Fehler im Punkt (4,4)

Zusammenfassung der Fehler

Punkt (3,7)	r = 6cm
Punkt (2,6)	r = 10cm
Punkt (4,4)	r = 17cm
Punkt (2,2)	r = 20cm
Punkt (7,2)	r = 29cm

8.3.4 Fehlerberechnung mittels Kovarianzmatrix

Mit dieser Methode können die Abweichungen bezüglich den x,y und z Koordinaten berechnet werden.

$$Ax = b \tag{8.15a}$$

$$A^T Ax = A^T b \tag{8.15b}$$

$$(A^T A)^{-1} A^T Ax = (A^T A)^{-1} A^T b \tag{8.15c}$$

$$x = Ab \tag{8.15d}$$

$$Q = A^T A \tag{8.15e}$$

Berechnung der Kovarianzmatrix mittels Pseudoinverse

$$COV = pinv(Q)...(Matlab) \tag{8.16a}$$

Standardabweichungsfehler für die Hilfsgröße d

$$s_{dx}(d_1^2 - d_2^2) = 2 \cdot |(d_1 \cdot s_f + d_2 \cdot s_f)| \tag{8.17a}$$

$$s_{dy}(d_1^2 - d_3^2) = 2 \cdot |(d_1 \cdot s_f + d_3 \cdot s_f)| \tag{8.17b}$$

$$s_{dz}(d_1^2 - d_4^2) = 2 \cdot |(d_1 \cdot s_f + d_4 \cdot s_f)| \tag{8.17c}$$

Standardabweichungsfehler für x,y und z

$$s_{fx} = \sqrt{COV_{11}} \cdot s_{dx} \tag{8.18a}$$

$$s_{fy} = \sqrt{COV_{22}} \cdot s_{dy} \tag{8.18b}$$

$$s_{fz} = \sqrt{COV_{33}} \cdot s_{dz} \tag{8.18c}$$

Variablen:

COV	Kovarianzmatrix
d	Entfernung zw. Tag und Anchor
s _f	Standardabw. aller Messwertfehler
s _{fx,y,z}	Standardab.-Fehler für x,y,z
s _{dx,dy,dz}	Standardab.-Fehler der Hilfsgröße d

Kovarianz-Fehler-Ellipse

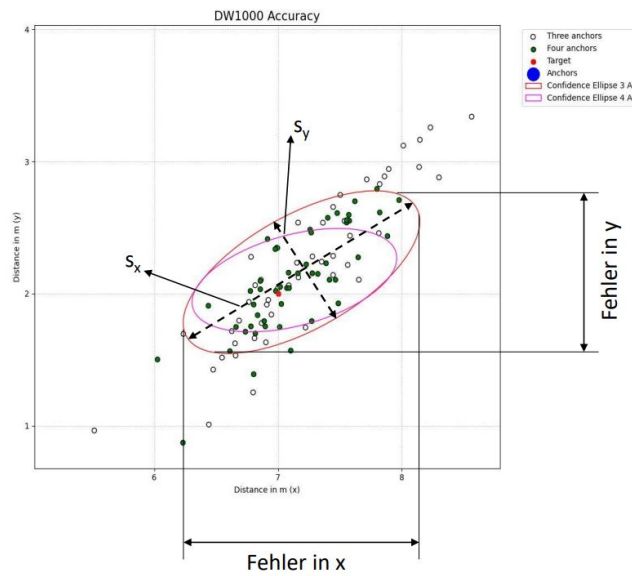


Abbildung 8.3: Kovarianz-Fehler-Ellipse

a) Ellipsen Gleichungen

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (8.19a)$$

$$\frac{x^2}{s_x^2} + \frac{y^2}{s_y^2} = k \dots (5.996) \quad (8.19b)$$

$$(8.19c)$$

b) Hauptachse und Nebenachse

$$2a = 2 \cdot s_x \cdot \sqrt{5.991 \cdot \lambda_1} \quad (8.20a)$$

$$2b = 2 \cdot s_y \cdot \sqrt{5.991 \cdot \lambda_2} \quad (8.20b)$$

c) Eigenvektor und Eigenwert

$$Ax = \lambda x \quad (8.21a)$$

$$(A - \lambda E) \cdot x = 0 \quad (8.21b)$$

d) Ausrichtungswinkel der Ellipse

$$\alpha = \arctan \frac{V(y)}{V(x)} \quad (8.22a)$$

Variablen:

a	Hauptachse
b	Nebenachse
s_x	Standardabweichung x
s_y	Standardabweichung y
$V(x)$	Vektorwert x
$V(y)$	Vektorwert y
λ_1	Eigenwert 1
λ_2	Eigenwert 2

Im Punkt a) in den Gleichungen 8.19a und 8.19b ist eine achsenausgerichtete Ellipse mit einer Hauptachse der Länge $2a$ und einer Nebenachse der Länge $2b$, die im Ursprung zentriert ist, beschrieben. In diesem Fall sind jeweils a und b die Standardabweichungen. Wobei k den Maßstab der Ellipse definiert und eine beliebige Zahl sein kann (z. B. $k=1$). Die 2D-Daten sind alle Normalverteilt. Das bedeutet, dass sowohl die x -Werte als auch die y -Werte ebenfalls normalverteilt sind. In weiterer Folge stellt die linke Seite von Gleichung 8.19a eigentlich die Summe der Quadrate unabhängiger normalverteilter Datenproben dar. Die Summe der quadrierten Gaußschen Datenpunkte ist nach der sogenannten Chi-Quadrat-Verteilung verteilt. Eine Chi-Quadrat-Verteilung wird in Form von Freiheitsgraden definiert, welche die Anzahl der Unbekannten darstellen. Hier wären es zwei Freiheitsgrade. Zu Beispiel Zwecken wurden ein Konfidenzintervall von 95% gewählt, welches einem k Wert (Chi Verteilungstabelle, zwei Freiheitsgrade) von 5.996 entspricht. Hierbei liegen 95% der Werte innerhalb der Ellipse. Somit ergeben sich die Gleichungen 8.20a und 8.20b aus Punkt b) mit Eigenwerten λ_1 und λ_2 , aus denen die Hauptachsenlänge sowie Nebenachsenlänge der Ellipse berechnet werden können.

Um eine beliebige Ausrichtung der Ellipse zu bekommen, müssen die Varianzen zur Haupt- und Nebenachse der Ellipse berechnet werden. Diese sind in der Kovarianzmatrix definiert und beschreiben die Richtung, in welcher die Daten am stärksten streuen. Hier spricht man von den Eigenvektoren der Kovarianzmatrix sowie den Eigenwerten. Im Punkt c) sind die Gleichungen 8.21a und 8.21b mit denen die Eigenwerte berechnet werden können sowie die Eigenvektoren, über welche man die Richtung der Datenausprägung bekommt. Um die Ausrichtung der Ellipse zu ermitteln, muss der Winkel des größten Eigenvektors zur x -Achse berechnet werden. Dies erfolgt im Punkt d) durch Gleichung 8.22a.[28]

8.4 Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse in Form von Diagrammen dargestellt und verglichen. Die Messdaten werden sowohl im nicht- kalibrierten als auch im kalibrierten Zustand abgebildet. Weiters ist in Abbildung 8.3 die Messung bei einer Distanz von einem Meter zwischen Anchor, welcher mit einem Akku verbunden ist, und dem Tag, welcher mit dem Laptop verbunden ist, gezeigt.



Abbildung 8.4: Entfernungsmessung

8.4.1 Automatische Antennen Kalibrierung

Das ESP32 UWB DW1000-Modul wurde mit einem bestehenden Programm über die Arduino IDE kalibriert. Das Programm ist für die Verwendung eines festen Ankerpunktes vorgesehen. Es verwendet die binäre Suche, um die Verzögerung der Ankerantenne zu finden und sie gegen eine bekannte Entfernung zu kalibrieren. Das entfernte Tag (am Ursprung) muss mit der Standard-Antennenverzögerung eingerichtet werden (Bibliotheksstandard = 16384). In Abbildung 8.4 ist der Kalibrierungsvorgang mittels Blockdiagramm dargestellt.

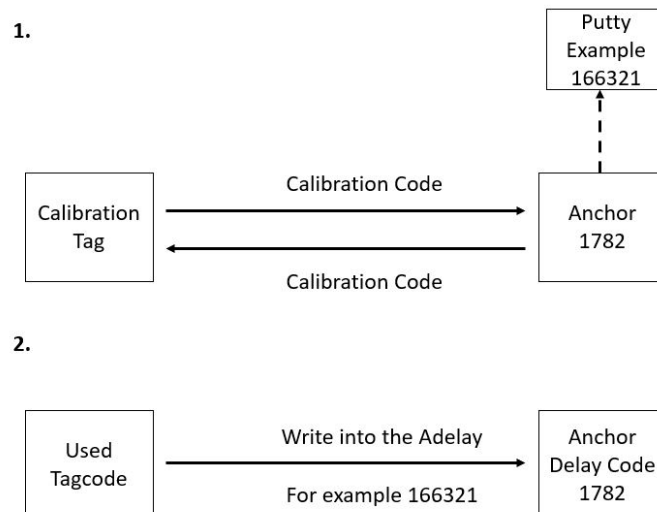


Abbildung 8.5: Kalibrierung

8.4.2 Auswertung ohne Kalibrierung

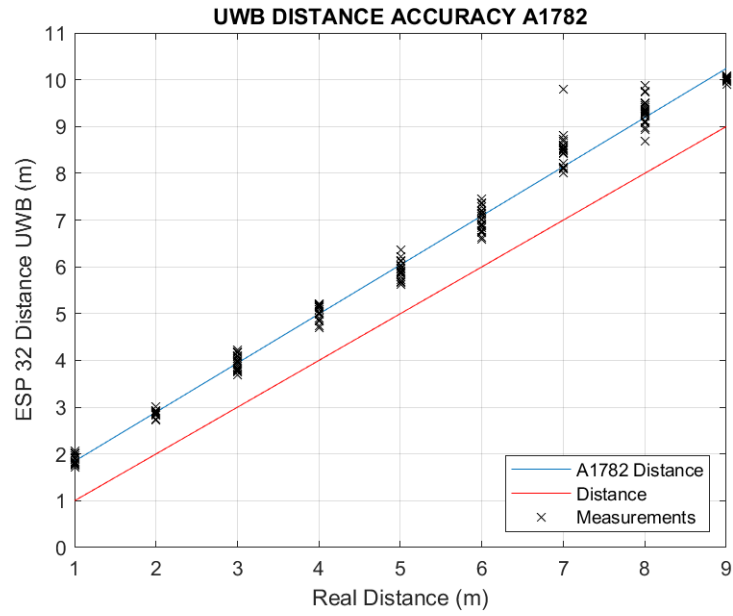


Abbildung 8.6: Entfernungsmessung A1782

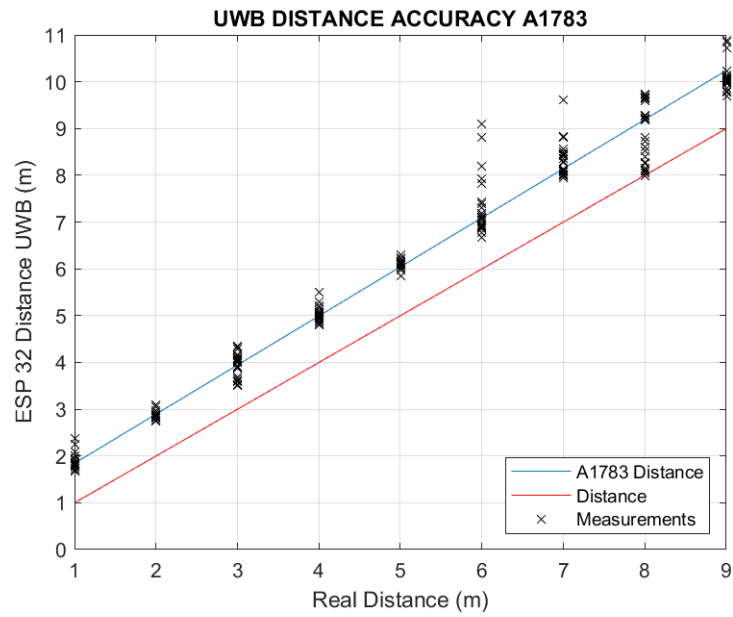


Abbildung 8.7: Entfernungsmessung A1783

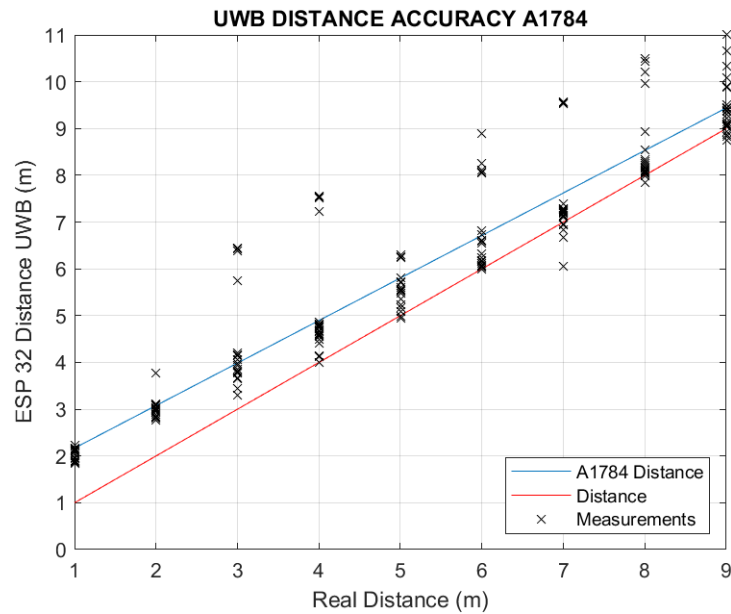


Abbildung 8.8: Entfernungsmessung A1784

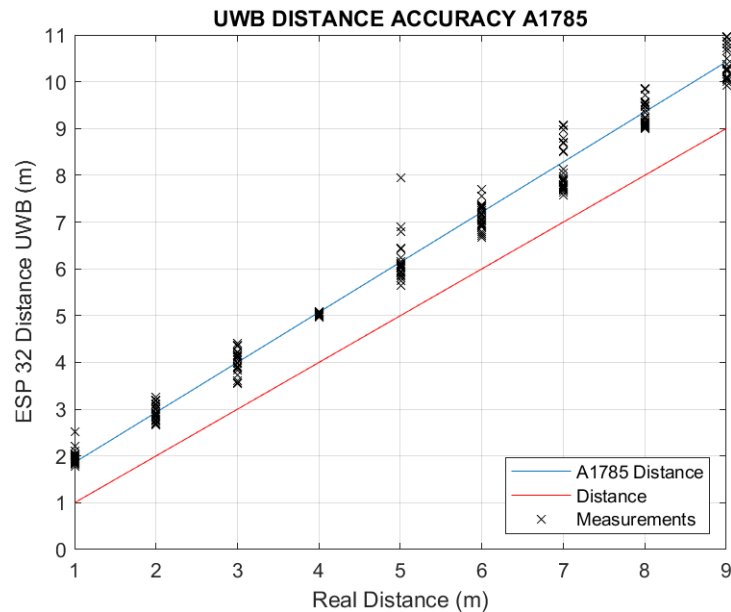


Abbildung 8.9: Entfernungsmessung A1785

In den Abbildungen 8.6 bis 8.9 ist jeweils auf der x-Achse die reale Distanz aufgetragen und auf der y-Achse die gemessene Distanz. Pro Meter wurden jeweils 30 Messungen durchgeführt (Measurements). Die Namensgebung der Anker erfolgte über die Chip-ID (1782-1785), um jeweils die Messungen zuzuordnen. Aus den verschiedenen Messungen wurde mittels Matlab eine Ausgleichsgerade (A1782 Distance-A1785 Distance) erstellt und diese mit der Abstandsgeraden (Distance) verglichen. Deutlich ersichtlich ist, dass fast jeder Anker einen Fehler von einem Meter und mehr liefert. Dieser Fehler wirkt sich stark auf die Positionsbestimmung mittels mehrerer Anker aus und liefert sehr fehlerhafte Ergebnisse. Diesbezüglich wurde eine Antennen-Kalibrierung des UWB-Chips vorgenommen, um den Fehler zu vermindern und ein besseres Ergebnis zu bekommen. Die schlechtesten Ergebnisse lieferte der A 1785 mit einem Fehler bis zu 1.5 m. Ergänzend sind noch im Anhang die Fehlerbalkendiagramme in welchen noch die Ausreißer und Mediane gesehen werden können.

8.4.3 Auswertung mit Kalibrierung

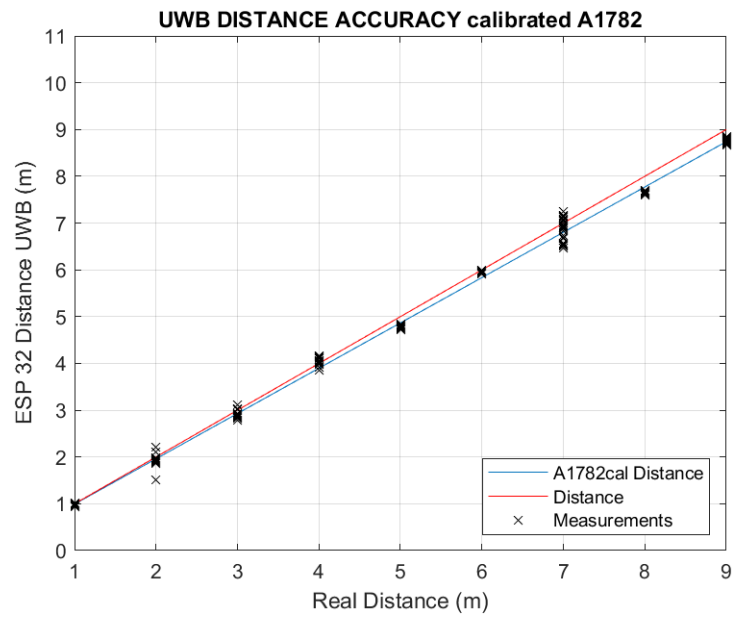


Abbildung 8.10: Entfernungsmessung A 1782

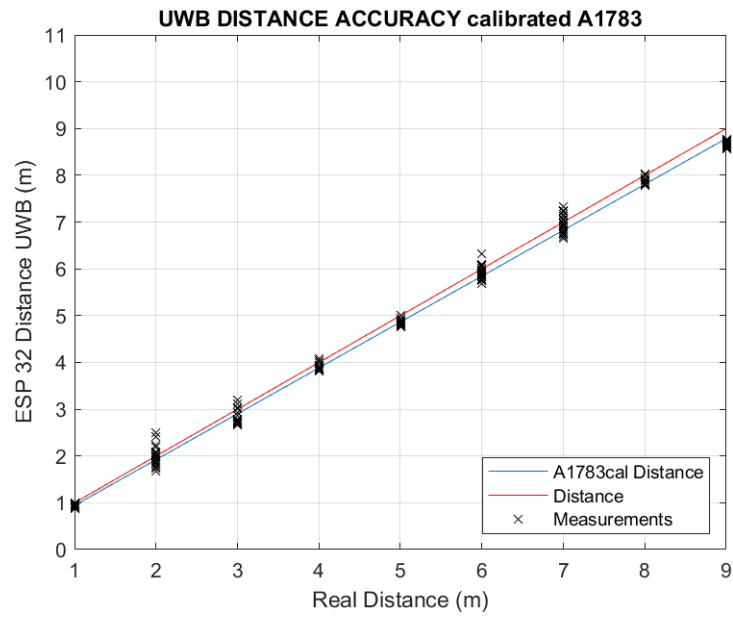


Abbildung 8.11: Entfernungsmessung A 1783

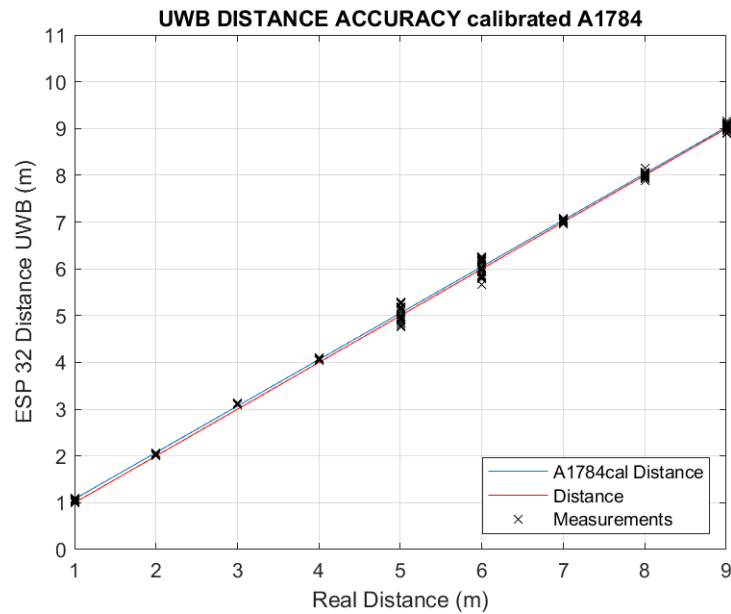


Abbildung 8.12: Entfernungsmessung A 1784

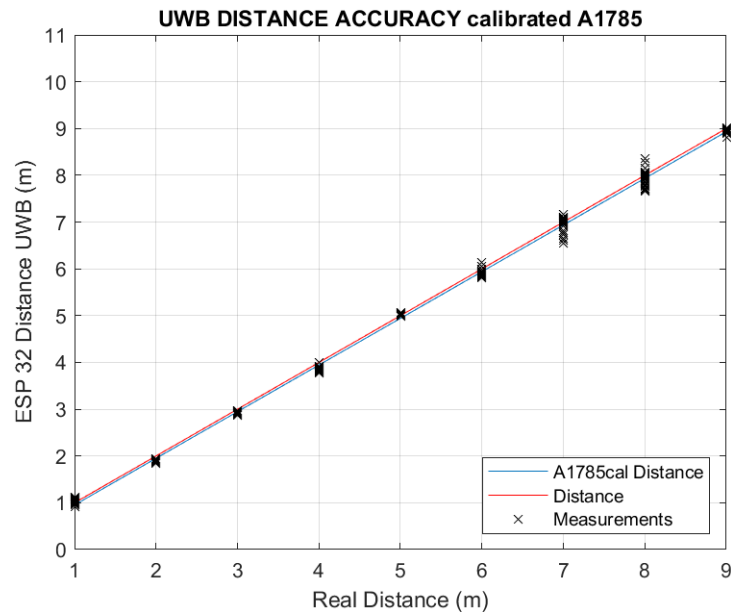


Abbildung 8.13: Entfernungsmessung A 1785

In den Abbildungen 8.10 bis 8.13 ist jeweils auf der x-Achse die reale Distanz aufgetragen und auf der y-Achse die gemessene Distanz. Pro Meter wurden jeweils 30 Messungen durchgeführt (Measurements). Die Namensgebung der Anker erfolgte über die Nummerierung (1782-1785), um jeweils die Messungen zuzuordnen. Aus den verschiedenen Messungen wurde mittels Matlab eine Ausgleichsgerade (A1782cal Distance-A1785cal Distance) erstellt und diese mit der Abstandsgeraden (Distance) verglichen. Deutlich ersichtlich ist, dass der Fehler der Anker durch die Kalibrierung der Antenne geringer ist als zuvor. Ohne Kalibrierung war der Fehler bei einem Meter und mehr. Dieser Fehler wirkt sich stark auf die Positionsbestimmung aus. Durch die Kalibrierung wurde der Fehler geringer. Bezugnehmend auf die Messungen ist auch erkennbar, dass der Anker A 1784 sowie der Anker A 1785 relativ wenig von der realen Distanz abweichen.

Zusammenfassung aller Distanzmessungen

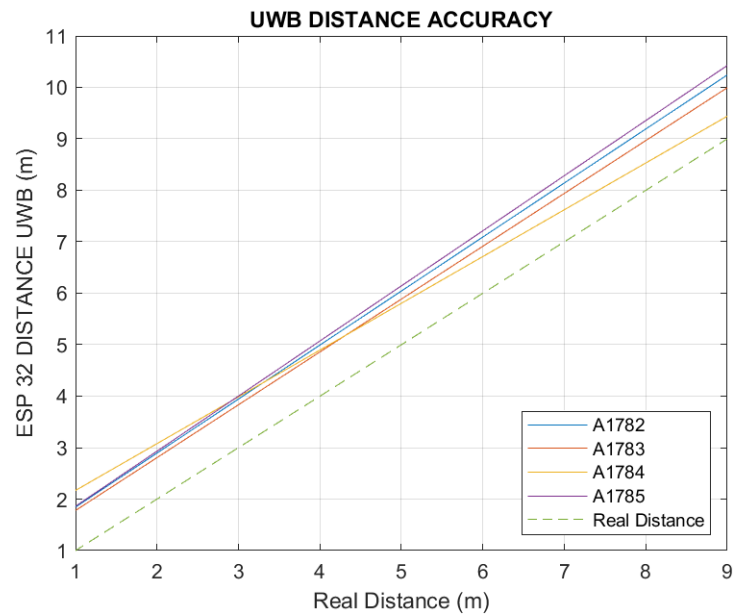


Abbildung 8.14: Zusammenfassung der Messungen (nicht kalibriert)

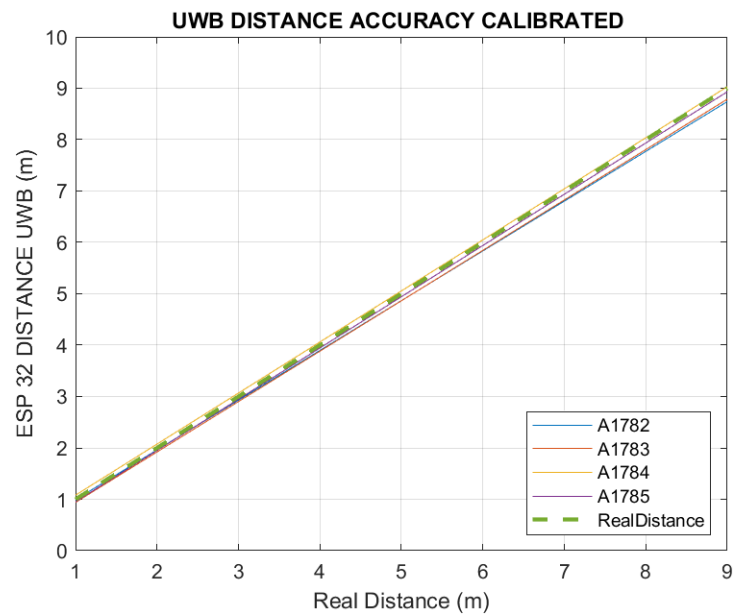


Abbildung 8.15: Zusammenfassung der Messungen (kalibriert)

In Abbildung 8.14 und 8.15 ist noch ein Überblick über die gesamten Messungen mit und ohne Kalibrierung. Zusammenfassend kann man sagen, dass die Kalibrierung eine Verbesserung der Positionsbestimmung mit sich bringt. Wichtig zu erwähnen ist, dass das gemessene Signal nicht irgendwie gedämpft oder durch andere Störungen verfälscht worden war. Grundlegend auch die Line of Sight was auch die guten Ergebnisse nach der Kalibrierung widerspiegelt.

8.5 Modellergebnisse

8.5.1 2D Modell

Der Aufbau des 2D-Modells besteht aus drei bis vier Anker, die jeweils blau in den Abbildungen 8.28 bis 8.30 zu sehen sind. Die Anker wurden so positioniert, dass sie jeweils in den Ecken des Koordinatensystems liegen. Dies ermöglicht eine Positionsbestimmung in der Ebene, die auch in der Realität so vorgenommen werden kann. Das Berechnungsverfahren, welches zur Lokalisierung eingesetzt wurde ist die Lateration oder die Trilateration. Siehe Abbildung 8.16. Der Schnittpunkt der Kreise beschreibt die Position des Targets.

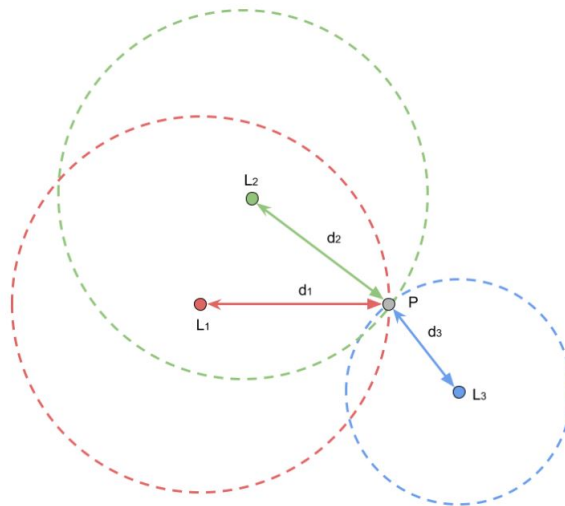


Abbildung 8.16: Trilateration [29]

Die Abmessungen von 8x8.5 m wurden verwendet, die z. B. einen Vorlesungsraum entsprechen. Das Target ist jeweils mit einem roten Punkt markiert. Die grünen und weißen Punkte sind jene Positionen, die durch das Modell zufällig berechnet worden sind und denen die Messungen, die über den Chip DW1000 bewerkstelligt worden sind, zu Grunde liegen. Da der selbe Chip in beiden Systemen verbaut ist, reicht die Distanzmessung des DW1000 für das Modell. Die grünen Punkte wurden jeweils mit vier Anker berechnet und die weißen mit drei. Es wurden 50 Positionsbestimmungspunkte, welche normalverteilt sind und im Intervall von \pm Sigma berechnet. D. h. , dass 68 % aller Messwerte in diesem Intervall zu finden sind.

In den Abbildungen 8.17-8.26 ist erkennbar, dass die grünen Punkte näher aneinander liegen als die weißen Punkte. Dies bezieht sich auf die Positionsbestimmung mit mehr als drei Anker. Die Positionsbestimmung mit vier Anker ist wesentlich genauer als mit drei und weist auch weniger Streuung auf. Somit kann die Aussage getroffen werden, dass die Anzahl der Anker von Wichtigkeit, für die Positionsbestimmung, ist. Dies sieht man auch an den Konfidenz Ellipsen, die bei einer Anzahl von vier Anker kleiner sind als bei der Positionsermittlung mit drei Anker.

Modell für Punkt (7,2)

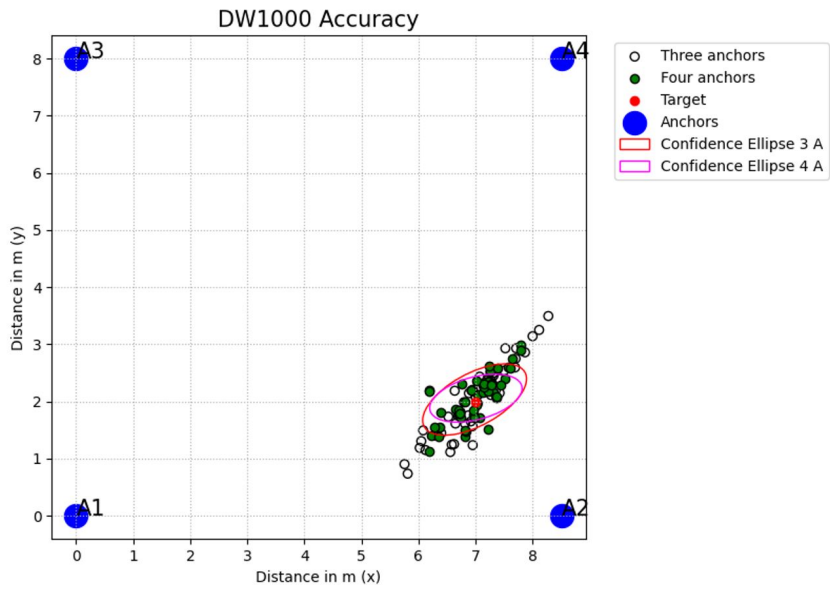


Abbildung 8.17: Modell Positionsbestimmung Punkt (7,2)

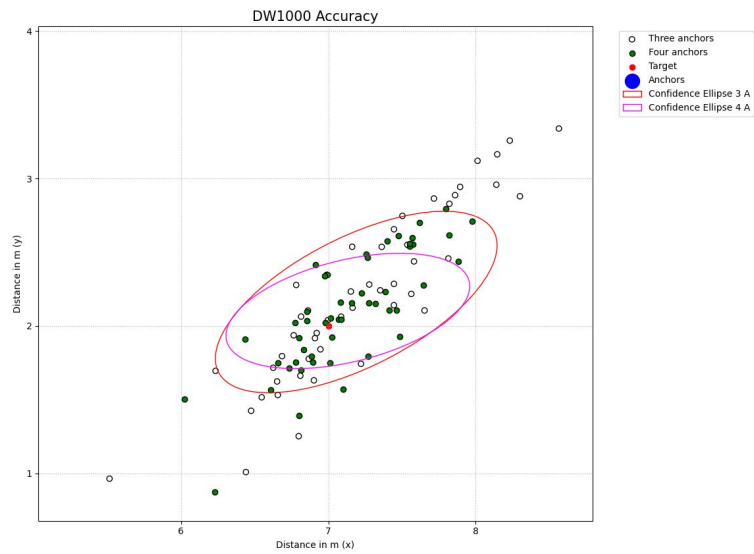


Abbildung 8.18: Modell Positionsbestimmung Punkt (7,2), (Zoom)

Modell für Punkt (2,2)

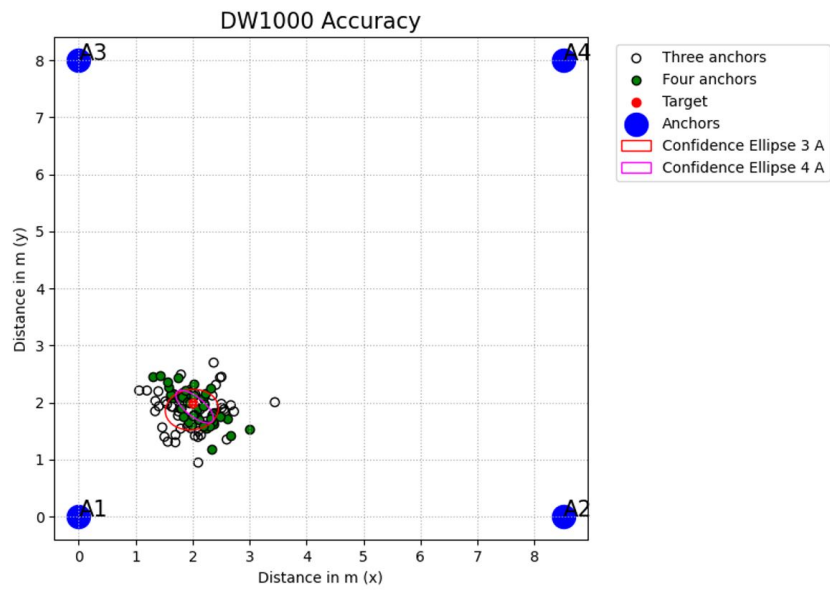


Abbildung 8.19: Modell Positionsbestimmung Punkt (2,2)

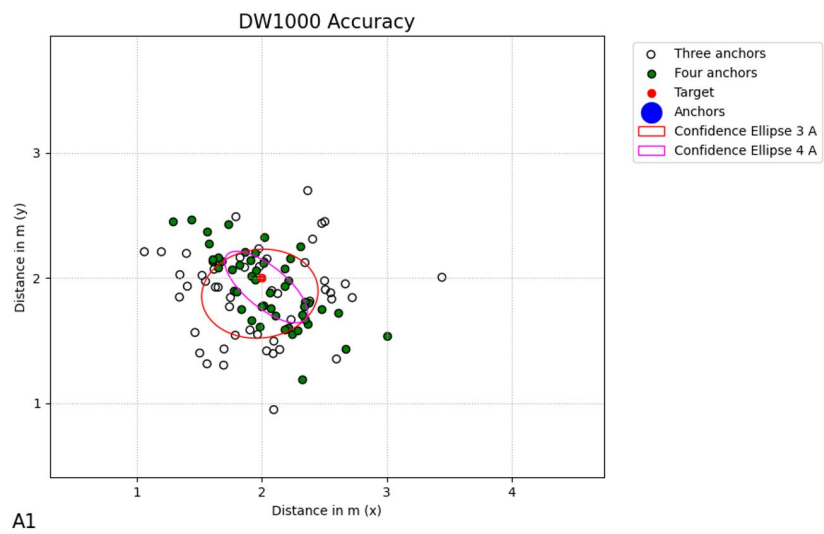


Abbildung 8.20: Modell Positionsbestimmung Punkt (2,2), (Zoom)

Modell für Punkt (4,4)

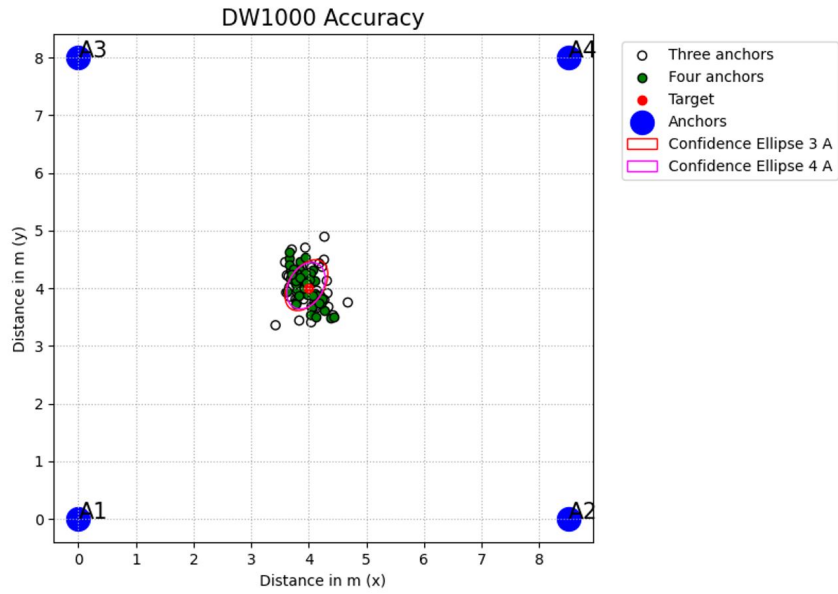


Abbildung 8.21: Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4)

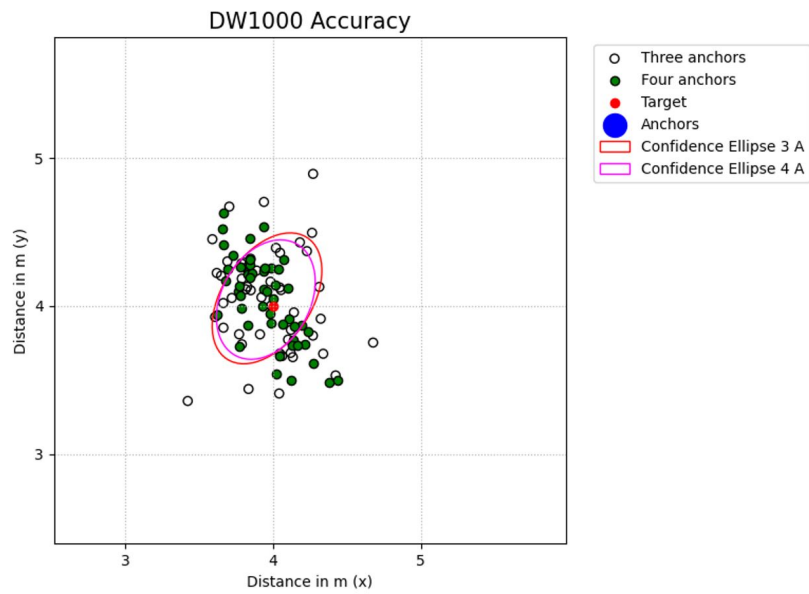


Abbildung 8.22: Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4), (Zoom)

Modell für Punkt (2,6)

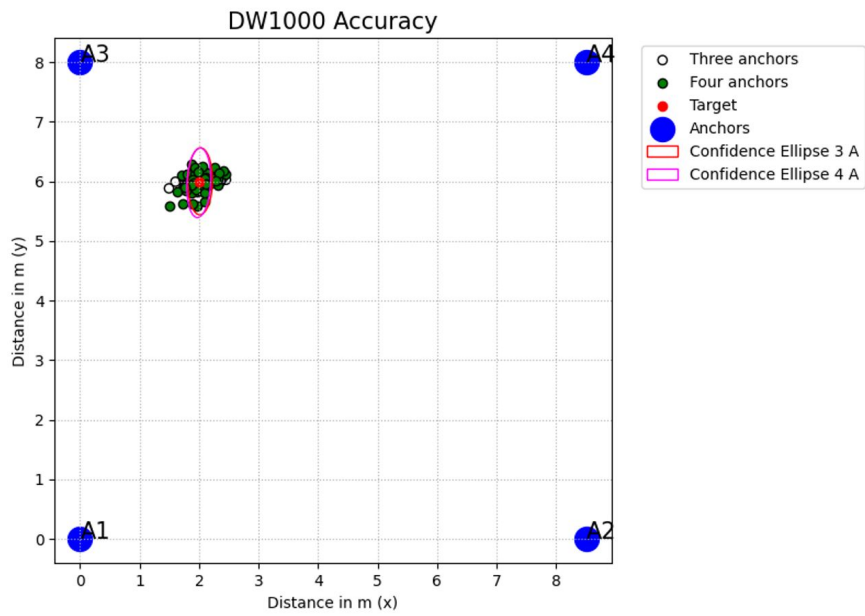


Abbildung 8.23: Modell Positionsbestimmung Punkt (2,6)

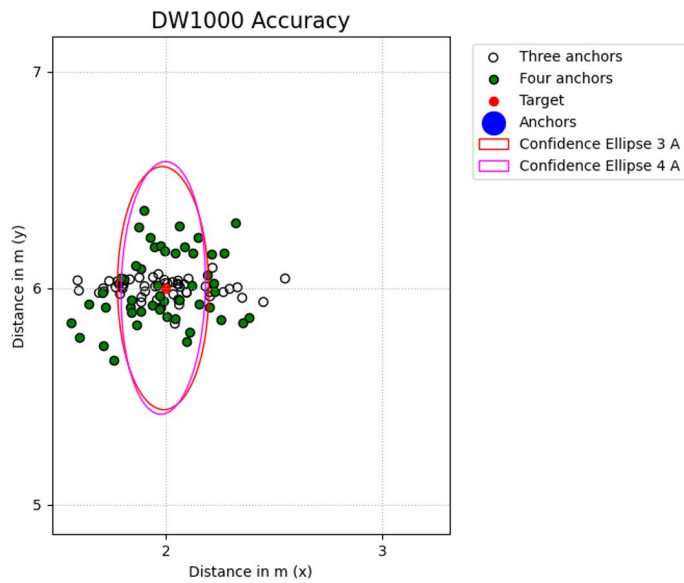


Abbildung 8.24: Modell Positionsbestimmung Punkt (2,6), (Zoom)

Modell für Punkt (3,7)

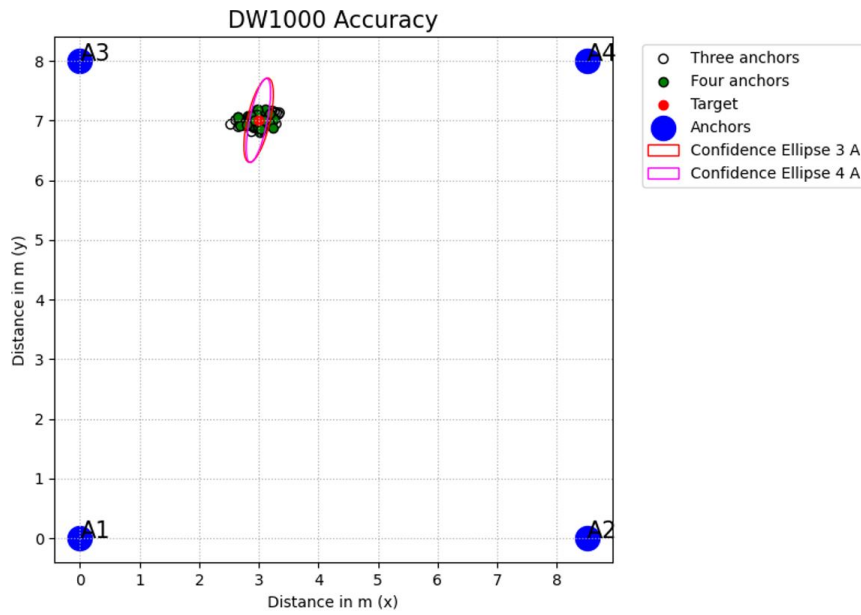


Abbildung 8.25: Modell Positionsbestimmung Punkt (3,7)

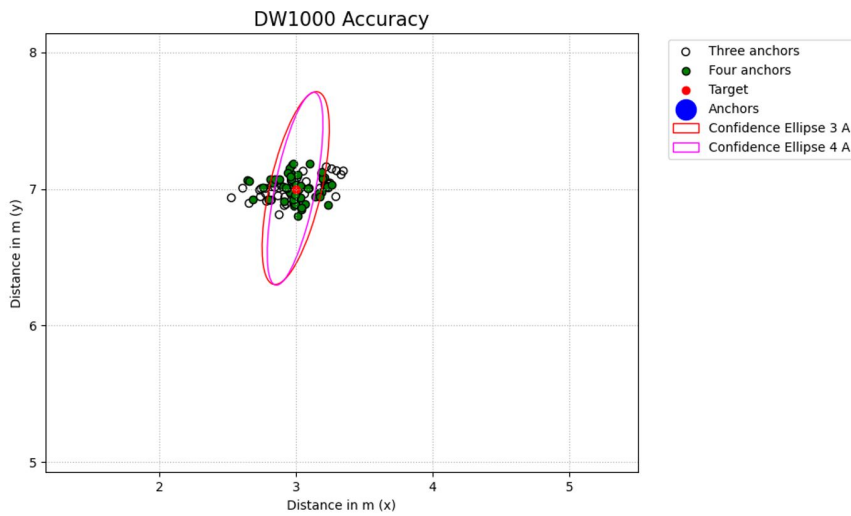


Abbildung 8.26: Modell Positionsbestimmung Punkt (3,7), (Zoom)

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse des 2D-Modells als auch der Messungen und Versuche kann eine Empfehlung für den Einsatzbereich ausgegeben werden. Dabei sind jedoch einige Bedingungen einzuhalten. Die verschiedenen Modelle und Messungen machten deutlich, was für ein Potenzial der Chip besitzt. Während der Bearbeitung der Arbeit wurden nicht alle Aspekte des DW1000 Chips im Detail beleuchtet, da einige Dinge erst im Laufe der Bearbeitung entdeckt wurden. Der DW1000 Chip eignet sich gut für die Distanzmessung bezüglich Line-of-Sight. Jedoch durch die verschiedenen Dämpfeigenschaften in Räumen wie z. B. Menschen, Türen, Maschinen sowie anderer Elektronik oder auch Maschinen werden die Ortungseigenschaften geschwächt. Wie schon erwähnt ist die Anzahl der Anker dahingehend wichtig, da sie direkten Einfluss auf die Ortung hat. Mehrere Anker verbessern die Positionsbestimmung.

8.5.2 3D Modell

Wie im 2D-Modell sind die Anker mit blau markiert. Die graue Ebene, die man im Diagramm sieht, ist jene Ebene, die am besten durch die vier Ankerpunkte berechnet werden kann. Mit rot ist wieder das Target gekennzeichnet und die grünen Kreuzchen, sind die Positionen, die mittels vier Ankern bestimmt wurden. Die Datensätze beruhen wie im Punkte 8.5.1 auf den Distanzmessung des DW1000.

3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (5,5,1.5)

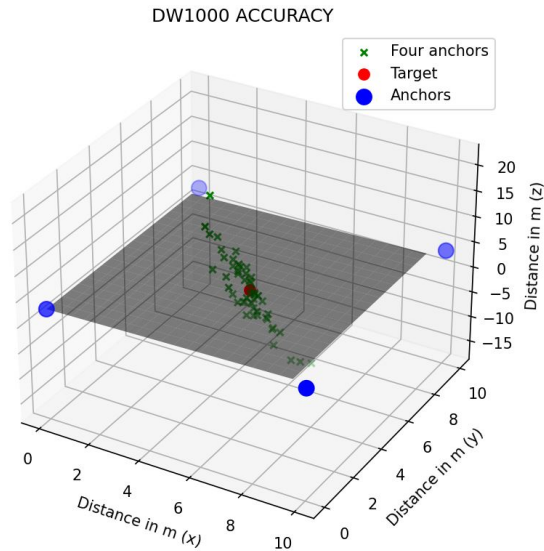


Abbildung 8.27: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (5,5,1.5)

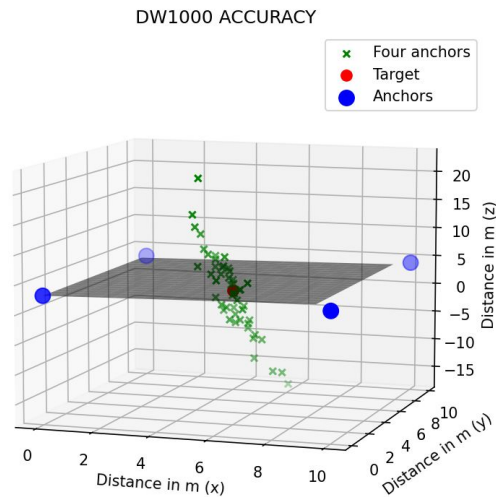


Abbildung 8.28: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (5,5,1.5), Seitenanblick

3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4,1)

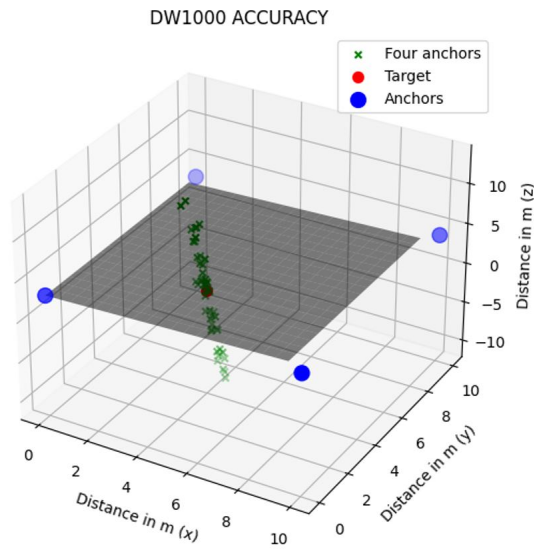


Abbildung 8.29: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4,1)

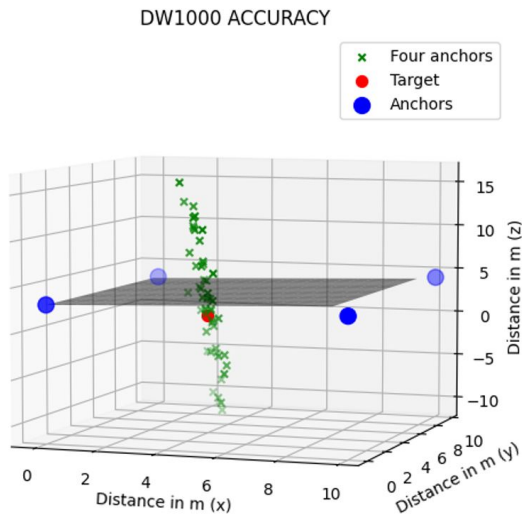


Abbildung 8.30: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (4,4,1), Seitenanblick

3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (6,5,3)

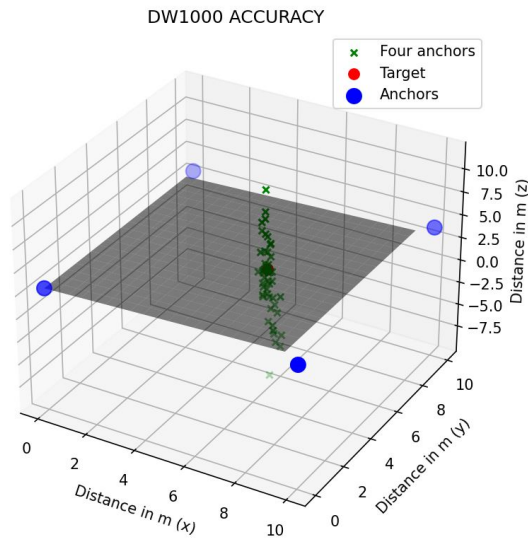


Abbildung 8.31: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (6,5,3)

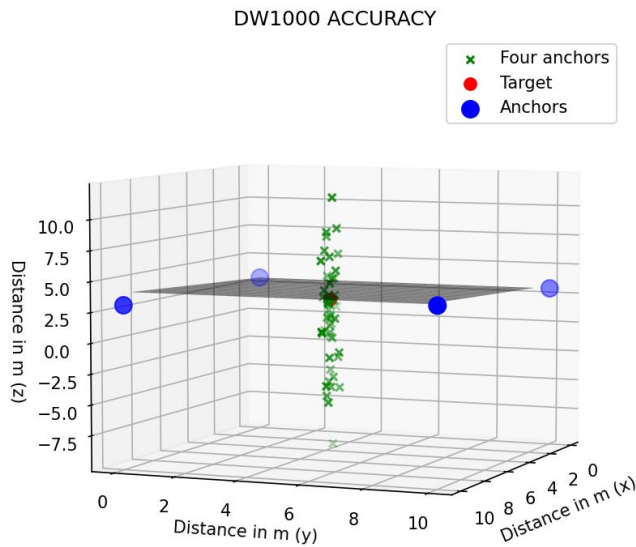


Abbildung 8.32: 3D-Modell Positionsbestimmung Punkt (6,5,3), Seitenanblick

In den Abbildungen 8.27-8.32 sind jeweils die Positionsbestimmung mit den grünen Kreuzchen ersichtlich. Die graue Ebene wurde zur Orientierung im Raum abgebildet. Hierbei wird zwischen den vier Ankern die best mögliche Ebene aufgespannt.

Bei der Bearbeitung der Positionsermittlung im Raum hat sich herausgestellt, dass die Ankerpositionen nicht in einer Ebene sein dürfen, da somit keine Wertigkeit für die z Richtung bzw. die Positionbestimmung in der z-Achse nicht funktioniert, was auch in den Formeln ...ersichtlich ist. Somit wurde ein Anker immer mit unterschiedlichem z-Wert bestimmt.

In diesem 3D-Modell kann weiters gezeigt werden, dass eine Streuung bezüglich z-Achse sich ergibt. Dies hat den Grund, dass im realen Fall nicht eine eindeutige Lösung durch die Trilateration

berechnet wird, sondern ein ganzer Lösungsraum. Im 3D ergibt sich somit ein sogenannter Fehler-
raum, welcher als Positionsfehleraum bezeichnet wird. Wie gut oder schlecht die Präzision in so
einem Fall ist, wird durch den Dilution of Precision Faktor bestimmt. Dieser gibt an, wie sich die
Präzision eines Ortungssystem aufgrund der geometrischen Beschaffenheiten ändert. Je nachdem
wie ungünstig die Anker positioniert werden, kann sich dieser Einfluss erheblich auf die Genauig-
keit des Ergebnisses auswirken. Man unterscheidet hier folgende Werte, über die man eine Aussage
bezüglich Präzision treffen kann:

- PDOP (engl.: Position Dilution of Precision): Verringerung der Positionsgenauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der benutzerbezogenen dreidimensionalen Positionsbestimmung an.
- HDOP (engl.: Horizontal Dilution of Precision): Horizontale Abschwächung der Genauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der Positionsbestimmung in der horizontalen Ebene an
- VDOP (engl.: Vertical Dilution of Precision): Vertikale Verringerung der Genauigkeit. Gibt den Ungenauigkeitsfaktor der Positionsbestimmung für die Höhe an.

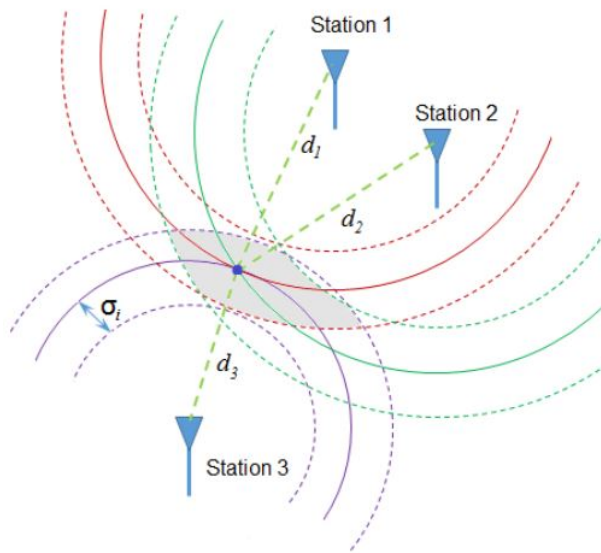


Abbildung 8.33: Dilution of Precision [23]

DOP	Note	Leistungsbeschreibung
1	Sehr gut	Genügt höchsten Ansprüchen
2-3	Gut	Für alle Anforderungen hinreichend
4-6	Befriedigend	Gut für Allgemeine Anforderungen
7-8	Ausreichend	Akzeptabler Wert für viele Anwendun- gen
9-20	Mangelhaft	Wert für Grobschätzung tauglich
>20	Ungenügend	Messungen sollten nicht benutzt werden

Tabelle 8.6: Einordnung der DOP Wert [23]

Abbildung 8.33 zeigt z. B. so einen Unsicherheitsbereich und in der Tabelle 8.6 sieht man jeweils die Bedeutung der der DOP Werte.

Berechnung der DOP-Werte

$$A_f = \begin{bmatrix} \frac{x-x_1}{d_1} & \frac{y-y_1}{d_1} & \frac{z-z_1}{d_1} \\ \frac{x-x_2}{d_2} & \frac{y-y_2}{d_2} & \frac{z-z_2}{d_2} \\ \frac{x-x_3}{d_3} & \frac{y-y_3}{d_3} & \frac{z-z_3}{d_3} \end{bmatrix} \quad (8.23)$$

In der Matrix A_f in 8.23 sind jeweils d_1 bis d_3 die gemessenen Abstände und x_{123} sowie y_{123} und z_{123} die tatsächlichen Koordinaten des Targets. Aufgrund dieser Matrix kann die Varianz der Position des Empfängers berechnet werden. Mit $Q = (A_f^T A_f)^{-1}$ kann die Varianz der Matrix berechnet werden und aus der die Werte der Dilution of Precision. [23]

$$PDOP = \sqrt{Q_{11} + Q_{22} + Q_{33}} \quad (8.24a)$$

$$HDOP = \sqrt{Q_{11} + Q_{22}} \quad (8.24b)$$

$$VDOP = \sqrt{Q_{33}} \quad (8.24c)$$

Beispiel für die Berechnung der DOP-Werte im Punkt 6/5/3

$$Q = \begin{bmatrix} 7.7408 & -7.1672 & -8.1707 \\ -7.1672 & 7.2745 & 7.9483 \\ -8.1707 & 7.9483 & 8.8543 \end{bmatrix} \quad (8.25)$$

$$PDOP = \sqrt{7.7408 + 7.2745 + 8.8543} = 4.8857 \quad (8.26a)$$

$$HDOP = \sqrt{7.7408 + 7.2745} = 3.8750 \quad (8.26b)$$

$$VDOP = \sqrt{8.8543} = 2.9756 \quad (8.26c)$$

Die Position Dilution of Precision oder auch Präzisionsgenauigkeit wäre hier in diesem Fall ca. bei 5 (Gleichung 8.26a) somit ergibt sich die Note Befriedigend (gut für Allgemeine Anforderungen) für den Raum. Für die Horizontale und Vertikale sind die Werte etwas besser, in etwa die Note Gut (Für alle Anforderungen hinreichend).

Tabelle:

In der Tabelle 8.7 sind jeweils die Werte der verschiedenen Dilution of Precision angegeben. Je nach

Punkt	PDOP	HDOP	VDOP
(6,5,3)	4.8857	3.8750	2.9756
(5,5,1.5)	9.3900	2.4077	9.0761
(4,4,1)	6.1482	5.8258	1.9647

Tabelle 8.7: Tabelle PDOP/HDOP/VDOP

unterschiedlichem Punkt sind die Werte auch unterschiedlich, da aufgrund der Berechnung man die realen Distanzen zu dem Tag braucht. Diese Distanzen unterscheiden sich natürlich von Position zu Position was auch eine Auswirkung auf die Berechnung und folglich auf die Präzision hat. Am schlechtesten ist die Positionsbestimmung des Punktes 5/5/1.5, da sie einen PDOP-Wert von über 9 aufweist und somit nur eine grobe Schätzung bezüglich der Position abgegeben werden können.

Diskussion

Physikalische Messungen sind grundsätzlich mit Unsicherheiten behaftet und meistens kann die Messgröße nicht direkt erfasst werden und muss deshalb mit den verschiedenen mathematischen Verfahren die Abweichungen der Messgröße bestimmt werden. Die mathematische Bearbeitung der Lokalisierung der Punkte in den Modellen, erfolgte über drei unterschiedliche Verfahren. Zum einen wurde die Fehlerfortpflanzung von Gauß angewendet zum anderen die Konfidenz-Ellipse sowie im drei Dimensionalen Raum die Dilution of Precision. Alle drei Verfahren geben eine Auskunft über die Fehler der Genauigkeit beziehungsweise auf eine Position, welche aufgrund der gemessenen Daten, über das Modell ermittelt werden können. Jede Fehlerbetrachtung soll zumindest die Abschätzung der maximalen Messunsicherheit, auch Maximalfehler genannt, einschließen. Unter der maximalen Messunsicherheit versteht man die größtmögliche, d. h. die unter ungünstigsten Umständen auftretende Abweichung einer Messgröße oder eines Ergebnisses vom Erwartungswert. Mit der Abschätzung der maximalen Messunsicherheit kann man die Größenordnung der mit einem bestimmten Messverfahren bzw. einer speziellen Messmethode erreichbaren Genauigkeit ermitteln.

Wie in Punkt beschrieben sind die Abweichungen oder Fehler, je nach betrachteter Position, in der Ebene oder im Raum unterschiedlich. Dies hängt natürlich von den gemessenen Werten als auch von den verwendeten Verfahren ab. Als Standard Wert ergeben sich im Mittel eine Abweichung von 30 bis 50 cm in der Ebene. Die Abweichungen in x und y Koordinate in einer Ebene sind jeweils nicht mehr so einfach zu bestimmen und werden über die Konfidenz-Ellipse ermittelt. Hier zeigt sich, dass die Anzahl der Anker Auswirkung auf die Positionsermittlung hat und eine größere Anzahl der Anker sich wesentlich besser auf die Lokalisierung auswirkt. Die Ortung im Raum ist je nach Position unter Betrachtung der DOP gut oder nur eine grobe Schätzung wie in Tabelle 8.7 ersichtlich.

Hierbei ist auch wichtig zu erwähnen, dass nicht nur die Chip-Eigenschaften eine wesentlich Rolle spielen, sondern auch die Umgebung in der man lokalisieren will. Da Funkwellen keine unendliche Reichweite haben und diese durch Gegenstände gedämpft werden können, muss die Positionierung der Anker dementsprechend gewählt werden. Je nach Einbau in Werkshallen oder in barrierefreien Räumen wird dies die Ortungsgenauigkeit negativ sowie positiv beeinflussen. Hier kann man sagen, dass die Line of Sight ein wesentlicher Punkt ist, um eine gute Ortungseigenschaft zu bekommen.

Abschließend kann man darauf hindeuten, dass System 1 und 2 je nach Anwendung und Räumlichkeit etwas bessere Ortungseigenschaften haben werden und dementsprechend schlechtere Ortungseigenschaften bis hin zu sehr falschen Angaben. Die Möglichkeit eine Verbesserung herbei zu führen wäre eine Verbesserung der Programmierung. Ein Punkt wären noch die verwendeten Quarze zur Erzeugung der Impulse. Dabei könnte man sich den Fehler der Quarze anschauen und wie dieser sich auf die Positionsbestimmung auswirkt.

Zusammenfassung und Ausblick

Diese Masterarbeit beschäftigt sich mit möglichen Lokalisierungsmethoden, die in Innenräumen angewendet werden können, und deren Genauigkeit. Dabei wurde die Ortung mittels Ultra Wideband analysiert. Betrachtet wurden die Signalform, Regulierung, UWB-Standard sowie das Senden und Empfangen. Weiterführend wurden Positionsbestimmungsverfahren und Lokalisierungssysteme, die zur Anwendung kommen können, beschrieben.

UWB bietet die Möglichkeit UWB Signale über eine Distanz bis zu 100 m zu übertragen. Dies gilt natürlich bei Line of Sight (Sichtverbindung) und hängt von vielen Faktoren ab. Dazu gehören das Antennendesign, die Sendeleistung und die Komplexität der Umgebung. Grundsätzlich durchdringen UWB-Signale sehr schlecht Metall, jedoch durchdringt das Signal gut Holz, Ziegel und Gips. Durch diesen Vorteil ist das UWB deutlich robuster als andere Verfahren und kann deshalb gut für die Innenraum Ortung herangezogen werden. Weiters ist das Frequenzspektrum zu erwähnen, welches von 3.5 GHz bis 10 GHz reicht. Man hat somit eine relativ große Bandbreite zur Verfügung im Gegensatz z. B. zu Bluetooth.

Im nächsten Punkt wurde ein Überblick geschaffen welche UWB-Chips Gegenwärtig auf dem Markt sind und auch zum Einsatz kommen. Aufgrund der durchgeführten theoretischen Betrachtungen und der Verfügbarkeit der Chips, wurde die Nutzung des ESP 32 UWB DW 1000 als zielführende Variante ausgewählt. Im zweiten Schritt wurden Überlegungen angestellt, wie man den UWB-Chip näher an die Produkte der Firma Tridonic hinführt. Hier bot sich das UWB DWS 1000 Shield für den Nordic nRF 52840-DK. Somit wäre die Integrierbarkeit in Tridonicprodukte gegeben.

Nach der Auswahl der Konzepte, wurden diese umgesetzt bzw. programmiert sowie ein Modell entwickelt, dessen Grundlage ca. 1000 Distanzmessungen von 1 m bis 9 m darstellen. Die Überlegung bezüglich des Modells war, dass die örtlichen Gegebenheiten oft nicht erlaubten, eine gute Ankerposition zu finden und somit signifikante fehlerhafte Ergebnisse zustande kamen. Zu erwähnen ist auch die Kalibrierung des DW 1000, die eine deutliche Verbesserung der Distanzmessung ergab.

Aufbauend auf den Erkenntnissen besteht die Möglichkeit der Verbesserung der Programme, um eine noch effizientere Messung zu generieren sowie die Visualisierung über API's. Anschließend wäre der Einbau in bestehende Tridonic Produkte wie LED Treiber möglich. Eine Miniaturisierung des UWB-Chips und das Platzieren dieses Chips in das Wireless Passive Module von Tridonic würde schlussendlich ein finales Produkt ergeben, welches für verschiedene Dienste einsetzbar wäre.

9 Anhang

Fehlerbalkendiagramme

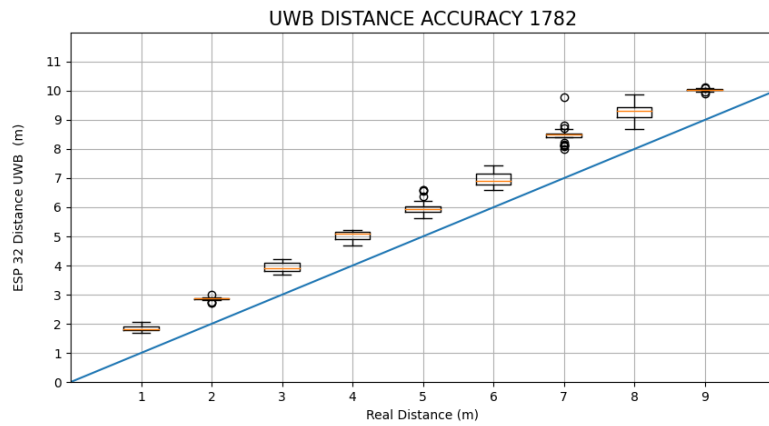


Abbildung 9.1: Fehlerbalken A 1782

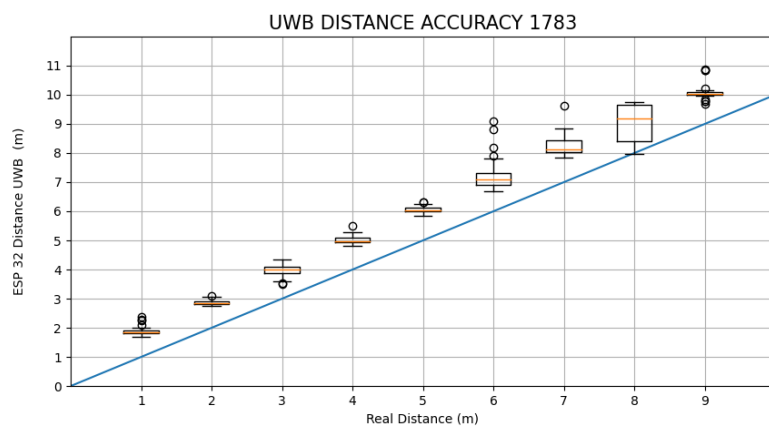


Abbildung 9.2: Fehlerbalken A 1783

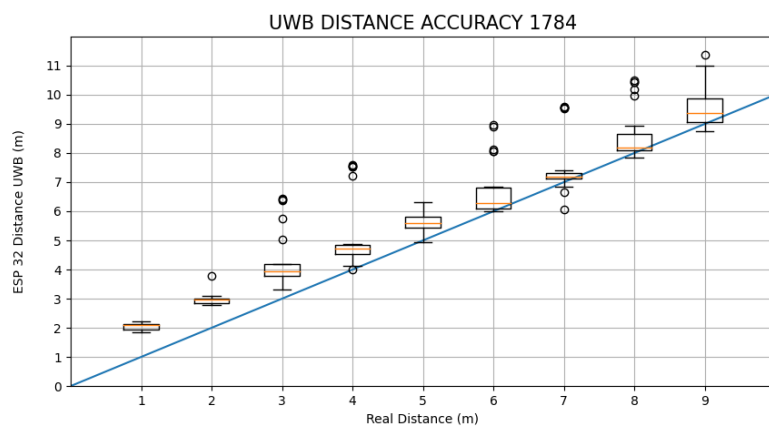


Abbildung 9.3: Fehlerbalken A 1784

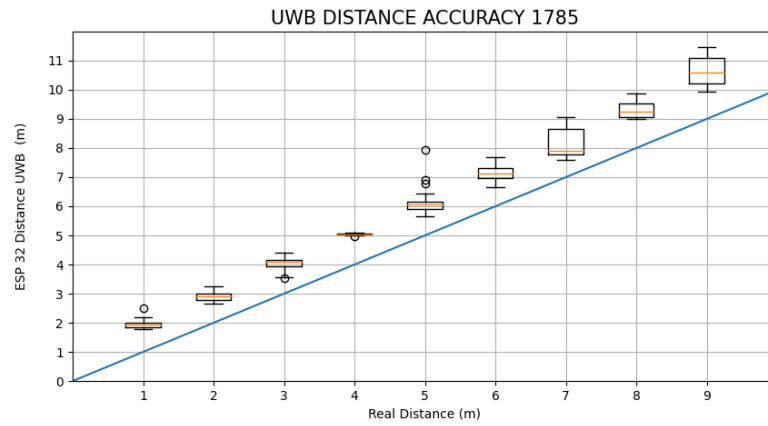


Abbildung 9.4: Fehlerbalken A 1785

Datenblätter

[A] <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-hardware/nrf52840-dk>

[B] <https://www.qorvo.com/products/p/DW1000>

[C] https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf

Software

Um die mathematischen Modelle zu erstellen, wurde jeweils Python und Matlab verwendet. Die Programmierung der Systeme 1 und 2 wurde jeweils mit Visual Studio und Arduino durchgeführt sowie dem Real Time Operating System Zephyr.

Literaturverzeichnis

- [1] „IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks–Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques“, IEEE. doi: 10.1109/IEEESTD.2020.9179124.
- [2] „Introduction to Ultra Wideband for Wireless Communications“.
[https://web.s.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzI2MTU5N19fQU41?sid=f673722e-2230-4d95-b76b-c4bd3ccd6bd0@redisvid=0form at=EBrid=1](https://web.s.ebscohost.com/ehost/ebookviewer/ebook/bmxlYmtfXzI2MTU5N19fQU41?sid=f673722e-2230-4d95-b76b-c4bd3ccd6bd0@redisvid=0form%20at=EBrid=1) (zugegriffen 28. Januar 2022).
- [3] D. Coppens, E. De Poorter, A. Shahid, S. Lemey, und C. Marshall, „An Overview of Ultra-WideBand (UWB) Standards(IEEE 802.15.4, FiRa, Apple): Interoperability Aspects and Future Research Directions“. arXiv, 4. Februar 2022. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <http://arxiv.org/abs/2202.02190>
- [4] G. Schmid und G. Neubauer, „Bestimmung der exposition durch ultrawideband technologien“, Tech. Rep. Bundesamt Für Strahlenschutz, 2007.
- [5] <https://www.3db-access.com/article/17> (Zugegriffen 7. Juni 2022).
- [6] „Ultra-wideband Positioning Systems | Wireless communications“, Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org/jo/academic/subjects/engineering/wireless-communications/ultra-wideband-positioning-systems-theoretical-limits-ranging-algorithms-and-protocols>, <https://www.cambridge.org/jo/academic/subjects/engineering/wireless-communications> (zugegriffen 7. Juni 2022).
- [7] Rainer Mautz. Indoor Positioning Technologies | Semantic Scholar. 2012. url: <https://www.semanticscholar.org/> (besucht am 01. 04. 2022)
- [8] Thuy Mai. Global Positioning System.NASA.Library Catalog:www.nasa.gov Publisher: Brian Dunbar. 5. Mai 2015. url: <http://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/communications/policy/GPS.html>
- [9] RTLS Wikipedia <https://en.wikipedia.org/wiki/Realtimelocatingsystem>
- [10] „PDF.pdf“. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32007D0131from=SL>
- [11] „Äquivalente isotrope Strahlungsleistung“, Wikipedia. 30. April 2021. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online].
- [12] „Spektrale Leistungsdichte“, Wikipedia. 27. Februar 2022. Zugegriffen: 7. Juni 2022. [Online].
- [13] K. W. Neumann, Ultra-Wideband-Technologie für den Einsatz im Schwermaschinenbau, 1. Auflage. Stolberg: Verlag R. Zillekens, 2017.
- [14] E. Köppe, „Lokalisierung sich bewegender Objekte innerhalb und außerhalb von Gebäuden“, 2014, doi: 10.17169/refubium-11044.
- [15] „Electromagnetic spectrum“, Wikipedia. 10. Juni 2022. Zugegriffen: 17. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Electromagnetic_spectrum&oldid=1092537213
- [16] Estimating Orientation Using Inertial Sensor Fusion and MPU-9250-MAT LAB Simulink - Ma-

thWorks Deutschland.

https://de.mathworks.com/help/support_kg/arduinoio/ug/estimating-orientation-using-inertial-sensor-fusion-and-mpu9250.html (zugegriffen Dez. 30, 2021)

[17] J. Wendel, Integrierte Navigationssysteme: Sensordatenfusion, GPS und Inertiale Navigation. 2007. doi: 10.1524/9783486595154

[18] „RTLS, Ultrasound-Based Accurate Indoor Positioning“, Sonitor. <https://www.sonitor.com> (zugegriffen 17. Juni 2022)

[19] „Download PDF Brochure - Real-Time Location Systems Market by Offering, Technology, Vertical, Application | COVID-19 Impact Analysis | MarketsandMarketsTM“. <https://www.marketsandmarkets.com/pdfdownloadNew.asp?id=1322>

[20] W. der Physik, „Navigieren mit Satellit: GPS“. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/erde/erde/gps/> (zugegriffen 18. Juni 2022).

[21] Robert Grüller. NAVSTAR-GPS Das globale Positionierungssystem. <http://www.gpswien.at/Artikel1.htm> (zugegriffen 18. Juni 2022).

[22] „Galileo General Introduction - Navipedia“. https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/Galileo_General_Introduction (zugegriffen 18. Juni 2022).

[23] Inpixon, „Indoor Location Technology: Sensors, Tags, Beacons More | Inpixon“. <https://www.inpixon.com/technology> (zugegriffen 18. Juni 2022).

[24] D. com D. Cavdar, „1_s2_0_S0261306913003750_main“, Eff. Waste Melamine Impregnated Pap. Prop. Oriented Strand Board, Zugegriffen: 18. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.academia.edu/4551935/1_s2_0_S0261306913003750_main

[25] Z. Farid, R. Nordin, und M. Ismail, „Recent Advances in Wireless Indoor Localization Techniques and System“, J. Comput. Netw. Commun., Bd. 2013, S. e185138, Sep. 2013, doi: 10.1155/2013/185138.

[26] W. der Physik, „Infrarotstrahlung“. <https://www.weltderphysik.de/gebiet/teilchen/licht/elektromagnetisches-spektrum/infrarotstrahlung/> (zugegriffen 18. Juni 2022)

[27] „Infrarot“. <https://www.infratec.de/sensorik/service-support/glossar/infrarot/> (zugegriffen 18. Juni 2022).

[28] V. Spruyt, „How to draw an error ellipse representing the covariance matrix?“, Computer vision for dummies, 3. April 2014. <https://www.visiondummy.com/2014/04/draw-error-ellipse-representing-covariance-matrix/> (zugegriffen 25. Juli 2022).

[29] A. Zucconi, „Positioning and Trilateration“, Alan Zucconi, 13. März 2017. <https://www.alanzucconi.com/2017/03/13/positioning-and-trilateration/> (zugegriffen 25. Juli 2022).

[30] „Astronavigation-Kavainga der Sternenweg“, Polynesia Spirit. <https://www.polynesia-spirit.at/polynesische-navigation/> (zugegriffen 27. Juli 2022).

[31] „Kompass“, Wikipedia. 15. Juli 2022. Zugegriffen: 27. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Kompass&oldid=224524798>

[32] „Atomuhr“, Wikipedia. 19. Juli 2022. Zugegriffen: 27. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Atomuhr&oldid=224628682>

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder in gleicher noch in ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch noch nicht veröffentlicht.



Dusko Vukovic, Dornbirn, August 20, 2022