

# Range-Only Simultaneous Localization and Mapping mittels Ultra-Wideband

Bachelorarbeit

Fachhochschule Aachen  
Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik  
Ingenieur-Informatik

Albert Kasdorf  
geb. am 29.12.1984 in Pawlodar  
Matr.-Nr.: 3029294

Gutachter:  
Prof. Dr. rer. nat. Alexander Ferrein  
Dr. Stefan Schiffer



---

# **Eidesstattliche Erklärung**

---

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die im Literaturverzeichnis angegebenen Quellen benutzt habe.

Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder noch nicht veröffentlichten Quellen entnommen sind, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem entsprechenden Quellennachweis versehen.

Diese Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form noch bei keiner anderen Prüfungsbehörde eingereicht worden.

---

Aachen, 21. Dezember 2017

---

Ort, Datum

---

Albert Kasdorf



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Glossar</b>	<b>vii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>ix</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>xi</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>xiii</b>
<b>1. Einführung</b>	<b>1</b>
1.1. Aufgabenstellung . . . . .	2
1.2. Motivation . . . . .	2
1.3. Zielsetzung . . . . .	2
1.4. Gliederung . . . . .	2
1.5. ???Problemstellung?? . . . . .	2
<b>2. Grundlagen</b>	<b>5</b>
2.1. Verfahren für die Reichweiten-Bestimmung . . . . .	5
2.2. Wahrscheinlichkeitstheorie . . . . .	5
2.3. Bayes/Kalman/Partikel Filter . . . . .	5
2.4. SLAM . . . . .	5
2.5. ROS . . . . .	5
<b>3. Stand der Forschung und Technik</b>	<b>7</b>
<b>4. Ultrabreitband</b>	<b>11</b>
4.1. Historie . . . . .	11
4.2. Alternative Technologien . . . . .	13
4.3. Gegenüberstellung . . . . .	13

4.4. Erstelle Hardware . . . . .	13
4.4.1. Anforderungen . . . . .	13
4.4.2. Hardware Zusammenstellung . . . . .	13
4.4.3. Prototypen . . . . .	18
4.4.4. Elektrischer Aufbau . . . . .	21
4.4.5. Platinendesign . . . . .	21
4.4.6. Steuersoftware . . . . .	21
4.4.7. Entfernungsmessung und Auswertung . . . . .	21
4.4.8. Kalibrierung . . . . .	21
<b>5. RO-SLAM</b>	<b>23</b>
5.1. Roboterplattform . . . . .	23
5.2. Softwarearchitektur . . . . .	23
5.2.1. ROS Module . . . . .	23
5.2.2. MRPT Module . . . . .	23
<b>6. Evaluation</b>	<b>25</b>
6.1. Versuchsaufbau . . . . .	25
6.2. Ergebnisse und Auswertung . . . . .	25
<b>7. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>27</b>
7.1. Zusammenfassung . . . . .	27
7.2. Ausblick . . . . .	27
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>29</b>
<b>Anhang</b>	<b>33</b>
<b>A. Blindtext Kapitel</b>	<b>35</b>
A.1. Blindtext Abschnitt . . . . .	35

---

# Glossar

---

**Anker** UWB-Modul das stationär befestig ist und sich nicht bewegt.

**Tag** UWB-Modul das am Roboter befestig ist und sich durch den Raum bewegt.

**UWB–Modul** Erstelle Platine mit dem UWB–Transceiver, dem Mikrocontroller, der Energieversorgung, usw.

**UWB–Transceiver** DWM1000 Integrated Circuit (IC), also der DW1000 Mikrocontroller mit der notwendigen Beschaltung und der Antenne.



---

# Abkürzungsverzeichnis

---

**CUA** Catholic University of America

**FBW** Fractional Bandwidth

**FCC** Federal Communications Commission

**FTDI** Future Technology Devices International

**GPR** Ground Penetrating Radar

**GSSI** Geophysical Survey Systems Inc.

**IC** Integrated Circuit

**IRQ** Interrupt Request

**LANL** Los Alamos National Laboratory

**LLNL** Lawrence Livermore National Laboratory

**MIR** Micropower Impulse Radar

**MISO** Master Input Slave Output

**MOSI** Master Output Slave Input

**PCB** Printed Circuit Board

**SCLK** Serial Clock

**SPI** Serial Peripheral Interface

**SS** Slave Select

**UART** Universal Asynchronous Receiver Transmitter

**USAF** United States Air Force

**USDOD** United States Department of Defense

**UWB** Ultra-Wideband

---

# **Abbildungsverzeichnis**

---

1.1.	a nice plot . . . . .	1
4.1.	DecaWave IC Pin Belegung . . . . .	14
4.2.	Adafruit Pro Trinket . . . . .	15
4.3.	Adafruit Pro Trinket LiPoly/LiIon Backpack . . . . .	16
4.4.	Schaltplan des Ultra-Wideband (UWB)–Moduls. . . . .	18
4.5.	Die ersten zwei Prototypen der UWB–Module. . . . .	20
4.6.	Printed Circuit Board (PCB)–Adapterboard für den DWM1000. . . . .	20



---

# **Tabellenverzeichnis**

---

1.1.	Table to test captions and labels . . . . .	1
4.1.	Pinbelegung zwischen dem DWM1000 und Pro Trinket. . . . .	15
4.2.	Pinbelegung zwischen dem LiIon Backpack und dem Pro Trinket. . . . .	17
4.3.	Pinbelegung zwischen dem CP2104 Friend und dem Pro Trinket. . . . .	17
4.4.	Materialkosten pro Tag bzw. Anker. . . . .	19



# 1.

## Einführung

Mit dem vorliegenden Artikel sollen die Einsatzmöglichkeiten der seriellen Kommunikation mit Peripheriegeräten mittels Serial Peripheral Interface (SPI) verdeutlicht werden.

Das SPI ist ein in den frühen 1980er Jahren von Motorola entwickeltes Bus-System mit einem „lockeren“ Standard für einen synchronen seriellen Datenbus (Synchronous Serial Port), mit dem digitale Schaltungen nach dem Master-Slave-Prinzip miteinander verbunden werden können.

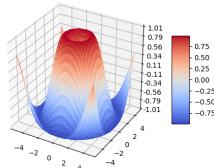


Abbildung 1.1.: a nice plot

As you can see in the figure 1.1, the function grows near 0. Also, in the page 1 is the same example.

The table 1.1 is an example of referenced L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>Xelements.

Col1	Col2	Col2	Col3
1	6	87837	787
2	7	78	5415
3	545	778	7507
4	545	18744	7560
5	88	788	6344

Tabelle 1.1.: Table to test captions and labels

## 1.1. Aufgabenstellung

## 1.2. Motivation

## 1.3. Zielsetzung

## 1.4. Gliederung

## 1.5. ???Problemstellung??

In der Zeit vor den Navigationsgeräten wurden auf deutschen Straßen noch regelmäßig faltbare Straßenkarten von den Beifahrern verwendet um den Fahrer den Weg zu weisen. Bevor eine Straßenkarten verwendet werden kann, muss diese erstellt werden. Dieser Prozess ist unter dem Begriff Kartenerstellung (engl. Mapping) bekannt. Der Detailgrad hängt dabei stark vom Verwendungszweck ab. Der erste Schritt nach dem Entfalten der Straßenkarten bestand in der Lokalisierung (engl. Localization), also der Bestimmung der ungefähren Fahrzeugposition und dem Ziel der Reise auf der Straßenkarte. Darauf aufbauend wurde vom Beifahrer dann eine Route zwischen der aktuellen Fahrzeugposition und dem Ziel geplant und während der Fahrt weiter verfolgt, was auch als Pfad-Planung (engl. Path-Planning) bekannt ist.

Genauso wie der menschliche Agent muss auch jeder mobile Roboter für sich diese grundlegende Frage beantworten können. „Wo bin ich?“, „Wo bin ich bereits gewesen?“, „Wohin gehe ich?“ und „Welcher ist der beste Weg dahin?“[1].

Außerhalb von geschlossenen Räumlichkeiten (engl. Outdoor) erfolgt die Lokalisierung in der Regel mittels GPS, unter der Voraussetzung dass eine ungehinderte Verbindung zu den GPS-Satelliten möglich ist. Die Lokalisierung ist in diesem Fall sehr einfach, da die GPS Koordinaten eindeutig sind und das Kartenmaterial bereits im gleichen Koordinatensystem vorliegt.

Innerhalb geschlossener Räumlichkeiten (engl. Indoor), wie in öffentlichen Gebäuden, Logistikhallen oder auch in Bergwerken, ist eine Lokalisierung mittels GPS nicht mehr möglich. Erschwerend kommt dazu, dass es in der Regel zu diesen Räumlichkeiten keine öffentlich verfügbaren Karten gibt oder diese sich wie im letzten Beispiel häufig ändern. Aus diesem Problemfeld haben sich Algorithmen für die Simultane Lokalisierung und Kartenerstellen (engl. Simultaneous Localization and Mapping (SLAM)) entwickelt.

Häufig werden SLAM Algorithmen verwendet um aus Kamerabildern oder 360° Abstandsmessungen eine Karte der Umgebung zu erstellen und sich in der gleichen zu loka-

lisieren. Der Fokus dieser Arbeit liegt jedoch auf den reinen Entfernungsbasierenden SLAM (engl. Range Only SLAM (RO-SLAM)) Algorithmen. Hierbei werden nur die Informationen der Eigenbewegung und die Entfernung zu mehreren, vorher unbekannten, Basisstationen genutzt um sich selbst zu Lokalisieren und eine Karte mit den Positionen der Basisstationen zu erstellen.



# **2.**

---

## **Grundlagen**

---

**2.1. Verfahren für die Reichweiten-Bestimmung**

**2.2. Wahrscheinlichkeitstheorie**

**2.3. Bayes/Kalman/Partikel Filter**

**2.4. SLAM**

**2.5. ROS**



# 3.

---

## Stand der Forschung und Technik

---

- 2001**
- !A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem (Zitiert von: 2803)
  - +Auxiliary variable based particle filters (115)
  - +Factor graphs and the sum-product algorithm (5869)
  - +Rao-Blackwellised particle filtering for dynamic Bayesian networks (1264)
- 2002**
- +FastSLAM: A factored solution to the simultaneous localization and mapping problem (2469)
  - !Preliminary results in range-only localization and mapping (187)
  - Indoor geolocation science and technology (985)
- 2003**
- !Robust range-only beacon localization (264)
  - !Experimental results in range-only localization with radio (82)
  - !Pure range-only sub-sea SLAM (174)
  - +Recent results in extensions to simultaneous localization and mapping (18)
- 2004**
- !Tracking moving devices with the cricket location system (547)
  - !A probabilistic approach to inference with limited information in sensor networks (42)
  - +An introduction to factor graphs (672)
  - ?An efficient multiple hypothesis filter for bearing-only SLAM (114)
- 2006**
- !Simultaneous localization and mapping: part I (2982)
  - !Simultaneous localization and mapping (SLAM): Part II (1479)

- Further results with localization and mapping using range from radio (69)
  - !Range-only slam for robots operating cooperatively with sensor networks (146)
  - !Range-only slam with interpolated range data (28)
- 2007**
- !Application of UWB and GPS technologies for vehicle localization in combined indoor-outdoor environments (52)
  - +Rao-Blackwellized particle filter for multiple target tracking (264)
- 2008**
- !Efficient probabilistic range-only SLAM (Zitiert von: 70)
  - !A pure probabilistic approach to range-only SLAM (Zitiert von: 36)
- 2009**
- !Navigating with ranging radios: Five data sets with ground truth (18)
  - !Mobile robot localization based on ultra-wide-band ranging: A particle filter approach (90)
  - !A robust method of localization and mapping using only range (45)
  - !Range-only SLAM with a mobile robot and a wireless sensor networks (109)
- 2010**
- !Geolocation with range: Robustness, efficiency and scalability (11)
  - !Studying of WiFi range-only sensor and its application to localization and mapping systems (3)
  - !tinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program (62)
- 2011**
- Ultra wide-band localization and SLAM: A comparative study for mobile robot navigation (17)
  - !A new state vector for range-only SLAM (10)
- 2013**
- A Spectral Learning Approach to Range-Only SLAM (13)
- 2014**
- !A comparison of slam algorithms with range only sensors (2)
  - !Efficient robot-sensor network distributed self range-only slam (16)
- 2015**
- ?A robot self-localization system using one-way ultra-wideband communication (18)
  - ?Fusing ultra-wideband range measurements with accelerometers and rate gyroscopes for quadrocopter state estimation (30)

- 
- 2016**
- !Indoor robot positioning using an enhanced trilateration algorithm (5)
- 2017**
- ?Ultra-Wideband Aided Fast Localization and Mapping System (1)
  - !A system for indoor positioning using ultra-wideband technology (0)
  - ?Range-only SLAM schemes exploiting robot-sensor network cooperation (0)
- 

Einen guten Überblick über die Eigenschaften der Drahtlosen-Protokolle (engl. Wireless Protocols) Bluetooth, UWB, ZigBee und WiFi liefert die Arbeit [2] von Lee, Su und Shen.

In [3] wird das grundlegende Prinzip erklärt um aus mehreren bekannten Sensoren die Position eines beweglichen Empfängers zu berechnen.

Der theoretische Hintergrund des SLAM–Verfahrens wird in [4] vorgestellt. Zusätzlich wird bewiesen das die Unsicherheit bei der Kartenerstellung und Lokalisierung eine untere Schranke erreicht.

Kantor und Singh stellen in Ihrer Arbeit [5] ein Lokalisierungsverfahren vor, welches die Roboterposition anhand von Entfernungsmessungen zu vorher bekannten Landmarken bestimmen kann. Im letzten Abschnitt wird SLAM–Verfahren vorgestellt, welches über einen Kalman–Filter die Unsicherheit der Landmarkenposition modellieren kann.

Die Autoren Blanco, González und Fernández-Madrigal gehen in ihren Arbeiten [6, 7] einen Schritt weiter und bestimmen die unbekannte Roboterposition sowie die unbekannten Landmarkenpositionen. Hierzu nutzen Sie im ersten Schritt einen Partikelfilter (engl. Particle Filter) bis die Schätzung eine ausreichende Genauigkeit erreicht hat um dann im zweiten Schritt über einen Kalman–Filter ein Positionsverfolgung (engl. Position Tracking) durchzuführen.

Die Arbeit [8] von Ledergerber, Hamer und D’Andrea gehen auf die Roboterlokalisierung unter Verwendung einer One-Way Ultra-Wideband Kommunikation ein. Dieses hat den Vorteil, das mit sehr wenigen Landmarken eine große Anzahl von Roboter lokalisiert werden kann.

- The Cartesian EKF described above operates in the Cartesian space, we formulate our problem in polar coordinates. - The use of this parameterization derives motivation from the polar coordinate system, where annuli, crescents and other ringlike shapes can be easily modeled. This parameterization is called Relative Over Parameterized (ROP) because it over parameterizes the state relative to an origin.

- EKF -> Polar EKF -> Multi-Hypothesis Filter - Partikel Filter



# 4.

---

## Ultrabreitband

---

### 4.1. Historie

Als Vater der UWB Kommunikation kann der italienische Funkpionier Guglielmo Marconi angesehen werden. In den späten 1890er Jahren entwickelte er den Knallfunkensender, der über eine Funkenstrecke ein hochfrequentes Signal zur Übertragung von Morsezeichen erzeugt. Mit dieser Apparatur gelang es Ihm, im Jahre 1901 einen Nachrichtenaustausch zwischen Nordamerika und Europa über den Nordatlantik durchzuführen.[9]

Bis in die Anfänge der 1960er Jahre dominierte jedoch die sinusförmige Funkübertragungsform. Dies änderte sich als die Forscher vom Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) und Los Alamos National Laboratory (LANL) begangen die Ausbreitung elektromagnetischer Wellen nicht nur im Frequenz- sondern auch im Zeitbereich zu untersuchen. Grundlegende Erkenntnisse wurden dabei im Bereich der Impulssender, -empfänger und -antennen gesammelt.[9–12]

Durch die Einführung der zeitbereichs basierten Abtast–Oszilloskope im Jahre 1962 durch Tektronix bzw. Hewlett-Packard war es zum ersten Mal möglich eine UWB Wellenform aufzufangen und anzuzeigen. Ermöglicht wurde dies erst durch den Einsatz von Tunneldioden und Avalanchetransistoren. [9, 11, 12]

Ab dem Jahre 1964 produzierten beide Hersteller Messgeräte für die Diagnose im Zeitbereich. [13]

Ab den Anfängen der 1970er Jahre waren alle wichtigen Grundsteine für ein UWB System für Kommunikation- bzw. Radaranwendungen gelegt. Dazu zählten auch diverse eingereichte Patente von Harmuth an der Catholic University of America (CUA), Ross und Robbins bei der Sperry Rand Corporation und Paul van Etten an der United States Air Force (USAF) im Rome Air Development Center.[9, 13, 14] Hervorzuheben ist das eingereichte Patent von Ross im Jahre 1973, siehe [15].

Kurz darauf im Jahre 1974 wurde die UWB Technologie kommerziell erfolgreich von Morey bei der Geophysical Survey Systems Inc. (GSSI) für ein Bodenradar (engl. Ground Penetrating Radar (GPR)) angewendet. [13]

Im Zeitraum von 1977 bis 1989 wurden mehrere Programme und Workshops organisiert um die Entwicklung von UWB Systemen voranzutreiben, darunter auch bei der USAF und dem United States Department of Defense (USDOD). Ebenfalls gabe es mehrere akademische Programme an diversen Instituten, darunter auch am LLNL, LANL, University of Michigan, University of Rochester und Polytechnic University, mit dem Fokus auf den physikalischen Unterschieden zwischen der Kurzimpulsübertragung und den Langimpulssignalen bzw. kontinuierlichen Impulssignalen bei der Interaktion mit verschiedenen Materialien.[13]

Ab dem Jahre 1989 wurde der Name UWB durch das USDOD geprägt. Diese Definition galt für alle Geräte die mindestens eine Bandbreite von 1,5 GHz bzw. 25 % der Fractional Bandwidth (FBW) belegten. Vorher war die UWB Technologie nur unter den Synonymen “baseband communication”, “carrier free communication”, “impulse radio”, “large relative bandwidth communication”, “nonsinusoidal communication”, “orthogonal functions”, “sequency theory”, “time domain”, “large-relative-bandwidth radio/radar signals”, “video-pulse transmission” und/oder “Walsh waves communication” bekannt. [9, 10, 12, 14, 16]

Im Jahre 1994 wurde von McEwan an der LLNL das Micropower Impulse Radar (MIR) konstruiert. Hierbei handelte es sich um ein UWB Radarsystem mit bemerkenswerten Eigenschaften. Das Radarsystem verfügte über eine sehr hohe Signalsensitivität, einen kompakten Aufbau, eine kostengünstige Herstellung und einen geringen Energieverbrauch, der sich im Bereich von Mikrowatt befanden und daher ideal für batteriebetriebene Anwendung eignete. [13]

Vor dem Jahre 2002 war die Verwendung von UWB auf Radarssystem beschränkt, die größtenteils in militärischen Anwendungen aufzufinden waren. [14] Das änderte sich ab dem Jahre 1998, als die Federal Communications Commission (FCC) mit der Standardisierung der UWB Nutzung begann. Im Jahre 2002 wurden durch die FCC in den Vereinigten Staaten von Amerika große Frequenzbereiche (3,6 GHz–10,1 GHz) für die kommerzielle Nutzung freigegeben hat, siehe First Report and Order (R&O). Danach wurden erstmals auch eine nicht militärische Anwendungen im Bereich “Imaging systems”, “communication and measurement systems” und “vehicular radar systems” möglich. [14]

Weitere Staaten folgten der FCC Regulierung/Standardierung und gaben ebenfalls große Frequenzbereiche für die UWB Technologie frei. Details zu den Regularien der einzelnen Staaten können unter [17] eingesehen werden.

## 4.2. Alternative Technologien

Einen guten Überblick über die Eigenschaften der Drahtlosen-Protokolle (engl. Wireless Protocols) Bluetooth, UWB, ZigBee und WiFi liefert die Arbeit [2] von Lee, Su und Shen.

qigao2015tightly - Tightly Coupled Model for Indoor Positioning based on UWB/INS

## 4.3. Gegenüberstellung

## 4.4. Erstelle Hardware

### 4.4.1. Anforderungen

An die zu erstellende Hardware werden mehrere Anforderungen gestellt.

Um eine Entfernungsmessung durchzuführen wird immer ein Marker und mindestens ein Anker benötigt. Sowohl der Marker als auch der Anker sollen aus den gleichen elektronischen Komponenten bestehen, also eine gemeinsame Hardwareplattform bilden. Die unterschiedliche Funktionalität pro Modul soll sich dann aus verschiedenen Software-Ständen der Firmware herausbilden.

Die Anker sollen im Bedarfsfall frei im Raum verteilt werden können. Nicht an jeder Stelle steht eine Stromversorgung zur Verfügung, daher muss jedes Modul über eine separate Energiequelle verfügen.

Zusätzlich muss der Marker über eine bidirektionale Kommunikationsschnittstelle zur Verarbeitungseinheit verfügen. Über diese sollen zum einen Steuerbefehle an das UWB-Modul geschickt werden und zum anderen sollen die gemessenen Entfernungswerte zwischen dem Marker und den Ankern an die Verarbeitungsanleitung übertragen werden.

### 4.4.2. Hardware Zusammenstellung

#### UWB–Transceiver

Als UWB–Transceiver werden die Komponenten der Firma DecaWave verwendet. Bei dem DW1000 handelt es sich nur um den IC der für die Erzeugen und Verarbeiten der UWB–Funksignale zuständig ist. Der DWM1000 beinhaltet neben dem DW1000 auch die notwendige Beschaltung und zusätzlich eine Antenne für die Übertragung, siehe Abbildung 4.1.

Der DWM1000 kann mit einer Spannung von 2,8 V–3,6 V[19] betrieben werden, idealerweise mit 3,3 V. Das bedeutet aber auch, dass die Logikpegelspannung für die SPI

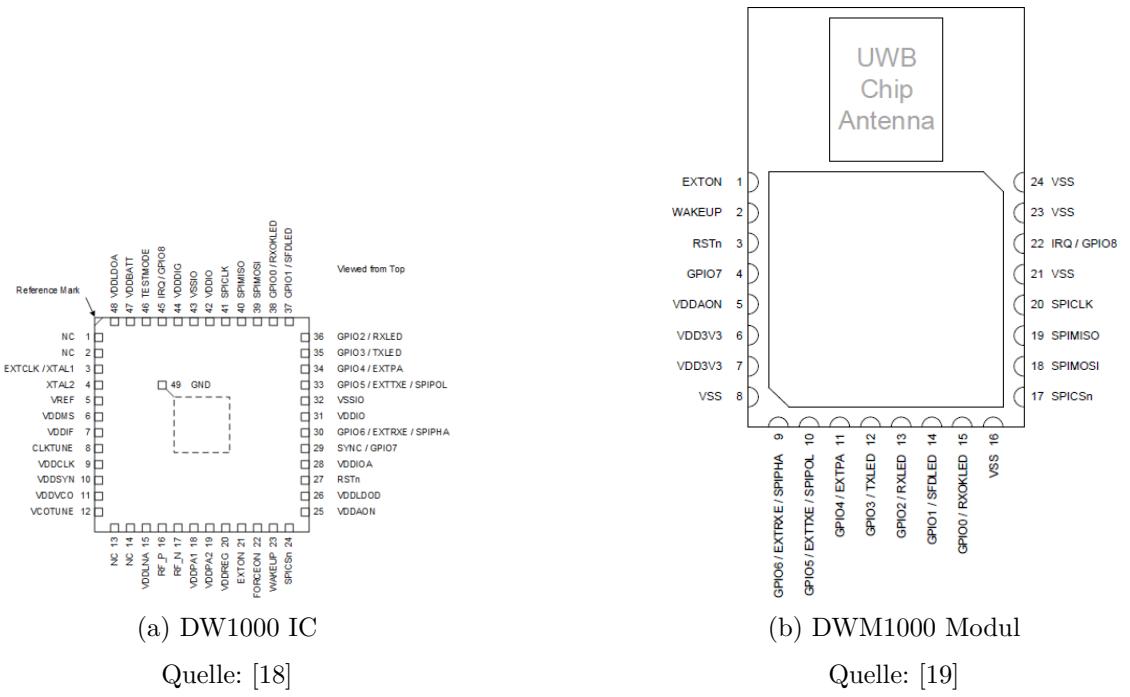


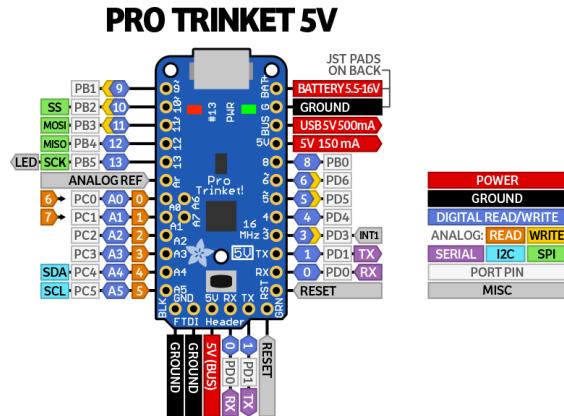
Abbildung 4.1.: DecaWave IC Pin Belegung

Schnittstelle 3,3 V beträgt. Dieser Umstand muss bei der Auswahl des Mikrocontrollers berücksichtigt werden.

Die Kommunikation mit dem DWM1000 erfolgt über die SPI Schnittstelle, hierfür sind die Pins Serial Clock (SCLK), Master Output Slave Input (MOSI), Master Input Slave Output (MISO) und Slave Select (SS) zu verwenden [19]. Bei der SPI-Schnittstelle handelt es sich um eine Master-Slave Architektur, das bedeutet das Daten vom Master gesendet und angefragt werden können. Der Slave kann jedoch nur Daten auf Anfrage senden. Um zu verhindern, dass der Master periodisch auf das Eintreffen einer Nachrichten anfragen muss, kann der Interrupt Request (IRQ)-Pin des Slaves verwendet werden. Um zu verhindern das kurzfristige Spannungsspitzen einen Interrupt auslösen, muss der IRQ-Pin über einen Pulldown-Widerstand auf Masse gezogen werden.

Um das DWM1000 erfolgreich zu initialisieren muss zusätzlich der RSTn-Pin durch den Mikrocontroller angesteuert werden. Zusätzlich ergibt über die Beschaltung dieses Pins die Möglichkeit den DWM1000 per Hardware im laufenden Betrieb neu zu starten.

Zusätzliche Informationen, wie der Versand und Empfang von Nachrichten, könnten über Status-Leuchtdioden ausgegeben werden. Hierfür wird jeder der Pins GPIO1 bis GPIO3 jeweils mit einem Vorwiderstand und einer Leuchtdiode verbunden.

Abbildung 4.2.: Adafruit Pro Trinket<sup>1</sup>

Quelle: <https://learn.adafruit.com/introducing-pro-trinket/pinouts>

DWM1000 (Pin)	Pro Trinket (Pin)	Bedeutung
SPICLK (20)	SCK (13)	SPI
SPIMISO (19)	MISO (12)	SPI
SPIMOSI (18)	MOSI (11)	SPI
SPICSn (17)	SS (10)	SPI
IRQ (22)	INT1 (3)	Interrupt
RSTn (3)	PB1 (9)	Hardware Reset

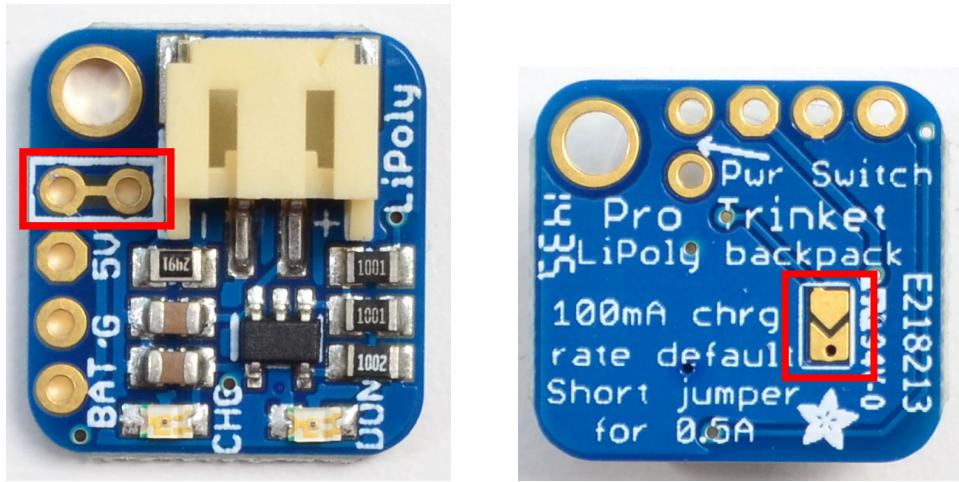
Tabelle 4.1.: Pinbelegung zwischen dem DWM1000 und Pro Trinket.

### Mikrocontroller

Wie bereits im vorherigen Abschnitt 4.4.2 erwähnt beträgt die Logikpegelspannung 3,3 V. Durch diesen Umstand entfallen alle Mikrocontroller die mit einer 5 V Versorgungsspannung, wie z.B. der beliebte Arduino Uno, betrieben werden. Die Entscheidung viel auf den Pro Trinket der Firma Adafruit, der als Hauptprozessor den Atmel ATmega328/P verwendet. Dieser hat den Vorteil, dass er jeweils in einer 5 V und 3,3 V Variante existiert. Zusätzlich ist die 3,3 V Variante mit einem Systemtakt von 12 MHz schneller als der vergleichbare Arduino Pro Mini 3,3 V der nur mit 8 MHz getaktet ist.

Um eine Kommunikationsverbindung zwischem dem DWM1000 und dem Mikrocontroller herzustellen, müssen die Pins anhand der Tabelle 4.1 verbunden werden.

<sup>1</sup>Der Adafruit Pro Trinket 3,3 V ist zum Großteil pinkompatibel zu der 5 V Variante. Nur der Pin BAT+ benötigte eine Batteriespannung von 3,5 V–16 V und der drei Reihen weiter unten liegende 5 V Pin liefert nur 3,3 V.



(a) Modifikation für den Schalter.

(b) Modifikation für einen höheren Ladestrom.

Abbildung 4.3.: Adafruit Pro Trinket LiPoly/LiIon Backpack

Quelle: <https://learn.adafruit.com/adafruit-pro-trinket-lipoly-slash-liion-backpack>

### Energieversorgung

Um den UWB–Transceiver und den Pro Trinket mit Energie zu versorgen wird ein Lithiumionenakku mit einer Spannung von 3,7 V und einer Kapazität von 2200 mAh verwendet. Die Verbindung zwischen den beiden wird über einen Lithiumionenakku Lade–Chip hergestellt. Diesen gibt es als fertiges Modul von Adafruit mit der Bezeichnung Pro Trinket LiPoly/LiIon Backpack.

Bevor jedoch dieses Modul eingesetzt werden kann, müssen noch zwei Modifikationen durchgeführt werden. Zum einen kann die Energiequelle mittels eines Schalters vom Verbraucher getrennt werden. Per Standard sind jedoch diese zwei Pins mit einander verbunden und müssen mit einem schwarfen Messer unterbrochen werden, siehe Abbildung 4.3a. Zum anderen wird der Lithiumionenakku nur mit einem Strom von 100 mA geladen. Bei einer Kapazität von 2200 mAh würde ein vollständiger Ladezyklus ca. 22 h dauern. Um diese Zeit zu verkürzen, müssen die zwei Lötpads, siehe Abbildung 4.3b, miteinander verbunden werden. Danach wird der Lithiumionenakku mit einem Strom von 500 mA geladen und dementsprechend verkürzt sich die Ladedauer auch auf ca. 2,5 h.

Um eine Verbindung zwischem dem LiIon Backpack und dem Pro Trinket herzustellen, müssen die Pins anhand der Tabelle 4.2 verbunden werden.

LiIon Backpack	Pro Trinket	Bedeutung
BAT	BAT+	Batteriespannung
5V	BUS	Ladespannung
G	GND	Masse
SW1	–	Schalter
SW2	–	Schalter

Tabelle 4.2.: Pinbelegung zwischen dem LiIon Backpack und dem Pro Trinket.

CP2104 Friend	Pro Trinket	Bedeutung
GND	GND	Masse
CTS	GND	Masse
5V	5V	Versorgungsspannung
TXD	RXD	Datenaustausch
RXD	TXD	Datenaustausch
RTS	RTS	Reset

Tabelle 4.3.: Pinbelegung zwischen dem CP2104 Friend und dem Pro Trinket.

### Datenaustausch

Der ATmega328/P verfügt nicht über einen eingebauten USB-Controller, daher ist ein direkter Datenaustausch zwischen dem Mikrocontroller und einem Computer nicht möglich. Jedoch verfügt der ATmega328/P über eine Universal Asynchronous Receiver Transmitter (UART)-Schnittstelle, mit der Daten seriell über die Pins RX und TX übertragen und empfangen werden können. Mittels einem zusätzlichen Modul kann diesen Datenstrom aufgefangen und über die USB-Schnittstelle übertragen werden. Der CP2104 Friend von Adafruit erledigt genau diese Aufgabe. Angeschlossen wird er über den Future Technology Devices International (FTDI)-Header, siehe Abbildung 4.2. Dadurch ist es möglich die Module die einen Datenaustausch benötigen mit einem entsprechenden Modul auszurüsten.

Um eine Verbindung zwischem dem CP2104 Friend und dem Pro Trinket herzustellen, müssen die Pins anhand der Tabelle 4.3 verbunden werden.

### Materialkosten pro UWB-Modul

Die Materialkosten für einen Tag betragen jeweils 45,15 € und für einen Anker 56,24 €. Der Unterschied ergibt sich dadurch, das z.B. für einen Tag keine Batterie benötigt wird, da dieser von der Energiequelle des Roboters gespeist wird. Die detaillierte Auflistung

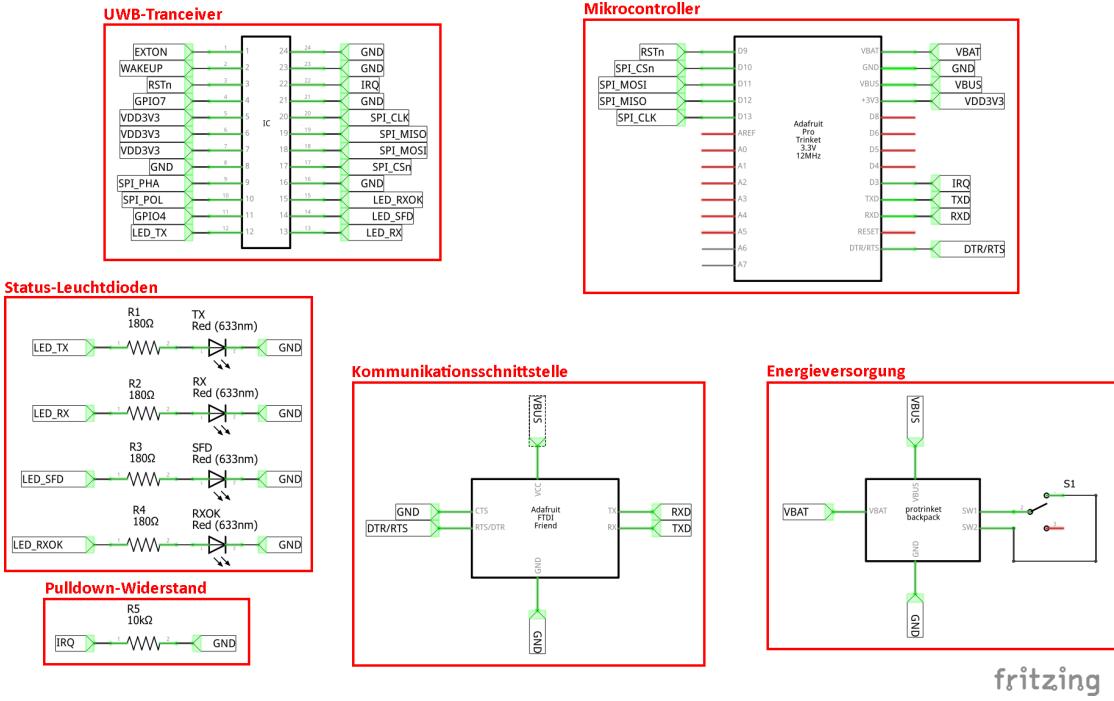


Abbildung 4.4.: Schaltplan des UWB-Moduls.

der Materialkosten können in der Tabelle 4.4 nachgeschlagen werden. Die Bauelemente die jeweils für einen Tag bzw. Anker benötigt werden, sind in der dazugehörigen Spalte angekreuzt.

### Schaltplan

Eine Übersicht der besprochenen Bauelemente, gruppiert nach Funktionsgruppen, können dem Schaltplan in Abbildung 4.4 entnommen werden.

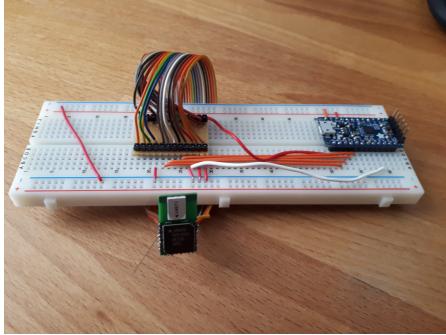
#### 4.4.3. Prototypen

Anhand eines vorläufigen Schaltplans wurden zwei Prototypen erstellt, siehe Abbildung 4.5.

Der erste Prototyp wurde auf einer Steckplatine realisiert, siehe Abbildung 4.5a. Die elektrische Verbindung zu dem DWM1000 IC wurde dabei über eine Freiluftverdrahtung mit einem steckplatinenfähigen Adapter umgesetzt. Der erste Verbindungsauflaufbau wurde dabei mit dem Beispielprogramm *BasicConnectivityTest* aus dem GitHub-Projekt [20] durchgeführt. Hierbei ist zu beachten das der *PIN\_IRQ* bei dem *Pro Trinket* nicht auf Pin 2 sondern auf Pin 3 liegt.

Tag	Anker	Anbieter	Artikelnummer	Komponente	Anzahl	Stückpreis
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Digi-Key	1479-1002-1-ND	Decawave Limited DWM1000	1	21,23 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Digi-Key	1528-1040-ND	Adafruit Pro Trinket 3 V	1	8,25 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Conrad	1417697-62	Kohleschicht-Widerstand 10 kΩ	1	0,06 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Conrad	1417644-62	Kohleschicht-Widerstand 180 Ω	4	0,06 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Conrad	180134-62	LED Grün	2	0,25 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Conrad	184756-62	LED Rot	2	0,34 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	Conrad	251007-62	Emmerich LiIon Akku ICR-18650 NH-SP mit Kabel	1	9,99 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	EXP-Tech	EXP-R15-577	Adafruit Pro Trinket LiPoly/LiIon Backpack	1	5,55 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	EXP-Tech	EXP-R15-1157	Adafruit CP2104 Friend	1	6,45 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	EXP-Tech	EXP-R15-419	Breadboard-friendly SPDT Slide Switch	1	1,20 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	EXP-Tech	EXP-R15-1074	JST 2-Pin Cable	1	0,80 €
<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	AISLER	-	Printed Circuit Board	1	7,74 €
					Gesamtpreis für einen Tag:	45,15 €
					Gesamtpreis für einen Anker:	56,24 €

Tabelle 4.4.: Materialkosten pro Tag bzw. Anker.



(a) Erster Prototyp auf einer Steckplatine.



(b) Zweiter Prototyp auf einem Lochstreifen.

Abbildung 4.5.: Die ersten zwei Prototypen der UWB–Module.

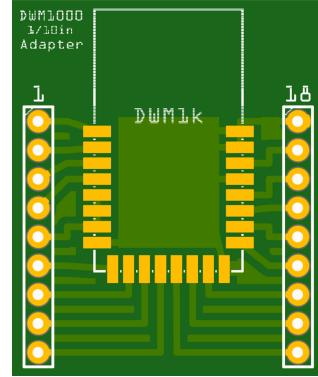


Abbildung 4.6.: PCB–Adapterboard für den DWM1000.

Während dem Aufbau des ersten Prototypen wurde ein PCB–Adapterboard, siehe Abbildung 4.6, für den DWM1000 bestellt. Dieses PCB–Adapterboard wurde ebenfalls dem GitHub–Projekt [20] entnommen. Mit diesem wurde dann ein zweiter Prototyp aufgebaut, siehe Abbildung 4.5b, der zusätzlich ohne eine externe Energieversorgung betrieben werden konnte. Mittels der beiden Prototypen war ein erster Nachrichtenaustausch bzw. eine erste Entfernungsmessung möglich. Der Nachrichtenaustausch wurden mit den Beispielprogrammen *BasicReceiver* und *BasicSender* erprobt, die Entfernungsmessung mit *RangingAnchor* und *RangingTag*.

**4.4.4. Elektrischer Aufbau****4.4.5. Platinendesign****4.4.6. Steuersoftware****4.4.7. Entfernungsmessung und Auswertung**

Der Überblick und Vergleich der verschiedenen Abstandsbestimmungsverfahren erfolgt über eine klassische Literatursuche, siehe [2, 21, 22].

isaacs2009optimal - Optimal sensor placement for time difference of arrival localization

**4.4.8. Kalibrierung**

Das Verfahren zur Kalibrierung der Antennenverzögerung kann ebenfalls der Hersteller-Dokumentation entnommen werden, siehe [23]. Hierfür muss ein Versuchsaufbau erstellt werden. Zusätzlich wird eine Anpassung der Steuer-/Auswerte-Software notwendig, um die Verzögerung zu berechnen.

Die Genauigkeitsbestimmung der Entfernungsmessung mit LOS und NLOS wird über einen Versuchsaufbau realisiert. Hierfür werden mehrere Messreihen in verschiedenen Abständen aufgenommen und mit der tatsächlichen Entfernung verglichen.



# **5.**

---

## **RO-SLAM**

---

### **5.1. Roboterplattform**

### **5.2. Softwarearchitektur**

#### **5.2.1. ROS Module**

#### **5.2.2. MRPT Module**



# **6.**

---

## **Evaluation**

---

**6.1. Versuchsaufbau**

**6.2. Ergebnisse und Auswertung**



# **7.**

---

## **Zusammenfassung und Ausblick**

---

**7.1. Zusammenfassung**

**7.2. Ausblick**



---

# Literaturverzeichnis

---

- [1] Robin Murphy. *Introduction to AI robotics*. MIT press, 2000.
- [2] Jin-Shyan Lee, Yu-Wei Su und Chung-Chou Shen. „A comparative study of wireless protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi“. In: *Industrial Electronics Society, 2007. IECON 2007. 33rd Annual Conference of the IEEE*. Ieee. 2007, S. 46–51.
- [3] Julius Smith und Jonathan Abel. „Closed-form least-squares source location estimation from range-difference measurements“. In: *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing* 35.12 (1987), S. 1661–1669.
- [4] MWM Gamini Dissanayake u. a. „A solution to the simultaneous localization and map building (SLAM) problem“. In: *IEEE Transactions on robotics and automation* 17.3 (2001), S. 229–241.
- [5] George Kantor und Sanjiv Singh. „Preliminary results in range-only localization and mapping“. In: *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA '02. IEEE International Conference on*. Bd. 2. Ieee. 2002, S. 1818–1823.
- [6] Jose-Luis Blanco, Javier González und Juan-Antonio Fernández-Madrigal. „A pure probabilistic approach to range-only SLAM“. In: *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*. IEEE. 2008, S. 1436–1441.
- [7] Jose-Luis Blanco, Juan-Antonio Fernández-Madrigal und Javier González. „Efficient probabilistic range-only SLAM“. In: *Intelligent Robots and Systems, 2008. IROS 2008. IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2008, S. 1017–1022.
- [8] Anton Ledergerber, Michael Hamer und Raffaello D'Andrea. „A robot self-localization system using one-way ultra-wideband communication“. In: *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*. IEEE. 2015, S. 3131–3137.

- [9] Robert J Fontana. „Recent system applications of short-pulse ultra-wideband (UWB) technology“. In: *IEEE Transactions on microwave theory and techniques* 52.9 (2004), S. 2087–2104.
- [10] Amr Eltaher und Thomas Kaiser. „Positioning of robots using ultra-wideband signals“. In: *IRA workshop on Advanced control and Diagnosis*. 2004.
- [11] V Lakkundi. „Ultra wideband communications: History, evolution and emergence“. In: *Acta Polytechnica* 46.4 (2006).
- [12] Roberto Aiello und Anuj Batra. *Ultra wideband systems: technologies and applications*. Newnes, 2006.
- [13] Terence W Barrett und VA Vienna. „Technical features, history of ultra wideband communications and radar: part I, UWB communications“. In: *Microw J* 44.1 (2001), S. 22–56.
- [14] Liuqing Yang und G. B. Giannakis. „Ultra-wideband communications: an idea whose time has come“. In: *IEEE Signal Processing Magazine* 21.6 (Nov. 2004), S. 26–54. ISSN: 1053-5888. DOI: 10.1109/MSP.2004.1359140.
- [15] R. G. *Transmission and reception system for generating and receiving base-band pulse duration pulse signals without distortion for short base-band communication system*. US Patent 3,728,632. Apr. 1973. URL: <https://www.google.com/patents/US3728632>.
- [16] Charles Fowler, John Entzminger, JAMES Corum u.a. „Assessment of ultra-wideband(UWB) technology“. In: *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine* 5.11 (1990), S. 45–49.
- [17] *UWB Regulations. A Summary of Worldwide Telecommunications Regulations governing the use of Ultra Wideband*. Version 1.0. DecaWave Limited, 2015. URL: [https://www.decawave.com/sites/default/files/apr001\\_uwb\\_worldwide\\_regulations\\_summary.pdf](https://www.decawave.com/sites/default/files/apr001_uwb_worldwide_regulations_summary.pdf) (besucht am 13.12.2017).
- [18] *DW1000 Datasheet*. Version 2.12. DecaWave Limited, 2016. URL: <https://www.decawave.com/application-notes>.
- [19] *DWM1000 Datasheet*. Version 1.6. DecaWave Limited, 2016. URL: <https://www.decawave.com/application-notes>.
- [20] Thomas Trojer. *thotro/arduino-dw1000. A library that offers functionality to use Decawave's DW1000 chips/modules with Arduino*. 2015. URL: <https://github.com/thotro/arduino-dw1000>.

- [21] F Herranz u. a. „Studying of WiFi range-only sensor and its application to localization and mapping systems“. In: *IEEE ICRA*. 2010, S. 115–120.
- [22] Reza Zekavat und R Michael Buehrer. *Handbook of position location: Theory, practice and advances*. Bd. 27. John Wiley & Sons, 2011.
- [23] *Antenna delay calibration of DW1000-based products and systems*. Version 1.01. DecaWave Limited, 2014. URL: [https://www.decawave.com/sites/default/files/aps014-antennadelaycalibrationofdw1000-basedproductsandsystems\\_v1.01.pdf](https://www.decawave.com/sites/default/files/aps014-antennadelaycalibrationofdw1000-basedproductsandsystems_v1.01.pdf) (besucht am 13.12.2017).



# **Anhang**



# A.

---

## Blindtext Kapitel

---

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

### A.1. Blindtext Abschnitt

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Das hier ist der zweite Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informa-

tionen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Und nun folgt – ob man es glaubt oder nicht – der dritte Absatz. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Nach diesem vierten Absatz beginnen wir eine neue Zählung. Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.

Dies hier ist ein Blindtext zum Testen von Textausgaben. Wer diesen Text liest, ist selbst schuld. Der Text gibt lediglich den Grauwert der Schrift an. Ist das wirklich so? Ist es gleichgültig, ob ich schreibe: „Dies ist ein Blindtext“ oder „Huardest gefburn“? Kjift – mitnichten! Ein Blindtext bietet mir wichtige Informationen. An ihm messe ich die Lesbarkeit einer Schrift, ihre Anmutung, wie harmonisch die Figuren zueinander stehen und prüfe, wie breit oder schmal sie läuft. Ein Blindtext sollte möglichst viele verschiedene Buchstaben enthalten und in der Originalsprache gesetzt sein. Er muss keinen Sinn ergeben, sollte aber lesbar sein. Fremdsprachige Texte wie „Lorem ipsum“ dienen nicht dem eigentlichen Zweck, da sie eine falsche Anmutung vermitteln.