



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg  
*Hamburg University of Applied Sciences*

# Bachelorthesis

Krystian Bolz

Bewertung von UHF RFID Transpondern auf  
Grundlage von Messungen in einer  
automatisierten Messkammer

Krystian Bolz

Bewertung von UHF RFID Transpondern auf  
Grundlage von Messungen in einer automatisierten  
Messkammer

Bachelorthesis eingereicht im Rahmen der Bachelorprüfung  
im Studiengang Informations- und Elektrotechnik  
am Department Informations- und Elektrotechnik  
der Fakultät Technik und Informatik  
der Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg

Betreuender Prüfer : Prof. Dr.-Ing. Jürgen Vollmer  
Zweitgutachter : Prof. Dr.-Ing. Ralf Wendel

Abgegeben am 12. April 2018

**Krystian Bolz**

**Thema der Bachelorthesis**

Bewertung von UHF RFID Transpondern auf Grundlage von Messungen in einer automatisierten Messkammer

**Stichworte**

Automatisierung, Messplatz, RFID, UHF

**Kurzzusammenfassung**

Diese Arbeit dokumentiert die Automatisierung und Inbetriebnahme einer hausgefertigten Absorberkammer. In der Messkammer wurden verschiedene UHF RFID Transponder über verschiedene Parameter vermessen und verglichen. Die Transponder wurden mittels eines kommerziellen RFID Readers angesprochen. Die gesamten Messungen wurden durch ein C# Programm von einem Computer gesteuert. Die Ergebnisse der Messungen wurden abgespeichert und Auswertungsmethoden angewandt. Im beschriebenen Aufbau kann der Transponder um eine Achse gedreht werden um aus verschiedenen Winkeln messen zu können. Des Weiteren kann der Reader seine Sendeleistung variieren, um eine Veränderung der Distanz zwischen Reader und Tag nachzubilden.

**Krystian Bolz**

**Title of the paper**

Evaluation of UHF RFID Transponder based in measurements in an automated measuring chamber

**Keywords**

Automation, Measurement chamber, RFID, UHF

**Abstract**

This thesis documents the automation and initial operation of a measuring chamber. In this chamber different types of UHF RFID Transponder were measured and compared. The transponder were addressed with a commercial UHF RFID Reader. The setup was actuated by a C# computer program. The measured values were stored and evaluated with different methods. In the described setting the Transponder can be turned around on one axis. Furthermore the reader can change its output power to emulate further distances between the transponder and the reader.

# Inhaltsverzeichnis

<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>7</b>
<b>1 Einführung</b>	<b>9</b>
1.1 Motivation . . . . .	9
1.2 Aufgabenstellung . . . . .	10
<b>2 Theoretische Grundlagen</b>	<b>12</b>
2.1 Antennentheorie . . . . .	12
2.1.1 Strahlungscharakteristik . . . . .	12
2.1.2 Antennengewinn . . . . .	14
2.1.3 Strahlungsdichte . . . . .	14
2.1.4 Äquivalente isotrope Strahlungsleistung . . . . .	15
2.1.5 Fernfeld . . . . .	15
2.1.6 Antennenimpedanz . . . . .	16
2.1.7 Antennenpolarisation . . . . .	16
2.2 UHF RFID . . . . .	18
2.2.1 Codierung und Modulation . . . . .	19
2.2.2 Aufbau eines Transponders . . . . .	20
2.2.3 Kommunikation . . . . .	21
2.2.4 Komplexe Leistungsanpassung . . . . .	22
<b>3 Analyse</b>	<b>24</b>
3.1 Materialanalyse . . . . .	24
3.1.1 UHF RFID Reader . . . . .	25
3.1.2 SMA Kabel . . . . .	25
3.1.3 Antenne . . . . .	26
3.1.4 Motor und Motoransteuerung . . . . .	26
3.1.5 Messkammer . . . . .	26
3.1.6 Transponder . . . . .	27
3.1.7 Übertragungsweg . . . . .	28

---

3.2	Aufgabenanalyse . . . . .	29
3.2.1	Messung . . . . .	29
3.2.2	Auswertung . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Design</b>	<b>34</b>
4.1	Mechanischer Aufbau . . . . .	34
4.2	Software . . . . .	36
4.2.1	Programmstruktur . . . . .	36
4.2.2	Dateiformate . . . . .	37
4.2.3	Task Management . . . . .	39
4.2.4	Reader Kommunikation . . . . .	39
4.2.5	Messauswertung . . . . .	40
<b>5</b>	<b>Realisierung</b>	<b>41</b>
5.1	Software . . . . .	41
5.2	Messungen . . . . .	42
5.2.1	Feststellung von Ladungsspeicherung . . . . .	42
5.2.2	Evaluierung der Entfernungsberechnung . . . . .	43
5.2.3	Evaluierung der Strahlungscharakteristik . . . . .	46
5.2.4	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse . . . . .	50
<b>6</b>	<b>Diskussion</b>	<b>52</b>
6.1	Bewertung der Ergebnisse . . . . .	52
6.1.1	Evaluierung der Entfernungsberechnung . . . . .	52
6.1.2	Evaluierung der Strahlungscharakteristik . . . . .	52
6.1.3	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse . . . . .	53
6.1.4	Zusammenfassung . . . . .	53
6.2	Ausblick . . . . .	54
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>55</b>
7.1	Abkürzungsverzeichnis . . . . .	55
7.2	Abbildungen . . . . .	57
7.2.1	Messkammer . . . . .	57
7.2.2	Simulierte Antennendiagramme . . . . .	59
7.2.3	Messungen . . . . .	62
7.3	Software Bedienungsanleitung . . . . .	76
7.4	Beispielhaftes Messprotokoll . . . . .	84
	<b>Quellenverzeichnis</b>	<b>96</b>

# Tabellenverzeichnis

3.1	Simulationenwerte der verschiedenen Antennendesigns unter Ansys HFSS . . .	28
3.2	Transponderdesign angenommene Dämpfung . . . . .	28
5.1	Entfernungsberechnung Distanzwerte . . . . .	45
5.2	Maximale Entfernung für eine überwiegend erfolgreiche Kommunikation mit dem Messaufbau . . . . .	45
5.3	Maximale Entfernung für eine überwiegend erfolgreiche Kommunikation mit 500mW ERP . . . . .	45
5.4	Strahlungsdiagramme der Tags mit zwei Messungen . . . . .	51
5.5	Strahlungsdiagramm Differenzen zur Simulation der Tags mit zwei Messungen	51

# Abbildungsverzeichnis

2.1	Antennen Ersatzschaltbild . . . . .	12
2.2	Beispielhafte Strahlungscharakteristik . . . . .	13
2.3	Antennenpolarisation . . . . .	18
2.4	Schematische Darstellung Transponder . . . . .	21
2.5	Schematische Darstellung des Eingangssystems eines Tags . . . . .	21
2.6	Zeitlicher Ablauf eines 'Inventory' . . . . .	22
3.1	Fotografie der Messkammer . . . . .	27
3.2	Übertragungsweg . . . . .	29
3.3	Freiraumdämpfung 868 MHz . . . . .	33
3.4	Freiraumdämpfung bei Variation der Sendeleistung . . . . .	33
4.1	Messaufbau . . . . .	35
4.2	Fotografie der Messkammer mit Messaufbau . . . . .	35
4.3	Klassendiagramm des erstellten Programms . . . . .	37
4.4	Schematische Darstellung der Dateistruktur . . . . .	38
5.1	Beispielhafte emulierte Entfernungen beim Erhöhen oder Senken der Sendeleistung . . . . .	43
5.2	CD1s Strahlungsdiagramm 'Read' . . . . .	47
5.3	CD1s erfolgreiche Kommunikationen in Polarkoordinaten . . . . .	48
5.4	CD1s Strahlungsdiagramm Read . . . . .	49
5.5	CD1s Strahlungsdiagramm Differenz . . . . .	49
5.6	BD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . . .	51
7.1	Messbox Vorderansicht Zeichnung . . . . .	57
7.2	Messbox Draufsicht Zeichnung . . . . .	58
7.3	Messbox Seitenansicht Zeichnung . . . . .	58
7.4	Simuliertes Antennendiagramm 3D vom BD1s . . . . .	59
7.5	Simuliertes Antennendiagramm 2D vom BD1s . . . . .	59
7.6	Simuliertes Antennendiagramm 3D vom CD1s . . . . .	60
7.7	Simuliertes Antennendiagramm 2D vom CD1s . . . . .	60
7.8	Simuliertes Antennendiagramm 3D vom RD1s . . . . .	61

---

7.9	Simuliertes Antennendiagramm 2D vom RD1s . . . . .	61
7.10	Entfernungsberechnung Inventory BD1s . . . . .	62
7.11	Entfernungsberechnung Read BD1s . . . . .	63
7.12	Entfernungsberechnung Write BD1s . . . . .	63
7.13	Entfernungsbereich Inventory BD1s . . . . .	64
7.14	Entfernungsbereich Read BD1s . . . . .	64
7.15	Entfernungsbereich Write BD1s . . . . .	65
7.16	Entfernungsberechnung Inventory CD1s . . . . .	65
7.17	Entfernungsberechnung Read CD1s . . . . .	66
7.18	Entfernungsbereich Inventory CD1s . . . . .	66
7.19	Entfernungsbereich Read CD1s . . . . .	67
7.20	Entfernungsberechnung Inventory RD1s . . . . .	67
7.21	Entfernungsberechnung Read RD1s . . . . .	68
7.22	Entfernungsberechnung Write RD1s . . . . .	68
7.23	Entfernungsbereich Inventory RD1s . . . . .	69
7.24	Entfernungsbereich Read RD1s . . . . .	69
7.25	Entfernungsbereich Write RD1s . . . . .	70
7.26	BD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . .	70
7.27	BD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Differenzen . . . . .	71
7.28	BD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Differenzen . . . . .	71
7.29	CD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . .	72
7.30	CD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . .	72
7.31	CD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Differenzen . . . . .	73
7.32	CD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Differenzen . . . . .	73
7.33	RD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . .	74
7.34	RD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Vergleich im Bereich -90 bis 90 Grad . . . .	74
7.35	RD1s Strahlungsdiagramm 'Read' Differenzen . . . . .	75
7.36	RD1s Strahlungsdiagramm 'Write' Differenzen . . . . .	75

# 1 Einführung

Das Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS) in Dresden entstand 2003 aus dem 1992 gegründeten Dresdner Institutsteils des Fraunhofer-Instituts für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme Duisburg. Das Institut unterteilt sich in sechs Geschäftsfelder, von denen sich das Geschäftsfeld 'Drahtlose Mikrosysteme' (WMS) unter anderem mit der Entwicklung von 'radio-frequency identification' (RFID) Systemen beschäftigt. Außerdem werden RFID Transponder (Tags) vom WMS Geschäftsfeld erforscht und entwickelt, welche zusätzlich mit Sensoren ausgestattet sind. Es wird sowohl an passiven, als auch an aktiven Tags geforscht. Mithilfe der RFID Technologie und den Sensoren ist es möglich, berührungsfrei Sensordaten auszulesen. Durch passive Tags besteht außerdem die Möglichkeit, dies batterieelos zu tun. Des Weiteren können batteriegestützte Transpondersysteme Messdaten unabhängig von einem RFID Reader (Reader) aufnehmen und abspeichern. Diese können dann bei Bedarf ausgelesen werden.

RFID Transponder mit Sensoren haben den Vorteil, an Orten messen zu können, an welchen kein direkter Zugang besteht oder die nachträgliche Platzierung eines Sensors nicht möglich ist. So können zum Beispiel Tags in Werkstoffe und Materialien eingegossen werden, um im Inneren die Feuchtigkeit oder Temperatur messen zu können.

## 1.1 Motivation

Im Zuge der Entwicklung von RFID Sensoren werden die Tags für verschiedene Umgebungszenarien und Anwendungsfälle nicht nur mit Sensoren ausgestattet, sondern es werden zusätzlich verschiedene Antennenformen, integrierte Schaltkreise 'integrated circuits' (ICs) und dazu passende Außenbeschaltungen entwickelt und erprobt. Um das Zusammenspiel der verschiedenen Elemente einheitlich bewerten zu können, soll eine Absorberkammer als Messaufbau in Betrieb genommen werden. Damit der Messaufbau möglichst effizient und autonom benutzt werden kann, wird verlangt, diesen zu automatisieren und eine geeignete Datenauswertung bereit zu stellen. Aus den Messresultaten sollen anschließend die gemessenen Designs miteinander verglichen werden, um so Anpassungsfehler oder bessere Designs zu identifizieren. Des Weiteren soll es möglich sein, durch die Modifizierung der Messkammer, durch zum Beispiel Störquellen, die Störfestigkeit der Systeme zu überprüfen.

Dadurch kann das Betreiben der Tags in verschiedenen Umgebungen unter Testbedingungen ermöglicht werden. Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit sind dabei wichtige Kriterien.

## 1.2 Aufgabenstellung

Für die Messungen steht eine bereits fertig gebaute und auf die Anwendung abgestimmte Absorberkammer zur Verfügung. Diese wurde im Rahmen einer Diplomarbeit (Braun, 2011) ausgelegt und den Ergebnissen der Arbeit entsprechend fertiggestellt. Damit die Messkammer für die Bewertung von Tag Designs benutzt werden kann, soll eine grafische Benutzerschnittstelle 'graphical user interface' (GUI) programmiert, sowie Methoden zur Auswertung der Messdaten evaluiert und angewandt werden. Die Funktionalität der GUI soll durch erste Messungen überprüft werden. Damit die GUI möglichst universell einsetzbar ist, soll sie softwareseitig auf einem 'Low-Level-Stack' (LLS) aufbauen, welcher hausintern entwickelt wurde und verschiedene RFID Readerhardware ansteuern kann. Da kommerzielle Reader nicht immer die gleichen Funktionen und Genauigkeiten haben, beeinflussen sie die Güte der Messung. Aus diesem Grund ist die Unabhängigkeit vom Reader eine wichtige Eigenschaft für den späteren Nutzen. Ziel ist es, die Parameter, über welche die Messung gefahren werden soll, abspeichern zu können, um auf der Softwareseite die Konstanz der Tests zu garantieren. Außerdem soll eine Datei erstellt werden, in welcher die Messdaten abgespeichert werden.

Die aus den Messungen gewonnenen Daten sollen durch geeignete Mittel grafisch darstellbar sein. Es soll eine Funktion bereitgestellt werden, mit der für alle Messungen ein Messprotokoll erstellt werden kann. Dieses Protokoll soll alle wichtigen Daten und Graphen enthalten. Die möglichen Auswertungsmethoden sollen im Laufe der Arbeit festgelegt werden.

Daraus erschließen sich folgende Minimalziele:

- Mechanisches Verfahren des RFID Tags
- Änderung der Sendeleistung
- Vorgabe der Messparameter
- Überprüfen der Messparameter mit definierten Grenzen
- Überprüfen, ob die Kommunikation mit dem Tag erfolgreich war
- Speichern der Messdaten
- Automatische Auswertung der Ergebnisse

- Grafische Darstellung der Ergebnisse

Des Weiteren wurden für diese Arbeit folgende Ziele als optional definiert:

- Änderung von Modulation, Zeitparametern und Trägerfrequenz
- Abspeichern der Graphen in einem geeigneten Format
- Zeitabschätzung der Messdauer

## 2 Theoretische Grundlagen

Im Folgenden wird die Theorie, welche zum Verständnis der UHF RFID Technologie notwendig ist, erläutert. Des Weiteren wird auf die theoretisch messbaren und wichtigen Werte eines Tags eingegangen.

### 2.1 Antennentheorie

Antennen sind passive elektronische Bauelemente. Eine Antenne ist im grundsätzlich elektrotechnischen Aufbau ein Schwingkreis aus einem komplexen Widerstand und reellen Anteilen durch Leitungen (Finkenzeller, 2012, Seite 139). Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises liegt im Hochfrequenzbereich meist zwischen 30 kHz und 300 GHz (Kark, 2010, Seite 1). Antennen sind so konstruiert, dass die Energie am Eingang möglichst effizient in Form von elektromagnetischen Wellen abgestrahlt wird. Neben dem Schwingkreis  $X$  wird eine Antenne in einem Ersatzschaltbild oft noch mit einem Leitungswiderstand  $R_V$  und einem Strahlungswiderstand  $R_S$  dargestellt (Abbildung 2.1). In der weiteren Arbeit sind die Strahlungscharakteristik, der Antennengewinn und die Antennenimpedanz die Eigenschaften, welche für die Berechnungen und Darstellungen benötigt werden. In diesem Kapitel wird näher auf diese Eigenschaften eingegangen.

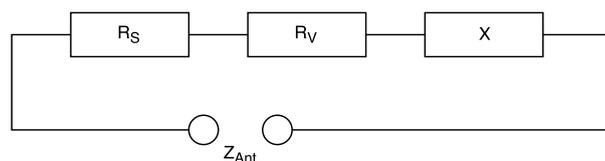


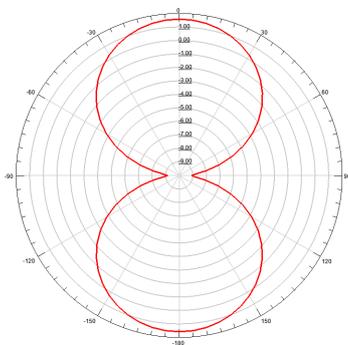
Abbildung 2.1: Ersatzschaltbild einer Antenne mit komplexem Widerstand ( $X$ ), Leitungs- ( $R_V$ ) und Strahlungswiderstand ( $R_S$ ).

#### 2.1.1 Strahlungscharakteristik

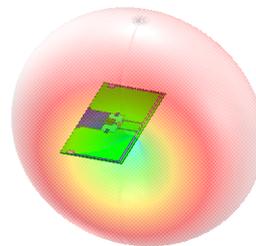
Der Strahlungscharakteristik lässt sich entnehmen, in welche Richtungen die Antenne die eingespeiste Leistung abstrahlt. Es lässt sich also für jeden Raumwinkel bestimmen, wie viel

Leistung die Antenne abstrahlt und so die Richtcharakteristik abbilden. Des Weiteren ist die Strahlungscharakteristik für das Empfangen und Senden dieselbe, da es sich um ein rein passives Bauelement handelt. Daraus folgt, dass die Richtung, in welcher die Antenne die meiste Leistung abstrahlt, sie auch am besten Leistung aufnehmen kann.

Die Strahlungscharakteristik einer Antenne ist häufig in einem Antennendiagramm dargestellt. Aus einem dreidimensionalen Antennendiagramm lässt sich ein erster Eindruck des Abstrahlverhaltens der Antenne im Raum gewinnen (vgl. Abbildung 2.2b). Um nun die Antenne in einer gewünschten Ebene genauer zu betrachten, gibt es auch zweidimensionale Antennendiagramme wie beispielhaft unter Abbildung 2.2a. Diesem Diagramm kann nun die Abstrahlcharakteristik der Antenne in einer Ebene entnommen werden. Die Diagramme sind meist in einem Polarkoordinatensystem beziehungsweise Kugelkoordinatensystem abgebildet. Die Ausbeulungen in den Diagrammen werden als Keulen bezeichnet. Meist gibt es eine Hauptkeule, welche das Abstrahlmaximum enthält. Des Weiteren gibt es die Rückkeule, welche das Abstrahlverhalten gegenüber der Hauptkeule abbildet. Die Abstrahlungen in Richtungen, in welche nicht abgestrahlt werden soll, nennt man Nebenkeulen. In den Beispielabbildungen sind keine Nebenkeulen vorhanden. Die Achse wird oft logarithmisch in Dezibel angegeben. Dezibel ist eine oft genutzte Einheit um Leistungen oder Leistungsverhältnisse anzugeben. Die Verstärkung in Dezibel errechnet sich zum Beispiel durch Formel 2.1.1. Durch die Umrechnung werden auch kleinere Keulen, wie die störenden Nebenkeulen, sichtbar.



(a) 2D Strahlungscharakteristik



(b) 3D Strahlungscharakteristik

Abbildung 2.2: Beispielhafte Strahlungscharakteristik eines vom Fraunhofer IPMS entwickelten Transponders (BD1s).

$$G[dB] = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{P_{Genutzt}[W]}{P_{Eingespeist}[W]} \right) \quad (2.1.1)$$

### 2.1.2 Antennengewinn

Der Antennengewinn ist der Leistungsgewinn einer Antenne gegenüber einer Bezugsantenne. Diese Bezugsantenne ist entweder der isotrope Strahler oder eine  $\lambda/2$ -Dipolantenne, auch Halbwellendipol genannt. Der isotrope Strahler ist ein idealisierter Strahler, welcher seine Energie in alle Richtungen gleich ausgeprägt abstrahlt. Der Halbwellendipol besitzt im Gegensatz zum isotropen Strahler bereits eine Richtcharakteristik, dadurch hat diese Antenne bereits einen Antennengewinn gegenüber dem isotropen Strahler. Für beide Bezugsantennen gibt es eine definierte Einheit. Ist die Bezugsantenne der isotrope Strahler wird der Antennengewinn in dBi angegeben. Handelt es sich bei der Bezugsantenne um eine  $\lambda/2$ -Dipolantenne so lautet die Einheit dBd. Zwischen beiden gibt es einen festen mathematischen Zusammenhang welcher in Formel 2.1.2 dargestellt ist. Der Antennengewinn beschreibt den Gewinn für den Punkt des Antennendiagramms, in welchem die Antenne maximal abstrahlt. Dies bedeutet, dass Antennen mit einem höheren Antennengewinn in ihrem Idealwinkel mehr Energie an den Fußpunkt, also die Antennenanschlüsse, abgeben können. Außerdem kann die gesendete Leistung in der idealen Abstrahlrichtung gegenüber dem isotropen Strahler verstärkt werden. Weiterhin wird bei der Berechnung von konkreten Leistungen teilweise auch der einheitenlose Antennengewinnfaktor verwendet. Dieser lässt sich aus oder in den Antennengewinn umrechnen wie in Formel 2.1.3 dargestellt.

$$G_{i \text{ dB}}[\text{dBi}] = G_{d \text{ dB}}[\text{dBd}] + 2,15 \text{ dB} \quad (2.1.2)$$

$$G = 10 \frac{G[\text{dB}]}{10} \quad (2.1.3)$$

### 2.1.3 Strahlungsdichte

Die Strahlungsdichte gibt an, wie viel Strahlungsleistung auf einer Fläche verteilt ist. Die Strahlungsdichte wird durch Formel 2.1.4 berechnet. Sie ist abhängig von der Entfernung zur Antenne, der eingespeisten Leistung und dem Antennengewinn. Wobei die Variable  $G_i$  den Antennengewinnfaktor beschreibt, welcher sich durch Formel 2.1.3 aus dem Antennengewinn in dB berechnen lässt. Die Strahlungsdichte ist bei einem isotropen Strahler in einer definierten Entfernung vollkommen gleich verteilt (Finkenzeller, 2012, Seite 132). Reale Antennen strahlen jedoch ungleichmäßig ab und erzeugen so je nach Position zur Antenne verschiedene Strahlungsdichten.

$$S \left[ \frac{W}{m^2} \right] = \frac{P_s[W] \cdot G_i}{4\pi \cdot r^2[m^2]} = \frac{EIRP[W]}{4\pi \cdot r^2[m^2]} \quad (2.1.4)$$

Strahlungsdichte

### 2.1.4 Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

Die äquivalente isotrope Strahlungsleistung 'equivalent isotropically radiated power' (EIRP) beschreibt, mit welcher Leistung ein isotroper Strahler gespeist werden müsste um in allen Richtungen die gleiche Strahlungsdichte wie das Maximum der Vergleichsantenne zu erreichen (NXP, 2008, vgl. Seite 15). Die EIRP ist das Produkt der eingespeisten Leistung und dem dimensionslosen Antennengewinnfaktor. Die Umrechnung des Antennengewinns in den Antennengewinnfaktor ist in Formel 2.1.3 beschrieben. Wie in Formel 2.1.5 zu sehen ist der Antennengewinnfaktor und die eingespeiste Leistung proportional zur EIRP. Die EIRP ist ein Maß, welches in Vorschriften und Standards als Mittel verwendet wird, um Strahlungsleistungen zu begrenzen. In einigen Vorschriften wird außerdem die effektive Strahlungsleistung 'effective radiated power' (ERP) als Angabe verwendet, welche eine  $\lambda/2$ -Dipolantenne als Bezugsantenne nutzt. Diese hat wie unter Formel 2.1.6 zu sehen einen direkten Zusammenhang mit der EIRP. Die EIRP und die ERP unterscheiden sich, wie der Antennengewinn, lediglich durch die Bezugsantenne.

$$EIRP[W] = P_s[W] \cdot G_i \quad (2.1.5)$$

Äquivalente isotrope Strahlungsleistung

$$ERP[W] = EIRP[W] \cdot 1,64 \quad (2.1.6)$$

Effektive Strahlungsleistung

### 2.1.5 Fernfeld

Das Fernfeld definiert die Grenze, ab welcher die elektromagnetischen Wellen eine nahezu ebene Phasenfront bilden und lokal senkrecht zum magnetischen Feld stehen (Kark, 2010, Seite 194). Es stellt eine unüberwindbare Grenze für induktiv gekoppelte Systeme dar, da die elektromagnetische Welle komplett von der Antenne gelöst ist (Finkenzeller, 2012, Seite 131). Das Fernfeld wird abhängig von den Maßen der Antenne und der Übertragungsfrequenz bestimmt. Durch Formel 2.1.7 ist das Fernfeld näherungsweise zu berechnen. Das Fernfeld beschreibt außerdem die Grenze, ab welcher die magnetische Feldstärke logarithmisch mit 20 dB/Dekade abfällt (Finkenzeller, 2012, vgl. Abb. 4.59 Seite 132). Dadurch lässt sich die Dämpfung im Freiraum erst ab dem Fernfeld durch Formel 3.2.1 berechnen.

$$R[m] > \frac{2 \cdot D^2[m^2]}{\lambda[m]} \quad (2.1.7)$$

Fernfeld

$D = \text{Maximalbreite der Antenne}$

### 2.1.6 Antennenimpedanz

Die Antennenimpedanz beschreibt den komplexen Widerstandswert einer Antenne. Die Antennenimpedanz ist frequenzabhängig und daher werden Schmalbandantennen, welche in der RFID Technik genutzt werden, immer für einen bestimmten Frequenzbereich ausgelegt. Dadurch kann das Maximum an Energie aus der Antenne in die Schaltung übertragen werden (vgl. Kapitel 2.2.4). Je fehlangepasster das System ist, desto mehr Energie wird reflektiert.

Da Antennen auch noch andere Eigenschaften haben, welche Vor- oder Nachteile mit sich bringen können, beispielsweise Abmessungen, kann die Antennenimpedanz nachträglich durch ein Anpassungsnetzwerk an die Impedanz der weiteren Beschaltung angepasst werden.

### 2.1.7 Antennenpolarisation

Antennen haben grundsätzlich zwei unterschiedliche Polarisierungen, welche beide Vor- und Nachteile haben. Beide Typen haben verschiedene Wellenformen im Raum und beeinflussen dadurch die Reichweite und die Robustheit gegenüber Bewegung in einem Sender Empfänger System.

#### lineare Polarisation

Linear polarisierte Antennen besitzen die Eigenschaft, ihre elektromagnetischen Wellen nur in einer Ebene abzustrahlen. Man unterscheidet zwischen horizontaler und vertikaler Polarisation je nach Ausrichtung der Welle zum Erdboden. Aus dem genannten Abstrahlverhalten folgt, dass es bei einer linear polarisierten Empfangs- und Sendeantenne zu einem signifikanten Leistungsverlust, bis zu totaler destruktiver Interferenz kommen kann. Dies passiert, wenn der Winkel der Antennenpolarisation in der YZ-Ebene zueinander 90 Grad verschoben ist, wie in Abbildung 2.3 in der schwarzen und der magentafarbenen Kurve zu sehen.

Der Vorteil der linear polarisierten Antennen ist, dass sie bei optimaler Ausrichtung eine vergleichsweise hohe Reichweite haben.

### **zirkulare Polarisation**

Zirkular polarisierte Antennen bilden durch die Drehung des elektrischen Feldes auf der Y- und Z-Achse für jeden Winkel der Ebene eine gleich ausgebildete Welle. Diese Polarisation ist im Allgemeinen robuster gegenüber linear polarisierten Antennen als ein vergleichbares System aus zwei linear polarisierten Antennen. Die zirkulare Polarisation wird erreicht durch zwei linear polarisierte Wellen, welche die gleiche Amplitude haben und im 90 Grad Winkel zueinander stehen. Die Wellen unterscheiden sich lediglich durch eine Phasenverschiebung von 90 Grad. Das hat zur Folge, dass sich eine zirkulare Welle ausbildet. Diese kann, je nachdem welche lineare Komponente verschoben wird, mit oder gegen den Uhrzeigersinn drehen. In [Abbildung 2.3](#) ist ein Beispiel einer im Uhrzeigersinn zirkular polarisierten Welle abgebildet.

Bei einer zirkular polarisierten Sendeantenne ist dadurch die Lage einer linear polarisierten Empfangsantenne in der Ebene nicht mehr ausschlaggebend für die empfangene Leistung und das Empfangen oder Senden kann robuster werden. Der Nachteil dieser Polarisation ist, dass bei der Kopplung von einer zirkular und einer linear polarisierten Antenne mit einem Polarisationsverlust von etwa 3 dB zu rechnen ist ([Finkenzeller, 2012](#), Seite 135).

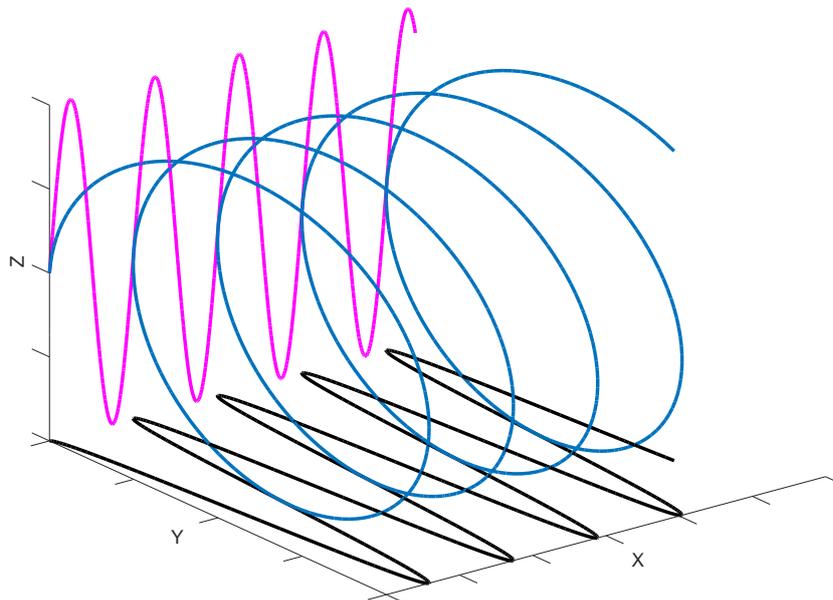


Abbildung 2.3: Abbildung einer horizontal (schwarz) und vertikal (magenta) linear polarisierten Welle. Außerdem die Überlagerung beider Wellen zu einer zirkular polarisierten Welle (blau).

## 2.2 UHF RFID

Die RFID Technik wird für das drahtlose Identifizieren von verschiedensten Gütern immer wichtiger (Tamm und Tribowski, 2010, Seite 2). Um Waren oder Warentransport verfolgen zu können, macht es diese Technik möglich, Gütern eindeutig zugeordnete Identifikationsnummern automatisiert drahtlos zu erfassen und auszuwerten.

Die Technik ist durch Modifikationen des Chips und der Erweiterbarkeit des Protokolls aber auch in anderen Bereichen einsetzbar. In der Beschreibung und den späteren Messungen wird nur der EPC Gen2 UHF Standard (GS1-EPCglobal, 2015) betrachtet, welcher Übertragungsverfahren und Signalkodierung festlegt.

Ein RFID System besteht im Allgemeinen aus einem Sender, auch Reader genannt, einem Übertragungskanal und einem Empfänger. Der Empfänger in einem UHF RFID System wird Tag genannt. Der Reader und das Tag modulieren die Daten über ein hochfrequentes Trägersignal, welches über Antennen ausgetauscht wird.

Die UHF RFID Technik arbeitet mit rein kapazitiver Kopplung, welche erst im Fernfeld durch praktisch ebene Phasenfronten gut möglich ist (Kark, 2010, Seite 193). Damit steht UHF

RFID im Gegensatz zu den niederfrequenten RFID Techniken, welche durch induktive und kapazitive Kopplung verbunden sind (Finkenzeller, 2012, Seite 22).

In der RFID Technik werden beim Reader beide Polarisationsarten verwendet. Für beide Antennenformen gibt es verschiedene Anwendungsbereiche. Das UHF RFID Tag ist üblicherweise mit linear polarisierten Antennen ausgestattet, da diese leicht und günstig zu realisieren sind. Des Weiteren ist eine linear polarisierte Readerantenne von Vorteil, wenn eine größere Reichweite gewünscht ist und die Orientierung der Tag Antenne gleichbleibend ist. Ist die Orientierung nicht bekannt oder nicht gleichbleibend, kann die Readerantenne durch eine zirkular polarisierte Antenne ersetzt werden.

Da der Freiraum als Funkkanal eine begrenzte Ressource ist und er von mehreren Anwendern gleichzeitig genutzt wird, wurden Bestimmungen und Vorschriften beschlossen. Damit die Anwender sich nicht gegenseitig stören werden durch Standards Bandbreiten oder auch Kanäle für bestimmte Zwecke vergeben. Einige Kanäle sind in ganz Deutschland an Unternehmen vergeben, andere sind für kommerzielle oder private Anwendungen frei. So verhält es sich auch mit dem UHF RFID Frequenzband. Dieses ist nach European Telecommunications Standards Institute (ETSI) Norm (ETSI, 2014, Seite 18) für Europa festgelegt auf den Bereich von 868 MHz bis 870 MHz.

### 2.2.1 Codierung und Modulation

Der Reader moduliert seine Informationen mittels 'double sideband amplitude shift keying' (DSB-ASK), 'single sideband amplitude shift keying' (SSB-ASK) oder 'phase-reversal amplitude shift keying' (PR-ASK) und einer 'pulse-interval encoding' (PIE). Alle Tags sollten jede der Modulationsformen demodulieren können.

Das Tag sendet seine Informationen mittels 'backscattering' zurück. Dies bedeutet, dass das Tag seinen Wellenwiderstand verändert und damit die reflektierte Leistung seiner Antenne beeinflusst. Diese Änderung der reflektierten Welle kann am Reader detektiert werden. Das Tag moduliert die Daten dadurch mit einem einfachen 'amplitude shift keying' (ASK). Die Daten können durch vier unterschiedliche Codierungen codiert werden. Die vier möglichen Codierungen sind FM0, Miller-2, Miller-4 oder Miller-8. Vom Grundaufbau her haben alle Codierung die gleiche Funktionsweise, die Symbollänge variiert jedoch. Durch die verschiedenen Codierungsarten, kann die Übertragungsgeschwindigkeit und die Bandbreite beeinflusst werden. Die schmalbandigen Codierungen wie Miller-8, sind weniger stör anfällig, haben aber eine niedrigere Übertragungsgeschwindigkeit als zum Beispiel FM0. Welche Codierung genutzt wird, wird vom Reader festgelegt.

## 2.2.2 Aufbau eines Transponders

Ein UHF Transpondersystem besteht immer aus einer Antenne und einem Chip. Die Antenne wird über den Fußpunkt mit dem Chip verbunden und hat die Aufgabe, die elektromagnetischen Wellen zu empfangen. Der Modulator und Demodulator des Transponder Chips sind mit dem Fußpunkt der Antenne verbunden. Diese beiden werden von der Logik, welche das Protokoll umsetzt, angesteuert, um Daten auszutauschen (Abbildung 2.4).

Im Allgemeinen gibt es, wie in Kapitel 1 erwähnt, aktive und passive Tags. Aktive Tags sind nicht auf die Energieversorgung durch einen Reader angewiesen. Sie können ihre Aufgabe oder Teile davon auch erfüllen, wenn kein Reader in der Nähe ist, um sie mit Energie zu versorgen. Hierfür benötigen sie jedoch eine eigene Energieversorgung. Passive Tags jedoch benötigen für jede Funktionalität eine externe Energieversorgung. Dies wird über den sogenannten 'constant wave' (CW) Träger sichergestellt. Der Reader sendet hierfür, über die gesamte Dauer der Kommunikation, elektromagnetische Wellen aus. Diese können vom Tag in Spannungen umgesetzt und teilweise gespeichert werden. Dies geschieht mit einem Gleichrichter und einem Spannungsregler (Abbildung 2.4). Ein aktives Tag benötigt diese beiden Elemente nicht.

Wie in Kapitel 2.1.6 beschrieben, ist ein wichtiger Faktor für die Leistungsübertragung die Leistungsanpassung. Die Transponderantenne sollte bestmöglich auf die passive Beschaltung und den IC des Tags angepasst sein, um maximale Effektivität und daraus resultierend höhere Reichweiten zu erzielen. Passive Tags besitzen für eine zuverlässige Spannungsversorgung einen Stützkondensator hinter dem Gleichrichter wie in Abbildung 2.5 zu sehen. Dieser Stützkondensator hat unter anderem die Aufgabe, Energie, welche vom Reader übertragen wird, zu speichern. Die Auslegung des Kondensators muss jedoch exakt gewählt werden. Denn ist der Kondensator zu klein, hat dies zur Folge, dass beim 'backscattering' die gespeicherte Energie nicht ausreicht, um die Zeit zu überbrücken, in der die Fußpunkte der Antenne nahezu kurzgeschlossen sind und weniger oder keine Energie mehr vom Reader übertragen werden kann. Ist der Kondensator jedoch zu groß, folgt daraus, dass er sich nicht schnell genug aufladen kann, sodass das Tag nicht schnell genug betriebsbereit ist und dadurch die Anfrage des Readers nicht vollständig erfassen kann.

Zu erwähnen ist außerdem, dass durch den internen Aufbau des Tags verschiedene Befehle unterschiedlich viel Energie benötigen können. Das liegt daran, dass zum Beispiel das Schreiben von Daten in den internen Speicher mehr Energie benötigt als das Abrufen. Des Weiteren können bei mit Sensoren ausgestatteten Tags, je nach physikalischem Sensorprinzip, höhere Versorgungsenergien nötig sein. Das hat zur Folge, dass nicht alle Kommunikationen unter den selben Randbedingungen erfolgreich ausgeführt werden können.

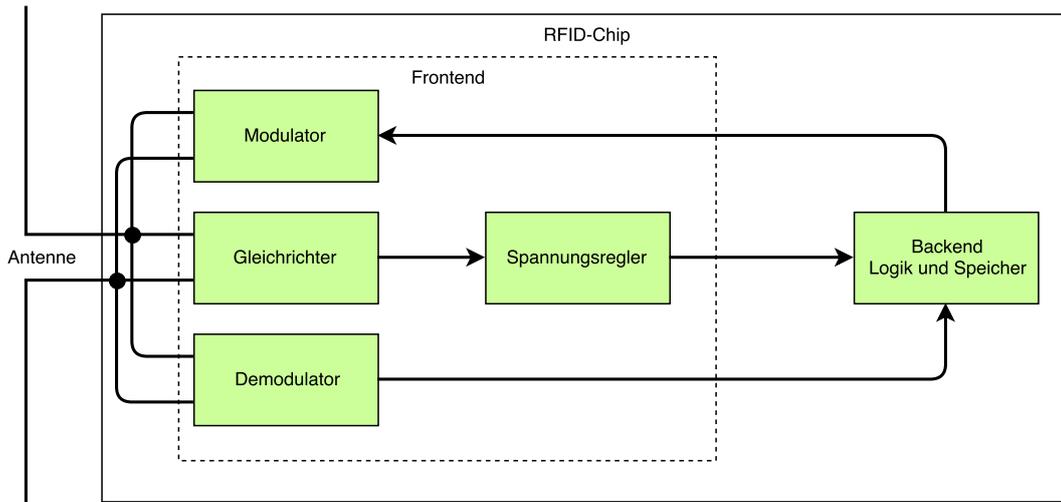


Abbildung 2.4: Schematische Darstellung eines passiven Transponder Systems. Spannungsversorgung des Modulators und Demodulators werden nicht abgebildet.

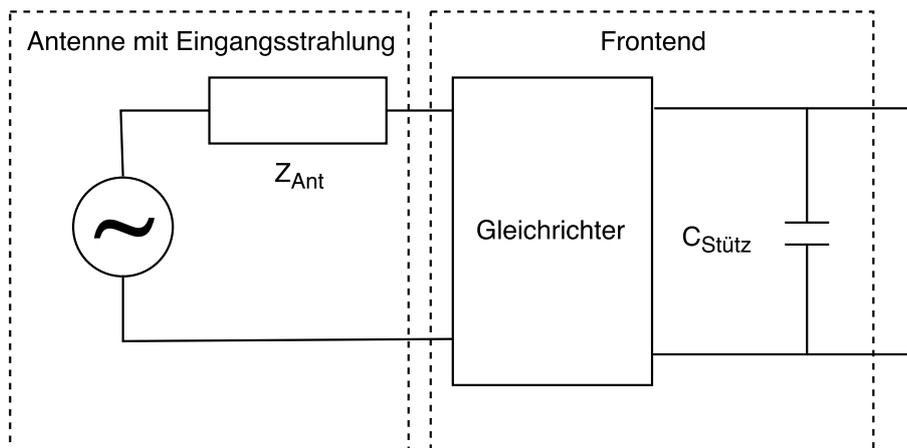


Abbildung 2.5: Schematische Darstellung eines Transponder Eingangssystems mit eingekoppelter Spannung an der Antenne.

### 2.2.3 Kommunikation

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt die für die Arbeit wichtigen Kommunikationen und deren Aufbau. Im Folgenden werden die übertragenen Daten vom Reader zum Tag Befehle genannt.

Der EPC Gen2 UHF Standard legt einige Befehle für die Kommunikation als notwendig fest.

Diese können jedoch nach Notwendigkeit auch durch anwendungsspezifische und optionale Befehle erweitert werden. Dieser Mechanismus ist essenziell für die erfolgreiche Implementierung der Sensor Tags. In dieser Arbeit werden drei Standardbefehle beziehungsweise Abläufe betrachtet. Diese sind das sogenannte 'Inventory', die 'Read' und die 'Write' Kommunikation.

Durch den 'Inventory' Befehl sollen alle Tags, welche sich aktuell in Reichweite des Readers befinden, einmalig erfasst werden. Von jedem erfassten Tag ist nach dem 'Inventory' der 'electronic product code' (EPC), also seine eindeutige Bezeichnung, bekannt. Mit dem 'Read' und 'Write' Befehl ist es möglich, bei Tags mit internem Speicher, Daten hinein zu speichern oder auszulesen. Um diesen Befehl ausführen zu können, muss jedoch der EPC des Tags bekannt sein.

Die 'Inventory' Kommunikation ist ein Ablauf von Befehlen. Allen Tags im Feld wird durch einen sogenannten 'Query' befohlen, eine sechzehn Bit Zufallszahl zu generieren und zurück zu senden. Um die Antworten mehrerer im Feld befindlicher Tags zu separieren, erfolgt das erst, wenn das Tag intern den sogenannten 'slot counter' auf den Wert Null dekrementiert hat. Der 'slot counter' wird mit jedem empfangenen 'Query' dekrementiert und am Anfang der Kommunikation mit einem Zufallswert beschrieben. Hat das Tag mit der Zufallszahl, der sogenannten 'RN16', geantwortet, kann der Reader diese in einem 'ACK' Befehl zurücksenden und damit dem Tag bestätigen, dass es seinen EPC zurücksenden kann. Der Ablauf wird in Abbildung 2.6 veranschaulicht. Das heißt, das 'Inventory' hat zur Folge, dass das Tag seinen EPC aus dem Speicher lesen und übertragen muss.

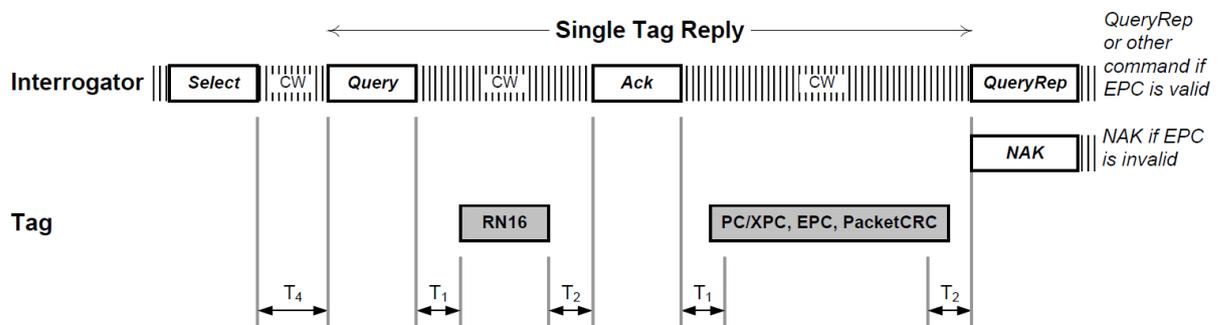


Abbildung 2.6: Zeitlicher Ablauf eines 'Inventory' mit definierten Zwischenzeiten (GS1-EPCglobal, 2015, Seite 42).

## 2.2.4 Komplexe Leistungsanpassung

Eine wichtige Eigenschaft in der UHF RFID Technik ist die komplexe Leistungsanpassung von der Antenne zum Transponderchip. Die komplexe Leistungsanpassung bestimmt, wie viel der empfangenen Leistung am Transponderchip umgesetzt werden kann. Die komplexe

Leistungsanpassung ist gegeben, wenn  $Z_{Ant} = Z_{Chip}^*$  ist.

Der Wirkungsgrad  $\eta$  bestimmt hierbei, welcher Anteil der eingespeisten Leistung als Wirkleistung am Transponderchip zur Verfügung steht (Formel 2.2.1). Wobei die Wirkleistung, durch fehlerhaft angepasste imaginäre Anteile der Impedanz, weiter sinken kann.

$$\eta = \frac{Re\{Z_{Chip}[\Omega]\}}{Re\{Z_{Ant}[\Omega]\} + Re\{Z_{Chip}[\Omega]\}} \quad (2.2.1)$$

Wirkungsgrad

# 3 Analyse

Im Folgenden wird auf die Aufgabe und die verfügbaren Materialien näher eingegangen. Es wird dargestellt, welche Materialien zur Verfügung stehen und wie diese zur Aufgabenlösung genutzt werden.

## 3.1 Materialanalyse

Für die Bewältigung der Aufgabe stehen folgende Geräte und Produkte zur Verfügung:

- metraTec<sup>®</sup> DeskID
- metraTec<sup>®</sup> PulsarMX
- metraTec<sup>®</sup> Echo-3 Antenne
- Arduino Leonardo
- Arduino Shield Pololu Dual VNH5019
- Schrittmotor VEXTA PXB44H-02AA-C8
- Verschiedene Transponder Designs
- Messkammer

Des Weiteren steht Visual Studio 2015 als 'integrated development environment' (IDE) zur Verfügung und ein auf Windows basierender Rechner.

### 3.1.1 UHF RFID Reader

Damit die Entwicklung der Software unabhängig von der Messkammer beginnen kann, können erste Versuche mit dem 'Low-Level-Stack' (LLS), einer dynamisch eingebundene Bibliothek 'dynamic link library' (DLL) zur Unterstützung unterschiedlicher Hardware, zur Ansteuerung des Readers außerhalb des Labors durchgeführt werden. Dafür wird der DeskID Reader der Firma metraTec<sup>®</sup> verwendet werden. Dieser hat eine geringere Reichweite und eine integrierte Antenne. Dadurch ist er für die Erprobung der Software in einem nicht abgeschirmten Raum von Vorteil. Für die Messungen im Innenraum der Messkammer steht der PulsarMX der Firma metraTec<sup>®</sup> zur Verfügung. Beide Reader senden bei 868 MHz. Diese Frequenz liegt in dem vom ETSI festgelegten Frequenzband (ETSI, 2014, Seite 18). Der PulsarMX kann mittels eines Sub-Miniature-A (SMA) Kabels mit verschiedenen Antennen verbunden werden. Des Weiteren hat der PulsarMX gegenüber dem DeskID eine höhere Sendeleistung. Der PulsarMX hat einen Sendeleistungsbereich von 12 dBm bis 27 dBm mit einer Auflösung von 1 dB. Nach der maximal erlaubten ERP von 500 mW der ETSI Norm (ETSI, 2014, Seite 18) ist der PulsarMX deshalb mit einer Antenne mit einem Antennengewinn von bis zu 2,15 dBi beziehungsweise 0 dBd kombinierbar. Vernachlässigt wird hier der Einfluss des SMA Kabels.

### 3.1.2 SMA Kabel

Das in diesem Messaufbau verwendete SMA Kabel ist ein Amphenol CO-316SMARSMA-010. Dieses basiert auf dem Kabeltyp RG316, von welchem sich die Dämpfung laut Datenblatt bei 868 MHz mit Formel 3.1.1 berechnen lässt (HUBER+SUHNER, 2014, Seite 2). Da das Kabel eine Länge von  $l = 3,048$  m hat, ergibt sich eine Dämpfung von 2,4384 dB (Formel 3.1.2).

$$\frac{A_{Kabel}[dB]}{m} = 0,7727 \frac{dB}{m \cdot GHz^{0,5}} \cdot (0,868 GHz)^{0,5} + 0,0972 \frac{dB}{m \cdot GHz} \cdot 0,868 GHz \approx 0,8 \frac{dB}{m} \quad (3.1.1)$$

$$A_{Kabel}[dB] = 0,8 \frac{dB}{m} \cdot 3,048 m = 2,4384 dB \quad (3.1.2)$$

### 3.1.3 Antenne

Bei der Echo-3 Antenne der Firma metraTec<sup>®</sup> handelt es sich um eine linear polarisierte Antenne mit einem Antennengewinn von 1 dBi (metraTec, 2016, Seite 2). Die Antenne hat eine Breite von 150 mm und bei einer Betriebsfrequenz von 868 MHz kann das Fernfeld dieser Antenne mithilfe von Formel 2.1.7 berechnet werden (Berechnung 3.1.3). Durch den Antennengewinn von 1 dBi kann die Antenne mit der maximalen Sendeleistung des Pulsar-MX betrieben werden, ohne die ETSI Norm zu verletzen. Es wäre allerdings möglich, je nach Kabelverbindung, eine Antenne mit einem höheren Antennengewinn zu verwenden, welches die Reichweite erhöhen würde.

$$R[m] > \frac{2 \cdot D^2[m^2]}{\lambda[m]} = \frac{2 \cdot (0,15 \text{ m})^2}{0,34538 \text{ m}} = 0,13029 \text{ m} \approx 13 \text{ cm} \quad (3.1.3)$$

### 3.1.4 Motor und Motoransteuerung

Der Motor wird über den Arduino positionsgenau angesteuert. Mit dem Arduino und dem Arduino Shield kann per virtuellem COM Port die Drehung des Motors absolut in Angabe von Schritten vorgegeben werden. Da der Motor eine Schrittweite von 1,8 Grad hat, ist dies somit auch die minimale Winkelauflösung des Aufbaus.

### 3.1.5 Messkammer

Wie bereits in Kapitel 1.2 erwähnt, steht die Messkammer nach den Ergebnissen einer Diplomarbeit (Braun, 2011) zur Verfügung. Im fertiggestellten Zustand hat sie Maße von H 143 cm x T 143 cm x B 183 cm (Abbildung 3.1). Die Messkammer ist von innen mit verschiedenen Pyramidenabsorbern verkleidet. An fünf von sechs Wänden wurde der Typ VHP-12, an der Wand hinter der Sendeantenne Pyramidenabsorber vom Typ VHP-8 verwendet (Braun, 2011, Seite 37). Die hier verwendeten Absorber haben laut Datenblatt bei 0,8 GHz eine Dämpfung von 33 dB (Emerson&Cuming, 2010b, Seite 3). Dies soll die Reflexion der elektromagnetischen Strahlung bei 868 MHz dämpfen und Störungen durch Interferenzen minimieren. Das genaue Frequenzverhalten oder die Güte der Abschirmung der Messkammer ist jedoch nicht bekannt.

Außerdem ist im Inneren der Messkammer aus mehreren PVC Streben eine Plattform aufgebaut, wie in Abbildung 7.1 und 7.3 zu sehen ist. Auf diesen kann ein zweiter Aufbau in Richtung der X-Achse verschoben werden. An diesem Aufbau wird die Antenne des Readers befestigt. Damit die genaue Position der Antenne später nachgebildet werden kann, sind auf der Plattform Markierungen abgebildet. Des Weiteren sind an einigen Stellen Löcher in den

Wänden, um Kabel oder auch die Welle des Motors ins Innere führen zu können. Für diese Löcher wurde ein Durchmesser gewählt, welcher in dem Frequenzbereich, in dem gearbeitet wird, nicht dazu führt, dass die Abschirmung eine Antenne bildet (Braun, 2011, Seite 31).



Abbildung 3.1: Fotografie der Messkammer mit geöffneten Türen.

### 3.1.6 Transponder

Es standen drei unterschiedliche Tagdesigns vom Fraunhofer IPMS zu Evaluierungszwecken zur Verfügung. Von allen sind durch die Simulation unter Ansys HFSS bereits einige Antennenparameter bekannt (Tabelle 3.1). Die grundlegenden Antennendesigns sind benannt mit 'regular dipole' (RD), 'boxed dipole' (BD) und 'circle dipole' (CD), einer Zahl, welche verschiedenen Versionen nummeriert, und einem Buchstaben, welcher den passenden Transponderchip beschreibt. Die Antennen der drei Tags haben die Namen RD1s, BD1s und CD1s. Diese sind alle mit einem vom Fraunhofer entwickelten Transponderchip, dem UTPv11, ausgestattet. Durch die Simulation der Antennendesigns waren bereits die Antennenimpedanz, die Polarisation, die Strahlungscharakteristik und der Antennengewinn bekannt. Die Tags sind durch ihre unterschiedliche Antennenimpedanzen unterschiedlich gut an den Transponderchip komplex angepasst. Antennengewinn und Antennenimpedanz der Tagantennen sind in Tabelle 3.1 aufgelistet. Die ermittelte Eingangsimpedanz des Transponderchips beträgt  $92 \Omega - j237 \Omega$ . Die Ermittlung der Chipimpedanz ist jedoch schwierig, da die Messung vom Messaufbau und Betriebszustand des Chips abhängig ist. Es muss davon ausgegangen werden, dass der Messwert noch fehlerbehaftet sein kann.

Durch Formel 2.2.1 und den Antennengewinn konnte vor der Messung bereits eine theoretische Aussage über die Reichweitenunterschiede, beziehungsweise die Dämpfung der Tags

getroffen werden. Bei der Berechnung des Wirkungsgrades gemäß Formel 2.2.1, wurden mögliche Verluste durch Blindleistungen in den Zuleitungen (Weißgerber, 2007, Seite 174) vernachlässigt. Die Dämpfung lässt sich durch Berechnen der Wirkleistung am Transponderchip in Dezibel und Subtraktion des Antennengewinns kombiniert berechnen, wie in Formel 3.1.4 angegeben (Tabelle 3.2). Aus den errechneten Werten ließ sich schlussfolgern, dass das CD1s Tag die geringsten Reichweiten erreichen sollte. Die RD1s und BD1s Tags liegen bei der Leistungsdämpfung nah beieinander, wobei das RD1s Tag theoretisch eine etwas geringere Dämpfung haben sollte. Wäre ein Tag komplex leistungsangepasst mit einem Antennengewinn von 0 dBi, wäre eine minimale Dämpfung der Wirkleistung von 3 dB nach Formel 3.1.5 zu erwarten.

Tabelle 3.1: Simulationsergebnisse der verschiedenen Antennendesigns unter Ansys HFSS

Antennendesign	Antennenimpedanz/ $Z_{Ant}[\Omega]$	Antennengewinn/ $G_{Ant}[dBi]$	simulierte Strahlungscharakteristik
BD1s	87,6 + j233,7	2,0	7.5
CD1s	41,1 + j264,9	-0,6	7.7
RD1s	90,3 + j240,8	2,6	7.9

Tabelle 3.2: Transponderdesign angenommene Dämpfung

Antennendesign	Wirkungsgrad/ $\eta$	Dämpfung/ A[dB]
BD1s	0,16122	5,0206
CD1s	0,16878	8,9218
RD1s	0,16366	4,3558

$$A[dB] = -10 \cdot \log \left( \frac{\operatorname{Re}\{Z_{Chip}[\Omega]\}}{\operatorname{Re}\{Z_{Ant}[\Omega]\} + \operatorname{Re}\{Z_{Chip}[\Omega]\}} \right) - G_{Ant}[dB] \quad (3.1.4)$$

$$A[dB] = -10 \cdot \log \left( \frac{1}{2} \right) \approx 3 \text{ dB} \quad (3.1.5)$$

### 3.1.7 Übertragungsweg

Durch die Vorgaben der Hardware und die Aufgabe ergibt sich ein Übertragungsweg, welcher in Abbildung 3.2 schematisch dargestellt ist. Diese Darstellung fasst den grundsätzli-

chen Aufbau des Übertragungswegs zusammen. Des Weiteren ist das Verhalten in Bezug auf die Leistung in dB angegeben. Wenn die Freiraumdämpfung proportional zur Antennendistanz berechnet werden kann, wird in den vergleichenden Messungen nur das Tag einen Unterschied machen. Dadurch sind Rückschlüsse auf dessen Eigenschaften möglich.

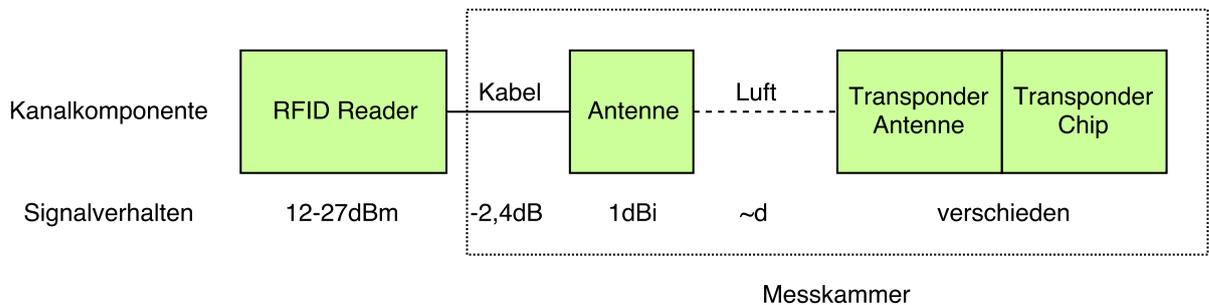


Abbildung 3.2: Übertragungsweg des gesamten Messaufbaus.

## 3.2 Aufgabenanalyse

Um die Ziele dieser Bachelorarbeit zu erreichen, sollen verschiedene Messungen an den Tags durchgeführt werden. Dazu muss unter Visual Studio eine GUI mit C# entwickelt werden, welche den Messablauf steuert. Außerdem soll festgelegt werden, welche Parameter im Messablauf veränderbar sind und für aussagekräftige Ergebnisse variiert werden. Diese sollen es ermöglichen, den Messablauf zu definieren. Außerdem sollen die Messdaten gespeichert werden können und eine Möglichkeit bereitgestellt werden, die Daten auszuwerten. Die gemessenen Daten sollen auf Gültigkeit und Reproduzierbarkeit durch erste Messungen geprüft werden.

### 3.2.1 Messung

Um die wichtigsten Fragen an den Messaufbau zu beantworten und verschiedene Tags miteinander vergleichen zu können, ist es wichtig, dass in der Messkammer möglichst keine Störungen entstehen. Die Messkammer wurde bereits im Design auf ein bestimmtes Frequenzspektrum angepasst. Die 868 MHz des UHF RFID Bandes ist eine Frequenz, zu welcher die Messkammer passend entworfen wurde (Braun, 2011, Seite 30). Um des Weiteren Störungen innerhalb des Messraumes zu vermeiden, sollen möglichst keine metallischen Gegenstände in der Messkammer platziert werden. Diese reflektieren die elektromagnetischen Wellen und erzeugen so Störungen durch Reflexionen (Nekoogar und Dowla, 2011, vgl. Seite 26). Da im Messaufbau aber ein Motor zum Einsatz kommt, muss

dieser außerhalb der Messkammer platziert werden. Ebenso soll möglichst nur die Antenne des Readers innerhalb und der Reader selber außerhalb der Messkammer fixiert werden. Der grundsätzliche Aufbau der Messkammer an sich soll nicht verändert werden. Dadurch ist die Güte der Abschirmung nach außen nicht beeinflussbar.

Damit der Motor außerhalb der Messkammer nutzbar ist, soll er an dieser befestigt werden. Die Welle soll mit einem PVC Rohr die Drehung in den Innenraum transferieren. Auf diesem Rohr soll eine Halterung befestigt werden, auf welcher die Tags leicht ausgetauscht werden können. Die Antenne soll mittels eines SMA Kabels mit der Readerhardware, welche sich außerhalb der Messkammer befindet, verbunden werden. Mit dem Computer sollen Motor und Reader ansteuerbar sein. Dadurch können die Tags aus verschiedenen Winkeln ausgemessen werden.

Des Weiteren soll es über die Software möglich sein, die Sendeleistung des Readers zu verändern, um so eine Bewegung auf der X-Achse (Abbildung 7.1) zu emulieren. Dies ist möglich, wenn davon ausgegangen wird, dass es durch die Absorber keinerlei Reflexion innerhalb der Messkammer gibt. In diesem Fall ist die empfangene Leistung die einzige Veränderung, die das Tag registriert. Somit kann später mit Formel 3.2.1 für die Freiraumdämpfung die nachgebildete Entfernung berechnet werden.

Der PulsarMX Reader liefert des Weiteren den sogenannten 'received signal strength indication' (RSSI) Wert zurück. Dieser ist definiert als die empfangene Sendeleistung der Tagantwort. Hat dieser Wert eine zuverlässige Auflösung von mindestens 1 dB, kann er für weitere Berechnungen, wie zum Beispiel um die Entfernung zwischen den Antennen abzuschätzen, genutzt werden. Dies setzt allerdings voraus, dass die genauen Reflexionseigenschaften der Tags und der Messkammer bekannt sind.

### 3.2.2 Auswertung

Mit dem PulsarMX Reader kann eine Sendeleistungsdifferenz von 15 dB erzeugt werden. Die Änderung der Sendeleistung am Reader hat auf die am Tag zur Verfügung stehende Leistung die gleiche Auswirkung wie eine Veränderung der Entfernung zwischen Reader und Tag. Daher kann das Variieren der Sendeleistung am Reader als Emulation einer Entfernungsänderung genutzt werden (Abbildung 3.4). Mit der Antennendistanz kann die Freiraumdämpfung gemäß Formel 3.2.1 berechnet werden. Wird zu dieser Dämpfung nun die Sendeleistungsdifferenz des Readers hinzu addiert, kann mit der umgestellten Formel 3.2.2 das Maximum der emulierbaren Entfernung bei theoretisch maximaler Sendeleistung, hier 27 dBm, berechnet werden. Abbildung 3.3 kann entnommen werden, dass mit wachsender Entfernung die Variation der Sendeleistung einen größeren Einfluss auf die theoretische Distanz nimmt.

Um eine möglichst genaue Vorhersage des Ergebnisses zu erzielen, muss durch Formel

3.2.3 der Friis-Übertragungsgleichung der gesamte Übertragungsweg betrachtet werden. Mit den Werten der Datenblätter aus Kapitel 3.1 kann die Leistung am Fußpunkt abgeschätzt werden. In der angepassten Friis-Formel 3.2.4 sind alle Werte eingetragen, welche sich in dem Aufbau nicht verändern werden.

Es können hier jedoch nur genaue Vorhersagen gemacht werden, wenn vom Tag bekannt ist, welche Leistung am Fußpunkt benötigt wird. Die Leistungsaufnahme des in dieser Arbeit verwendeten Chipsatzes ist jedoch nicht bekannt. Die Leistung hängt von dem jeweiligen Transponderchip, von der Impedanzanpassung zur Antenne und der daraus resultierenden Dämpfung, wie in Formel 3.1.4 dargestellt, ab. Es kann allerdings durch die Vermessung von drei verschiedenen Tags eine Schätzung der Leistungsaufnahme abgegeben werden.

Außerdem ist es möglich, durch die Drehung des Tags in der XZ-Ebene, die Strahlungscharakteristik in der Ebene zu untersuchen. Diese kann dann mit den durch die Simulation erwarteten Werten verglichen werden.

$$A_f[dB] = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot d[m] \cdot f[Hz]}{c \left[ \frac{m}{s} \right]} \right) \quad (3.2.1)$$

Freiraumdämpfung

$$d[m] = 10^{\frac{A_f[dB]}{20}} \cdot \frac{c \left[ \frac{m}{s} \right]}{4\pi \cdot f[Hz]} \quad (3.2.2)$$

$A_f[dB]$  = Freiraumdämpfung

$d[m]$  = Entfernung vom isotropen Strahler

$f[Hz]$  = Sendefrequenz

$$P_r[dB] = P_s[dB] + G_s[dB] + G_r[dB] - A_f[dB] - A_{Kabel}[dB] \quad (3.2.3)$$

Modifizierte Friis-Übertragungsgleichung

$$P_r[dB] = P_s[dB] + 1 \text{ dBi} + G_r[dB] - 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot d[m] \cdot 868 \text{ MHz}}{c \left[ \frac{m}{s} \right]} \right) - 2,4384 \text{ dB} \quad (3.2.4)$$

$P_r[dB]$  = Empfangsleistung

$P_s[dB]$  = Sendeleistung

$G_s[dB]$  = Antennengewinn Sendeantenne

$G_r[dB]$  = Antennengewinn Empfangsantenne

$A_{Kabel}[dB]$  = Dämpfung des SMA Kabels

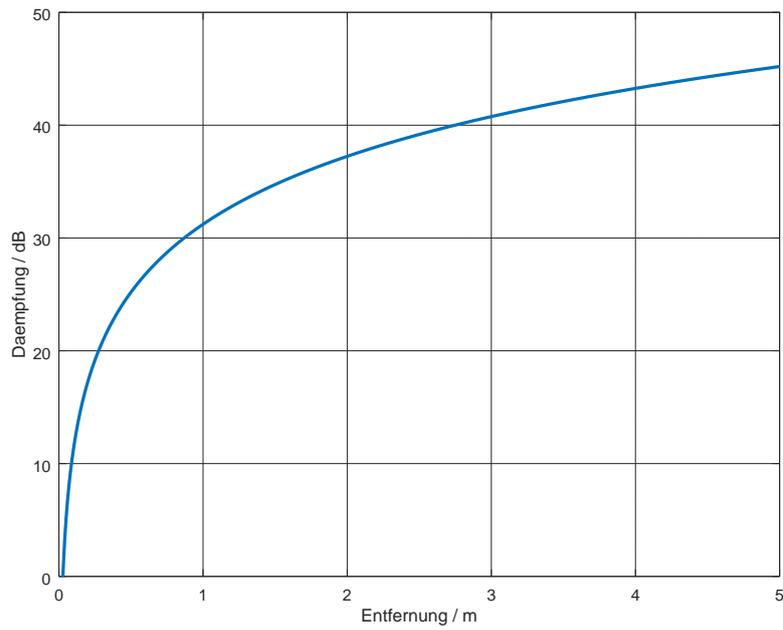


Abbildung 3.3: Freiraumdämpfung über fünf Meter bei 868 Mhz.

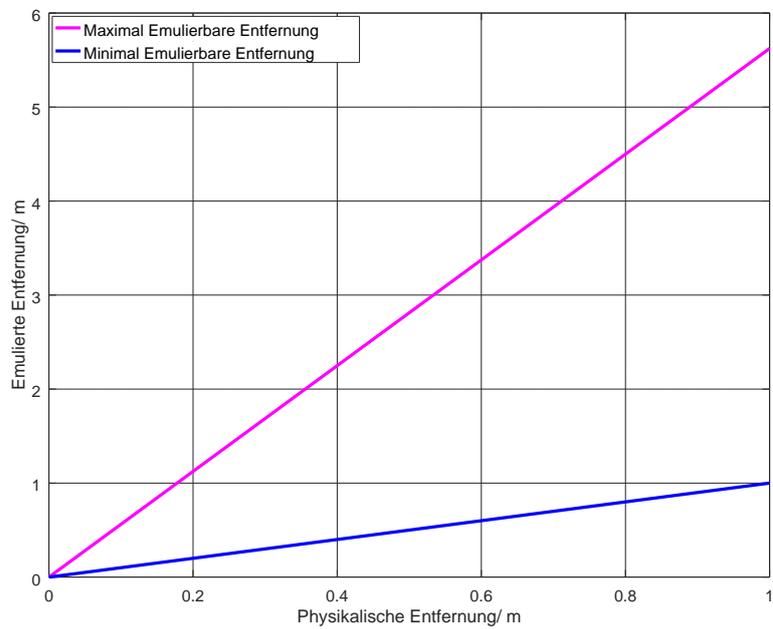


Abbildung 3.4: Emulierbare Distanzen bei Variation der Sendeleistung durch den PulsarMX von 12 dBm bis 27 dBm mit unterschiedlichen Antennendistanzen.

# 4 Design

In diesem Kapitel werden die grundlegenden Design Entscheidungen, auf welchen die Realisierung aufbaut, beschrieben und begründet.

## 4.1 Mechanischer Aufbau

Für den mechanischen Aufbau ist es wichtig, dass sich, wie in Kapitel [3.2.1](#) erwähnt, möglichst keine zusätzlichen Störfaktoren innerhalb der Messkammer befinden. Demzufolge wurde das SMA Kabel durch eines der Löcher geführt, um den Reader mit der Readerantenne zu verbinden und eine Störung der Messung durch den Reader zu vermeiden. Die Readerantenne wurde an dem verschiebbaren Aufbau befestigt, welcher auf der Plattform aufliegt. Auf diesem Aufbau kann die Readerantenne in X-Achsen Richtung bewegt werden (vgl. [Abbildung 7.1](#)).

Der Motor wurde unter dem Aufbau befestigt und die Welle unter eines der Löcher platziert. An der Welle wurde daraufhin ein PVC Rohr befestigt. Am anderen Ende des Rohres wurde eine Klammer angebracht, welche die Möglichkeit bietet, die Tags mit dem Rohr zu verbinden. Um die Transponder nicht direkt mit der Klammer zu verbinden, wurden sie an einem Stück Pappe befestigt. Das Rohr wurde zur zusätzlichen Stabilisierung noch durch ein weiteres PVC Profil geführt. Um die Tagbefestigung möglichst stabil an der gleichen Stelle zu halten, wurde dieses Profil mit der restlichen Konstruktion verbunden (vgl. [Abbildung 4.2](#)).

Der Aufbau ist in [Abbildung 4.1](#) schematisch dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Antennenfläche der Readerantenne zum Transponder ausgerichtet ist, anders als dargestellt. Des Weiteren markieren die Pfeile die Bewegungsrichtungen, wobei lediglich die Drehung des Tags automatisiert erfolgen kann. Zusätzlich sind die kabelgebundenen Verbindungen dargestellt.

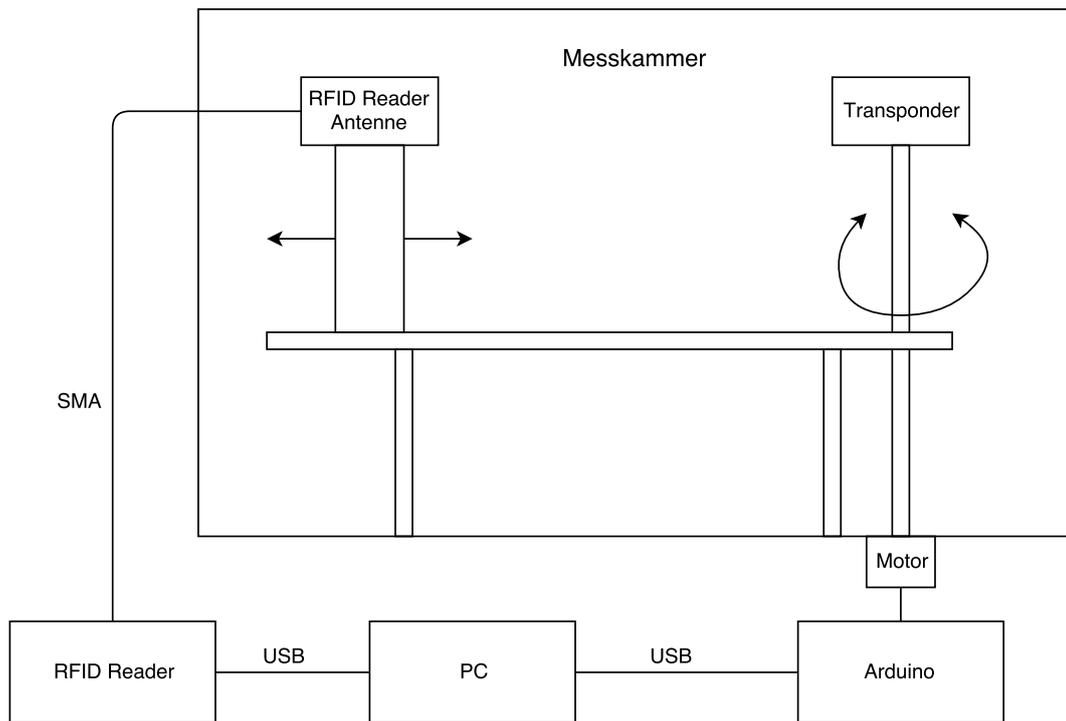


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Messaufbaus.

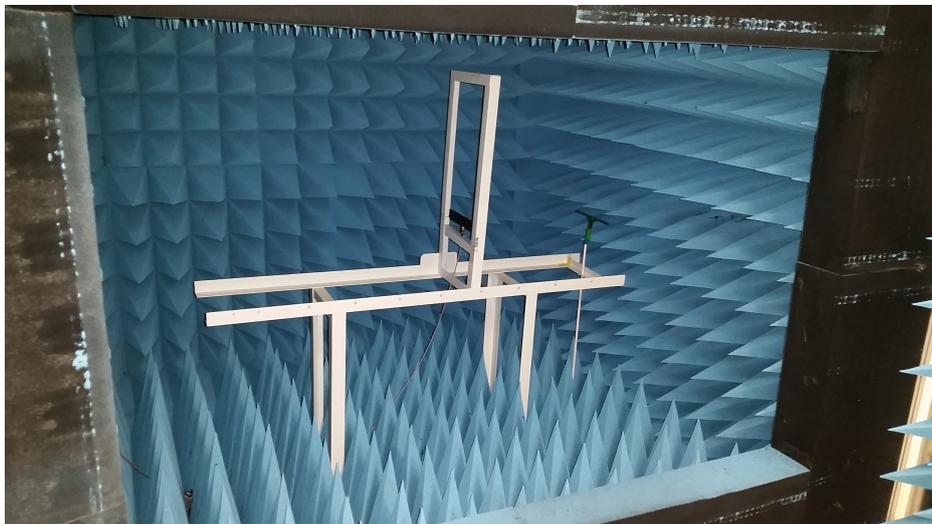


Abbildung 4.2: Fotografie der Messkammer bei geöffneten Türen mit dem installierten Messaufbau.

## 4.2 Software

Dieser Abschnitt beschreibt die Vorüberlegungen für das Programmieren der GUI. Die Dateiformate werden sinnvoll und verständlich gewählt. Zusätzlich wird entschieden, welche Aufgaben in einem eigenen Task ausgeführt werden sollen, um die Bedienerfreundlichkeit zu gewährleisten.

### 4.2.1 Programmstruktur

Um das Programm möglichst übersichtlich und leicht erweiterbar aufzubauen, wurde es modular und nach dem Klassendiagramm in Abbildung 4.3 erstellt. Die oberen vier 'Window' Klassen beinhalten alle GUI Elemente. Sie sind für das Überwachen und Weiterleiten der Daten an den 'Control Layer' zuständig. Die drei oberen Elemente sind alle abhängig vom Hauptfenster ('Main Window') und haben selber keinen Zugriff auf den 'Control Layer'.

Der 'Control Layer' ist für das Verbinden mit der 'Custom Motor COM' Klasse verantwortlich, welche den Motor steuert. Des Weiteren erstellt der 'Control Layer' die 'Parameters' Klasse, welche die Messparameter und Bedingungen abspeichert.

Die 'Custom XML' Klasse ist für das einlesen und abspeichern der 'extensible markup language' (XML) Dateien zuständig und wird vom 'Control Layer' und vom 'File Controller' angesteuert. Der 'File Controller' kontrolliert das Abspeichern von Dateien und startet durch den 'Measuring Controller' die Messvorgänge.

Das 'Gnuplot Interface' ist die Schnittstelle zwischen dem Programm und gnuplot. Es steuert das Erstellen und abspeichern von Graphen. Der 'CSV Manager' kontrolliert das Abspeichern der Messergebnisse im 'comma-separated values' (CSV) Format.

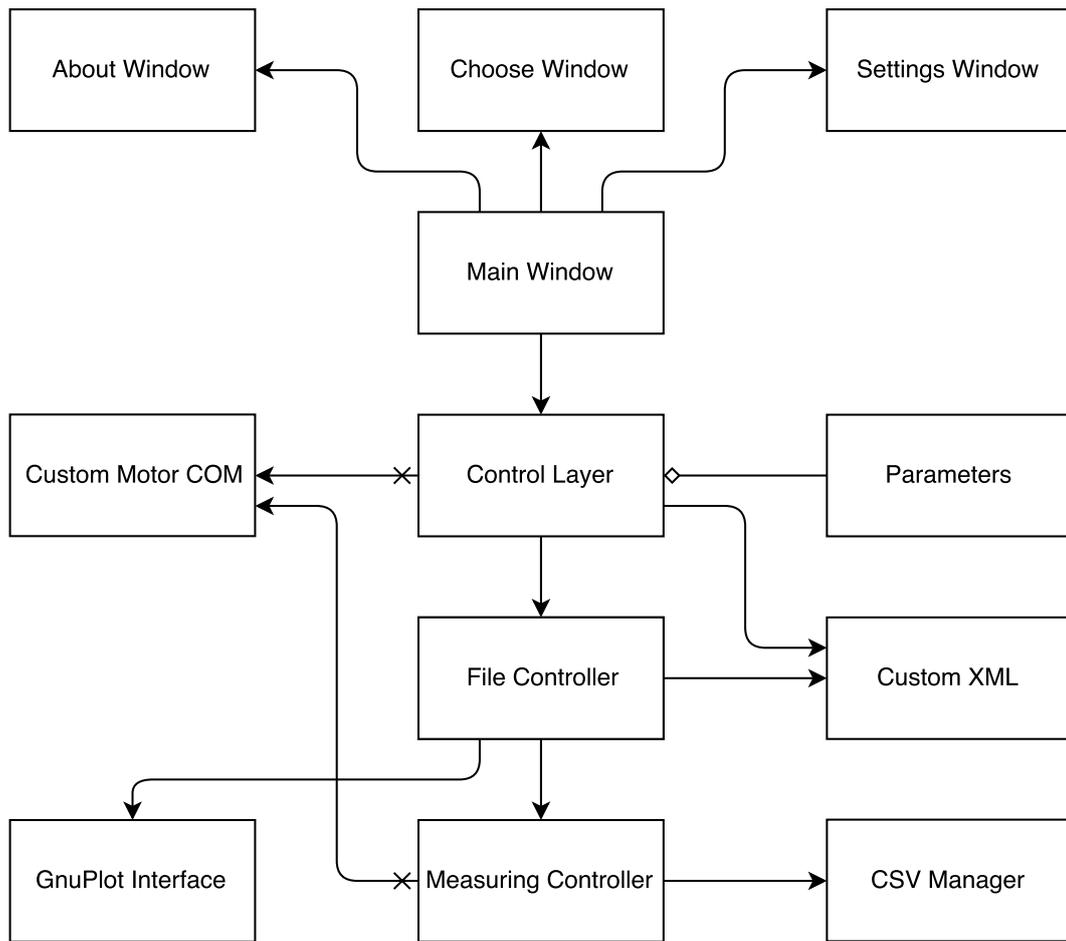


Abbildung 4.3: Klassendiagramm des erstellten Programms mit den wichtigsten Klassen.

## 4.2.2 Dateiformate

Für die Software werden vier Dateiformate benötigt. Die Dateiformate werden alle vom Programm lesbar sein. Abspeichern wird das Programm aber nur die XML Datei und die Messdaten (Abbildung 4.4). Das XML und 'XML schema definition' (XSD) Dateiformat werden für die Speicherung und Überprüfung der Messparameter verwendet. Das CSV Dateiformat wird für die Speicherung der Messdaten benutzt. Ein weiteres CSV Dateiformat mit definierten Schlüsselwörtern wird für die Festlegung der Auswertungsparameter angewandt. Alle Dateiformate sind textbasiert und können so einfach außerhalb des Programms angepasst und von anderen Programmen eingelesen werden.

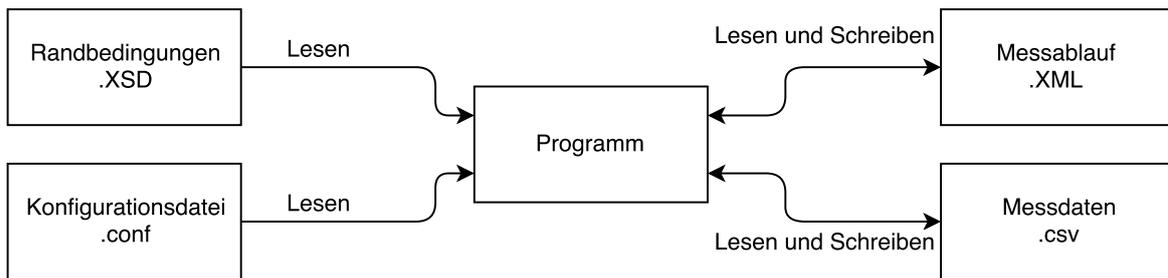


Abbildung 4.4: Darstellung der vom Programm zu lesenden und zu schreibenden Dateiformate.

### Messparameter

Um die Messparameter abspeichern zu können, wurde das XML Dateiformat gewählt (Aufbau vgl. 7.3). Dieses hat den Vorteil, dass es sich mit einem einfachen Texteditor jederzeit anpassen lässt. Damit können Messparameter auch mit externen Editoren festgelegt und abgespeichert werden. Das XML Format hat außerdem den Vorteil, dass die Randparameter mit einer XSD Datei festgelegt werden können (Aufbau vgl. 7.3). Da zum Beispiel nicht alle RFID Reader den gleichen Bereich oder die gleiche Auflösung bei der Sendeleistung zulassen, kann die XSD Datei passend konfiguriert werden. In der XSD Datei können für Überprüfungszwecke Variablentyp, Minimal- und Maximalwert festgelegt werden. Das heißt, es können für jeden Aufbau die Randparameter festgelegt werden. Das Programm erhält dann eine Funktion, welche überprüft, ob die angegebenen Messparameter die Randparameter erfüllen und sollte dies nicht der Fall sein, kann eine Warnung generiert werden. Dies hat den Vorteil, dass der Messaufbau nicht mit unzulässigen Messparametern angesteuert wird, wenn die XSD Datei den aktuellen Messaufbau beschreibt.

### Messdaten

Für das Abspeichern der Messdaten wurde das CSV Dateiformat gewählt, da es eine einfache und verständliche Möglichkeit ist, Daten abzuspeichern. Ein weiterer Vorteil ist, dass Auswertungen außerhalb des Programms vorgenommen werden können. Die Daten sind ebenfalls mit einem einfachen Texteditor auslesbar. Außerdem können Auswertungsmethoden einfacher in externen Programmen evaluiert werden. Zeigt die Methode in dem externen Programm dann das gewünschte Ergebnis, kann die Berechnungsvorschriften in das Programm eingebunden werden.

## Auswertungsparameter

Auf Basis des CSV Dateiformats wurde ein Konfigurationsformat definiert. Mit diesem können die Auswertungsparameter festgelegt werden und Graphen abgespeichert werden. Da es sich ebenfalls um eine einfache Textdatei handelt, können die Auswertungsparameter mit einem einfachen Texteditor angepasst und Auswertungen hinzugefügt werden.

### 4.2.3 Task Management

Damit der Anwender bewerten kann, ob die Messung Fortschritte macht, wird die Messung selber in einem zweiten Thread gestartet. Dieser gibt an die GUI weiter, wie viele Messungen bereits durchgeführt wurden. Die GUI wird den Fortschritt dann in geeigneter Form anzeigen.

### 4.2.4 Reader Kommunikation

Die Kommunikation mit dem Reader wird, wie in Kapitel 1.2 erwähnt, über den LLS gesteuert. Dieser Stack besteht aus einer DLL und einigen Drittanbieter Bibliotheken. Die DLL rpf2net stellt die benötigten Funktionen und Datentypen für das Ansteuern des Readers zur Verfügung. Die Funktionen zum Verbinden und Trennen einer Kommunikation zum Reader sind vor oder nach jeder Messung notwendig, um den Reader anzu steuern oder wieder freigeben zu können. Außerdem werden alle drei im Messablauf verwendeten Befehle durch eine eigene Funktion ausgelöst.

Die Befehlsfunktionen liefern einen Wert zurück, welcher angibt, ob die Kommunikation erfolgreich war oder fehlgeschlagen ist. Die Bibliothek liefert außerdem nach jedem erfolgreich ausgeführten Befehl den RSSI Wert zurück. Dieser Wert ist meist negativ. Da alle Messungen dieser Arbeit im Fernfeld gemacht werden, beträgt die Freiraumdämpfung hier bereits 13 dB (Formel 4.2.1) und alle RSSI Werte können als negativ angenommen werden. So wird bei einer nicht erfolgreichen Kommunikation der Wert '1' in die RSSI Spalte eingefügt. So kann im Nachhinein festgestellt werden, ob die Kommunikation unter den gegebenen Parametern erfolgreich war oder nicht.

$$D_f[dB] = 20 \cdot \log_{10} \left( \frac{4\pi \cdot 0.13029 \text{ m} \cdot 868 \text{ MHz}}{c \left[ \frac{\text{m}}{\text{s}} \right]} \right) \approx 13 \text{ dB} \quad (4.2.1)$$

### 4.2.5 Messauswertung

Für die Auswertung werden die Daten aus der Datei eingelesen und im Programm vorverarbeitet. Die Art der Vorverarbeitung wird über die Auswertungsparameter festgelegt. Es wird möglich sein, die Datensätze zwei- oder dreidimensional darzustellen und aus der Sendeleistung und X-Achsen Entfernung zwischen der Readerantenne und dem Tag die emulierte Entfernung zu berechnen. Außerdem wird eine Datei mit den Messparametern erstellt und ebenfalls zur Auswertung hinzugefügt. Die erstellten Dateien werden in einem neu angelegten Ordner abgelegt.

#### Grafische Darstellung

Für das Anzeigen und Erstellen der Daten in einem Graphen wird gnuplot verwendet. Angesteuert wird gnuplot über die Klasse eines Drittanbieters ([Morris, 2017](#)). Diese leitet die Befehle aus dem Programm an gnuplot weiter und steuert darüber auch das Abspeichern der Graphen. Welche Graphen erstellt werden sollen, wird über die Konfigurationsdatei festgelegt.

#### Messprotokoll

Für das Erstellen eines Messprotokolls wird eine externe Bibliothek verwendet ([iTextSharp, 2011](#)). Diese speichert die Graphen und verarbeiteten Daten in einer PDF Datei. Die benutzte Version ist die letzte, welche unter MPL und LGPL veröffentlicht wurde und damit frei verwendbar ist. Die Graphen werden als Abbildung eingefügt und die abgebildeten Daten in einer Tabelle hinterlegt. Die Datei soll dann als Messprotokoll dienen und die wichtigsten Erkenntnisse der Messung zusammenfassen. Das bedeutet, dass vor jeder Messung definiert werden sollte, was gemessen wird und welche Ergebnisse erwartet werden.

# 5 Realisierung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung des Designs in ein lauffähiges Programm beschrieben und welche Erkenntnisse aus den erhobenen Daten gewonnen werden konnten.

## 5.1 Software

Mit dem Programm ist es möglich, den Messaufbau nach dem Festlegen der Messparameter automatisiert zu bedienen. Das bedeutet, dass nach den Einstellungen zu Beginn der Messung keine weiteren Veränderungen am Messaufbau vorgenommen werden müssen.

Das Programm erlaubt es, über verschiedene Parameter zu messen und deren Auswirkungen auswerten zu können. Des Weiteren wird ermöglicht, die Sendeleistung des Readers zu variieren und das Tag auf der XZ-Ebene zu drehen. Diese beiden Parameter bilden die wichtigsten Einstellungsmöglichkeiten.

Des Weiteren können verschiedene Verzögerungszeiten festgelegt werden. Ein Zeitparameter beschreibt, wie lange das Tag vor der beginnenden Kommunikation mit dem CW Träger bestrahlt wird. Ein zweiter Parameter bestimmt die Erholzeit nach jeder Kommunikation, in welcher keinerlei Leistung vom Reader ausgesendet wird. Dadurch kann der Einfluss des Stützkondensators auf die Funktionalität des Tags untersucht werden. Dazu kann das Tag im Bereich betrieben werden, in welchem die Kommunikation gerade fehlschlägt. Dann kann ermittelt werden, ob das Tag keine Antwort sendet, weil es die empfangenen Daten nicht dekodieren konnte, oder weil die Versorgungsenergie nicht mehr ausreicht. Dafür muss allerdings sichergestellt sein, dass das Tag genügend Energie speichern kann, um die Antwort senden zu können. Des Weiteren muss der Reader empfindlich genug sein, um die Antwort auch dekodieren zu können.

Außerdem ist es möglich, verschiedene Befehle zu senden, um mögliche Unterschiede in der Erreichbarkeit des Tags feststellen zu können. Die Bedienungsanleitung zur implementierten Software kann Kapitel [7.3](#) entnommen werden.

## 5.2 Messungen

Dieser Abschnitt erklärt, mit welchen Methoden die Messungen ausgewertet wurden und mit welchen Messparametersätzen gearbeitet wurde. Während der ersten Messungen wurde festgestellt, dass der vom PulsarMX übertragene RSSI Wert nicht die Genauigkeit besitzt, um für Berechnungen genutzt zu werden. Aus diesem Grund wird der Wert zwar in den Messdaten gespeichert, aber während der Auswertung lediglich als Indikator für eine erfolgreiche oder fehlgeschlagene Kommunikation genutzt.

### 5.2.1 Feststellung von Ladungsspeicherung

#### Methode

Wie in Kapitel 2.2.2 erwähnt, hat der Stütz- oder Eingangskondensator als Ladungsspeicher des Transponders eine wichtige Rolle. Bei kontinuierlicher Messung könnte es vorkommen, dass ein Tag bei einer bestimmten Sendeleistung noch antwortet, obwohl die ausgesendete Energie des Readers bereits unter die Empfindlichkeitsschwelle des Tags gefallen ist. Das Tag würde bei diesem Vorgang noch genug Energie aus den vorherigen Messungen im Kondensator gespeichert haben.

Um diese Möglichkeit zu erproben, wurde die Sendeleistung in den Messparametern verändert und die Checkbox für das Hoch- und Herunterfahren der Sendeleistung aktiviert. Dadurch wurde die Leistung mit jeder neuen Messung erhöht und in einem späteren Ablauf gesenkt. Sollte der Abbruch der Kommunikation beim Erhöhen und beim Senken der Sendeleistung bei unterschiedlichen Sendeleistungen geschehen, kann auf den beschriebenen Effekt zurückgeschlossen werden.

#### Durchführung

In den Messungen konnte kein Unterschied zwischen dem Erhöhen oder Senken der Sendeleistung festgestellt werden. Beispielhaft sind hier in Abbildung 5.1 zwei Graphen abgebildet, bei welchen am gleichen Punkt der X-Achse die Kommunikation fehlschlägt. Dieses Verhalten wurde bei allen vermessenen Tags beobachtet. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass der Stützkondensator der verwendeten Tags nicht zu groß gewählt wurde und die Messung nicht verfälscht.

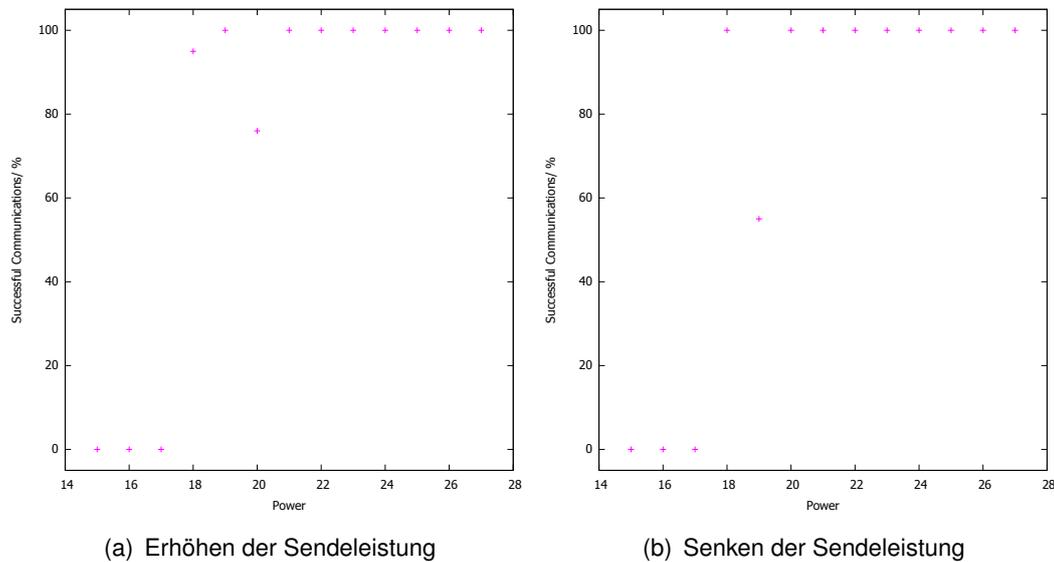


Abbildung 5.1: Beispielhafte emulierte Entfernungen beim Erhöhen oder Senken der Sendeleistung mit einem vom Fraunhofer entwickelten Transponder (RD1s und 'Read' Befehl).

## 5.2.2 Evaluierung der Entfernungsberechnung

### Methode

Um die Berechnung der emulierten Entfernung, welche in Kapitel 3.2.2 beschrieben ist, mit dem Messaufbau zu überprüfen, wurden einige Kontrollmessungen durchgeführt. Diese Messungen sind definiert durch eine Veränderung der Sendeleistung und des Antennenabstandes. Alle anderen Parameter verändern sich nicht, sodass sie keinen Einfluss auf die Messung nehmen. Der Winkel ist auf 0 Grad festgelegt.

Anschließend wurde die Readerantenne auf der X-Achse an verschiedenen Stellen positioniert. Für jede Position wurde die Messung mit jeweils den gleichen Messparametern gefahren. Aus diesen Messungen ergibt sich nun ein Diagramm, welches im Idealfall aus Funktionen besteht, welche genau aufeinander liegen. Allerdings ist dies wegen der Auflösung der Sendeleistung von 1 dB des PulsarMX nicht möglich. Aus der Auflösung resultieren je nach Antennenabstand unterschiedliche emulierte Entfernungen, wodurch jede Funktion unterschiedliche X-Achsen Werte besitzt. Es wird erwartet, dass die Funktionen nicht genau aufeinander liegen, aber alle ungefähr den gleichen Verlauf haben. Wird vorausgesetzt, dass für eine erfolgreiche Kommunikation mit gegebener Sendeleistung mindestens 50 %

der Befehle erfolgreich vom Reader verarbeitet werden können, kann für jeden Antennenabstand der Übergang zu einer überwiegend fehlgeschlagenen Kommunikation als Bereich angegeben werden.

Um dies zu erreichen, wurden die letzte Distanz, bei welcher die Kommunikation überwiegend erfolgreich war, und die darauf Folgende gespeichert und grafisch in einem Koordinatensystem abgebildet. Im Idealfall überschneiden sich alle diese Bereiche, so dass alle Werte einen gemeinsamen X-Achsen Bereich definieren. Wenn dies der Fall ist, kann gefolgert werden, dass die Entfernung, ab welcher die Kommunikation überwiegend fehlschlägt, in diesem Bereich liegt. Um die Maximalentfernung jedoch mit größter Wahrscheinlichkeit anzugeben, sollte das Minimum aller Werte gewählt werden. Zur Darstellung im Koordinatensystem werden auf der X-Achse die emulierten Distanzen aufgetragen und auf der Y-Achse die unterschiedlichen Antennendistanzen.

## Durchführung

Diese Messung wurde, wie zuvor beschrieben, für alle drei verfügbaren Tags durchgeführt. Da der CD1s jedoch, wie erwartet, eine viel geringere Reichweite hat, wurden hier weniger Messungen durchgeführt. Alle Distanzwerte, zu welchen Messungen mit den unterschiedlichen Tags gemacht wurden, sind in Tabelle 5.1 aufgeführt. Für jedes Tag wurde die Messung mit den drei verschiedenen Befehlen durchgeführt und das Ergebnis ist, wie erwartet, nicht ideal aber es lässt eine Tendenz erkennen, wie zum Beispiel in Abbildung 7.11 zu sehen ist. Der auf der Y-Achse eingetragene Wert wird hier als erfolgreich definiert, wenn die Funktion des LLS die Rückmeldung einer erfolgreichen Kommunikation gibt. So wird für alle Messungen mit gleichem Befehl und gleicher Sendeleistung prozentual angegeben, wie erfolgreich diese war. In den Messungen sind Ausreißer teilweise ebenfalls vorhanden, wie in Abbildung 7.10 zu sehen ist.

Außerdem wurden Graphen erstellt, welche die beiden Entfernungen abbildet, um welche der prozentuale Wert das erste Mal unter 50 % fällt. Diese Bereiche sollten sich, wie erwähnt, idealerweise überschneiden. Hier ist auf der Y-Achse die Antennendistanz angegeben und die beiden Punkte markieren die berechneten Entfernungen, zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50 % gefallen ist.

Als maximaler Entfernungswert, ab welchem die Kommunikation noch erfolgreich ist, wurde die Minimalentfernung aller Bereiche gewählt. Dieser Wert spiegelt die Grenze am sichersten wieder (Tabelle 5.2). Der Tabelle lässt sich des Weiteren entnehmen, dass der 'Write' Befehl des CD1s Tags bei keiner der Entfernungen als erfolgreich definiert werden konnte, da hier die minimalen 37cm noch zu weit entfernt waren. Wie erwartet, ist durch die erhöhte Energieaufnahme der Tags beim Schreiben von Daten die Maximalentfernung für den 'Write' Befehl geringer. Dieses Verhalten konnte mit allen drei Tags nachgewiesen werden.

Da der hier genutzte Messaufbau die maximal erlaubte abgestrahlte Leistung nach der ETSI Norm noch unterschreitet, kann durch das Abziehen der Kabeldämpfung und das Addieren des maximalen Antennengewinns eine weitere Entfernung berechnet werden. Diese Entfernung sollte die maximale Kommunikationsreichweite der Tags abbilden, wenn der Aufbau den erlaubten Maximalwert von 500 mW ERP abstrahlt. Um die Berechnung durchzuführen, wurde Formel 5.2.1 genutzt und die Werte wurden in Tabelle 5.3 eingetragen.

Tabelle 5.1: Distanzwerte der Messpunkte für die Evaluierung der Entfernungsberechnung.

Antennendesign	37cm	42cm	47cm	52cm	57cm	62cm
BD1s	✓	✓	✓	✓	✓	✓
CD1s	✓	✓	✓	✓	x	x
RD1s	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Tabelle 5.2: Maximale Entfernung für eine überwiegend erfolgreiche Kommunikation bei 27 dBm Sendeleistung im beschriebenen Messaufbau mit gefilterten Ausreißer Werten.

Antennendesign	'Inventory'	'Read'	'Write'
BD1s	74cm	73cm	58cm
CD1s	47cm	47cm	X
RD1s	116cm	114cm	82cm

$$d[m] = 10^{\frac{D_f \times cm[dB] - 1 \text{ dBi} + A_{Kabel} + 2.15 \text{ dBi}}{20}} \cdot \frac{c \left[ \frac{m}{s} \right]}{4\pi \cdot f[Hz]} \quad (5.2.1)$$

Tabelle 5.3: Maximale Entfernung für eine überwiegend erfolgreiche Kommunikation bei 27 dBm Sendeleistung, ohne Kabeldämpfung und mit einem Antennengewinn der Readerantenne von 2.15 dBi (500 mW ERP).

Antennendesign	'Inventory'	'Read'	'Write'
BD1s	113cm	111cm	88cm
CD1s	71cm	70cm	X
RD1s	176cm	172cm	125cm

### 5.2.3 Evaluierung der Strahlungscharakteristik

#### Methode

Für die Evaluierung der Strahlungscharakteristik wurden die Messergebnisse mit den simulierten Strahlungsdiagrammen verglichen. Um dies zu erreichen, wurden bei den Messungen lediglich die Sendeleistung und der Winkel in der XZ-Ebene zwischen den Antennen verändert. Aus diesen Messdaten kann nun ebenfalls der Übergang von überwiegend erfolgreichen zu fehlerhaften Kommunikationen festgestellt werden. Wird nun in einem Graphen mit Polarkoordinaten auf der Achse die negative Differenz zur minimalen Sendeleistung berechnet und als Leistung in dB gespeichert (Formel 5.2.2), ergibt sich eine Abbildung welche dem Strahlungsdiagramm entspricht. Dieser Wert gibt nun an, wie gut in diesem Winkel die Tag zu Reader Kommunikation funktioniert hat. Daraufhin können die Pegeldifferenzen mit den simulierten verglichen werden. Dazu müssen die gemessenen und die simulierten Werte zueinander normiert werden.

Diese Messung wurde mit dem 'Read' und dem 'Write' Befehl durchgeführt. Diese sollten jedoch auf die Pegeldifferenzen keinen nennenswerten Einfluss haben. Es kann erwartet werden, dass unterschiedlich viele Messungen, aufgrund der unterschiedlichen Energieaufnahme, erfolgreich sein werden.

$$G_{X \text{ Achse}} = \min(G_{\text{Sendeleistung}}) - G_{\text{Sendeleistung}} \quad (5.2.2)$$

#### Durchführung

Um die Strahlungscharakteristik der Tags abzubilden, wurden die Messparameter auf 12 dBm bis 27 dBm in 1 dB Schritten eingestellt. Des Weiteren wurde die minimale Winkelauflösung von 1,8 Grad in einem Bereich von -90 Grad bis 90 Grad eingestellt.

Für jede einzelne Einstellung wurden 100 Messungen durchgeführt. Die Messung für eine Einstellung wurde für gelungen definiert, wenn über 50 % der Kommunikationen erfolgreich waren. Dieser Vorgang wurde für alle drei Tags durchgeführt.

Bei der folgenden Auswertung ist zu beachten, dass festgestellt wurde, dass für bestimmte Winkel die Kommunikation fehlschlägt, obwohl Bereiche um diesen Winkel herum erfolgreich sind (vgl. Abbildung 5.3). Diese Einbrüche wurden für den Vergleich mit den simulierten Werten nicht explizit betrachtet. Die Einbrüche lassen sich der Strahlungscharakteristik nicht einfach entnehmen (vgl. Abbildung 5.2), sind aber aus der Wertetabelle in den Messprotokollen erkennbar. Diese Störungen sind nicht reproduzierbar, treten aber häufiger auf. Eine mögliche Erklärung dieser Einbrüche sind auftretende destruktive Reflexionen im Inneren der Messkammer. Da die Einbrüche im vom Programm erstellten Strahlungsdiagramm nicht

angezeigt werden, ist zu empfehlen, beim Erstellen der Graphen auch immer die Polardarstellung der erfolgreichen Kommunikationen für die maximale Sendeleistung zu erstellen. Dieser Anzeige können Einbrüche schnell entnommen werden.

Für die Bewertung der Ergebnisse wurden die aus den Messwerten erstellten Daten zusammen mit den simulierten Werten in ein Polarkoordinatensystem eingetragen. Dafür wurde die Leistung bei 0 Grad vom gemessenen Wert auf den simulierten Wert normiert, da durch diese Messung lediglich die Leistungsdifferenzen der verschiedenen Winkel interessant und aussagekräftig sind (vgl. Abbildung 5.4). Außerdem wurde der Ablauf mit dem 'Read' und dem 'Write' Befehl durchlaufen.

Ein weiterer Graph zeigt den Betrag der Differenzen zwischen den gemessenen und simulierten Werten. Hier wurde eine Grenze bei 1 dB eingetragen, da dies die Auflösung des Readers ist. Die Grenze definiert so den Bereich, in welchem Schwankungen zu erwarten sind (vgl. Abbildung 5.5).

Den Abbildungen lässt sich entnehmen, dass die gesetzte Grenze von 1 dB nicht immer unterschritten wurde. Daraus lässt sich schlussfolgern, dass die Messkammer im aktuellen Aufbau keine idealen Messbedingungen herstellt. Die Asymmetrie in den Abweichungen könnte außerdem ein Hinweis darauf sein, dass die Messkammer in der aktuellen Konfiguration keine symmetrische beziehungsweise gleichbleibende Dämpfung besitzt.

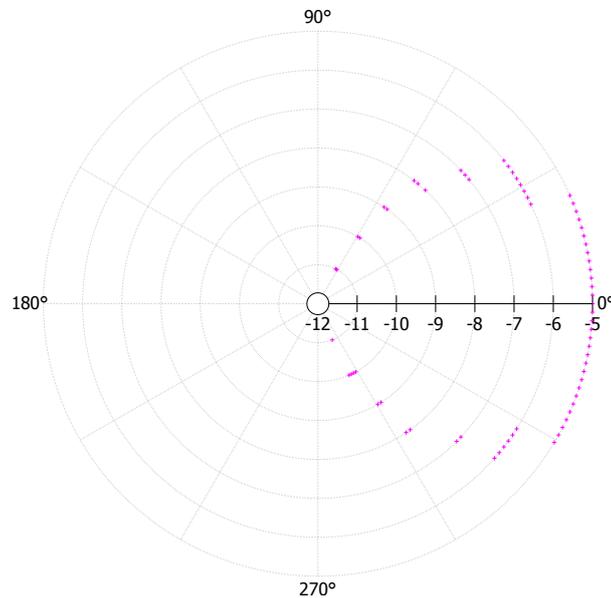


Abbildung 5.2: Beispiel eines Strahlungsdiagramms, welches das Programm erstellen kann.

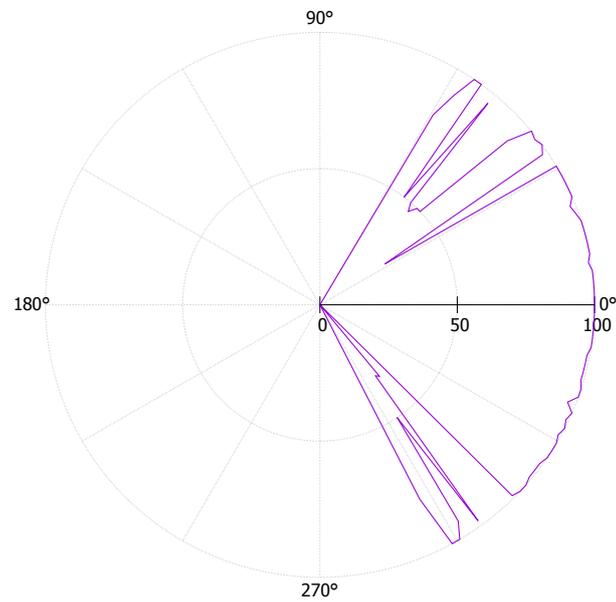


Abbildung 5.3: CD1s erfolgreiche Kommunikationen in % in Polarkoordinaten mit 'Write' Befehl. Beispielhafte Abbildung von Kommunikationseinbrüchen. Erstellt mit der programmierten GUI.

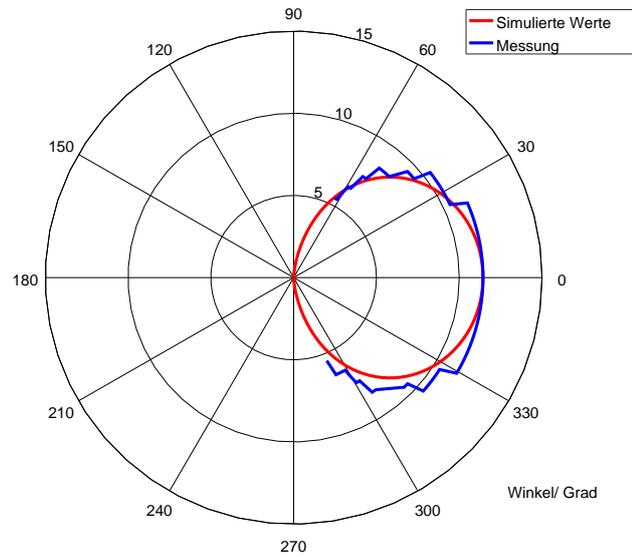


Abbildung 5.4: CD1s Strahlungscharakteristik der simulierten und gemessenen Werte. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

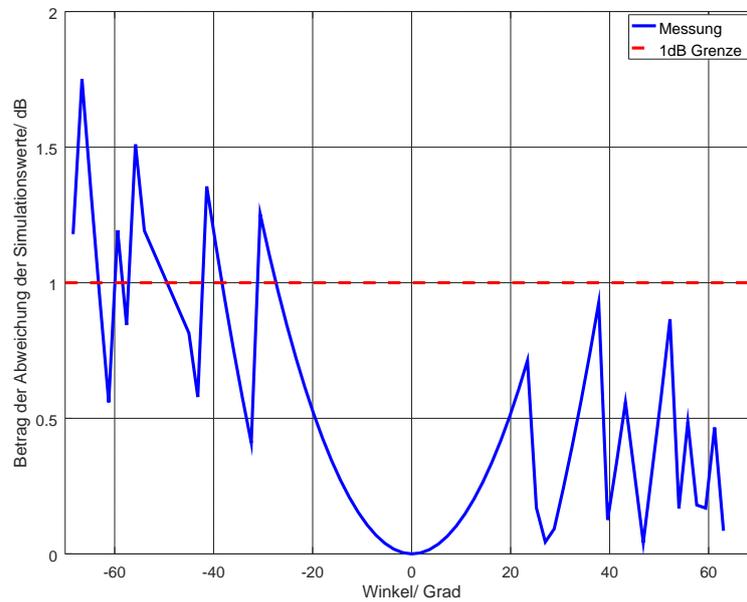


Abbildung 5.5: CD1s Strahlungsdifferenz von simulierten zu gemessenen Werten. Differenz der selben Messung wie in [Abbildung 5.4](#)

## 5.2.4 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

### Methode

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse nachzuweisen, wurde die Messung zur Evaluierung der Strahlungscharakteristik ein zweites Mal durchgeführt. Diesmal jedoch mit zehn Messpunkten pro Einstellung. Daraufhin können beide Ergebnisse miteinander verglichen werden. Es wird erwartet, dass sich die Ergebnisse geringfügig unterscheiden. Für einen Nachweis der Reproduzierbarkeit sollte die Differenz beider Messungen maximal 1 dB betragen, da dies die Auflösung des Readers ist.

### Durchführung

Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu überprüfen, wurde die Messung für die Strahlungscharakteristik ein zweites Mal mit zehn Messungen pro Einstellung durchgeführt. Daraufhin wurden die Ergebnisse beider Messungen miteinander verglichen.

Den Abbildungen kann entnommen werden, dass beide Messungen sehr ähnliche Ergebnisse liefern. Eine komplette Übereinstimmung der Daten war nicht zu erwarten. In [Abbildung 5.6](#) sind diese geringen Unterschiede beispielhaft durch eine Messung mit dem 'Read' Befehl am BD1s Tag zu erkennen.

Des Weiteren kann aus der Entfernungsmessung die Reproduzierbarkeit teilweise abgeleitet werden, da, wie beschrieben, für jede Entfernung ein eigener Messdurchlauf gestartet wurde und diese somit auch zeitlich unabhängig voneinander sind. Trotz der Unabhängigkeit lieferten die Messungen ähnliche Ergebnisse und lassen die Aussage zu, dass ein gewisser Grad an Reproduzierbarkeit erreicht wurde.

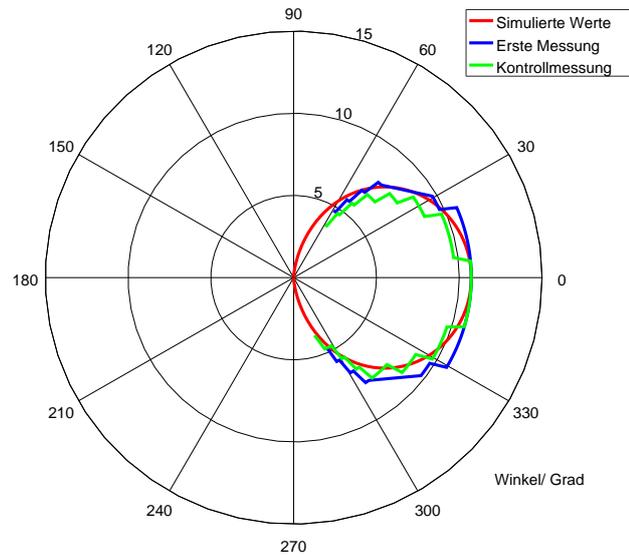


Abbildung 5.6: BD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

Tabelle 5.4: Strahlungsdiagramme der Tags mit zwei Messungen

Antennendesign	'Read'	'Write'
BD1s	5.6	7.26
CD1s	7.29	7.30
RD1s	7.33	7.34

Tabelle 5.5: Strahlungsdiagramm Differenzen zur Simulation der Tags mit zwei Messungen

Antennendesign	'Read'	'Write'
BD1s	7.27	7.28
CD1s	7.31	7.32
RD1s	7.35	7.36

# 6 Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse analysiert und diskutiert. Außerdem werden mögliche Verbesserungen oder Veränderungen genannt und erläutert.

## 6.1 Bewertung der Ergebnisse

Für alle Ergebnisse ist zu beachten, dass die Abschirmungseigenschaften der Messkammer nicht bekannt sind und dadurch der Einfluss von außen nicht berechenbar ist. Die Messungen wurden außerdem an mehreren Tagen durchgeführt. Teilweise waren im selben Labor noch andere Reader in Betrieb. Deshalb muss bei allen Ergebnissen beachtet werden, dass ein Störeinfluss von außen nicht auszuschließen ist.

### 6.1.1 Evaluierung der Entfernungsberechnung

Die Messungen zur Nachprüfung der Entfernungsberechnung durch die Freiraumdämpfung (Formel 3.2.1) haben das Ergebnis geliefert, welches erwartet wurde. Der Abbruch der Kommunikation erfolgte bei den Messungen immer in einem Bereich von ungefähr 20 cm. Die Bereiche, in welchen die Erfolgsquote auf unter 50 % abfällt, überschneiden sich teilweise. Da diese Messungen alle unabhängig voneinander waren und jedes Mal der Messaufbau verändert wurde, kann gefolgert werden, dass durch die Berechnungen eine Aussage über die Reichweite gemacht werden kann.

### 6.1.2 Evaluierung der Strahlungscharakteristik

Bei den Messungen zur Nachprüfung der Strahlungscharakteristik wurden Schwankungen von 1 dB erwartet. Dieser Wert wurde in einigen Messpunkten, gerade bei spitzen Winkeln, überschritten. Die Messdaten haben in den durchgeführten Messungen eine maximale Abweichung von ca. 3,7 dB (Abbildung 7.33). Um diese Messungen genau bewerten zu können,

ist es wichtig, die Messkammer im Inneren durch ein geeignetes Messinstrument auf Reflexionen und Interferenzen zu prüfen. Dadurch könnte es auch möglich sein, die Einbrüche der erfolgreichen Kommunikationen bei bestimmten Winkeln (vgl. Abbildung 5.3) zu erklären.

### 6.1.3 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Bei den Kontrollmessungen wurden ähnliche Ergebnisse wie bei den ersten Messungen erzielt. Den geringen Schwankungen kann entnommen werden, dass die Messkammer keine idealen Abschirmungs- und Dämpfungseigenschaften besitzt. Außerdem ist es möglich, dass minimale Unterschiede in der Position der Antenne durch erneutes Verschieben des Aufbaus, an welchem die Readerantenne befestigt ist, diese Abweichungen hervorrufen.

### 6.1.4 Zusammenfassung

In dieser Arbeit konnte erfolgreich ein System implementiert und getestet werden, um Messungen an verschiedenen Tags automatisiert vornehmen zu können. Trotz der Abweichungen zu den simulierten Werten ist ein Vergleich verschiedener Designs auf Grundlage der Messungen und deren Auswertung möglich. Die Ergebnisse der Messungen sind überwiegend reproduzierbar. Diese Messungen lassen sich mit ähnlichen Bedingungen und gleichem Messablauf jederzeit wiederholen.

Des Weiteren ermöglicht es das Programm, eine umfangreiche Dokumentation und Auswertung der Ergebnisse direkt aus den Messdaten zu erstellen. Die Software ermöglicht dem Anwender, den Aufwand der Messungen zu minimieren und trägt damit wesentlich zur Beschleunigung der Messabläufe bei. Der Gesamtaufbau ermöglicht es, definierte Messbedingungen zu schaffen, welche im Vergleich zu den Messungen am Labortisch wesentlich verbessert wurden. Verbleibende Messungenauigkeiten sind auf nicht durch diese Arbeit beeinflussbare Bedingungen zurückzuführen.

Die Minimalziele, welche die Aufgabenstellung definiert hat, wurden alle erfüllt. Von den optionalen Zielen konnten nicht alle erfüllt werden. Die aktuelle Version des LLS lässt eine Änderung der Modulation und anderen Parametern, welche die Kommunikation direkt beeinflussen, nicht zu. Dies hängt auch damit zusammen, dass nicht jede Readerhardware eine Methode zur Veränderung implementiert. Alle erstellten Graphen werden als Bitmap Grafik und Vektorgrafik abgespeichert. Die Abschätzung der Messdauer wurde ebenfalls erfolgreich implementiert, diese ist jedoch nur ein grober Richtwert.

## 6.2 Ausblick

Damit die Messungen mit diesem Messaufbau präziser durchgeführt werden können, sollte die Messkammer zuallererst, bezüglich der Abschirmung bei 868 MHz, ausgemessen werden. Dadurch kann nachgewiesen werden, ob die Messungen überhaupt aussagekräftig sein können. Außerdem sollte der Innenraum auf Reflexionen untersucht werden. Daraufhin können durch den Messaufbau, welcher in der Diplomarbeit ([Braun, 2011](#)) beschrieben wurde, genauere Messungen der Transponder durchgeführt werden. Es ist möglich, das erstellte Programm umzuschreiben und für einen veränderten Messaufbau zu nutzen. Dadurch können alle Messungen mit genauerer Hardware durchgeführt werden. Möglich wäre zum Beispiel der Einsatz eines Netzwerkanalysator mit den notwendigen softwareseitigen Erweiterungen.

Außerdem wäre es nun möglich, Tags mit unterschiedlichen Chipsätzen auszustatten und diese zu vergleichen. Dadurch können vom Fraunhofer erstellte Designs mit kommerziellen verglichen werden. Zusätzlich kann die Antenne durch ein Anpassungsnetzwerk an den Chip angepasst werden und durch Messungen die beste Einstellung ermittelt werden. Dadurch kann auf die Eingangsimpedanz des Transponderchips geschlossen werden.

# 7 Anhang

## 7.1 Abkürzungsverzeichnis

<b>ASK</b>	'amplitude shift keying'
<b>BD</b>	'boxed dipole'
<b>BLF</b>	'backscatter link frequency'
<b>CD</b>	'circle dipole'
<b>CSV</b>	'comma-separated values'
<b>CW</b>	'constant wave'
<b>DLL</b>	dynamisch eingebundene Bibliothek 'dynamic link library'
<b>DSB-ASK</b>	'double sideband amplitude shift keying'
<b>EIRP</b>	äquivalente isotrope Strahlungsleistung 'equivalent isotropically radiated power'
<b>EPC</b>	'electronic product code'
<b>ERP</b>	effektive Strahlungsleistung 'effective radiated power'
<b>ETSI</b>	European Telecommunications Standards Institute
<b>GUI</b>	grafische Benutzerschnittstelle 'graphical user interface'
<b>IC</b>	integrierter Schaltkreis 'integrated circuit'
<b>IDE</b>	'integrated development environment'
<b>LGPL</b>	GNU Lesser General Public License
<b>LLS</b>	'Low-Level-Stack'
<b>MPL</b>	Mozilla Public License
<b>PDF</b>	'portable document format'

---

<b>PIE</b>	'pulse-interval encoding'
<b>PR-ASK</b>	'phase-reversal amplitude shift keying'
<b>RD</b>	'regular dipole'
<b>Reader</b>	RFID Reader
<b>RFID</b>	'radio-frequency identification'
<b>RSSI</b>	'received signal strength indication'
<b>SMA</b>	Sub-Miniature-A
<b>SSB-ASK</b>	'single sideband amplitude shift keying'
<b>Tag</b>	RFID Transponder
<b>UHF</b>	ultrahochfrequent 'ultra high frequency'
<b>XML</b>	'extensible markup language'
<b>XSD</b>	'XML schema definition'

## 7.2 Abbildungen

### 7.2.1 Messkammer

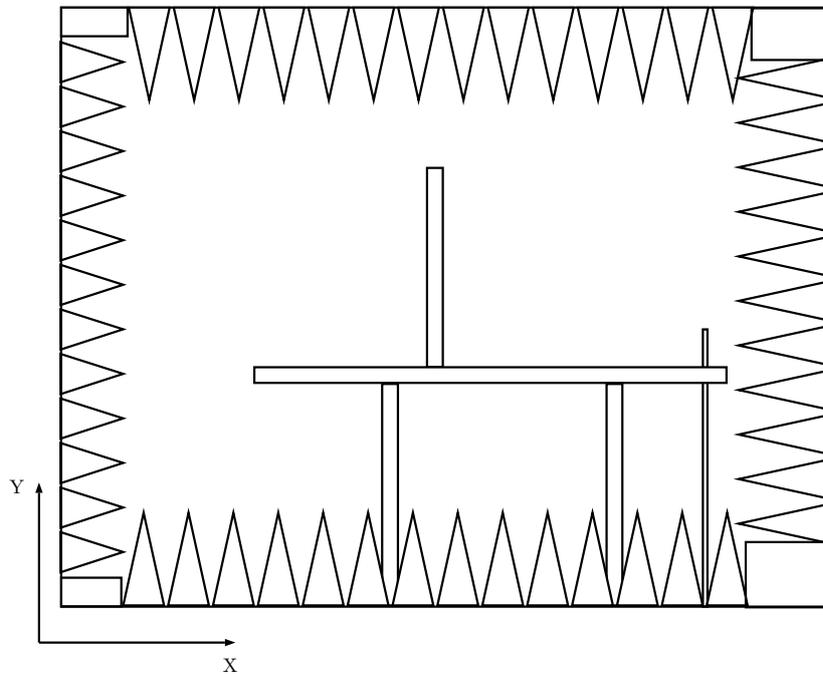


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Messbox Innenraums in der Vorderansicht

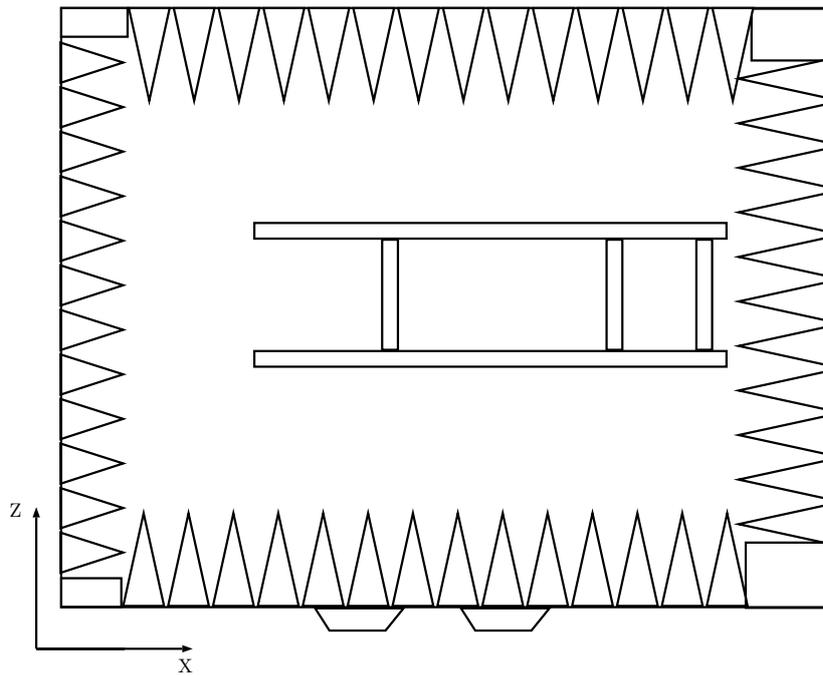


Abbildung 7.2: Schematische Darstellung des Messbox Innenraums in der Draufsicht

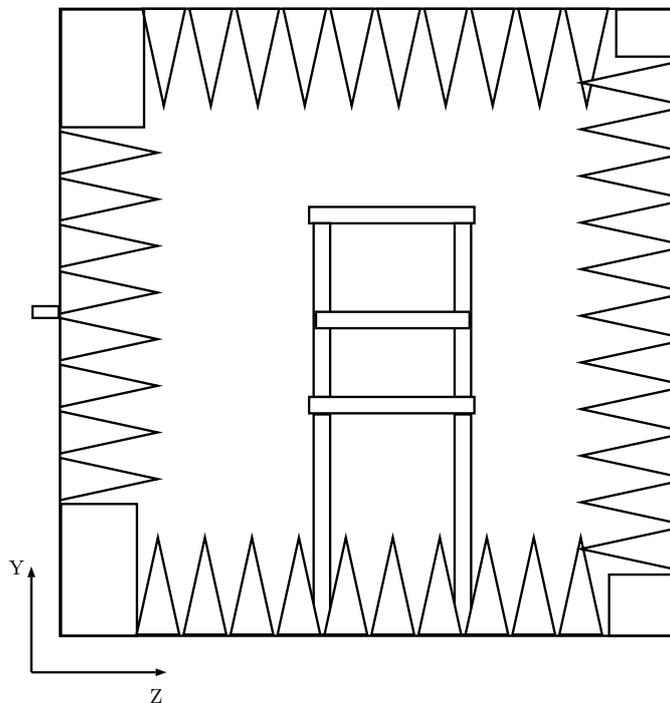


Abbildung 7.3: Schematische Darstellung des Messbox Innenraums in der Seitenansicht

## 7.2.2 Simulierte Antennendiagramme

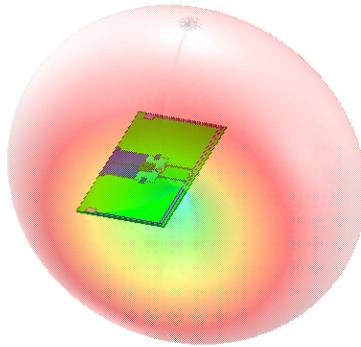


Abbildung 7.4: Simuliertes Antennendiagramm 3D vom BD1s

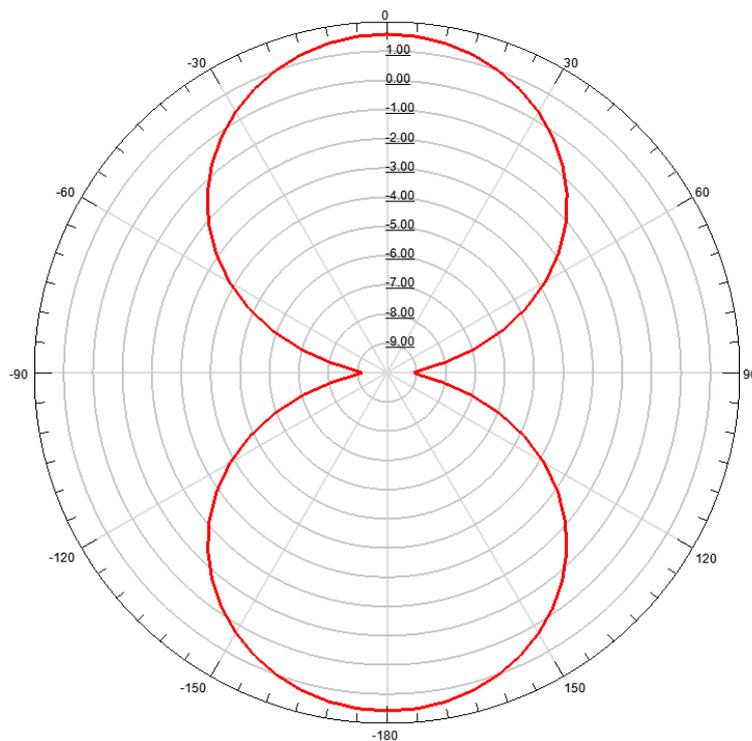


Abbildung 7.5: Simuliertes Antennendiagramm 2D vom BD1s in der XZ-Ebene

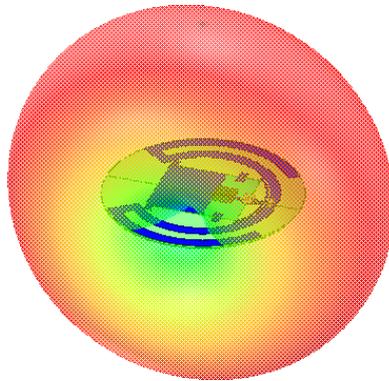


Abbildung 7.6: Simuliertes Antennendiagramm 3D vom CD1s

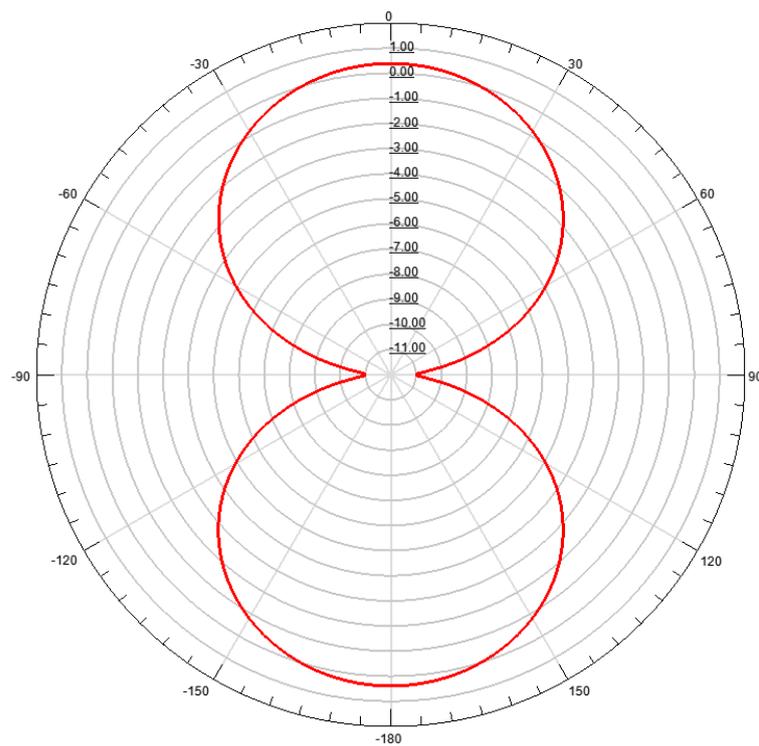


Abbildung 7.7: Simuliertes Antennendiagramm 2D vom CD1s in der XZ-Ebene

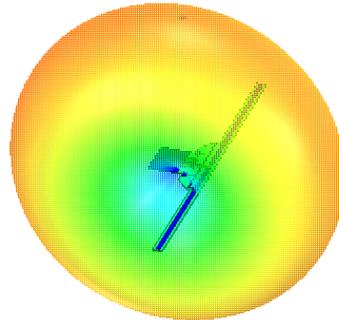


Abbildung 7.8: Simuliertes Antennendiagramm 3D vom RD1s

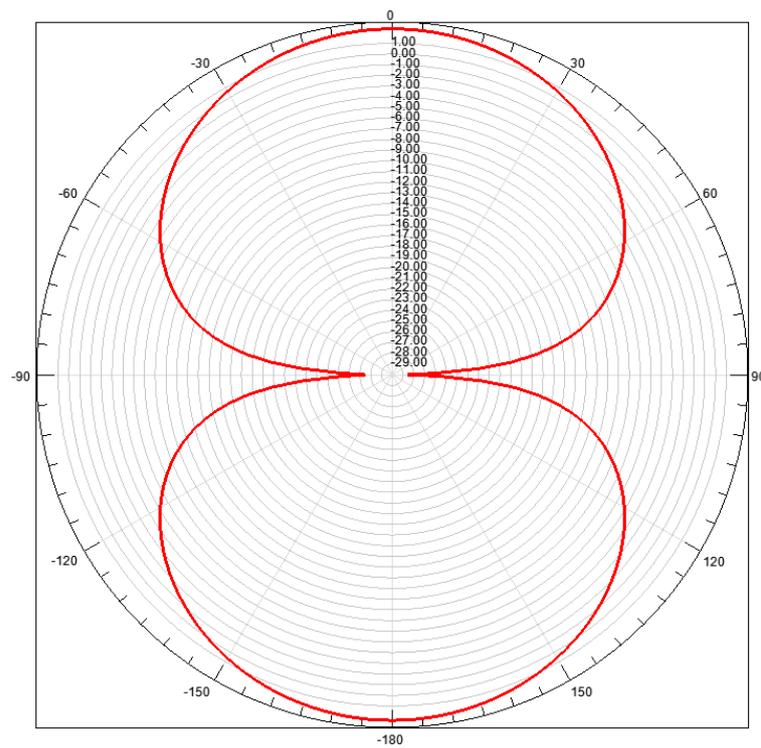


Abbildung 7.9: Simuliertes Antennendiagramm 2D vom RD1s in der XZ-Ebene

## 7.2.3 Messungen

### Entfernungsmessung

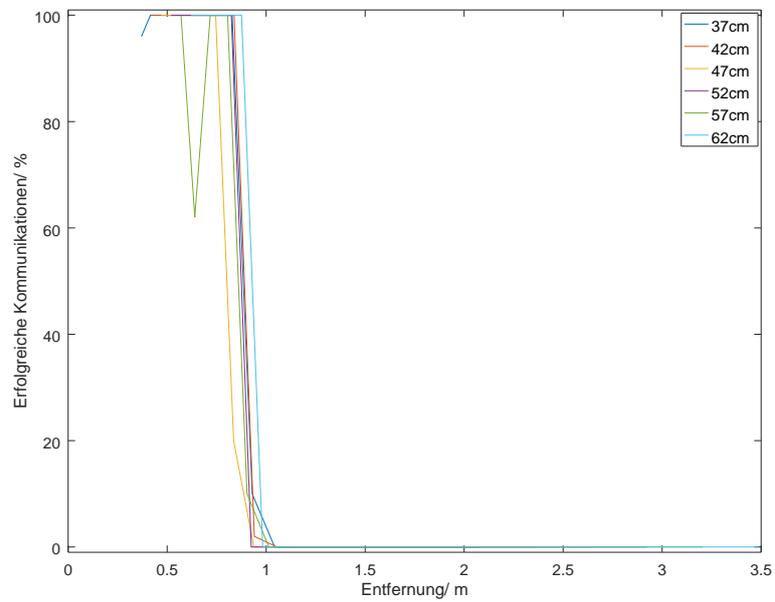


Abbildung 7.10: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des BD1s Tags durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

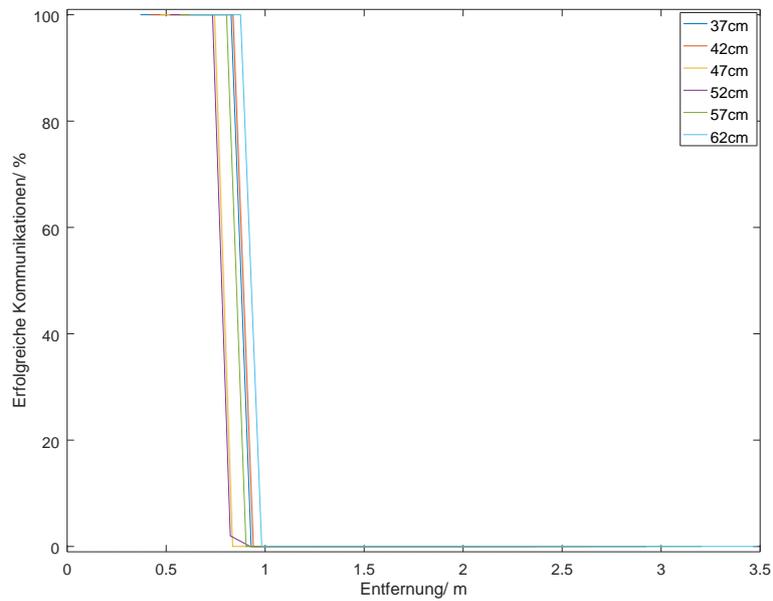


Abbildung 7.11: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des BD1s Tags durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

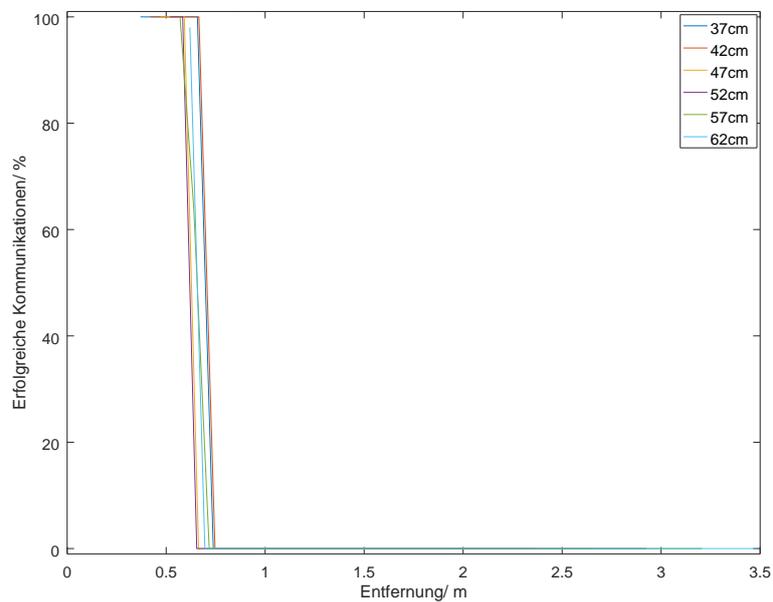


Abbildung 7.12: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des BD1s Tags durch einen 'Write' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

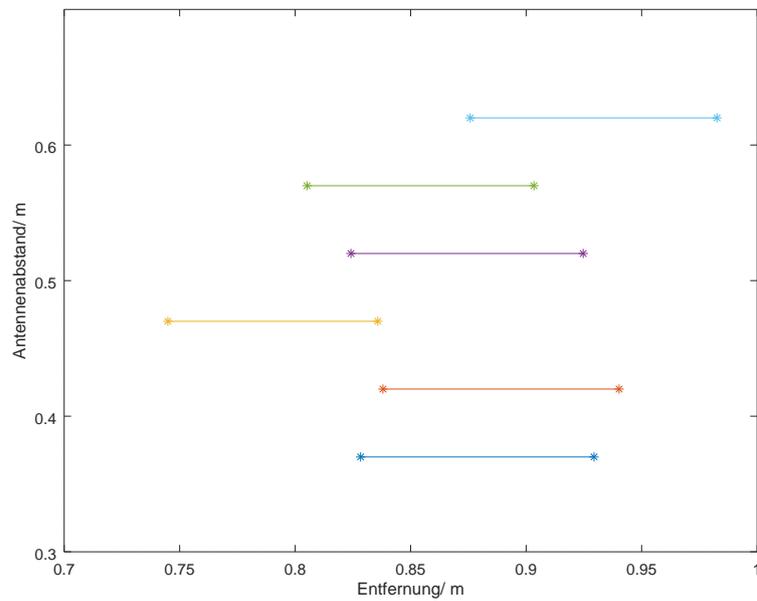


Abbildung 7.13: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom BD1s Tag durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

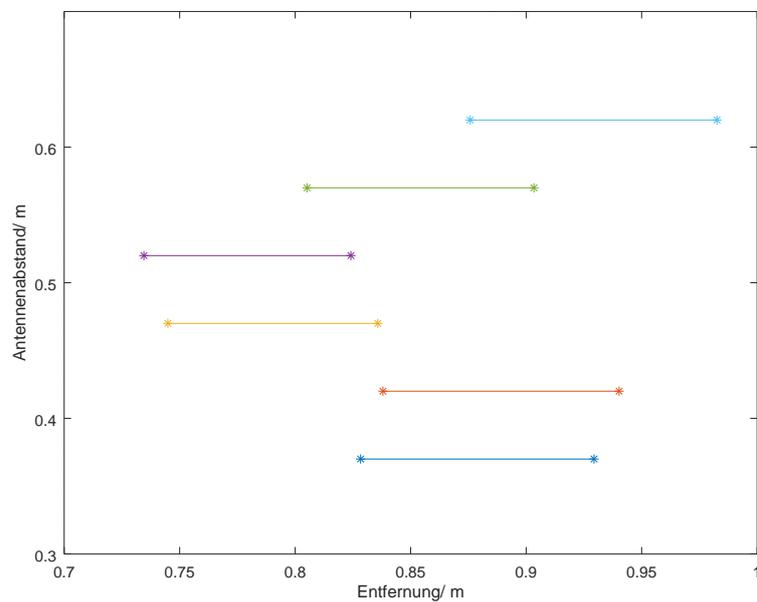


Abbildung 7.14: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom BD1s Tag durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

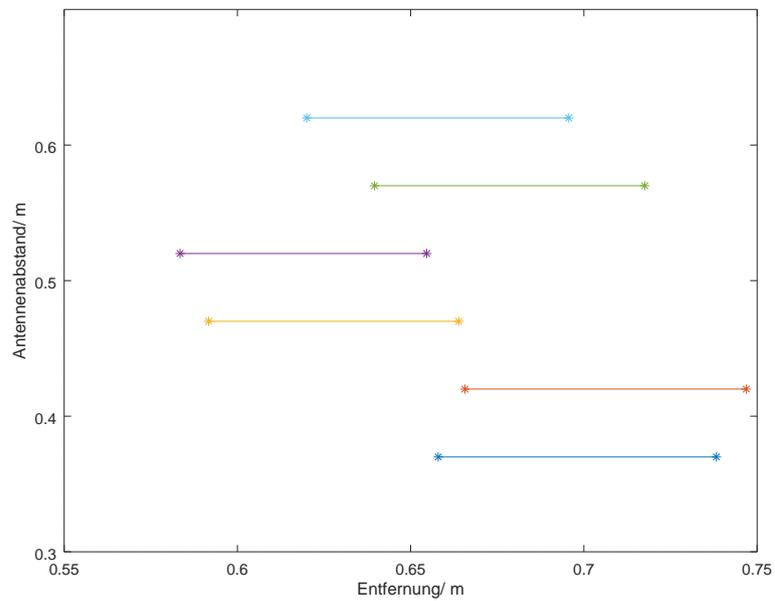


Abbildung 7.15: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom BD1s Tag durch einen 'Write' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

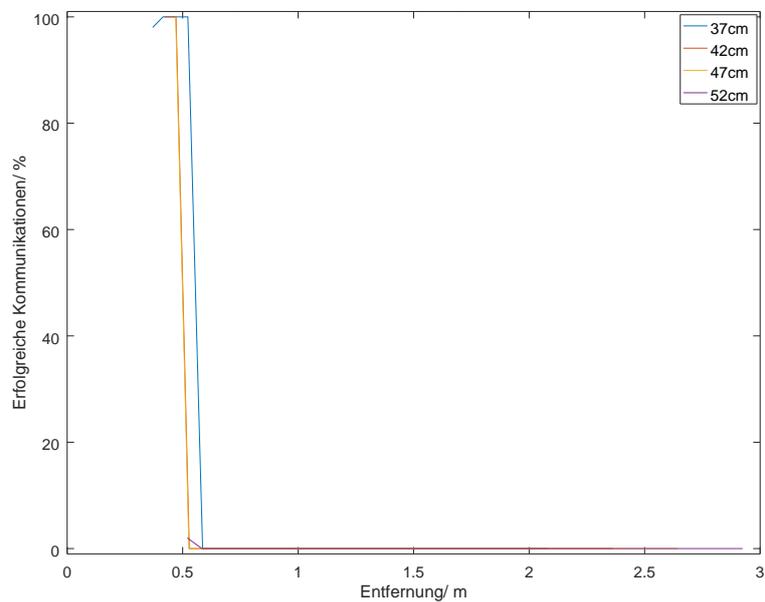


Abbildung 7.16: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des CD1s Tags durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

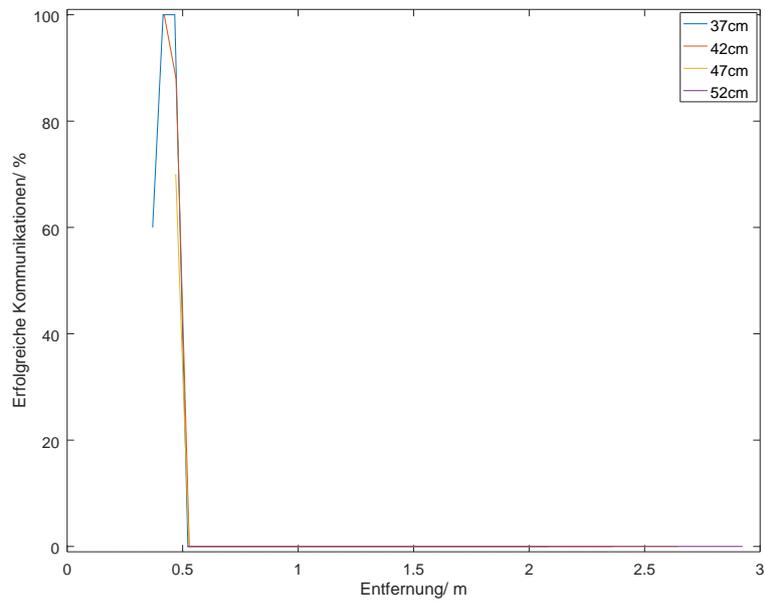


Abbildung 7.17: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des CD1s Tags durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

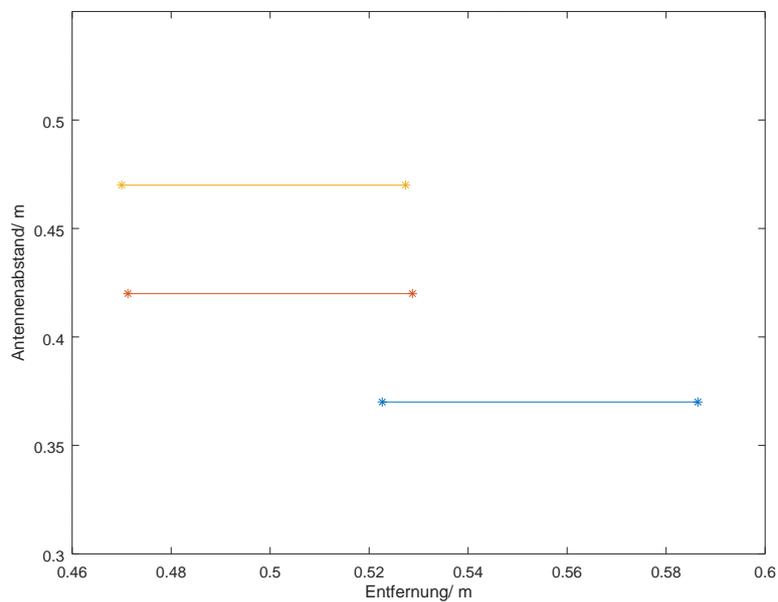


Abbildung 7.18: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom CD1s Tag durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

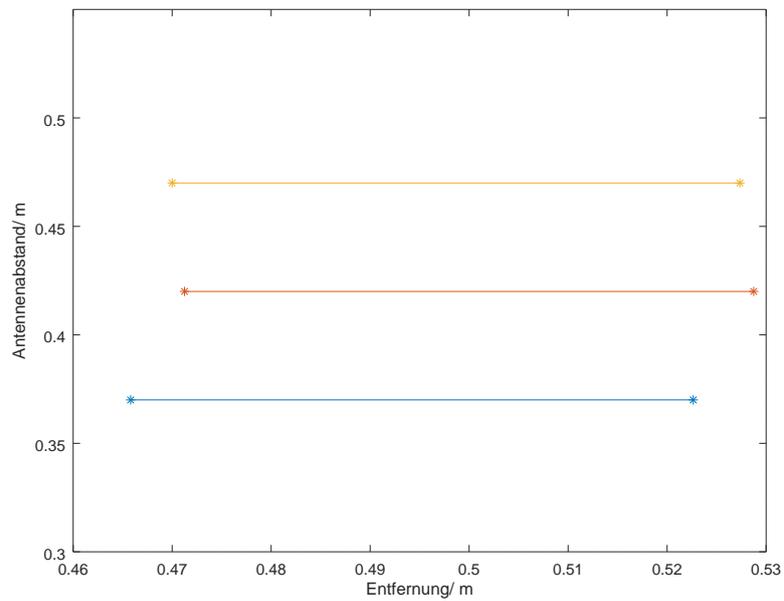


Abbildung 7.19: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom CD1s Tag durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

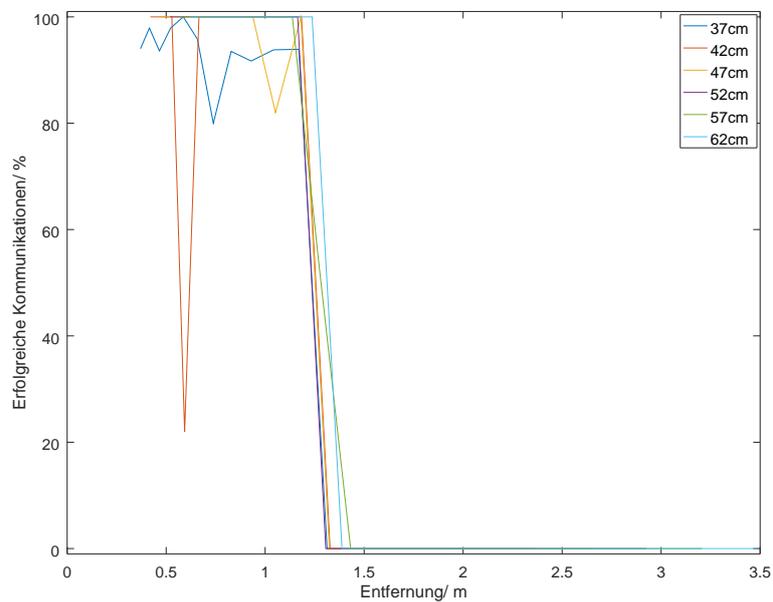


Abbildung 7.20: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des RD1s Tags durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

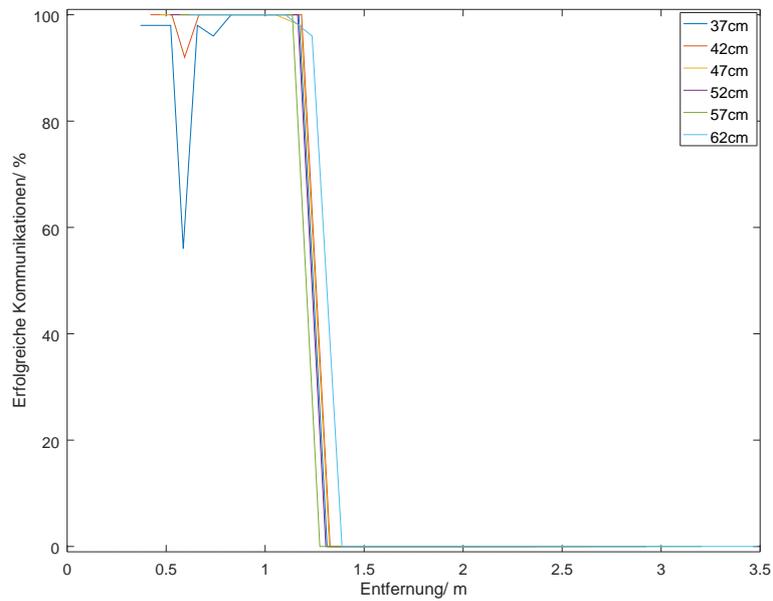


Abbildung 7.21: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des RD1s Tags durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

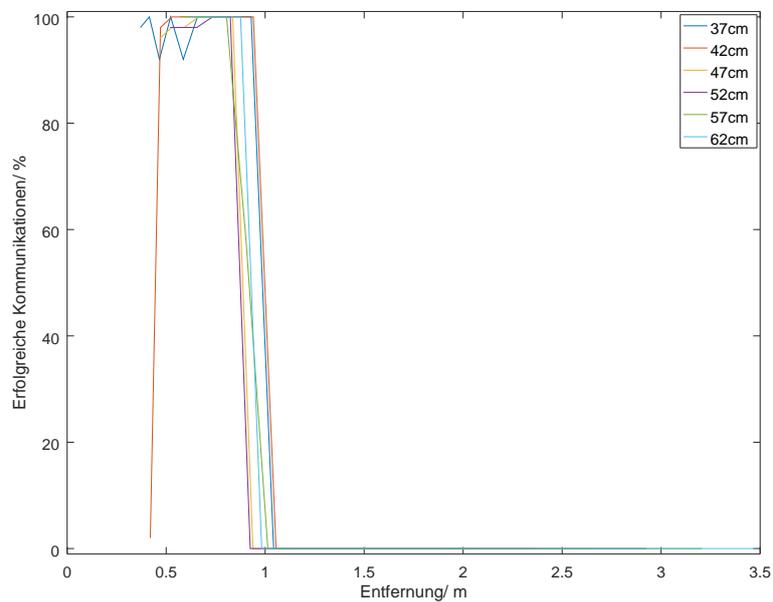


Abbildung 7.22: Alle aufgenommenen Entfernungskurven des RD1s Tags durch einen 'Write' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

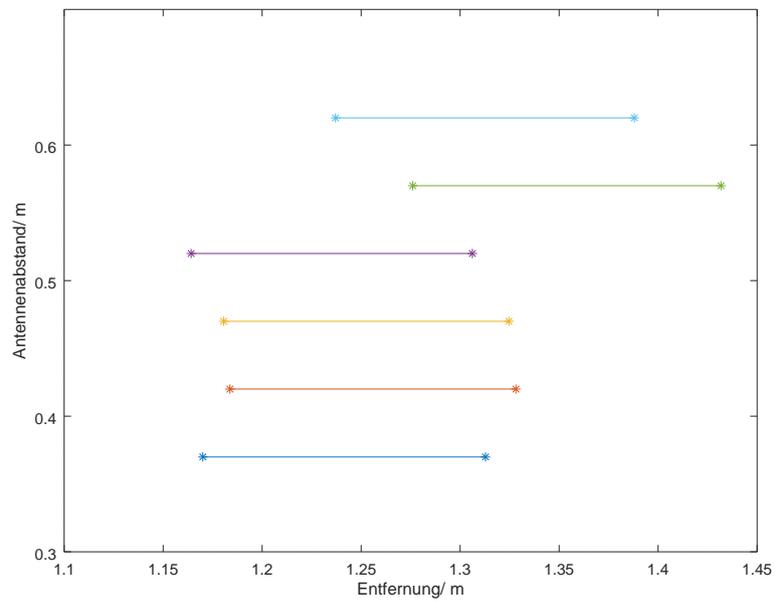


Abbildung 7.23: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom RD1s Tag durch einen 'Inventory' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

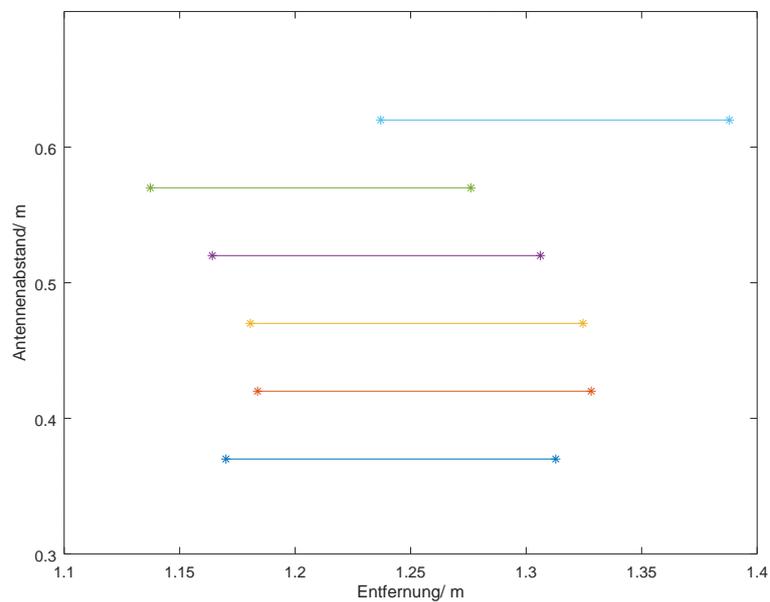


Abbildung 7.24: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom RD1s Tag durch einen 'Read' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

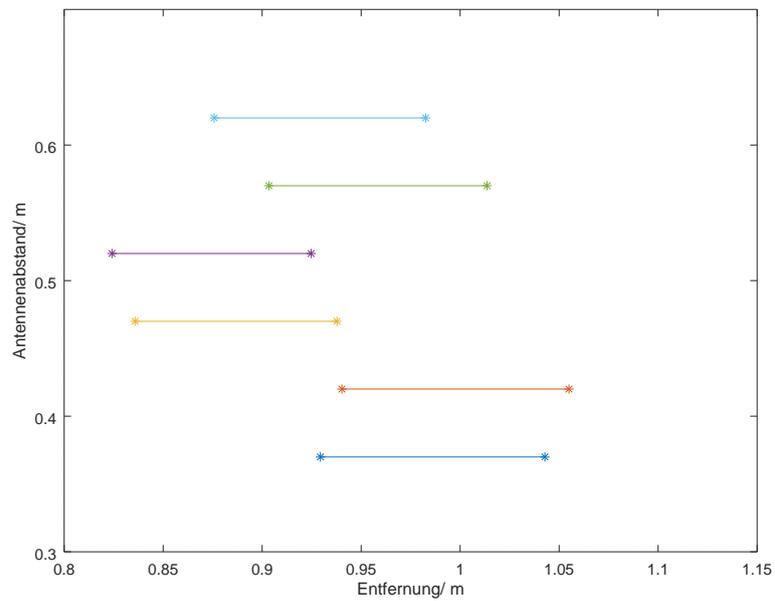


Abbildung 7.25: Punkte zwischen welchen die Erfolgsquote unter 50% fällt vom RD1s Tag durch einen 'Write' Befehl für sechs verschiedene Antennendistanzen.

### Strahlungscharakteristik

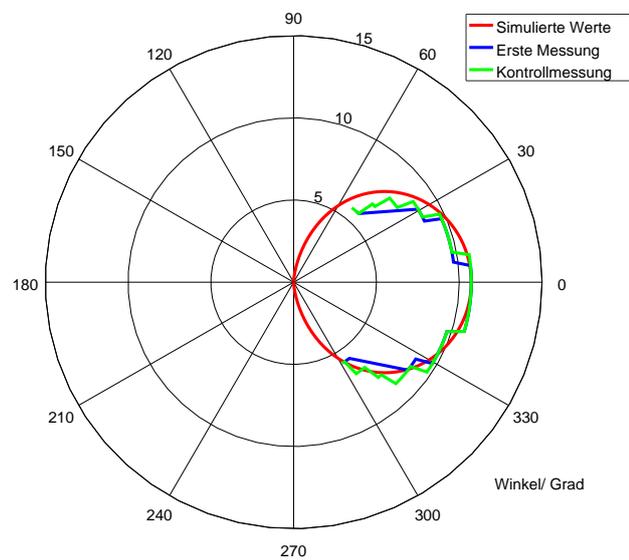


Abbildung 7.26: BD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

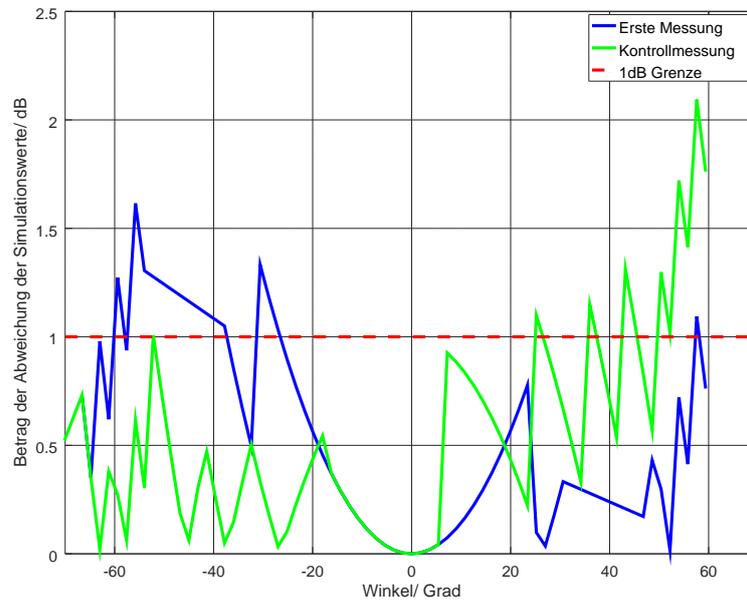


Abbildung 7.27: BD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

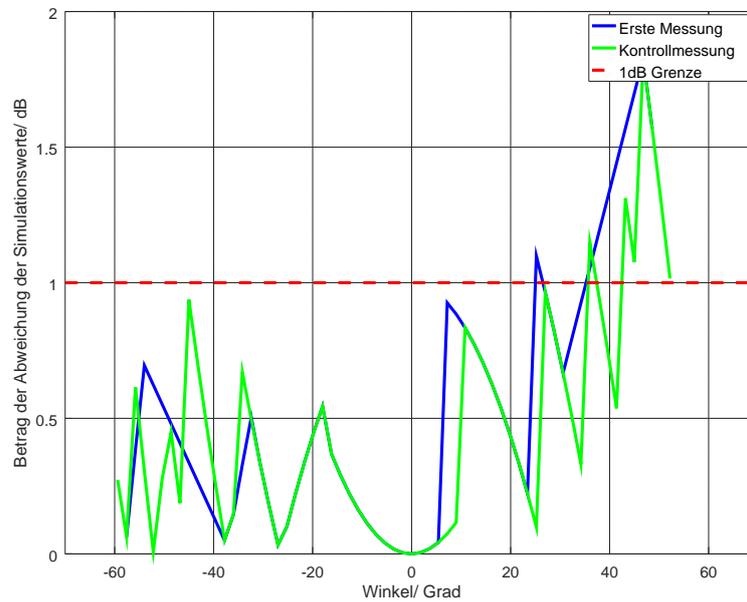


Abbildung 7.28: BD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

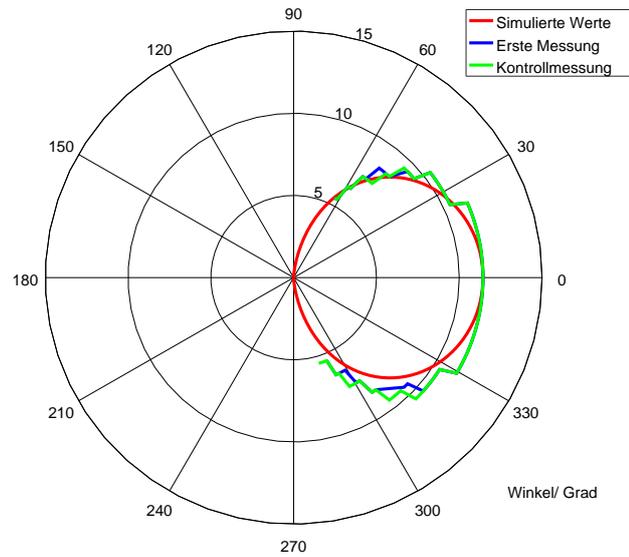


Abbildung 7.29: CD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

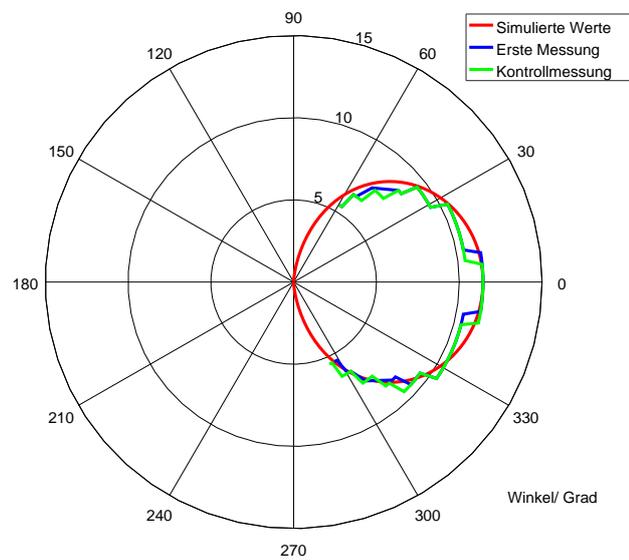


Abbildung 7.30: CD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

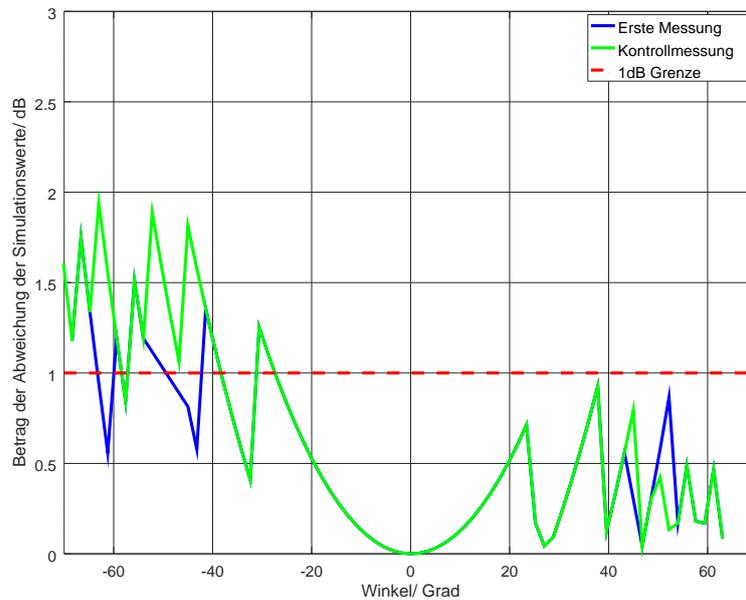


Abbildung 7.31: CD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

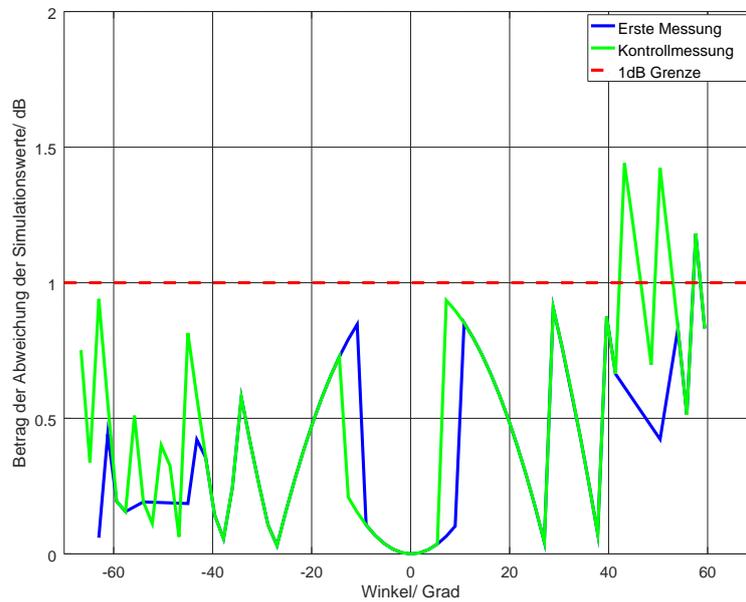


Abbildung 7.32: CD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

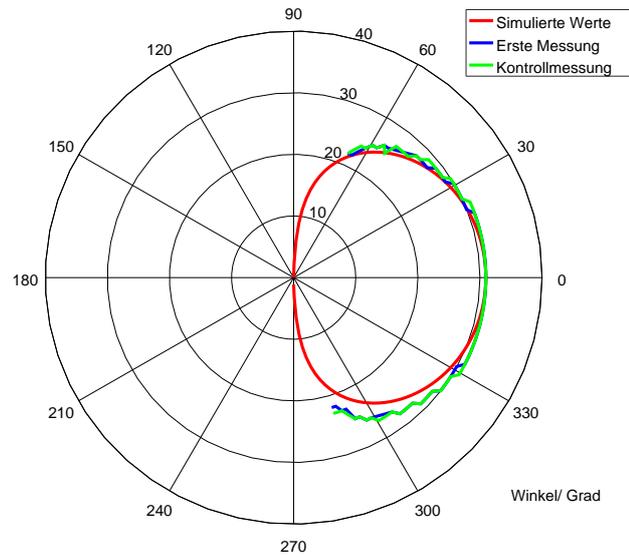


Abbildung 7.33: RD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

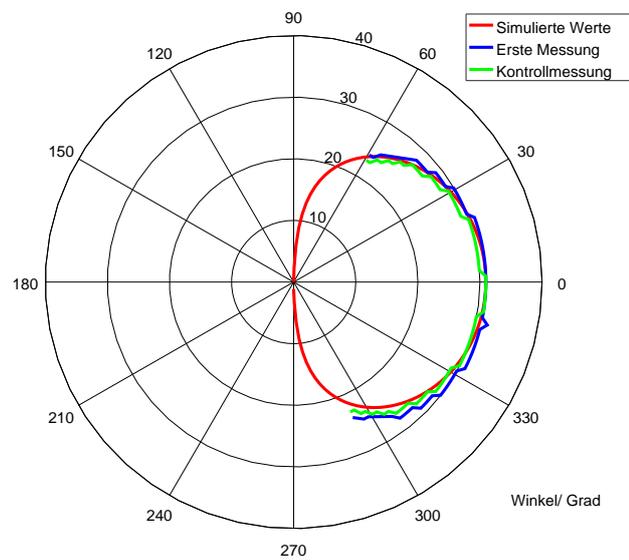


Abbildung 7.34: RD1s Strahlungsdiagramm von simulierten und gemessenen Werten im Bereich -90 bis 90 Grad. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

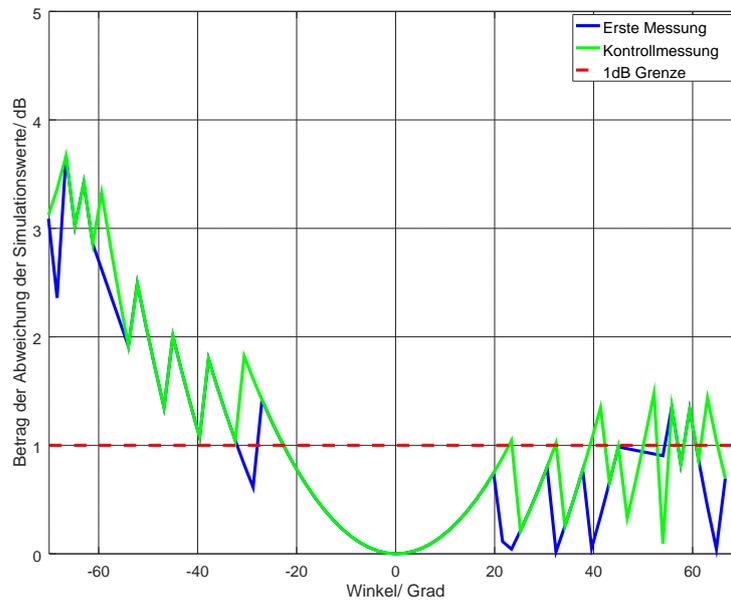


Abbildung 7.35: RD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Read' Befehl.

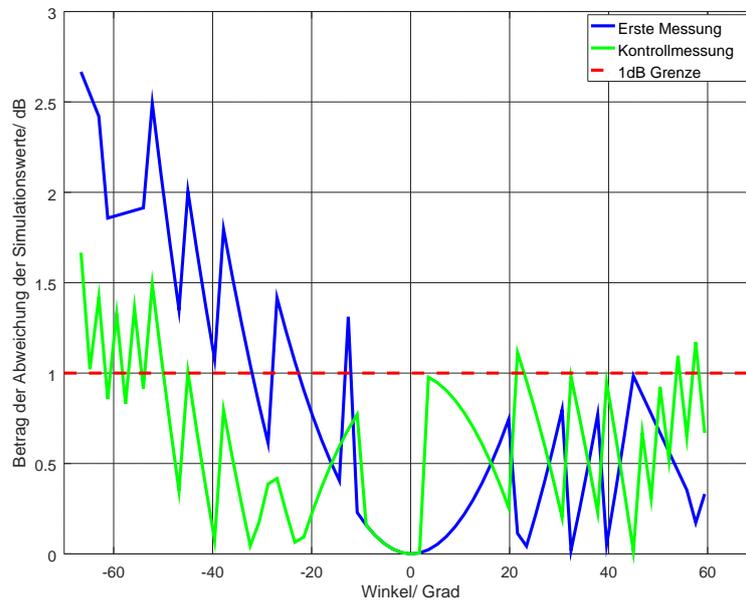


Abbildung 7.36: RD1s Graph der Differenzen des Strahlungsdiagramms von simulierten zu gemessenen Werten. Gemessen mit dem 'Write' Befehl.

## 7.3 Software Bedienungsanleitung

### Anleitung für das AutomatedMeasurementTool

#### Hauptfenster

The screenshot shows the main window of the AutomatedMeasurementTool. It features a menu bar at the top with 'File', 'Settings', and 'Help'. Below the menu bar are two connection sections. The first section has a dropdown menu set to 'RPF\_RTP\_PULSARMX', a 'Connect' button, 'Device Status' text, and a 'Search Tag' button. The second section has an empty dropdown menu, a 'Connect' button, and 'COM Status' text. The main area contains a table of measurement parameters:

	Start	Step	End		
Power	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	dBm	<input type="checkbox"/> Fixed
Angle	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	°	<input type="checkbox"/> Fixed
Commands	<input type="checkbox"/> Inventory	<input type="checkbox"/> Read	<input type="checkbox"/> Write		
Recovery Time	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	ms	<input type="checkbox"/> Fixed
Power CW	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	dBm	<input type="checkbox"/> Fixed
CW Duration	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>	ms	<input type="checkbox"/> Fixed
Iterations	<input type="text"/>				

Additional controls include a 'Power Up Down' checkbox, a 'Create PDF after measurement' checkbox, 'Start' and 'Plot Data' buttons, a 'Calculate Duration' button, a 'Set Directory Name' field with 'test' entered, and a 'Create PDF' button. The status bar at the bottom shows 'Duration: 0', 'Runs: 0', and 'Everything is fine'.

Labels on the right side of the screenshot identify the following elements:

- Menüleiste
- Verbindungselemente
- Messparameter
- Zusätzliche Elemente
- Statusleiste

#### Menüleiste

Über die Menüleiste können weitere Fenster geöffnet und Messparameter geladen oder gespeichert werden. Der Menüpunkt 'File' ermöglicht es die Messparameter als XML Datei abzuspeichern oder zu laden. Beim Laden einer Datei wird sogleich überprüft ob die Vorgaben der eingestellten XSD Datei eingehalten wurden und Warnungen bei Fehlern angezeigt. Unter 'Settings' können Einstellungen für den Messaufbau vorgenommen werden. Im 'Help' Menüpunkt kann ein Fenster geöffnet werden welches allgemeine Informationen über den aktuell verbundenen Reader bereitstellt. Außerdem ein Hilfe Fenster in welchem unter anderen die implementierten Tastenkombinationen beschrieben sind.

#### Verbindungselemente

Die Verbindungselemente bilden den oberen Teil des Fensterinhalts. Hier kann über die Comboboxes der angeschlossene Reader gewählt und über den 'Connect' Button verbunden werden. Für den

Reader gibt es auch noch den 'Search Tag' Button mit dem kontrolliert werden kann, ob sich ein lesbares Tag im Feld befindet. Über die zweite Combobox wird der Arduino verbunden. Dafür wird der virtuelle COM Port genutzt und eine serielle Verbindung zum Mikrocontroller aufgebaut.

#### Messparameter

Für alle einstellbaren Messparameter wurden Textfelder erzeugt welche es erlauben den Messvorgang innerhalb der GUI festzulegen. Alle Parameter in denen Zahlenwerte verfahren werden, haben ein 'Start', 'Step' und ein 'End' Textfeld. Hier kann der Start- und Endwert und die Schrittweite eingestellt werden. Durch die Wahl von positiven oder negativen Schrittweiten und den entsprechenden Start- und Endwerten kann das Programm den Parameter mit jedem Schritt höher oder niedriger setzen. Verfügbar sind hierbei die folgende Parameter:

- Power: Sendeleistung in dBm
- Angle: Winkel zwischen Readerantenne und Tag in Grad
- Recovery Time: Erholzeit nach jeder Einzelbefehlsausführung in ms
- Power CW: Sendeleistung des vor jeder Messung erzeugten CW Trägers in dBm
- CW Duration: Dauer eines CW Trägers vor jeder Messung in ms

Für alle diese Parameter besteht die Möglichkeit die neben den Textfeldern platzierte Checkbox zu klicken. Dadurch werden die Schritt- und Endparameter Textfelder unveränderlich gemacht und der Startwert des Parameters wird über die gesamte Messung als Einstellung genutzt.

Des Weiteren stehen drei weitere Parameter zur Verfügung. Die Checkbox mit dem Titel 'Power Up Down' sorgt dafür, dass die Sendeleistung während der gesamten Messung vom Start- zum Endwert und vom End- zum Startwert verfahren wird. Dadurch lassen sich in einem Messdurchlauf mögliche Unterschiede nachweisen. Außerdem stehen Checkboxes welche unter dem Titel 'Commands' geführt sind zur Verfügung. Von diesen muss für jeden Messdurchlauf mindestens eine bestätigt sein, um den Befehl welcher in dem Messdurchlauf gefahren wird auszuwählen. Es können auch mehrere Befehle ausgewählt werden und diese werden dann alle unter den gleichen Bedingungen durchgeführt. In das 'Iterations' Textfeld kann eine ganze Zahl eingefügt werden welche festlegt, wie oft jede einzelne Messeinstellung durchgeführt werden soll.

#### Zusätzliche Elemente

Mit den untersten Elementen im Fenster kann der Messaufbau angesteuert werden. Der 'Calculate Duration' Button berechnet die ungefähre Messdauer bei verbundenem Reader. Über den 'Start' Button wird die Messung gestartet und der Speicherort der CSV Datei festgelegt. Mit der Checkbox vor diesem kann festgelegt werden ob die Auswertungsdatei gleich im Anschluss erstellt werden soll. Durch den 'Plot Data' Button ist es möglich eine CSV Datei mit Daten einzulesen und einfache zwei-beziehungsweise dreidimensionale Graphen zu erstellen. Der 'Create PDF' Button erzeugt eine PDF Datei mit den in der Konfigurationsdatei festgelegten Berechnung und legt alle Daten in einem Ordner ab welcher in dem Textfeld daneben benannt werden kann.

### Statusleiste

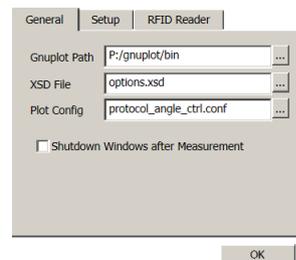
Die Statusleiste hat drei Elemente. Ganz links wird angezeigt wie viele Messdurchläufe die eingestellten Parameter erzeugen. Des Weiteren kann eine ungefähre Voraussage der Zeit berechnet werden. Dies funktioniert aber nur mit einem verbundenen Reader. Das zweite Element gibt bestimmte Statusmeldungen aus. Hier wird angezeigt wenn zum Beispiel eine Messung gestartet wird ohne einen verbundenen Mikrocontroller. Das dritte Element ist eine Fortschrittsanzeige welche anzeigt wie weit die Messung ungefähr fortgeschritten ist.

## Einstellungsfenster

Unter diesem Punkt wird erklärt welche Einstellungen über das Einstellungsfenster vorgenommen werden können. Außerdem wird erläutert welchen Einfluss dies auf die Messung oder den Berechnungsablauf hat.

### General

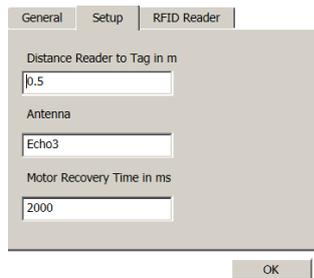
Unter diesem Reiter können generelle Einstellungen vorgenommen werden. Das Fenster besteht aus drei Textfeldern und einer Checkbox. Über die Textfelder werden die Referenzpfade für gnuplot, die XSD Datei und die Graphen Konfigurationsdatei festgelegt. Der gnuplot Pfad wird für die erfolgreiche Erstellung der Graphen benötigt. Die XSD Datei welche hier angegeben ist überprüft die Messparameter und die Graphen Konfigurationsdatei bestimmt welche Graphen erstellt werden sollen. Mit der Checkbox kann ausgewählt werden, dass der PC nach Beendigung der Messung eigenständig herunterfährt.



### Setup

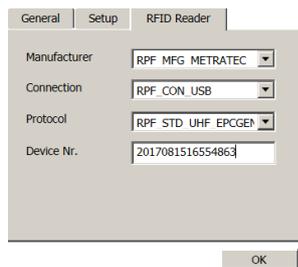
Diese Einstellungen ermöglichen das Setzen von Parametern zu dem Messaufbau welche nicht elektronisch ausgelesen werden können. Hier kann die physikalische Entfernung zwischen Readerantenne und Tag angegeben werden, dieser Wert muss stimmen um später, wenn gewünscht,

die emulierten Entfernungen zu berechnen. Außerdem kann der Name der Antenne als Parameter für die Protokollierung eingefügt werden. Die 'Motor Recovery Time' bestimmt die Wartezeit des Programms nach dem Bewegen des Motors.



#### RFID Reader

Hier können weitere Einstellungen zum Reader festgelegt werden welche für die Verbindung wichtig sind. Außerdem ist ein Textfeld freigegeben in welchem eine Nummer oder ein eindeutiger Name dem verwendeten Reader zugeordnet werden kann.



### Messparameter Einstellen

Mit den XML Dateien können die Parameter festgelegt und abgespeichert werden. Zu dem aufgebauten Testsetup sollte immer eine passende XSD Datei die Grenzen festlegen. Die Parameter haben folgende Auswirkungen auf die Messung. Der obere Teil der XSD Datei beschreibt die unterschiedlichen Typen von Parametern. Der untere zeigt an welche Parameter vorkommen müssen und wie häufig.

**Beispiel XML:**

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>

<Parameter>

<PowerStart>27</PowerStart>
<PowerStep>-1</PowerStep>
<PowerEnd>23</PowerEnd>

<PowerUpDown>false</PowerUpDown>

<AngleStart>-90</AngleStart>
<AngleStep>1.8</AngleStep>
<AngleEnd>90</AngleEnd>

<Commands>Read</Commands>
<Commands>Write</Commands>

<RecoveryTStart>0</RecoveryTStart>
<RecoveryTStep>1</RecoveryTStep>
<RecoveryTEnd>0</RecoveryTEnd>

<CWTStart>0</CWTStart>
<CWTStep>1</CWTStep>
<CWTEnd>0</CWTEnd>

<CWPowerStart>12</CWPowerStart>
<CWPowerStep>1</CWPowerStep>
<CWPowerEnd>12</CWPowerEnd>

<Iterations>10</Iterations>

</Parameter>
```

**Beispiel XSD:**

```
<?xml version="1.0" encoding="utf-8" ?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
elementFormDefault="qualified">

<!-- XSD File for RFID measurement setup-->

<xs:simpleType name="Power">
  <xs:restriction base="xs:float">
    <xs:minInclusive value="12"/>
    <xs:maxInclusive value="27"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="Angle">
  <xs:restriction base="xs:float">
    <xs:minInclusive value="-180"/>
    <xs:maxInclusive value="180"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="Time">
  <xs:restriction base="xs:integer">
    <xs:minInclusive value="0"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>
```

```

<xs:simpleType name="fSteps">
  <xs:restriction base="xs:float">
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="iSteps">
  <xs:restriction base="xs:integer">
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="Modulation_Types">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="PR-ASK"/>
    <xs:enumeration value="SSB-ASK"/>
    <xs:enumeration value="DSB-ASK"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="Encoding_Types">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="FM0"/>
    <xs:enumeration value="Miller2"/>
    <xs:enumeration value="Miller4"/>
    <xs:enumeration value="Miller8"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:simpleType name="Command">
  <xs:restriction base="xs:string">
    <xs:enumeration value="Inventory"/>
    <xs:enumeration value="Read"/>
    <xs:enumeration value="Write"/>
  </xs:restriction>
</xs:simpleType>

<xs:complexType name="Parameters">
<xs:sequence>
<xs:element name="PowerStart" minOccurs="1" maxOccurs="1" type="Power"/>
<xs:element name="PowerStep" minOccurs="1" maxOccurs="1" type="fSteps"/>
<xs:element name="PowerEnd" minOccurs="1" maxOccurs="1" type="Power"/>

<xs:element name="PowerUpDown" minOccurs="1" maxOccurs="1"
type="xs:boolean"/>

<xs:element name="AngleStart" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Angle"/>
<xs:element name="AngleStep" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="fSteps"/>
<xs:element name="AngleEnd" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Angle"/>

<xs:element name="Commands" minOccurs="1" maxOccurs="3" type="Command"/>

<xs:element name="RecoveryTStart" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Time"/>
<xs:element name="RecoveryTStep" minOccurs="0" maxOccurs="1"
type="iSteps"/>
<xs:element name="RecoveryTEnd" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Time"/>

<xs:element name="CWTStart" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Time"/>
<xs:element name="CWTStep" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="iSteps"/>
<xs:element name="CWTEnd" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Time"/>

<xs:element name="CWPowStart" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Power"/>

```

```

<xs:element name="CWPowerStep" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="fSteps"/>
<xs:element name="CWPowerEnd" minOccurs="0" maxOccurs="1" type="Power"/>

<xs:element name="Iterations" type="xs:integer"/>

</xs:sequence>
</xs:complexType>

<xs:element name="Parameter" type="Parameters"/>

</xs:schema>

```

## PDF Erstellen Lassen

Um eine PDF erstellen zu lassen muss über die Einstellungen der Pfad zu einer .conf Datei (hier eine normale Textdatei) angegeben werden. Eine Beispielkonfiguration ist hier abgebildet:

```

IMAGETYPE,Name,Title,Angle,Command,RecoveryTime,PowerCW,CWTime,PowerUpDown,Power,RSSI
XY_SC,plot_sc_distance_read_down,Successful Communications over Distance,0,1,0,12,0,0,Distance,x
XY_SC,plot_sc_distance_read_up,Successful Communications over Distance,0,1,0,12,0,1,Distance,x
XY_SC,plot_sc_distance_write_down,Successful Communications over Distance,0,2,0,12,0,0,Distance,x
XY_SC,plot_sc_distance_write_up,Successful Communications over Distance,0,2,0,12,0,1,Distance,x
POLAR_SC,plot_polar_radiation_pattern_read,Successful Communications over Angle,x,1,0,12,0,0,max,x
POLAR_SC,plot_polar_radiation_pattern_write,Successful Communications over Angle,x,2,0,12,0,0,max,x
POLAR_RAD,plot_polar_radiation_pattern_write_ext,Polar Plot representing Antenna Diagram,x,2,0,12,0,0,x,x

```

Grundsätzlich wird jeder einzelne Plot über eine Zeile gesteuert. Die erste Zeile darf hierbei nicht fehlen, sie ist überall gleich! Die hinteren Elemente bestimmen welche Werte die nicht auf der X oder Y Achse vertretenen Parameter haben. Hierbei kann ein expliziter Wert angegeben werden oder mit min oder max der Minimal- oder Maximalwert dieses Parameters gewählt werden. Alle Parameter welche mit einem x beschrieben sind werden als Achsen oder Berechnungsparameter übernommen. Das zweite Element ist der Dateiname unter welchem der Plot erstellt wird (Achtung keine doppelten Namen). Und der dritte setzt den Titel des Plots in der PDF. Das erste Element beschreibt die Art des Plots. Aktuell verfügbar und getestet sind:

```

XY_SC
POLAR_SC
POLAR_RAD

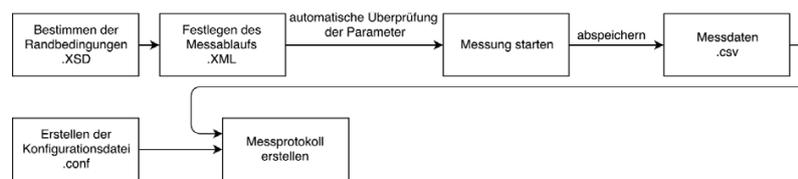
```

In den beiden SC Plots berechnen in Prozent die erfolgreichen gegenüber allen Kommunikationen. Hier MUSS ein x beim RSSI Wert eingetragen werden. Außerdem wird mit dem ersten x der X-Achsen Parameter gewählt. Beim POLAR\_SC sollte dies Stets der Winkel sein da ein Polar Plot sonst keinen Sinn macht.

Beim POLAR\_RAD Plot verhält es sich ähnlich. Auch hier sollte für eine sinnvolle Anzeige der Winkel, der Power und der RSSI Wert mit einem x versehen werden. Variable Sendeleistung ist hier notwendig, um das Strahlungsdiagramm nachbilden zu können.

## Benutzungsablauf

Um die Software richtig zu nutzen ist hier abgebildet welche Schritte für eine Erfolgreiche Messung unternommen werden müssen.



Bevor eine Messung gestartet wird sollte geprüft werden, ob die Randbedingungen für den zu nutzenden Messaufbau richtig gewählt wurden. Das heißt, sind zum Beispiel die Sendeleistungen auf die richtigen Werte begrenzt oder wurde die Software um einige Komponenten erweitert welche noch nicht hinzugefügt wurden.

Ist dies geprüft, kann in dem Programm der Messablauf definiert werden und sollte anschließend abgespeichert werden. Es wird eine Fehlermeldung geben, wenn die Messparameter außerhalb der Randbedingungen definiert wurden. Dies geschieht ebenfalls wenn die Messung über den Start Button gestartet wird. Beim drücken des Buttons, erscheint ein neues Fenster in welchem der Name und Speicherort der zu erstellenden CSV Datei mit den Messdaten festgelegt wird. Ist dies geschehen startet die Messung.

Soll im Anschluss ein Messprotokoll erstellt werden, muss mit einem Texteditor eine Konfigurationsdatei erstellt werden, in welcher die Bedingungen für das Erstellen definiert sind. Zusammen mit den Messdaten kann nun, nachdem auf die Konfigurationsdatei in den Einstellungen verwiesen wurde, das Messprotokoll erstellt werden. Sollten Graphen nicht erzeugt werden können, wird ebenfalls eine Fehlermeldung angezeigt.

## 7.4 Beispielhaftes Messprotokoll

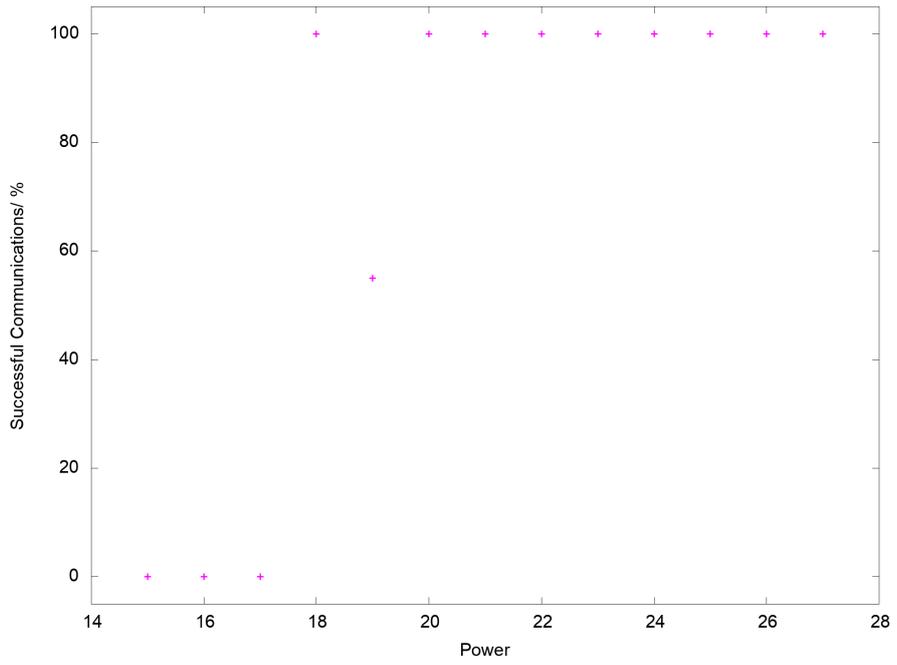
### Measuring Protocol of RD1s\_angle\_ctrl\_long2

Measuring Protocol created on 22.3.2018

Measured with RPF\_RTP\_PULSARMX connected via RPF\_CON\_USB  
Device Number: 2017081516554863  
Antenna: Echo3  
Physical Distance: 0.37m

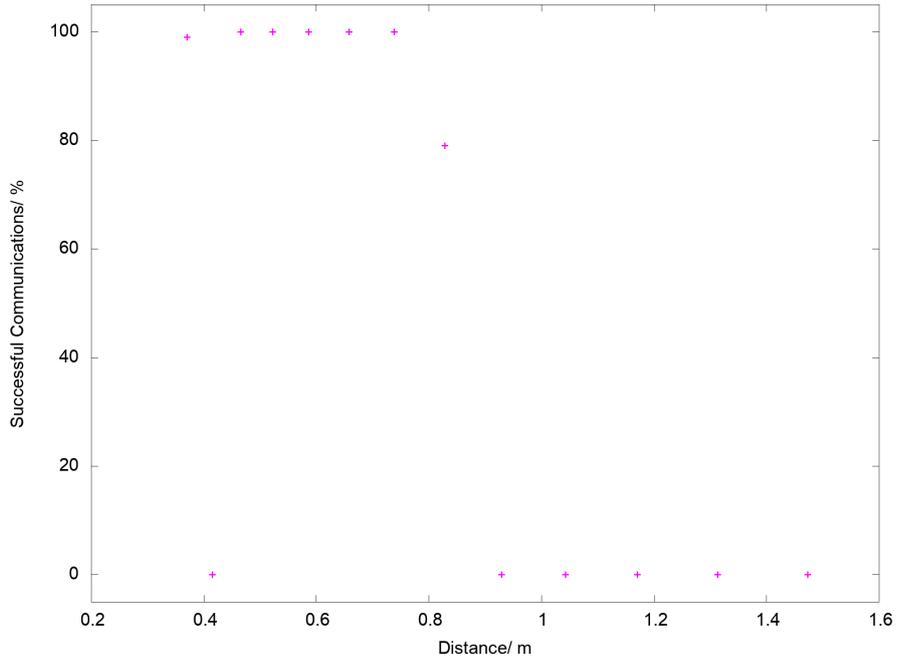
Successful Communications/ Power dBm

Degree = 0°  
Command = Read  
RecoveryTime = 0ms  
PowerCW = 12dBm  
CWTime = 0ms  
PowerUpDown = Power decrease



Data from figure		
Power	Successful Communications	Measurements
27	100	100
26	100	100
25	100	100
24	100	100
23	100	100
22	100	100
21	100	100
20	100	100
19	55	100
18	100	100
17	0	100
16	0	100
15	0	100

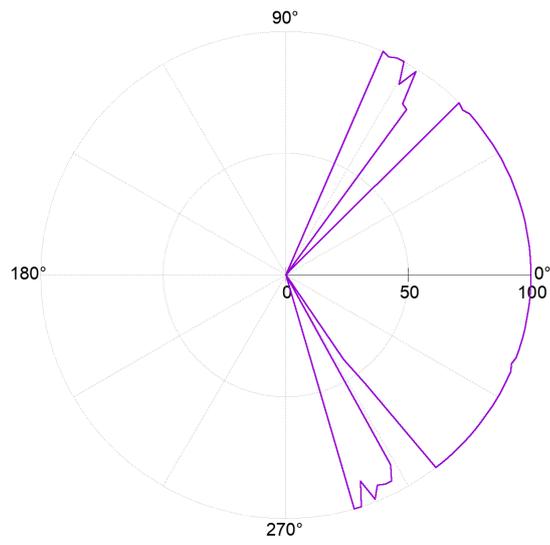
Successful Communications/ Distance  
Degree = 0°  
Command = Write  
RecoveryTime = 0ms  
PowerCW = 12dBm  
CWTime = 0ms  
PowerUpDown = Power increase  
Emulated Distance with an output power of 27dBm



Data from figure		
Distance	Successful Communications	Measurements
1.473	0	100
1.313	0	100
1.17	0	100
1.043	0	100
0.929	0	100
0.828	79	100
0.738	100	100
0.658	100	100
0.586	100	100
0.523	100	100
0.466	100	100
0.415	0	100
0.37	99	100

Successful Communications/ Angle

Command = Read  
RecoveryTime = 0ms  
PowerCW = 12dBm  
CWTime = 0ms  
Power = 27dBm  
PowerUpDown = Power increase



Data from figure		
Degree	Successful Communications	Measurements
-90	0	100
-88.2	0	100
-86.4	0	100
-84.6	0	100
-82.8	0	100
-81	0	100
-79.2	0	100
-77.4	0	100
-75.6	0	100
-73.8	100	100
-72	100	100
-70.2	90	100
-68.4	99	100
-66.6	94	100
-64.8	95	100
-63	95	100
-61.2	89	100
-59.4	0	100
-57.6	0	100
-55.8	42	100
-54	55	100
-52.2	100	100
-50.4	100	100
-48.6	100	100
-46.8	100	100
-45	100	100
-43.2	100	100
-41.4	100	100
-39.6	100	100
-37.8	100	100
-36	100	100
-34.2	100	100
-32.4	100	100
-30.6	100	100
-28.8	100	100
-27	100	100
-25.2	100	100
-23.4	100	100
-21.6	99	100
-19.8	100	100
-18	100	100
-16.2	100	100
-14.4	100	100
-12.6	100	100
-10.8	100	100

-9	100	100
-7.2	100	100
-5.4	100	100
-3.6	100	100
-1.8	100	100
0	100	100
1.8	100	100
3.6	100	100
5.4	100	100
7.2	100	100
9	100	100
10.8	100	100
12.6	100	100
14.4	100	100
16.2	100	100
18	100	100
19.8	100	100
21.6	100	100
23.4	100	100
25.2	100	100
27	100	100
28.8	100	100
30.6	100	100
32.4	100	100
34.2	100	100
36	100	100
37.8	100	100
39.6	100	100
41.4	100	100
43.2	99	100
45	100	100
46.8	4	100
48.6	0	100
50.4	1	100
52.2	0	100
54	84	100
55.8	85	100
57.6	99	100
59.4	91	100
61.2	100	100
63	100	100
64.8	99	100
66.6	100	100
68.4	0	100
70.2	0	100
72	0	100
73.8	0	100

75.6	0	100
77.4	0	100
79.2	0	100
81	0	100
82.8	0	100
84.6	0	100
86.4	0	100
88.2	0	100

Polar Plot representing Antenna Diagram

Command = Write

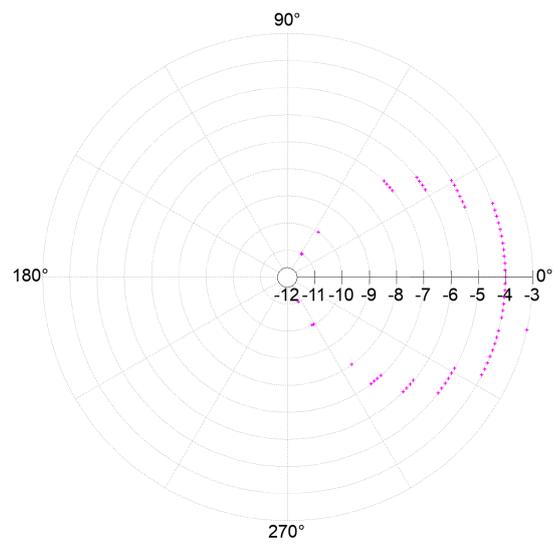
RecoveryTime = 0ms

PowerCW = 12dBm

CWTime = 0ms

PowerUpDown = Power decrease

0 dB equals the minimal radiated Power of: 15dBm



Data from figure		
Degree	dB	Measurements
-66.6	-11	100
-63	-10	100
-61.2	-10	100
-54	-8	100
-52.2	-7	100
-50.4	-7	100
-48.6	-7	100
-46.8	-7	100
-45	-6	100
-43.2	-6	100
-41.4	-6	100
-39.6	-6	100
-37.8	-5	100
-36	-5	100
-34.2	-5	100
-32.4	-5	100
-30.6	-5	100
-28.8	-5	100
-27	-4	100
-25.2	-4	100
-23.4	-4	100
-21.6	-4	100
-19.8	-4	100
-18	-4	100
-16.2	-4	100
-14.4	-4	100
-12.6	-3	100
-10.8	-4	100
-9	-4	100
-7.2	-4	100
-5.4	-4	100
-3.6	-4	100
-1.8	-4	100
0	-4	100
1.8	-4	100
3.6	-4	100
5.4	-4	100
7.2	-4	100
9	-4	100
10.8	-4	100
12.6	-4	100
14.4	-4	100
16.2	-4	100
18	-4	100
19.8	-4	100

21.6	-5	100
23.4	-5	100
25.2	-5	100
27	-5	100
28.8	-5	100
30.6	-5	100
32.4	-6	100
34.2	-6	100
36	-6	100
37.8	-6	100
39.6	-7	100
41.4	-7	100
43.2	-7	100
45	-7	100
55.8	-10	100
57.6	-11	100
59.4	-11	100

# Quellenverzeichnis

- [Braun 2011] BRAUN, René: *Untersuchung von Messmethoden zur Charakterisierung von RFID-Transponder-Antennen*, HTW Dresden, Diplomarbeit, 2011
- [Emerson&Cuming 2010a] EMERSON&CUMING: *ECCOSORB Flat Absorber*. 2010. – URL <http://ecanechoicchambers.com/TB/EB-050-%20FS-NRL.pdf>
- [Emerson&Cuming 2010b] EMERSON&CUMING: *ECCOSORB Very High Performance Broadband Pyramidal Absorber*. 2010. – URL <http://ecanechoicchambers.com/TB/EB-100%20-%20VHP-NRL.pdf>
- [ETSI 2014] ETSI: *ETSI TR 102 436 V2.1.1*. 2014. – URL [http://www.etsi.org/deliver/etsi\\_tr/102400\\_102499/102436/02.01.01\\_60/tr\\_102436v020101p.pdf](http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/102400_102499/102436/02.01.01_60/tr_102436v020101p.pdf)
- [Finkenzeller 2012] FINKENZELLER, Klaus: *RFID Handbuch*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012. – ISBN 978-3-446-42992-5
- [GS1-EPCglobal 2015] GS1-EPCGLOBAL: *EPC Radio-Frequency Identity Protocols Generation-2 UHF RFID v2.0.1*. 2015. – URL [https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2\\_Protocol\\_Standard.pdf](https://www.gs1.org/sites/default/files/docs/epc/Gen2_Protocol_Standard.pdf)
- [HUBER+SUHNER 2014] HUBER+SUHNER: *Coaxial Cable RG 316 /U*. 2014. – URL [https://www.koax24.de/storage/datasheet/de/050104\\_Datenblatt\\_RG316\\_U\\_HundS.pdf](https://www.koax24.de/storage/datasheet/de/050104_Datenblatt_RG316_U_HundS.pdf)
- [iTextSharp 2011] ITEXTSHARP: *iTextSharp 4.1.6*. 2011. – URL <https://www.nuget.org/packages/iTextSharp-LGPL>
- [Kark 2010] KARK, Klaus W.: *Antennen und Strahlungsfelder*. Vieweg+Teubner, 2010. – ISBN 978-3-8348-0553-9
- [metraTec 2012] METRATEC: *Datenblatt DeskID UHF Desktop-Reader*. 2012. – URL [http://www.metratec.com/fileadmin/docs/de/datenb/Datenblatt\\_DeskID-ISO\\_r1-0.pdf](http://www.metratec.com/fileadmin/docs/de/datenb/Datenblatt_DeskID-ISO_r1-0.pdf)

- [metraTec 2015] METRATEC: *Technische Dokumentation für metraTec PulsaMX UHF RFID-Reader*. 2015. – URL [http://www.metratec.com/fileadmin/docs/de/dokus/Doku\\_PulsarMX\\_v1-1.pdf](http://www.metratec.com/fileadmin/docs/de/dokus/Doku_PulsarMX_v1-1.pdf)
- [metraTec 2016] METRATEC: *Datenblatt Echo-3 UHF Antenne*. 2016
- [Morris 2017] MORRIS, James: *Gnuplot.C#*. 2017. – URL <https://github.com/AwokeKnowing/GnuplotCSharp>
- [Nekoogar und Dowla 2011] NEKOOGAR, Faranak ; DOWLA, Farid: *Ultra-Wideband Radio Frequency Identification Systems*. Springer, 2011. – ISBN 978-1-4419-9700-5
- [NXP 2008] NXP: *AN 1629 UHF RFID Label Antenna Design*. 2008. – URL <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN162910.pdf>
- [Tamm und Tribowski 2010] TAMM, Gerrit ; TRIBOWSKI, Christoph: *RFID*. Springer, 2010. – ISBN 978-3-642-11459-5
- [Weißgerber 2007] WEISSGERBER, Wilfried: *Elektrotechnik für Ingenieure 2*. vieweg, 2007. – ISBN 978-3-8348-0191-3

# Versicherung über die Selbstständigkeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit im Sinne der Prüfungsordnung nach §16(5) APSO-TI-BM ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Wörtlich oder dem Sinn nach aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht.

Hamburg, 12. April 2018

Ort, Datum

Unterschrift