

Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik
(ZEA), Systeme der Elektronik (ZEA-2)

Inbetriebnahme, Optimierung und Verifikation eines Antennen- messplatzes für 5,8 GHz Antennen

Lea-Marie Schreckenber

Jül-4420

Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik
(ZEA), Systeme der Elektronik (ZEA-2)

Inbetriebnahme, Optimierung und Verifikation eines Antennen- messplatzes für 5,8 GHz Antennen

Lea-Marie Schreckenber

Berichte des Forschungszentrums Jülich
Jül-4420 · ISSN 0944-2952
Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und
Analytik (ZEA), Systeme der Elektronik (ZEA-2)

DE-A96 (Bachelor, FH Aachen, 2019)

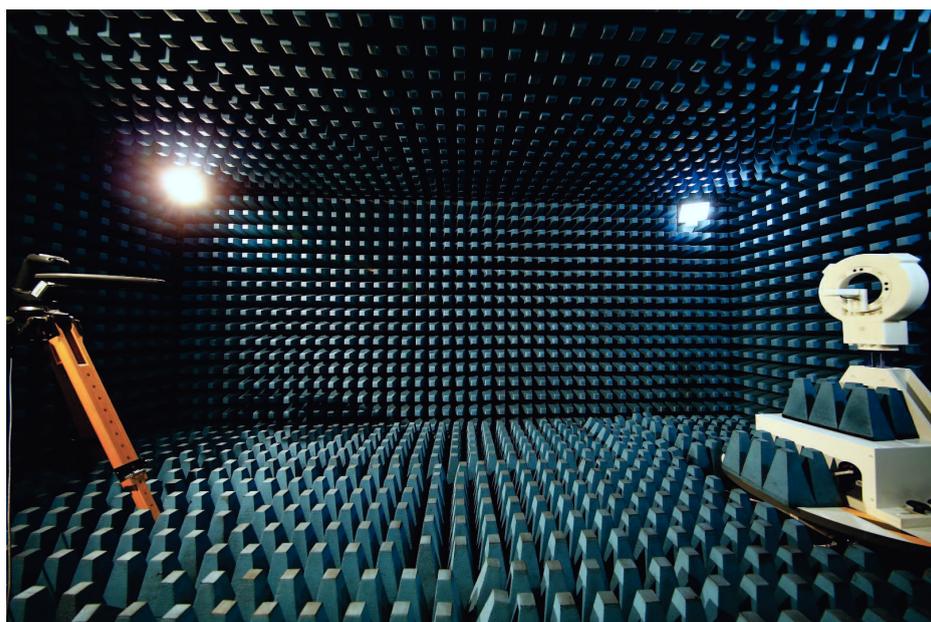
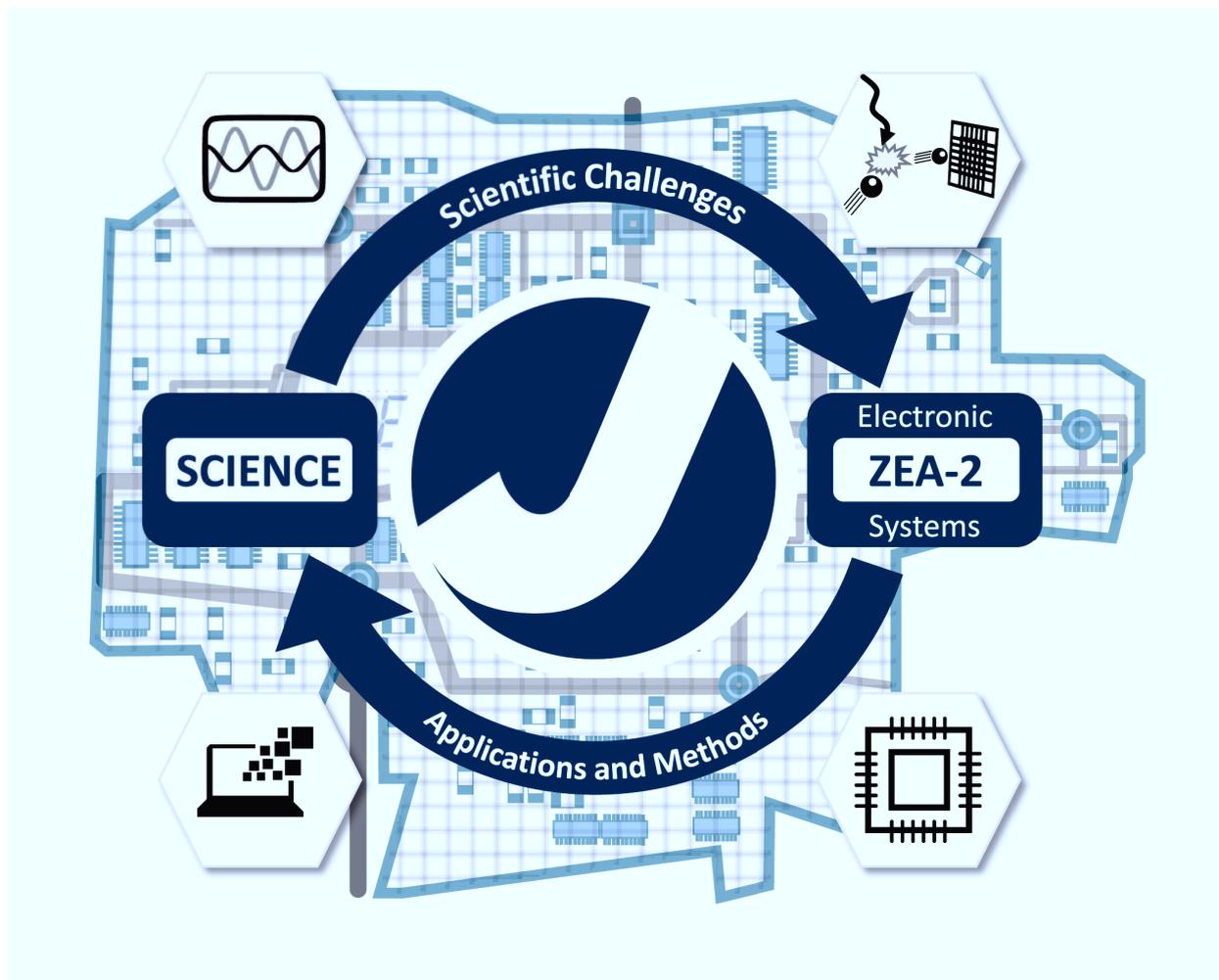
Vollständig frei verfügbar über das Publikations-
portal des Forschungszentrums Jülich (JuSER)
unter www.fz-juelich.de/zb/openaccess

Forschungszentrum Jülich GmbH · 52425 Jülich
Zentralbibliothek, Verlag
Tel.: 02461 61-5220 · Fax: 02461 61-6103
zb-publikation@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

This is an Open Access publication distributed under the
terms of the [Creative Commons Attribution License 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/),
which permits unrestricted use, distribution, and



reproduction in any medium, provided the
original work is properly cited.



Erklärung

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

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

Alle Zeichnungen oder Abbildungen in dieser Arbeit sind von mir selbst erstellt worden oder mit einem Entwerfer erstellt worden.

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

Aachen, im Monat März

I vollständige, handschriftliche Unterschrift

Geheimhaltung

Diese Bachelorarbeit darf weder vollständig noch auszugsweise ohne schriftliche Zustimmung des Autors, des betreuenden Mentoren oder der Firma veröffentlicht, vervielfältigt, weitergegeben oder in irgendeiner Weise zugänglich gemacht werden.

Ohne meine Zustimmung:

Die Geheimhaltung ausgenommen ist ausschließlich die Speicherung der Arbeit im Internet.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	ZEA-2	1
1.2	IPS-MA	2
1.3	Motivation	3
2	Theoretischer Hintergrund	5
2.1	Elektromagnetische Welle	5
2.2	Streuparameter	7
2.3	Antennengrundlagen	8
3	Messaufbau und Durchführung	15
3.1	Device Under Test	16
3.2	Absorberkammer	21
3.3	Messequipment	23
3.4	2-Achsen Positionierer	23
3.5	Messpunkteverteilung und Ansteuerung der Geräte	26
3.6	Durchführung der Messung und Analyse	28
3.7	Messaufbaubedingte Verluste	29
4	Diskussion der Ergebnisse	33
4.1	Erste Messungen	33
4.2	Optimierung	35
4.3	Verifikation mit bekanntem Objekt	42
4.4	Messergebnisse	45
5	Zusammenfassung und Ausblick	49
A	Anhang	51
	Abbildungsverzeichnis	57

Tabellenverzeichnis	59
Literaturverzeichnis	61

1 Einleitung

Die Bachelorarbeit gliedert sich in vier Kapitel. In der Einleitung wird zum einen das Projekt beschrieben in dem die Arbeit angesiedelt ist. Außerdem wird das Thema aus den auftretenden Problemstellungen abgeleitet. Im weiteren Verlauf werden zunächst die für den Aufbau entscheidenden Theoriegrundlagen erläutert und darauf aufbauend der Messaufbau und die Durchführung aufgezeigt. Der Diskussion der ersten Ergebnisse im anschließenden Kapitel folgt die Aufführung der darauf basierenden, durchgeführten Optimierungen. Nach der Erörterung der Verifikation des Aufbaus mit einem bekannten Objekt werden endgültige Ergebnisse beispielhaft präsentiert.

1.1 ZEA-2

Das Zentralinstitut für Engineering, Elektronik und Analytik - Systeme der Elektronik (ZEA-2) gehört zum Forschungszentrum Jülich und bietet komplexe elektronische und informationstechnische Systemlösungen für Aufgabenstellungen in der Sensorik und Detektortechnik sowie in der Signal- und Datenverarbeitung für die Forschung an [1]. Zusätzlich wird an der Entwicklung von System-on-Chip Lösungen gearbeitet. Darunter fällt auch das Projekt in dem das Thema der Arbeit angesiedelt ist. Das ZEA-2 besteht aus sechs in der Forschung und Entwicklung angesiedelten Kompetenzteams sowie drei weiteren Teams, die in Anwendungsbereichen aktiv sind. Diese arbeiten nach dem Strukturprinzip einer Matrixorganisation projektübergreifend zusammen. Das Team „Systemintegration, Verifikation und Test“ plant und entwickelt anwendungsoptimierte Applikationen zur Analyse und Regelung komplexer Vorgänge in wissenschaftlichen Anwendungen [2].

1.2 IPS-MA

Das *Indoor Positioning System* (IPS) beschreibt ein Positionierungssystem für geschlossene Räume. Es existieren verschiedene Lösungsansätze für die IPS Realisierung, die unterschiedliche Vor- und Nachteile bieten. Akustische und optische Systeme beispielsweise sind bis jetzt nicht für eine Positionierung im Millimeterbereich einsetzbar. Diese Anforderung des IPS-MA Projektes kann mit einem hochfrequenten System in Form eines Signals mit elektromagnetischen Wellen als Träger erfüllt werden. Vergleichbar ist dieses Prinzip mit dem bekannten auf Satelliten basierenden *Global Positioning System* (GPS). Dieses Konzept ist mit den Problemen der Dämpfung und Zerstreuung der elektromagnetischen Welle an Objekten und Gegenständen behaftet, sobald die Positionierung in geschlossenen Räumen erfolgt. Für das IPS soll ein eigenes System mit *Base Stations* und *Mobile Devices* entwickelt werden, welches eine Positionsbestimmung in Relation zu den *Base Stations* vornimmt. Die mindestens acht *Base Stations* sind darin an einem festen Ort im Raum positioniert. Sie senden ein Signal im ISM-Band bei 5,8 GHz. In den ISM-Frequenzbändern (Industrial, Scientific and Medical Band) dürfen Hochfrequenz-Geräte unter bestimmten Rahmenbedingungen lizenzfrei agieren [3]. Die *Mobile Devices* sind die Objekte, deren Positionen im Raum bestimmt werden (Abb. 1.1). Das Signal wird mit der IPS-Antenne von dem *Mobile Device* empfangen und die daraus gewonnenen Informationen über ein Bluetooth Modul mit einer eigenen Bluetooth-Antenne zurück an die *Base Stations* gesendet. In diesen Informationen sind unter anderem die gemessenen *Time Difference of Arrival* der unterschiedlichen *Base Stations* enthalten. Diese werden weiter an eine *Central Unit* geleitet und dort wird die Position der *Mobile Devices* mit den *Base Stations* als Referenzpunkt errechnet.

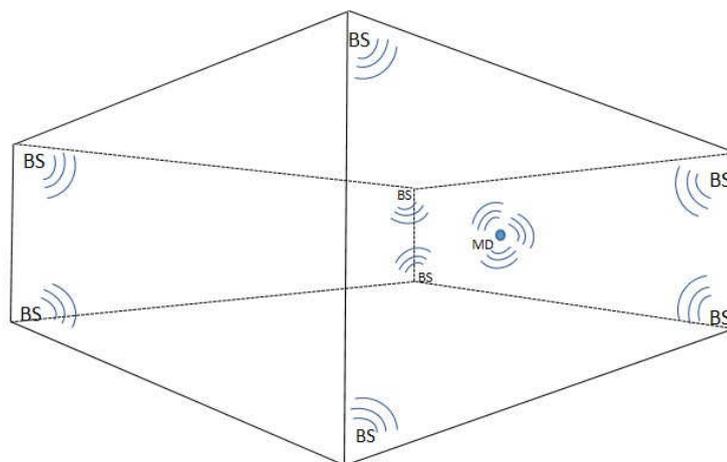


Abbildung 1.1: Indoor Positioning System
Base Station (BS) *Mobile Device* (MD)

Das MA im Projektnamen steht für *Motion Analysis* und bezeichnet den Einsatzbereich des Positionierungssystems für eine Bewegungsanalyse des menschlichen Körpers bei zum Beispiel sportlicher Aktivität. Jedes der bis zu 24 *Mobile Devices* soll auf den Millimeter genau am Körper lokalisierbar sein. Für die räumliche Lokalisierung müssen mindestens Signale von drei *Base Stations* gleichzeitig empfangen werden. Die geforderte Genauigkeit erhöht diese Anzahl jedoch. Die Abstrahlcharakteristik der IPS-Antenne sollte deshalb möglichst gleichmäßig verteilt sein und einer Rundstrahlcharakteristik entsprechen. So kann von vielen *Base Stations* gleichzeitig das Signal empfangen werden. Liefern *Mobile Devices* falsche oder keine Ergebnisse, muss dies mittels der Software auf der *Central Unit* ermittelt und herausgerechnet werden.

1.3 Motivation

Der Einsatzbereich des Positionierungssystems definiert die Rahmenbedingungen des *Mobile Device*. Da diese Sensoren am Körper eines Sportlers angebracht werden, stellt die Größe der Sensoren einen wichtigen Aspekt dar. Sie sollen den Probanden nicht stören oder in der Bewegung einschränken. Daher existieren maximale Größenvorgaben für die Ausmaße der Sensoren. Ein beispielhafter Aufbau ist in Abbildung 1.2 zu sehen. Die Größenvorgaben haben Auswirkungen auf die Bauteile und somit auch auf die benötigte IPS-Antenne.

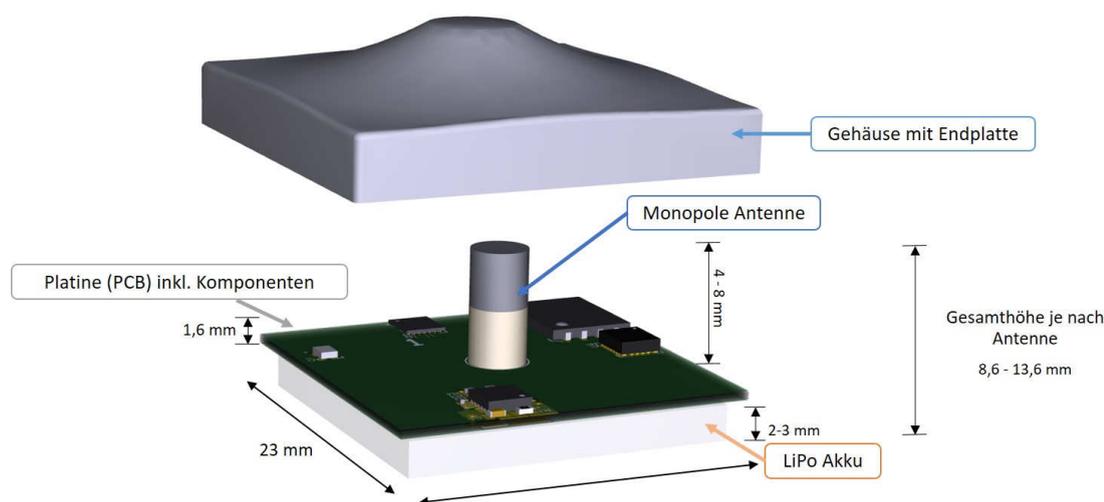


Abbildung 1.2: Beispielhafter Aufbau des IPS *Mobile Device*

Es stehen mehrere Antennenarten zur Verfügung, die den Größenvorgaben entsprechen und aufgrund ihrer verschiedenen Richtcharakteristiken sowie ihrer Funktionsweisen spezifische

Vor- und Nachteile aufweisen. Diese werden später im Verlauf genauer betrachtet und aufgezeigt. Ein zweiter wichtiger Aspekt ist die Positionierung der Antenne auf dem Sensor. Die Anwender wünschen sich aus Praktikabilitätsgründen den Referenzpunkt in der Mitte des Sensors. Infolge der Positionierung können neue und unbekannte Charakteristiken der Antenne auftreten, da eine mittige Positionierung der Antenne generell untypisch ist. Es soll nun geprüft werden, ob die aus der Literatur bekannten Antennencharakteristiken der unterschiedlichen Antennenarten mit den modifizierten Antennen des IPS-MA Projekts identisch sind.

Eine Simulation der Antenne durch eine 3D-Simulationssoftware für elektromagnetische Felder hilft bei der Beantwortung der Frage, ob die Antennen auf den Sensoren trotz der oben aufgeführten Anforderungen ein 5,8 GHz Signal mit möglichst wenig Verlusten empfangen können. Zusätzlich soll diese Simulation in der Realität überprüft werden. Die Herausforderung des Antennenaufbaus implizieren den Aufbau eines automatisierten, reproduzierbaren Antennenmessplatzes und damit auch dessen Inbetriebnahme, Optimierung und Verifikation.

2 Theoretischer Hintergrund

In diesem Kapitel werden zunächst kurz die allgemeinen Grundlagen der elektromagnetischen Welle aufgeführt. Von diesen kann dann auf die relevanten Antennengrundlagen geschlossen werden, die den späteren Messaufbau betreffen. Hierzu zählen eine kurze Einführung in die S-Parameter und die unterschiedlichen Polarisierungen, die weiter auf die speziellen Antennenarten hinführen.

2.1 Elektromagnetische Welle

Nach Maxwell impliziert eine ruhende elektrische Ladung ein elektrisches Feld. Zusätzlich erzeugt bewegte Ladung ein geschlossenes, magnetisches Feld um den Stromfluss. Ändert sich nun das magnetische Feld, entsteht ein elektrisches Feld, welches geschlossen die Änderungsrichtung des Magnetfeldes umkreist. So entstehen bei zeitlicher Änderung von Strom und Spannung elektromagnetische Wellen, die sich im Raum ausbreiten, ohne auf ein Medium angewiesen zu sein. Die Ausbreitung der Welle von einer Strahlungsquelle wird mit Nah- und Fernfeld in verschiedene Bereiche unterschieden. Erst im Fernfeld breitet sich die Energie über ein Strahlungsfeld unabhängig von der Quelle aus. Die Feldvektoren stehen dort senkrecht aufeinander, schwingen phasengleich und folgen dem Prinzip der Transversalwelle. Das heißt, dass die Ausbreitung senkrecht zu ihrer Schwingung erfolgt [4, Kap. 8.3].

Für kurze Antennen ab der Länge L für Anwendungen bei der Wellenlänge λ mit $L \leq \lambda$ gelten die Fernfeldbedingungen ab einem Abstand r [4, Tab. 8.6]

$$r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \text{ oder } r \geq 2\lambda. \quad (2.1)$$

Eine Darstellung der Ausbreitung einer elektromagnetischen Welle im Vakuum ist in Abbildung 2.1 zu sehen. Die elektrische Feldstärke ist in Rot abgebildet, die magnetische Flussdichte in Blau. Sie breitet sich mit Lichtgeschwindigkeit in z -Richtung aus.

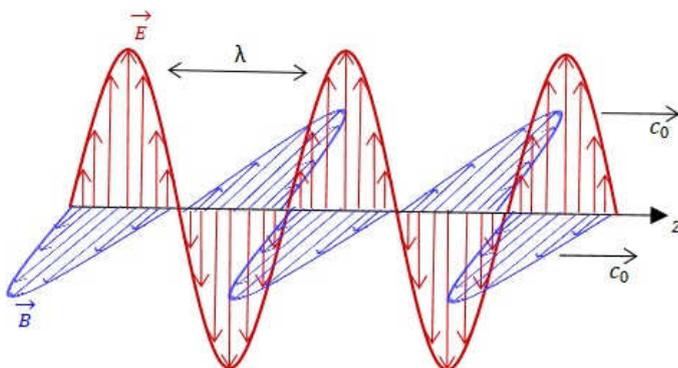


Abbildung 2.1: Vertikal linear polarisierte elektromagnetische Welle im Vakuum

Als Wellenlänge λ wird die Länge eines kompletten Schwingvorgangs bezeichnet. Sie ist der Quotient der Ausbreitungsgeschwindigkeit c und der Frequenz f der elektromagnetischen Welle (2.2). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist abhängig von der Materie in der sich die Welle fortbewegt. Im Medium Luft ist dies gerundet die Lichtgeschwindigkeit des Vakuums c_0 .

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \quad \text{mit} \quad c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} \quad (2.2)$$

Die magnetische Feldkonstante μ_0 und die elektrische Feldkonstante ε_0 definieren ebenfalls den Wellenwiderstand des Vakuums Z_0 [4, S. 218]

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \approx 377 \, \Omega. \quad (2.3)$$

Die Permittivität ε eines Stoffes ist die Multiplikation der elektrischen Feldkonstante mit der relativen Permittivität ε_r . Es gilt

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r. \quad (2.4)$$

Die Permittivität gibt die dielektrische Leitfähigkeit für Materialien in elektrischen Feldern an. Da als Bezugskonstante die Permittivität des Vakuums gilt, ist die relative Permittivität von Vakuum selbst $\varepsilon_r = 1$. Luft besitzt eine relative Permittivität von $\varepsilon_r = 1,000576 \approx 1$ und gleicht gerundet der relativen Permittivität von Vakuum [5, Kap. 6.2.2].

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ gibt den Verlust der Energie in elektrischen Bauelementen und von elektromagnetischen Wellen in Materie an. Im Vakuum gilt deshalb $\tan \delta = 0$. Zumeist wandeln sich die Verluste in Materie durch Dissipation in Wärme um [5, 6].

2.2 Streuparameter

Die Streuparameter sind eine Art der Beschreibung von Mehrportsystemen, die überwiegend in der Hochfrequenztechnik Anwendung findet. Im Gegensatz zur bekannten Impedanzmatrix, die anliegende Spannungen und fließende Ströme angibt, werden bei der Streumatrix die ein- und auslaufenden Wellengrößen eines Systems im Zusammenhang mit den Wellenwiderständen beschrieben.

Die Matrixgleichung (2.5) [7, S.11] eines Zweitors verknüpft die einlaufende Welle a_i über die Streuparameter S mit der herauslaufenden Welle b_i :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

Wie in Abbildung 2.2 zu sehen ist, beschreiben die Parameter S_{11} die Eingangs- und S_{22} die Ausgangsreflexionen der jeweiligen Welle und die Parameter S_{21} die Vorwärts- und S_{12} die Rückwärtstransmissionen. Für passive Bauteile -und somit auch für Antennen- ist dieses System reziprok, das heißt die Vorwärts- und Rückwertstransmission sind gleich.

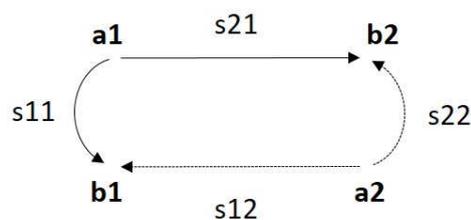


Abbildung 2.2: S-Parameter als Zweitor [7, S.11]

Die Reflexion beschreibt die Anpassung des Tores. Sie gibt an, wie gut oder aber schlecht ein System an ein Referenzsystem (z.B. 50Ω) angepasst ist, das heißt, wie viel der eingehenden Leistung auch tatsächlich an das System weitergegeben und wie viel zurück reflektiert wird. Es wird eine möglichst große Reflexionsdämpfung angestrebt (siehe Tab. 2.1). Die Skala ist logarithmisch.

Tabelle 2.1: Reflexionsdämpfung (*Return Loss*)

Return Loss	Reflektierte Leistung	Transmittierte Leistung
0 dB	100 %	0 %
3 dB	50 %	50 %
6 dB	25 %	75 %
10 dB	10 %	90 %
20 dB	1 %	99 %
30 dB	0,1 %	99,9 %

Die Transmission stellt bei einem passiven System die Signaldämpfung bei dessen Durchlauf dar. Bei dieser Angabe wird ein Wert möglichst nah an 0 dB angestrebt, denn dieser entspricht einem Leistungsübertragungsverhältnis nahe eins. Eine vollständige Signalübertragung und somit eine verlustfreie Transmission entsprechen 0 dB Dämpfung [7].

2.3 Antennengrundlagen

Antennen sind technische Vorrichtungen um elektromagnetische Wellen zu senden oder diese zu empfangen. Somit wandeln sie leitungsgebundene, elektromagnetische Wellen in Freiraumwellen um und im Umkehrschluss Freiraumwellen in leitungsgebundene, elektromagnetische Wellen. Die Welle wird sozusagen aus- bzw. eingekoppelt. Die Freiraumübertragung im Fernfeld hängt nur von dem Medium ab in dem sich die elektromagnetische Welle befindet.

Das theoretische Freiraumdämpfungsmaß F für Leistungsdichte berechnet sich nach der Formel [8, S. 205]

$$F = \left(\frac{4\pi r \cdot f}{c} \right)^2. \quad (2.6)$$

Daraus folgt als Freiraumdämpfungsmaß in logarithmischer Form [8, S. 205]

$$F(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10}(r) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{4\pi}{c} \right). \quad (2.7)$$

Dabei steht r für den Abstand der Antennen in Metern und f für die Frequenz in Hertz. Die Variable c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Medium in dem sich die Welle fortbewegt. Für Luft kann die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum angenommen werden.

In der Hochfrequenz- und Antennentechnik wird auch der Leistungspegel zumeist in der logarithmischen Form angegeben. So können sehr große und ebenso sehr kleine Werte zusammen dargestellt werden. Die Einheit des Leistungspegels ist Dezibel (dB), wobei der Leistungspegel absolut ist und einen definierten Bezugswert benötigt. Als Referenz findet häufig ein Milliwatt - in Schreibweise dBm - Verwendung. Der Antennengewinn wird ebenfalls in Dezibel angegeben. Der Gewinn veranschaulicht die Richtwirkung einer Antenne kombiniert mit dem jeweiligen Leistungsgewinn oder Verlust. Die Angabe kann sich auf zwei unterschiedliche Referenzantennen beziehen. Zum einen auf den isotropen Kugelstrahler, welcher einen theoretischen Rundstrahler von elektromagnetischen Wellen symbolisiert. Dieser Antennengewinn hat die Einheit *dBi*. Zum anderen kann als Bezugsantenne ein (Halbwellen)-Dipol mit der Einheit *dBd* verwendet werden. 0 dBd entsprechen 2,15 dBi [4].

Die Antennenspeisung geschieht zumeist über Koaxialkabel. Dieses ist ein unsymmetrisches Kabel in dem das Signal über den Innenleiter übertragen wird. Der Außenleiter dient als Massebezug und gleichzeitig als Abschirmung gegen elektrische Felder. Der Vorteil eines Koaxialkabels zeigt sich im Aufbau. Da nur zwischen dem Innen- und Außenleiter ein elektrisches Feld entsteht, ist es nach außen hin feldfrei und gut geschirmt.

Polarisation

Im Allgemeinen wird in der Polarisation zwischen der linearen und der zirkularen Ausbreitungsart unterschieden, wobei letztere eine spezielle Form der elliptischen Polarisation darstellt. Werden Sende- und Empfangsantennen unterschiedlicher Polarisation kombiniert, treten entweder Verluste oder eine komplette Dämpfung der Übertragungsleistung auf. Die Kombinationen sind in Tabelle 2.2 aufgezeigt. Ein lineares Verhältnis des Ausgangs- zu Eingangspegel von 1, also einer vollständigen Transmission ohne Verluste entsprechen 0 dB. Eine Dämpfung um die Hälfte stellen hingegen im linearen Leistungsverhältnis 3 dB Dämpfung dar. Bei dem Übergang von einer linearen Polarisation auf eine zirkulare geht somit 50 % der Sendeleistung verloren [9].

Tabelle 2.2: Dämpfung durch die unterschiedlichen Polarisationen zwischen Feld und Antenne [9, S. 130]

Antennen- polarisation \ Feld- polarisation	vertikal	horizontal	zirkular rechtsdrehend	zirkular linksdrehend
	vertikal \uparrow	0 dB	∞	3 dB
horizontal \rightarrow	∞	0 dB	3 dB	3 dB
zirkular rechtsdrehend \odot	3 dB	3 dB	0 dB	∞
zirkular linksdrehend \ominus	3 dB	3 dB	∞	0 dB

Die elektrischen Feldvektoren bewegen sich bei der linearen Polarisation in einer Ebene senkrecht oder parallel zur Ausbreitungsrichtung fort. Dies entspricht einer vertikalen oder horizontalen Ausrichtung (Abb.2.3).

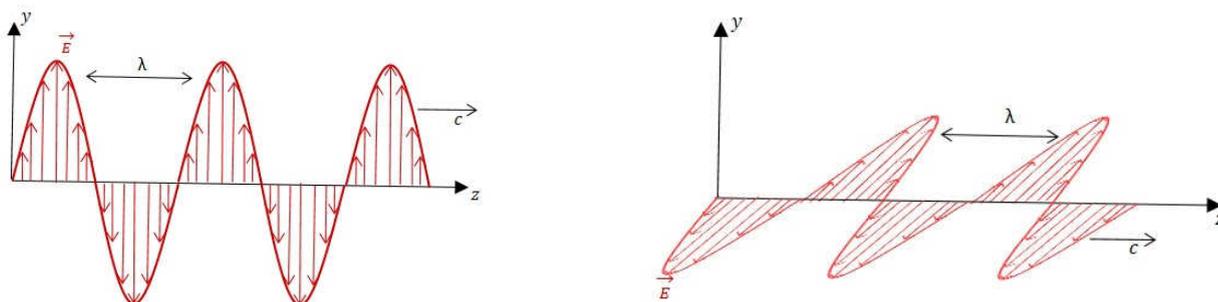


Abbildung 2.3: Linear polarisierte elektromagnetische Wellen
links: Vertikal
rechts: Horizontal

Eine zirkulare Polarisation entsteht aus einer elliptischen Polarisation, bei welcher die Amplituden der E-Vektoren gleich lang sind und diese zusätzlich senkrecht aufeinander stehen. Diese Vektoren rotieren links- oder rechtsdrehend um die z -Achse, folglich senkrecht zur Ausbreitungsrichtung (siehe Abb. 2.4).

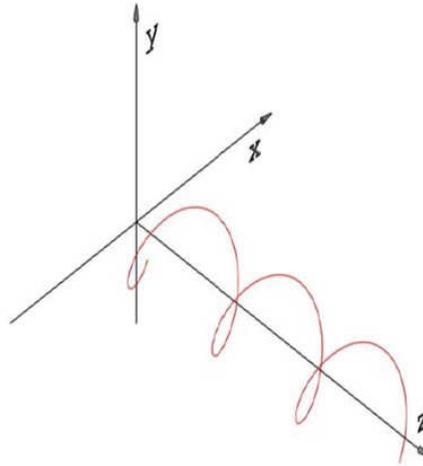


Abbildung 2.4: Linksdrehende zirkular polarisierte elektromagnetische Welle [10]

Antennenarten

Für den Versuchsaufbau und das IPS-MA Projekt werden verschiedene Antennen benötigt und im Folgenden theoretisch betrachtet:

- Dipolantenne
- Monopolantenne
- Logarithmisch periodische Dipolantenne
- Chipantenne
- Patchantenne

Dipolantenne

Der Dipol ist eine der geläufigsten Antennenarten und findet sich auch als Bauteil in anderen Antennenarten wieder. Bei einer halben Wellenlänge ist dieser in Resonanz und stehende Wellen können zwischen den beiden Enden der Antenne verlaufen. Deshalb wird diese Antenne auch als $\frac{\lambda}{2}$ -Dipol bezeichnet. Ein Dipol lässt sich zur Veranschaulichung aus einem Schwingkreis erstellen. Dazu wird dieser in der geometrischen Mitte aufgetrennt und der

Plattenkondensator aufgeklappt. Das System ist symmetrisch gegen Masse. Die elektrischen Feldlinien, die zwischen dem Kondensator auftreten, müssen bei einer Auftrennung eine immer größere Strecke zurücklegen und gehen deshalb bei der Form eines Dipols in den freien Raum über. Es bilden sich Strommaxima in der Mitte des Dipols und Spannungsmaxima an den jeweiligen Enden.

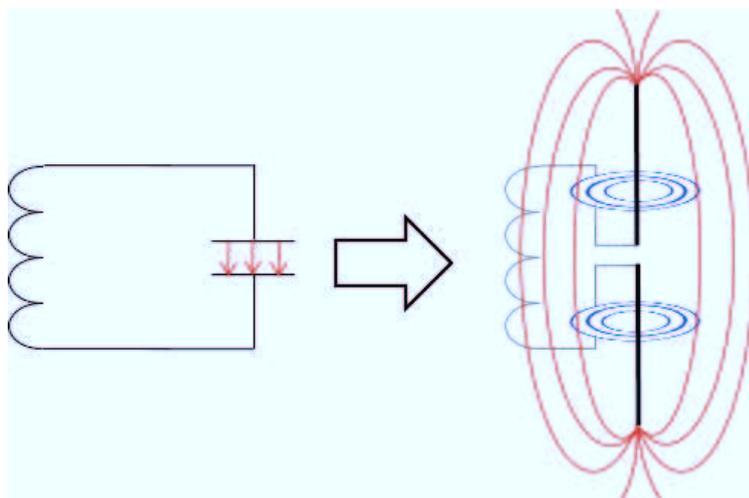


Abbildung 2.5: Übergang eines Schwingkreises in eine Dipolantenne

Die Dipolantenne besitzt eine apfelförmige Abstrahlcharakteristik. Es liegen bei dem Rundstrahler nur an den jeweiligen Spitzen der Pole Sende- bzw. Empfangseinbrüche vor. Die restliche Charakteristik ist gleichmäßig ausgeprägt mit Maxima in der geometrischen Mitte [9, Kap. 9.1.1].

Monopolantenne

Bei einer Monopolantenne wird eine Seite der Dipolantenne durch eine leitfähige Ebene ersetzt. Deshalb ist die Monopolantenne auch unter dem Namen Groundplane Antenne bekannt. Im Gegensatz zur Dipolantenne ist die Monopolantenne eine unsymmetrische Antenne mit einer Pollänge von $\frac{\lambda}{4}$. Die Monopolantenne besitzt wie die Dipolantenne eine apfelförmige Abstrahlcharakteristik [9, Kap. 19.4].

Logarithmisch periodische Dipolantenne

Bei einer logarithmisch periodischen Dipolantenne handelt es sich um die einzige hier vorgestellte Breitbandantenne mit gleichzeitiger Richtwirkung. Diese Antenne besteht aus mehreren Dipolen, deren Abstand in Form einer logarithmischen Funktion abnimmt. Für eine phasenrichtige Anregung werden die Dipole über eine Doppelleitung kreuzweise gespeist, die dann bei einem bestimmten Abstand zum letzten Dipol kurzgeschlossen wird. Als neutraler Strahler wird der $\frac{\lambda}{2}$ -Dipol bezeichnet, der für eine anliegende Arbeitsfrequenz in Resonanz geht. Die nicht resonierenden Dipole mit einer effektiv kürzeren Länge als $\frac{\lambda}{2}$ agieren als Direktoren, Dipole mit einer effektiv größeren Länge als $\frac{\lambda}{2}$ als Reflektoren. Der Antennengewinn ist abhängig von der Anzahl der verbauten Dipolelemente [4, Kap. 12.2] [11].

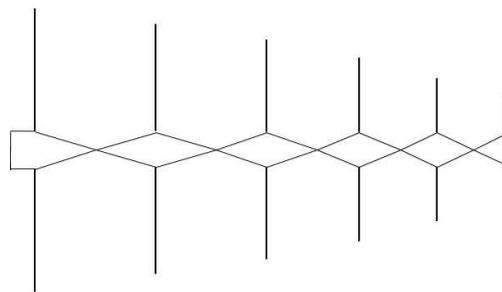


Abbildung 2.6: Aufbau einer logarithmisch-periodischen Dipolantenne (LPDA)

Chipantenne

Die Chipantenne ist eine dielektrische Resonator Antenne (DRA) und gehört zu den Flachantennen. Ein ungeschirmter dielektrischer Resonator wird zu einer Antenne, da dieser elektromagnetische Wellen emittiert. Sie wird hauptsächlich für elektromagnetische Wellen im Mikrowellen-Frequenzbereich eingesetzt. Als Dielektrikum wird Keramik verwendet, dieses dient als Resonatormaterial. Die Größe der Antenne lässt sich ungefähr mit $\frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$ berechnen, wobei sich das λ_0 auf die Wellenlänge des Ausbreitungsmediums bezieht und das spezifische ϵ_r die relative Permittivität des Dielektrikums beträgt. Je nach Material lassen sich für den Mikrowellen-Frequenzbereich sehr kleine Antennen herstellen. Die Abstrahlcharakteristik einer Chipantenne ist modellabhängig und lässt sich nicht generell beschreiben [12, Kap.5].

Patchantenne

Eine Patchantenne hat eine planare Struktur und wird aufgrund ihrer Bauweise auch als Streifenleitungsantenne bezeichnet. Vorteilhaft ist die geringe Bauhöhe, der damit verbundene hohe Miniaturisierungsgrad und die Reproduzierbarkeit. Allerdings zeigt sie durch Verluste im Substrat einen geringeren Wirkungsgrad und die Bandbreite beläuft sich auf nur einige Prozent. Die Patchantenne besteht aus einer typischerweise rechteckigen Metallfläche (Patch), dessen Kantenlänge $\frac{\lambda}{2}$ ist. Folglich ist eine Patchantenne ein $\frac{\lambda}{2}$ -Resonator. Ein dielektrisches Substrat trennt das Patch von einer leitfähigen Grundfläche. Eine Art der Versorgung des Patches ist die direkte Speisung über eine Streifenleitung, welche eine lineare Polarisationsausbreitung der Antenne bewirkt. Bei zusätzlicher Implementierung einer um 90° gedrehten Streifenleitung zur Signalspeisung wird die zuvor lineare Polarisation der elektromagnetischen Welle zu einer zirkularen Polarisation. Das Patch strahlt ballonförmig nach oben ab. Auf der Rückseite entsteht eine kaum merkliche Ausstrahlung von elektromagnetischen Wellen [4, Kap. 17.1] [9, Kap. 36.10].

3 Messaufbau und Durchführung

Für die Untersuchung dient ein Messaufbau, welcher die vorbereiteten *Devices Under Test (DUT)* reproduzierbar in einer Freiraumumgebung in Form einer 2D- und 3D-Charakteristik vermisst. Eine Skizze dieses Aufbaus ist in Abbildung 3.1 dargestellt. Bei genauerer Betrachtung fällt auf, dass in dem Messaufbau die IPS-Antenne -entgegen ihrer Auslegung- als Sendeantenne fungiert und von dem Signalgenerator gespeist wird. Dies ist auf dem internen Vorverstärker in der logarithmisch periodischen Antenne von *Rohde und Schwarz* zurückzuführen, die zur Vermessung des *DUT* dient. Der Verstärker der schon bekannten und spezifizierten Antenne agiert nur im Empfangs- und nicht im Sendemodus. Aufgrund des reziproken Verhaltens von Antennen kann die Senderichtung vertauscht werden. Das *Device Under Test* wird auf der Halterung eines 2-Achsen Positionierers befestigt. Das empfangene Signal wird aus der Absorberkammer herausgeführt und von einem Spektrumanalysator vermessen.

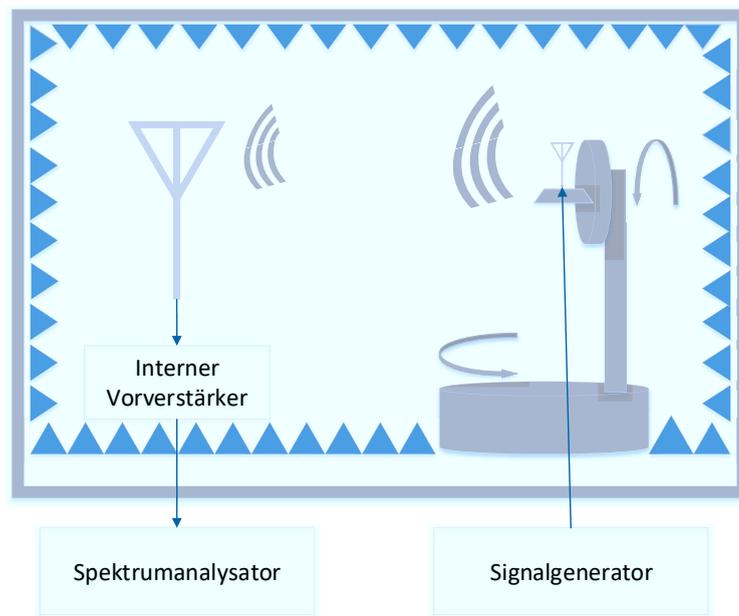


Abbildung 3.1: Skizze des Messaufbaus mit allen Komponenten

3.1 Device Under Test

Ein *Device Under Test* bezeichnet ein zu vermessendes Objekt. Es werden mit der Monopol-, der Chip- und der Patchantenne drei *Devices Under Test* genauer vorgestellt und deren Eignung als IPS-Antenne bezogen auf ihre Anforderungen diskutiert. Aufbauend auf diesen Schlussfolgerungen werden letztendlich die Monopolantenne und die Chipantenne vermessen.

Monopolantenne

Aufgrund ihrer Abstrahlcharakteristik und der einfachen Positionierung wird für die Untersuchung eine Monopolantenne favorisiert. Entscheidend für die Untersuchungen ist der Aufbau der Testplatinen und die Ergebnisse der Simulation verschiedener Ausführungen mit einem Simulationstool für elektromagnetische Felder. Mittels eines Netzwerkanalysators werden zusätzlich die S11-Parameter aufgenommen und so die Anpassung bei 5,8 GHz aufgezeigt.

Aufbau

Die Testplatine basiert auf einem 25 mm großen Quadrat aus FR-4 und einer Kupferschicht, die als Masse und Referenzfläche für den Monopol dient. Die Antenne ist in der Mitte des PCBs platziert und besteht aus versilbertem Kupferdraht. Auf der Rückseite steht ein SMA-Anschluss für das Koaxialkabel zur Verfügung. Die Länge des Monopols lässt sich wie in der Gleichung 2.2 in Abschnitt 2.3 gezeigt, aus der Wellenlänge der spezifischen Frequenz bestimmen. Die Wellenlänge bei 5,8 GHz beträgt

$$\lambda = \frac{c_0}{f} \approx \frac{3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{5,7 \cdot 10^9 \text{ 1/s}} \approx 51,7 \text{ mm}, \quad (3.1)$$

daraus folgt eine mechanische Länge l des Monopols von

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{51,7 \text{ mm}}{4} \approx 13 \text{ mm}. \quad (3.2)$$

Diese Testplatine ist in Abbildung 3.2 in der Mitte zu sehen. Beim Vergleich der Ausmaße des Monopols mit der von dem Kunden gewünschten Größe des Sensors (siehe Abb. 1.2) fällt

auf, dass die Antenne mit 13 mm zu lang ist. Zur Verkürzung der mechanischen Länge, bei gleichbleibender Anpassung bei 5,8 GHz, muss ein Lösungsansatz realisiert werden.

Eine Möglichkeit ist es den Monopol mit einer Oxidkeramik (Al_2O_3) zu ummanteln. Im Gegensatz zur relativen Permittivität von Luft $\epsilon_r \approx 1$ besitzt das Dielektrikum ein $\epsilon_r \approx 10$. Somit verlangsamt sich die elektromagnetische Welle, wenn sie von der Ausbreitung in Luft in die Oxidkeramik eintritt. Daraus folgt eine kürzere Wellenlänge als die 51,7 mm der berechneten Monopolantenne ohne Dielektrikum. Dies bewirkt eine Verlängerung der elektrischen Länge des Monopols, was zur Verkürzung der mechanischen Länge führt. Es wird eine Anpassung bei 5,8 GHz erzielt. Trotz der höheren Permittivität ist der Verlustfaktor mit $\tan \delta = 10^{-4}$ relativ klein und die Verluste akzeptabel. Die theoretisch maximale Verkürzung der Monopolantenne beläuft sich auf

$$l_{\min} = \frac{l_{\text{Monopol ohne Dielektrikum}}}{\sqrt{\epsilon_r}} \approx \frac{13 \text{ mm}}{\sqrt{10}} \approx 4,1 \text{ mm.} \quad (3.3)$$

Allerdings ist diese in der Realität nicht umsetzbar, da die Theorie von einer kompletten Umhüllung des Monopols mit dem Dielektrikum ausgeht. Durch empirische Simulationen lässt sich eine minimale Länge l_{\min} von 7 mm ermitteln.

Zwei unterschiedliche Varianten sind in Abbildung 3.2 dargestellt. Auf der linken Seite der Abbildung ist ein 10 mm langer Monopol mit passender Dicke des Dielektrikums für die Anpassung bei 5,8 GHz zu sehen. Rechts ein 7 mm langer Monopol mit entsprechendem Dielektrikum. Die Monopolantenne ohne Dielektrikum kommt nicht als IPS-Antenne infrage, dient allerdings als Referenzmessung, da sie eine bekannte und zu erwartende Charakteristik aufweist.



Abbildung 3.2: Verschiedene Varianten der Monopolantenne

In Abbildung 3.3 ist der S11-Parameter von 1 GHz bis 10 GHz zu sehen. Dabei bedeuten die 0 dB, dass die gesamte Leistung, die über das Koaxialkabel in die Antenne gespeist wird,

dort reflektiert und zurück auf die Leitung gelangt. Kleinere Werte stehen für eine geringere Reflexion und somit für mehr Leistung, die tatsächlich von der Antenne abgestrahlt wird. Die Abbildung zeigt deutlich, dass die Monopolantenne bei 5,8 GHz mit -26,1 dB in Anpassung ist.

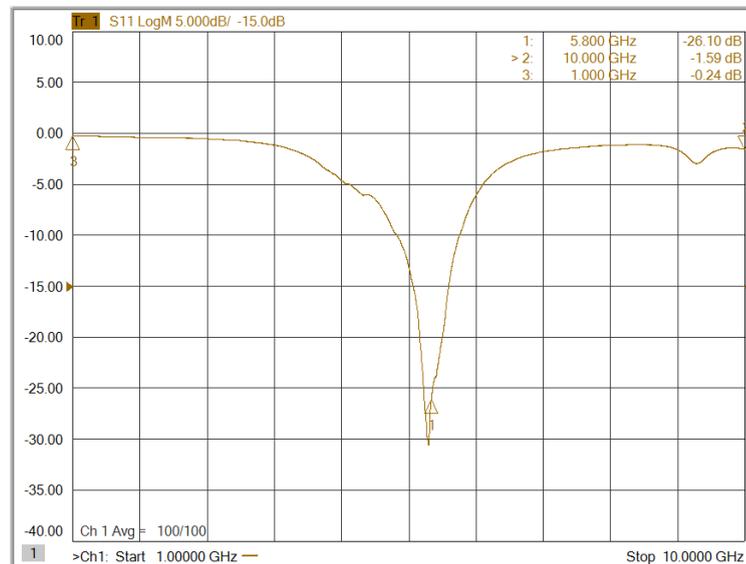


Abbildung 3.3: S11-Parameter der Monopolantenne ohne Dielektrikum

Simulation

Das Verhalten der Monopol Testplatten lässt sich mit einer elektromagnetischen Simulation mit dem Programm EMPro (elektromagnetic Professional 3D EM Design Automation) der Firma Keysight mit der FEM (Finite Element Method) Methode simulieren. Die 13 mm lange Monopolantenne ohne Dielektrikum zeigt eine erwartete, apfelförmige Rundstahlcharakteristik (siehe Abb.3.4 links). Darauf aufbauend lässt sich die kürzeste Länge des Monopols bei einer festgelegten Dicke des Dielektrikums von 10 mm ermitteln (siehe Abb.3.4 rechts). Dazu wird die Länge mittels verschiedener Sweep-Durchläufe empirisch angenähert. Sie beträgt wie zuvor angeführt 7 mm. Die Simulationen zeigen den Antennengewinn einer Monopolantenne ohne Dielektrikum auf einer Testplatte und eine mit Dielektrikum.

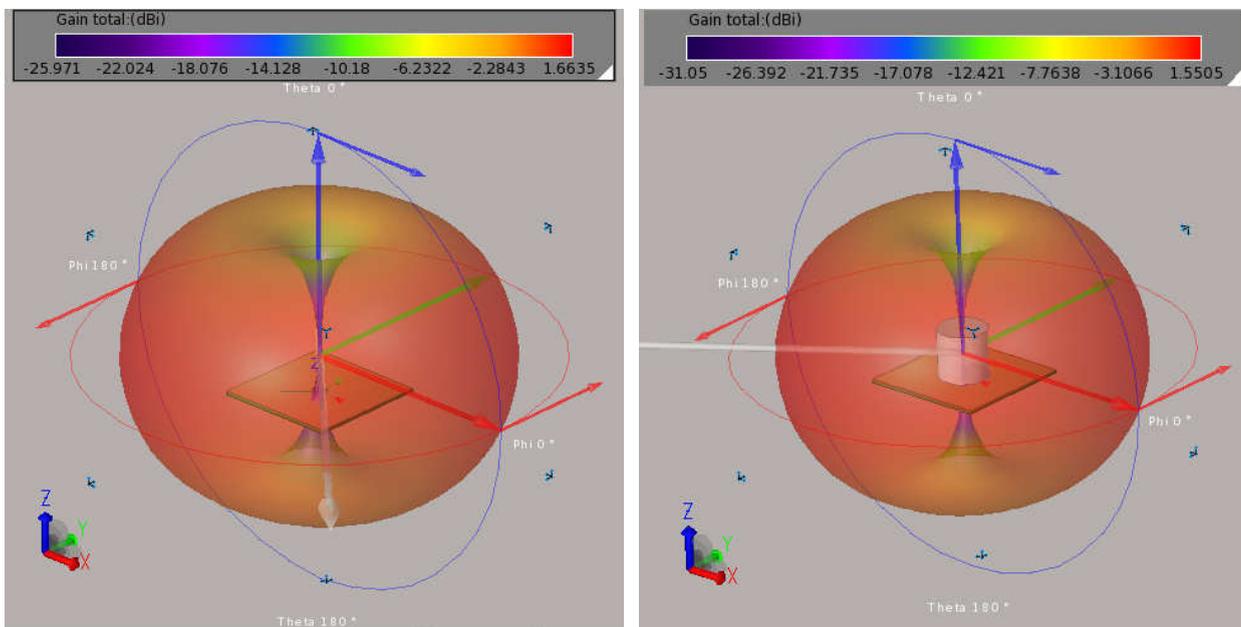


Abbildung 3.4: Simulationen der Monopolantenne mit EMPro
links: ohne Dielektrikum
rechts: mit Dielektrikum

Die kürzeste Version der Monopolantenne mit Keramikummantelung ist der erfolgversprechendste Ansatz für die Antennenlösung, sodass auf diesen das Hauptaugenmerk bei den Antennencharakterisierungen liegt.

Chipantenne

Zwar besitzt die Chipantenne nur ein sehr kleines Packmaß und damit gute Voraussetzungen für den Einsatz als IPS-Antenne, andererseits spricht jedoch die Abstrahlcharakteristik gegen die Chipantenne. Diese ähnelt nicht dem Rundstrahler, ist unregelmäßig (Abb. 3.5) und zugleich abhängig von der Positionierung auf der Platine. Folglich sind die Messergebnisse nicht reproduzierbar und die Wahrscheinlichkeit ist zu hoch, dass die Chipantenne das Signal von zu wenigen *Base Stations* empfängt, und ist somit als Typ nicht geeignet. Die Chipantenne kommt jedoch als *DUT* in Frage, da die verifizierte Charakteristik aus dem Datenblatt des Herstellers zur Verifikation des eigentlichen Messaufbaus dienen kann.

Eine solche anwendbare Lösung bietet die Firma Antenova mit ihrer linear polarisierten Sharpi Wi-Fi Antenne (SRC5G027). Diese ist auf der linken Seite der Abbildung 3.5 zu sehen. Auf dieser Testplatine ist die Chipantenne am oberen Rand implementiert und mit einem Anpassnetzwerk versehen. An der linken Seite der Testplatine ist der SMA-Anschluss für das Koaxialkabel befestigt, welcher über eine Streifenleitung mit dem Anpassnetzwerk verbunden ist.

Bei 5,8 GHz beträgt der S11 Parameter -13,49 dB (siehe Anhang Abb. A.2).

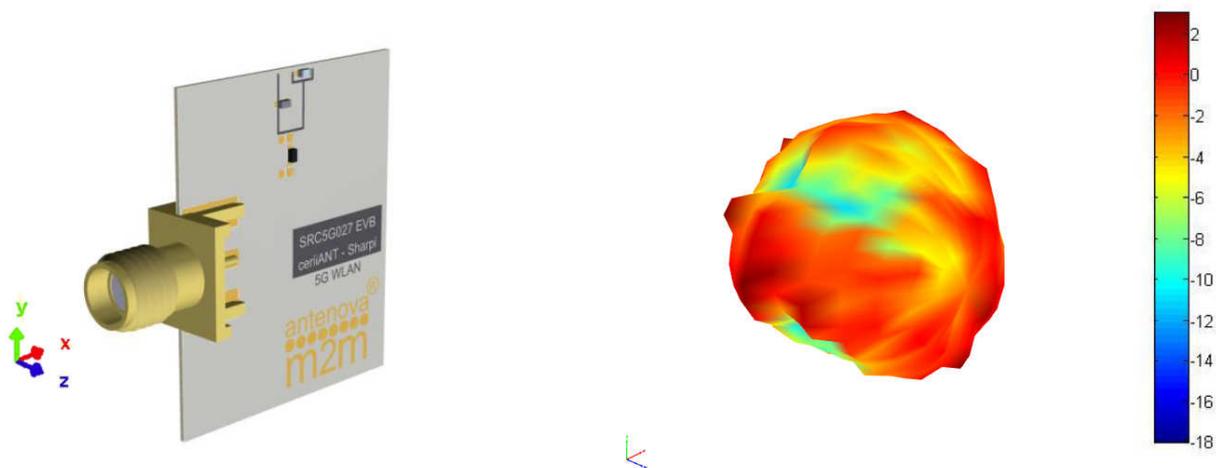


Abbildung 3.5: 3D-Simulation aus dem Datenblatt der Chipantenne bei 5,46 GHz [13]

Patchantenne

Die Patchantenne findet in den *Base Stations* des IPS-MA Projekts Verwendung und wird dort für die Aussendung des 5,8 GHz Signals und den Empfang des 2,4 GHz Bluetooth Signals eingesetzt. Die Bluetooth Antenne ist in Abbildung 3.6 auf der linken Seite der Platine zu erkennen, die IPS-Basisantenne auf der rechten Seite. Es fällt auf, dass die Seitenlängen der linken Fläche (Patch) doppelt so lang sind wie die der rechten Fläche. Dies ist auf die unterschiedlichen Arbeitsfrequenzen zurückzuführen, denn die IPS Frequenz entspricht der doppelten Bluetooth Frequenz. Insgesamt betrachtet bietet die Patchantenne zwei Vorteile. Zum einen hat sie eine nach vorne abstrahlende, gleichmäßige Richtcharakteristik und zum anderen kann diese je nach Bauart linear oder zirkular polarisiert sein. Für die zirkulare Polarisation muss das Patch z.B. um eine um 90° versetzt gedrehte Zuleitung erweitert werden. Zusammengefasst machen alle die genannten Aspekte die Patchantenne ebenfalls für die IPS-Antenne auf den *Mobile Devices* interessant. Allerdings ist das Patch, das auf der Abbildung 3.6 im rechten Teil der Platine zu sehen ist, zu groß für das *Mobile Device* und somit keine Option für die IPS-Antenne.



Abbildung 3.6: *Base Station* mit Patchantenne für Bluetooth bei 2,4 GHz (links) und Patchantenne für 5,8 GHz (rechts)

3.2 Absorberkammer

Der Messaufbau befindet sich aufgrund mehrerer Aspekte in einer Absorberkammer (Abb. 3.7). Die Kammer besteht aus einer Schirmkabine mit elektrisch leitfähigen Wänden und mehreren Absorbern im Inneren. Diese ermöglicht Messungen unter Freiraumbedingungen in einem Gebäude. Unter einem Freiraum wird ein Raum verstanden, der keine Beeinträchtigung auf

das Sende- und Empfangssignal in Form einer elektromagnetischen Welle hervorruft und im Gegensatz zum Freifeld auch keinen reflektierenden Boden enthält. Das heißt, Reflexionen, die zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz führen, müssen in der Absorberkammer absorbiert werden. Eine Mehrwegeausbreitung wird somit ebenfalls eliminiert, was mit Hilfe von Hybridabsorbern eine Kombination aus Ferritplatten und Pyramidabsorbern, die aus Kohlenstoff getränktem, geschäumtem Material bestehen, geschieht. Die reflexionsarmen Ferritplatten passen für niedrigere Frequenzen die Impedanz des Feldwelleninnenwiderstands des Freiraums ($377\ \Omega$) dem Welleninnenwiderstand der Schirmwand ($0\ \Omega$) an. Die Absorber nehmen die höheren Frequenzen auf, indem sie die Energie der Welle in Wärme umwandeln. Durch die spezielle Form können die elektromagnetischen Wellen mehrfach auf die Absorberoberfläche treffen und somit die Reflexionsdämpfung erhöhen [14, Kapitel 5.7.1]. Zusammengenommen haben die Hybridabsorber einen Arbeitsbereich von 30 MHz bis 40 GHz und weisen bei ca. 6 GHz eine Reflexion von -30 bis -35 dB auf (Abb.A.1).

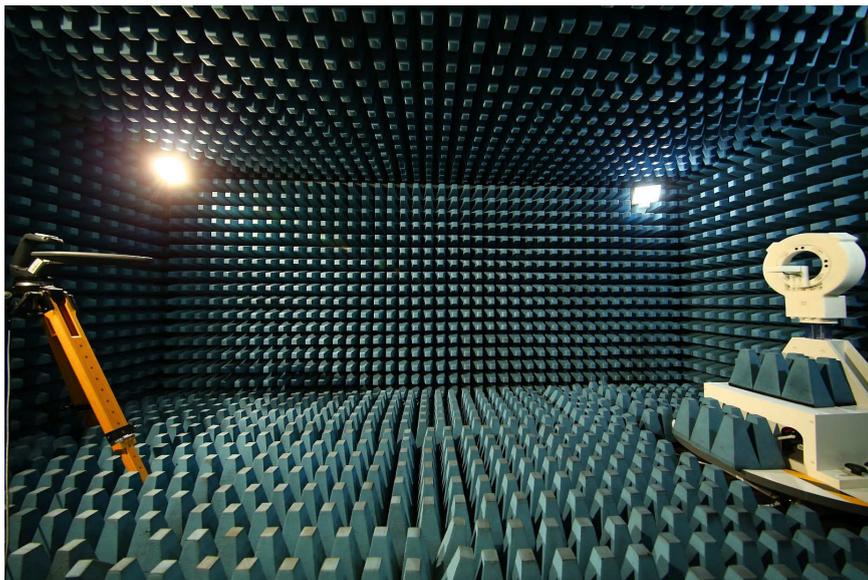


Abbildung 3.7: Absorberkammer aus der Weitwinkelperspektive

Des Weiteren ermöglicht die Absorberkammer durch die Schirmkabine eine Messung ohne Störung durch die Außenwelt. Im Umkehrschluss vermeidet die Abschirmung die Emission von nicht zulässigen Signalen in die normale Umgebung. Kabel mit flexibler Verlegung müssen durch ein Becken mit Kupferspänen ins Innere der Kammer geführt werden. Die Stromversorgung wiederum wird durch einen Filter von Störungen bereinigt.

3.3 Messequipment

Der *MXG Vector Signal Generator N5182B (9 kHz - 6 GHz)* von Keysight speist das *Device Under Test* mit einem und konstanten, hochfrequenten Sinussignal. Der Generator verfügt über eine Ethernet Schnittstelle und kann damit über externe Geräte angesteuert werden.

Als Messempfänger wird der *ESL6 EMI Test Receiver* von Rohde und Schwarz eingesetzt. Auch dieser ist mit einer Ethernet Schnittstelle zur externen Kommunikation ausgestattet. Der Spektrumanalysator ist zusätzlich mit dem 10 MHz Referenz Oszillator des Signalgenerators verbunden. Dies dient der Synchronisation beider Geräte miteinander. Der verbaute interne Vorverstärker hebt das empfangene Signal um 10 dB an und erhöht so das Signal-Rausch-Verhältnis, sodass sich die Empfangsqualität verbessert. Der interne Vorverstärker muss jedoch nicht in der später erläuterten Verluststrecke betrachtet werden, da der Spektrumanalysator diesen intern heraus rechnet.

Als Empfangsantenne dient die aktive logarithmisch periodische *HE300 Active Directional Antenna* der Firma Rohde und Schwarz.

3.4 2-Achsen Positionierer

Aufbau

Der Messtisch ist ein 2-Achsen Positionierer und besteht aus zwei Systemen der Firma Inco Systems. Das erste System ist ein 360° drehbarer *Compact Table (CT 0800)*, welcher im Kugelkoordinatensystem dem Raumwinkel φ entspricht. Diese Drehbewegung ist in Abbildung 3.8 zu erkennen. Auf diesem Drehtisch ist das zweite System befestigt, bei dem es sich um eine ebenfalls 360° drehbare *Turn Unit (DE 3600)* handelt und dem Raumwinkel θ entspricht. Diese Drehbewegung ist in Abbildung 3.9 zu erkennen. Somit kann mit verschiedenen φ - und θ - Werten $[0; \pi]$ $[0; 2\pi]$ jeder Raumwinkel der Kugelkoordinaten betrachtet werden.

Zur späteren Ausrichtung der Charakteristiken im Raum wird zusätzlich ein dreidimensionales kartesisches Koordinatensystem benötigt. Die Achse entlang der Markierung auf dem *Compact Table* auf der linken Abbildung 3.8 wird als x -Achse definiert. Die Ausrichtung in die Tiefe ist die y -Achse und die vertikale Höhe die z -Achse.

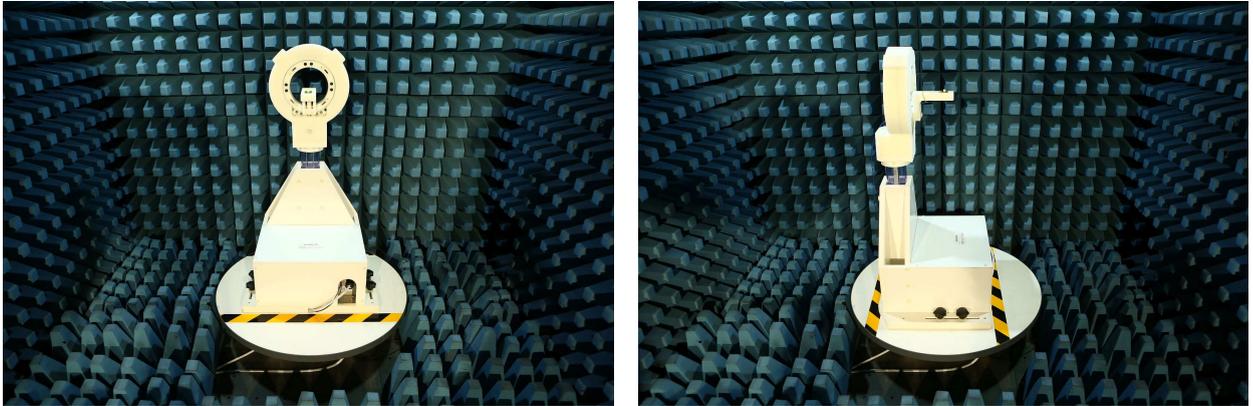


Abbildung 3.8: 2-Achsen Positionierer

links: Positionierer, nach vorne zeigend

rechts: Positionierer, mit *Compact Table* um 90° gedreht

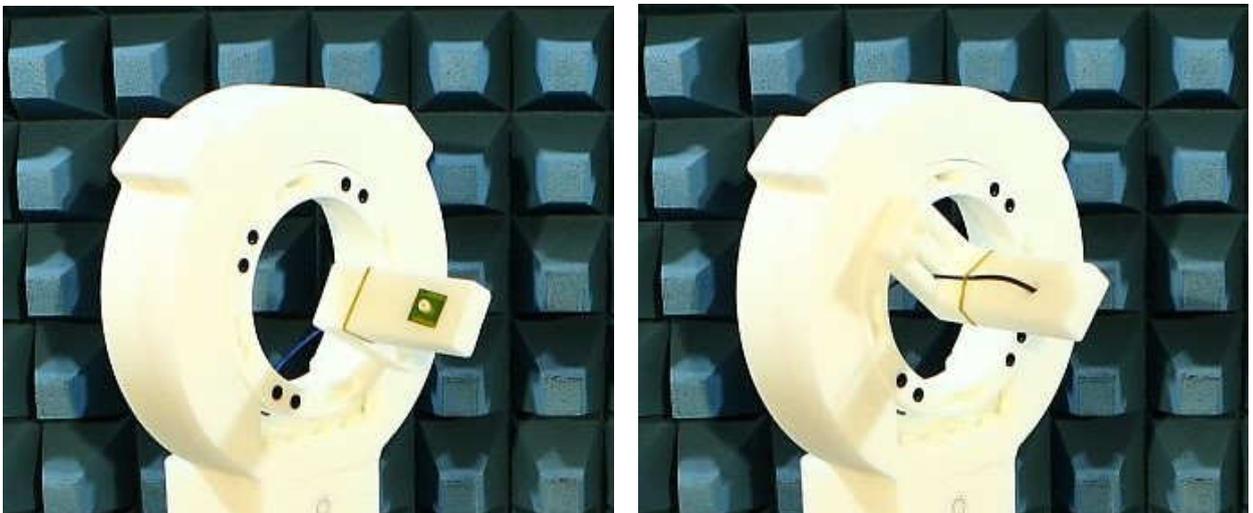


Abbildung 3.9: Drehbewegung der *Turn Unit*

links: *Turn Unit*

rechts: *Turn Unit* um 180° gedreht

Zur Vermeidung von Reflexionen am Material besteht der *Compact Table* aus Kömacel, PVC als Randbegrenzung und Holz. Die Rotationseinheit der *Turn Unit* besteht aus Rohacell 110 IG mit einer relativen Permittivität ϵ_r unter 1,2 und sollte somit die Messungen nicht beeinflussen. Die übrigen Bestandteile bestehen aus Kömacel mit PVC Profil. Für den Antrieb sind in der *Turn Unit* und dem *Compact Table* Motoren mit einer Genauigkeit von $\pm 1^\circ$ installiert. Die Motoren sind so geschirmt, dass eine Störaussendung unterdrückt wird [15, 16].

Positionierung der Antennen

Das Messobjekt wird zentral auf beide Rotationsachsen des 2-Achsen Positionierers angebracht, sodass die Ausrichtung der Antenne variiert werden kann, ohne die absolute Position im Raum zu verändern. Zuerst wird der Mittelpunkt des *Compact Tables* ermittelt. Dieser entspricht verlängert der z -Achse im Koordinatensystem. Durch eine Einmessung des Drehtisches wird zunächst die gesuchte Position auf der Halterung der *Turn Unit* angenähert. Senkrecht über dieser Position schwebend wird nun ein Schnurlot an der Decke befestigt; es stellt somit eine frei hängende Verlängerung der Drehachse des *Compact Tables* dar. Zeigt das Schnurlot nach einer Rotation des *Compact Tables* auf einen anderen Punkt auf der *Turn Unit*, wie zu Beginn der Rotation, entspricht die gewählte Position des Schnurlots nicht der exakten Verlängerung der Drehachse. Anschließend wird die Position des Schnurlots leicht verändert, woraufhin der *Compact Table* erneut rotiert. Dieses Verfahren wird solange wiederholt, bis sich das Schnurlot zentral über der Drehachse des Tisches befindet. So kann mit dem Schnurlot der Mittelpunkt der z -Achse des Positionierers experimentell verifiziert werden. Der Mittelpunkt der *Turn Unit* wird mit einer Vermessung des Durchmessers mittels eines Lasers verifiziert.

Die LPDA HE 300 von Rohde und Schwarz wird als Empfangsantenne auf einem Dreibein aus Holz in drei Metern Entfernung aufgestellt, sodass hochfrequente Signale durch das Holz nicht reflektiert werden und eine Beeinträchtigung der Messung vermieden wird. Die Messungen der Antennen finden im Bereich des Fernfeldes statt, da dies der spätere Einsatzbereich der IPS-Antenne sein wird.

3.5 Messpunkteverteilung und Ansteuerung der Geräte

Im Rahmen einer Seminararbeit wurde die Ansteuerung des Positionierers automatisiert. Dafür wurde eine Messpunkteverteilung, eine Analysefunktion und Teile der Geräteansteuerung in Matlab entwickelt.

Messpunkteverteilung

Die Summe aller anfahrbaren Raumkoordinaten des Positionierers entsprechen einer Kugel. Die Raumumgebung kann deshalb mit Kugelkoordinaten dargestellt werden. Auf dieser Kugeloberfläche wird nun eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Messpunkte angestrebt. Für die Verteilung ist zwischen den zwei verschiedenen Messabläufen zu unterscheiden. Zum einen ist eine 3D-Charakteristik der Antenne vorgesehen. Das heißt, dass auf der gesamten Kugeloberfläche Messpunkte verteilt werden müssen. Dafür werden n Punkte äquidistant auf eine Linie gesetzt und in Form einer Spirale um eine aufgespannte Sphäre gelegt. Dieses Vorgehen lässt Messpunkte mit etwa identischen Abstand sowie einem zusätzlich entstandenen schnellen Fahrweg für den Positionierer entstehen.

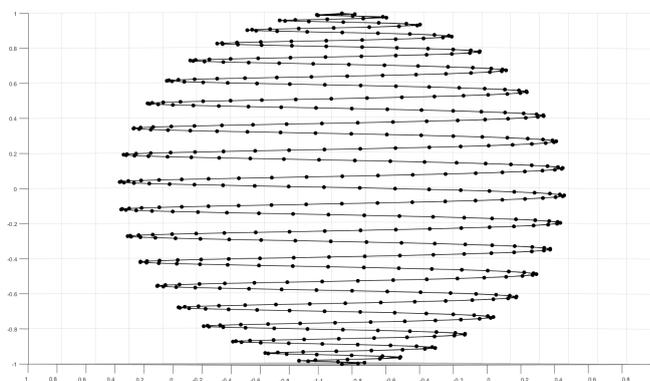


Abbildung 3.10: Spirale für die äquidistante Punkteverteilung

Für die Erstellung einer 2D-Charakteristik wird eine Verteilung der Messpunkte auf einer Kurve der Kugel benötigt. Dies entspricht einem Kreis, der auf der Kugeloberfläche liegt, wobei nur horizontal oder vertikal verlaufende Kreise relevant sind. Folglich muss für diese Antennencharakteristik nur eine Achse des 2-Achsen Positionierers bewegt werden. Die andere wird bei einem bestimmten Raumwinkel festgesetzt. Für beide Szenarien existieren die Matlab Funktionen `setPointsBall(n)` und `setPointsCircle(n , d , $rot_turnunit$)`.

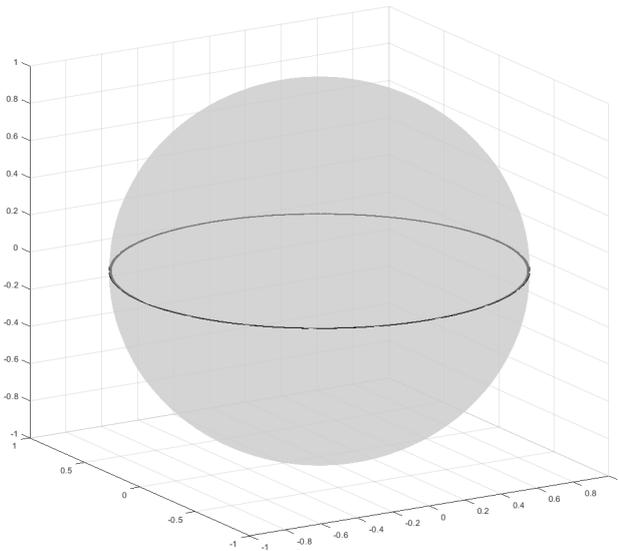


Abbildung 3.11: Darstellung einer Kurve um die Kugel

Da alle Messpunkte nacheinander manuell unter relativ hohem Zeitaufwand zu vermessen und so kaum reproduzierbar wären, soll der Messdurchlauf automatisiert werden. Dementsprechend soll die Initialisierung der Geräte automatisch erfolgen und im gleichen Arbeitsschritt das richtige Setup der Geräte eingestellt werden. Die Messwerte der nacheinander angefahrenen Messpunkte sollen aufgenommen und zusammen mit dem zugehörigen Messpunkt abgespeichert werden.

Geräteansteuerung

Der in Unterkapitel 3.4 beschriebene 2-Achsen Positionierer wird von einem Innco Systems Controller (CO 3000) über Lichtwellenleiter angesteuert. Aufgrund des optischen Signalkabels wird eine Beeinflussung der Messung in der Absorberkammer durch ein elektrisches Signal vermieden. Die Implementierung ist in Matlab realisiert. Der Controller kommuniziert über eine TCP/IP-Verbindung, welche mit der Instrument Control Toolbox von Matlab eingerichtet wird [17]. Es lassen sich Befehle senden und Rückgabewerte auslesen [18]. Die Initialisierung des 2-Achsen Positionierers, die Messpunkteverteilung, die Ansteuerung des Positionierers und die Hinterlegung der übergebenen Messwerte in einer Matrix erfolgen kombiniert in der *measure(pointArray, measureFunc)*-Funktion.

Der Signalgenerator und der Spektrumanalysator kommunizieren ebenfalls über das TCP/IP-Protokoll und lassen sich über Matlab ansteuern. Dies geschieht über die Matlab Funktionen die im Anhang A.5 und A.6 dargestellt sind.

3.6 Durchführung der Messung und Analyse

Durchführung der Messung

Die automatisierte Messung wird mit dem Matlab Skript *run()* gestartet (Abb. A.3). Zu Beginn werden alle Geräte mit der Funktion *instruments_running* initialisiert, eine Verbindung aufgebaut und die Voreinstellungen, wie zum Beispiel die Einschaltung des Signalgenerators, getroffen (Abb. A.4). Zur Erfassung eines klaren Leistungspegels des Messwertes, sind zudem die Einstellungen des Spektrumanalysators zu beachten.

Die Funktion *measure* steuert den Drehtisch für die vorgegebene Anzahl an Messpunkten an und ruft intern für jeden angefahrenen Punkt die *getMesurament*-Funktion auf, um den Spektrumanalysator anzusprechen und auszulesen. In der Funktion *measure* ist eine Abfrage implementiert, die sicherstellt, dass keine Motorenbewegung während des Messvorgangs stattfindet. Das verhindert eine Störung des Messsignals. Während zusätzlicher Wartesekunden kann sich der Messwert am Spektrumanalysator neu einstellen. Das Ergebnis wird in der Matrix *erg* abgelegt und am Ende des Skripts abgespeichert. Nachdem die Messung abgeschlossen ist, wird der Signalgenerator ausgeschaltet und die Verbindung zu den Geräten getrennt.

Visualisierung der Messung

Mit Hilfe der in der Seminararbeit zuvor implementierten Matlab Funktion *analyse(pointArray, name)* kann nun eine Visualisierung der Messwerte vorgenommen werden.

Die 3D-Charakteristik soll durch eine räumliche sowie eine farbliche Visualisierung differenzierbar sein. Dafür werden die Positionen der Messpunkte in kartesische Koordinaten umgerechnet und zusammen mit dem Farbwert des Messpunkts der Matlab Funktion *surf* zum Plotten übergeben. Da diese allerdings nur eine Spirale und keine komplett gefüllte Kugel bildet, wird als Hilfe eine *Sphere* mit 2601 Punkten⁽ⁱ⁾ aufgespannt und die jeweils am nächsten positionierten Messpunkte den Punkten der Sphäre zugeordnet.

⁽ⁱ⁾Die Matlab Funktion *Sphere(50)* ergibt eine *Sphere* mit 2601 Punkten

Für eine 2D-Charakteristik werden die Messwerte einer Kurve um die Kugel als Querschnitt von oben dargestellt. Die 2D-Charakteristik wird nur räumlich visualisiert, eine farbliche Differenzierung ist nicht üblich. Mit Veränderung der Position der *Turn Unit* oder des *Compact Tables* wird die Matrix der Messpunkte mit den passenden Messergebnissen der Matlab Funktion `polarplot()` übergeben.

3.7 Messaufbaubedingte Verluste

Nur in der theoretischen Betrachtung gibt es verlustfreie Übertragungen. In der Realität treten immer Verluste auf, wobei in diesem Fall zwischen leitungsgebundenen und denen im Freiraum auftretenden Verlusten unterschieden wird. In Abbildung 3.12 sind alle Komponenten, die die Messstrecke beeinflussen, aufgeführt.

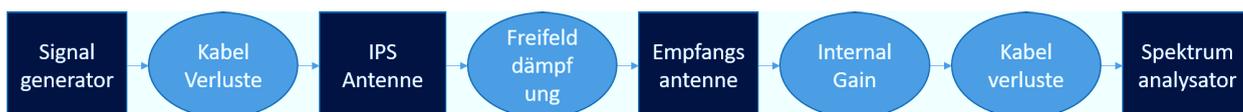


Abbildung 3.12: Signal Verluststrecke

Die Kabelverluste lassen sich mit Hilfe einer Messung der S21-Parameter an einem Netzwerkanalysator und einer Durchgangsmessung des Messaufbaus ermitteln. Bei der Durchgangsmessung wird ein Signal vom Signalgenerator ausgegeben und nach dem Durchlauf aller betroffenen Kabel und Komponenten der noch vorhandene Leistungspegel am Spektrumanalysator gemessen. Diese Verluste sind speziell abhängig von der Bauart und der Länge der Kabel sowie von der Frequenz des zu übertragenden Signals.

Zuerst wird die Dämpfung des flexiblen Messkabels festgestellt. Dieses wird für die Verbindung von der zu vermessenden Antenne auf dem 2-Achsen Positionierer mit dem Kabelanschluss der Absorberkammer benötigt. Mittels eines Netzwerkanalysators wird der S21-Parameter des Kabels bestimmt, welcher den Verlust über die Transmission des Messkabels liefert. Dieser beläuft sich auf 5,34 dB. Werden nun der mit dem Signalgenerator verbundene Absorberkammer-Anschluss, und der der Spektrumanalysator-Anschluss mit Hilfe des bekannten Messkabels verbunden, können die Verluste der Leitungen herausgerechnet werden. Bei einer Speisung des Systems mit 0 dBm Eingangsleistung des Signalgenerators misst der Spektrumanalysator einen Leistungspegel von -20,6 dBm. Dieser Verlust von 20,6 dB setzt sich aus den fest installierten Kabeln der Absorberkammer und dem schon bekannten

Messkabel zusammen. Wird dessen Verlust subtrahiert, bleibt nur der Verlust der Kabel bis zu den Anschlüssen der Absorberkammer. Dieser beläuft sich auf ca. 15 dB. In der folgenden Tabelle 3.1 sind alle gemessenen und berechneten Kabelverluste aufgeführt.

Tabelle 3.1: Kabelverluste

Kabelkomponenten	Kabelverluste bei 5,8 GHz [dB]
flexibles Messkabel	5,43
Rotary Adapter	0,3
fest installierte Kabel bis zu Anschlüssen der Absorberkammer	15

Die in der Tabelle 3.2 zusammengestellten Antennengewinne sind den Handbüchern bzw. Datenblättern der Hersteller entnommen [19, 20].

Tabelle 3.2: Antennengewinne

Antennenkomponenten	Antennengewinn bei 5,8 GHz [dBi]
R&S HE 300 passiver Betrieb ohne Verstärker	3
R&S HE 300 aktiv Betrieb mit Verstärker	11
Aaronia HyperLOG 7060	6

Der Leistungsverlust des Empfangssignals gegenüber dem Sendesignal im Freiraum entsteht auf einer Funkstrecke aufgrund von Signalzerstreuung und nicht wegen einer Dämpfung durch die Luft. Das Freiraumdämpfungsmaß in logarithmischer Form berechnet sich nach der Formel aus 2.7 wie folgt:

$$\begin{aligned}
 F(dB) &= 20 \cdot \log_{10}(r) + 20 \cdot \log_{10}(f) + 20 \cdot \log_{10}\left(\frac{4\pi}{c}\right) \\
 &= 20 \cdot \log_{10}(3) + 20 \cdot \log_{10}(5,8 \cdot 10^9) + 20 \cdot \log_{10}(41,88 \cdot 10^9) \\
 &\approx 57 \text{ dB}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Mit Hilfe von zwei bekannten logarithmisch periodischen Antennen wird nun die berechnete Freiraumdämpfung und die restliche Verluststrecke in der Absorberkammer verifiziert. Die LPDA HyperLOG 7060 von Aaronia wird als Sendeantenne auf dem Drehtisch positioniert (Abb. 3.14).

Die LPDA HE 300 von Rohde und Schwarz verbleibt als Empfangsantenne auf dem Dreibein aus Holz in drei Metern Entfernung. Beide logarithmisch periodischen Antennen befinden sich in einer horizontal linearen Polarisationsrichtung. Wird nun mit dem Signalgenerator ein Signal von 0 dBm Sendeleistung bei 5,8 GHz eingespeist, misst der Spektrumanalysator an der

Empfangsantenne einen Leistungspegel von $-68,53$ dBm. Dieser Leistungsverlust von $68,53$ dB der Übertragungsstrecke setzt sich aus den Kabelverlusten, der Freiraumdämpfung und dem Antennengewinn der beiden Antennen zusammen. Werden von diesem die Kabelverluste ($20,6$ dB) subtrahiert und die Antennengewinne (3 dBi + 6 dBi) addiert, ergibt dies die tatsächliche Freiraumdämpfung. Sie beträgt gerundet 57 dB und ist somit genauso groß wie die berechnete Freiraumdämpfung (siehe Gleichung 3.4).

Dies wird in dem nachfolgenden Levelplan erneut deutlich. In diesem ist das berechnete Freiraumdämpfungsmaß in die Verluststrecke mit eingebunden und es entsteht ein vollständiger Levelplan mit allen Komponenten, die das Signal beeinflussen. Mit einem Wert von $-68,69$ dBm ist dieser nahe am gemessenen Wert der Durchgangsmessung.

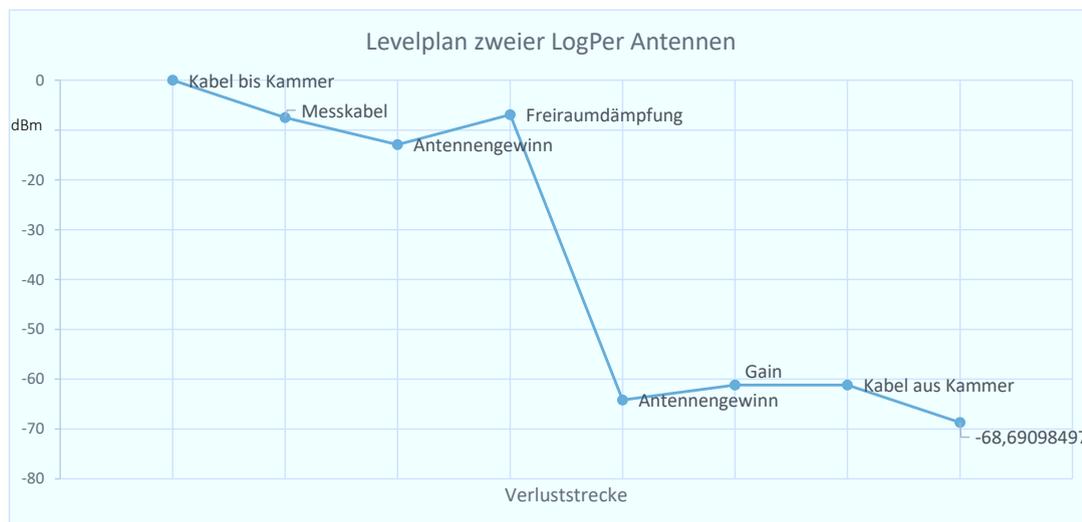


Abbildung 3.13: Levelplan der Verluststrecke von zwei logarithmisch periodischen Antennen

Der gemessene Verlust der gesamten Messstrecke abzüglich des Antennengewinns der HyperLOG Antenne ($-68,53 \text{ dB} + 6 \text{ dBi}$) wird von den späteren Ergebnissen subtrahiert. Die Messstrecke ist in der Abbildung 3.14 skizziert.

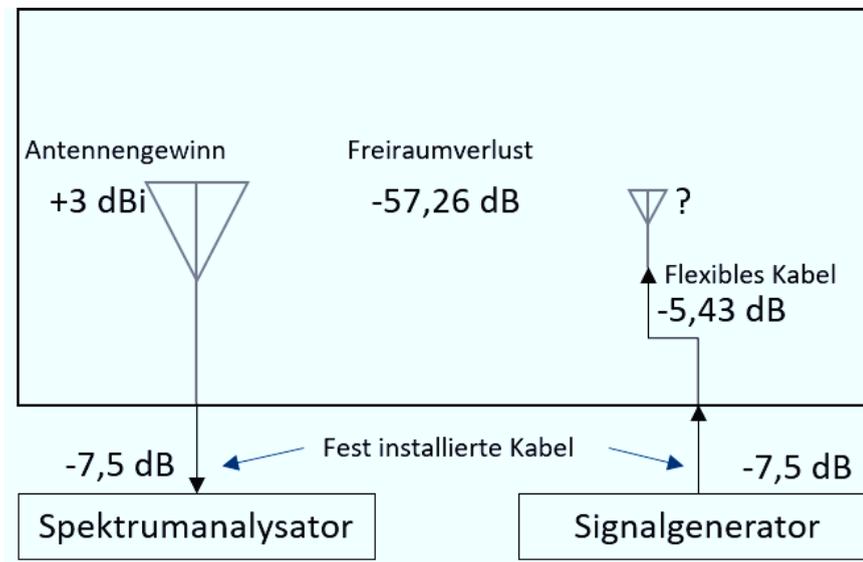


Abbildung 3.14: Skizze der Komponenten der Verluststrecke mit unbekanntem *Device Under Test*

4 Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse, die mit dem Messaufbau aus Kapitel 3 erzeugt wurden, diskutiert. Dafür werden die ersten Messungen analysiert und auf Fehler im Aufbau überprüft. Aufbauend darauf werden Optimierungen erörtert und durchgeführt. Mit Hilfe der Verifikation einer bekannten Antenne sind diese zu überprüfen. Zur Demonstration des automatisierten Antennenmessplatzes werden beispielhaft Ergebnisse der Vermessung der Monopolantenne präsentiert.

4.1 Erste Messungen

Das Ziel der ersten Messungen ist es Charakteristiken zu erzeugen, die ähnlich zu den aus der bestehenden Literatur sind. Die Angabe der Ergebnisse erfolgt in den relativ gemessenen Leistungspegeln, ohne die Verluststrecke miteinzubeziehen. Dies ist für die Überprüfung der korrekten Darstellung ausreichend. Die Verluste werden erst in der Verifikation und den finalen Ergebnissen mit einkalkuliert.

2D-Charakteristik

2D-Charakteristiken bestimmter Schnittebenen einer Antenne zeigen eine etwaige Richt- oder Rundstrahlcharakteristik auf und sind schnell zu vermessen. Für die erste 2D-Charakteristik werden 200 Messpunkte auf der XY-Schnittebene gewählt. Als Referenz dient das in Unterkapitel 3.4 definierte Koordinatensystem. Die Messung der XY-Schnittebene bedingt eine vertikale Platzierung der Monopolantenne auf der Halterung der *Turn Unit*, eine Drehung des *Compact Tables* um 360° und die Festsetzung der *Turn Unit* auf 0° . Die gemessene Leistung sollte bei der symmetrisch aufgebauten Monopolantenne in jeder Ausrichtung einen ähnlichen Pegel betragen, es wird eine Rundstrahlcharakteristik erwartet. Bei Betrachtung der Abbildung 4.1 fallen jedoch Unterschiede auf.

Die Rundstrahlcharakteristik wird im Bereich von 90° bis 270° ersichtlich. In der anderen Hälfte fällt eine Messabweichung auf. Bei 0° bzw. 360° ist eine Keule zu erkennen, daneben befinden sich Einbrüche der Signalstärke. In diesem Messbereich steht der *Compact Table* in der Position, bei der die *Turn Unit* genau zwischen den beiden Antennen steht. Zusätzlich sind Schwankungen um mehrere dB im gesamten Messbild zu erkennen.

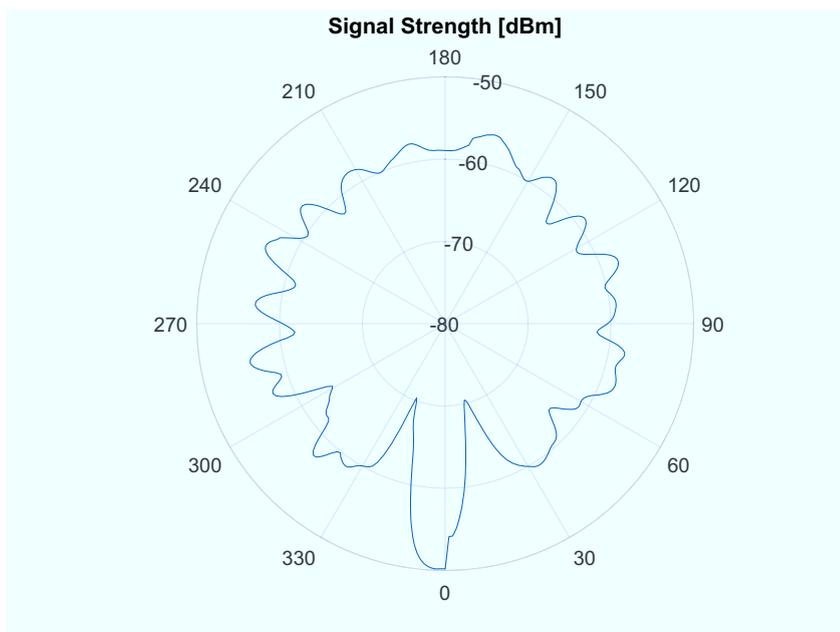


Abbildung 4.1: Drehung in XY-Schnittebene

3D-Charakteristik

Die 3D-Charakteristik ist die eigentliche Motivation dieser Bachelorarbeit. Sie wird erstellt, damit Simulation und reales Verhalten vergleichbar sind. In Abbildung 4.2 ist eine der ersten Vermessungen der Monopolantenne ohne Dielektrikum dargestellt. Die Charakteristik zeigt in der Umgebung der negativen Seite der x -Achse eine gleichmäßig gute Ausstrahlung. Der verschlechterte Empfang in beide Richtungen der y -Achse ist auf die Eigenschaften des Monopols zurückzuführen und somit erwartet. Die Empfangseinbrüche entlang der z -Achse sowie der ausgeprägte Kamm mit starkem Empfang auf der positiven Seite der x -Achse sind nicht plausibel. Der Kamm entspricht der Messabweichung der 2D-Charakteristik bei 0° . Das heißt die Abweichung ist reproduzierbar.

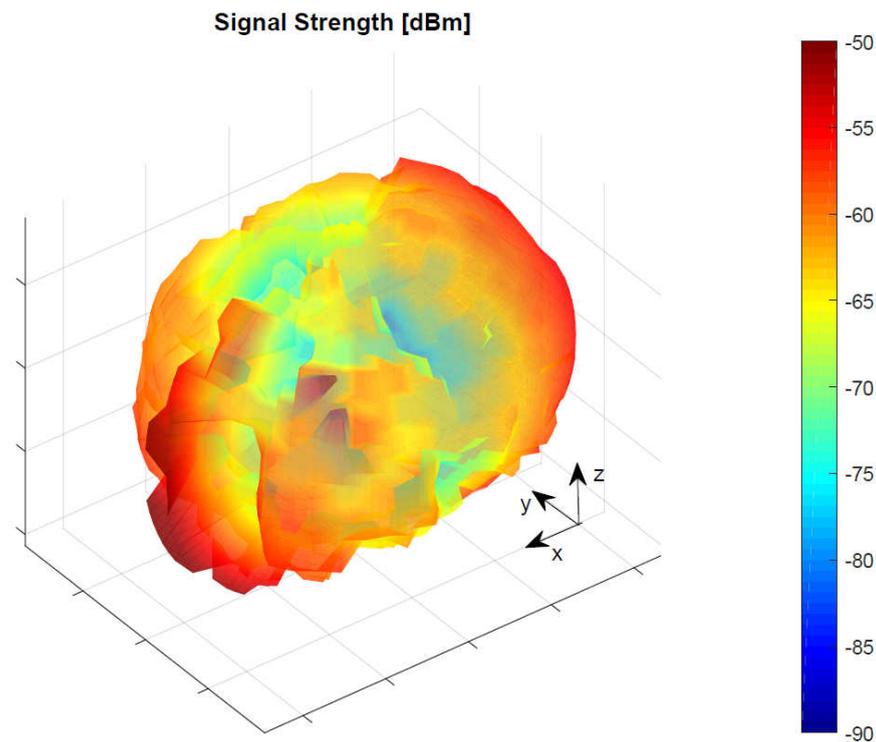


Abbildung 4.2: Erste Vermessung der Monopolantenne

4.2 Optimierung

Nach der Analyse der ersten Messungen wird deutlich in welchen Bereichen noch Optimierungsbedarf besteht. Neben der Wahl des flexiblen Messkabels und dessen Kabelführung ist die Polarisierung der Messantenne entscheidend. Fehler in der Messvorrichtung, die aufgrund der Antennenausrichtung auftreten, sollen ausgeschlossen werden. Es ist zu untersuchen, ob die immer an derselben Stelle auftretende Messabweichung durch die oben genannten Optimierungen eliminierbar ist.

2-Achsen Positionierer

2D-Charakteristik

Es existieren zwei unterschiedliche Varianten mit denen der 2-Achsen Positionierer eine 2D-Charakteristik erstellen kann. Entweder wird der ϕ - oder der θ -Winkel vermessen. Zur Vermessung des ϕ -Winkels rotiert die *Turn Unit* 360° und der *Compact Table* steht still. Für

die Vermessung des θ -Winkels steht die *Turn Unit* und der *Compact Table* dreht sich. Für einen Vergleich wird die XY-Charakteristik der Monopolantenne mit beiden Messvarianten erstellt. Die Messunsicherheiten und die reproduzierbare Messabweichung bei 0° treten bei einer Drehung der *Turn Unit* und der Festsetzung des *Compact Tables* nicht auf. Eine Warteroutine in dem Messskript verhindert eine Messung während der Rotation der Systeme. Somit kann eine Veränderung durch zu schnelle Wertaufnahme ausgeschlossen werden.

Da nicht jede Kabelführung für die Aufnahme der Charakteristiken geeignet ist, kann die optimierte Messvariante nicht immer angewendet werden.

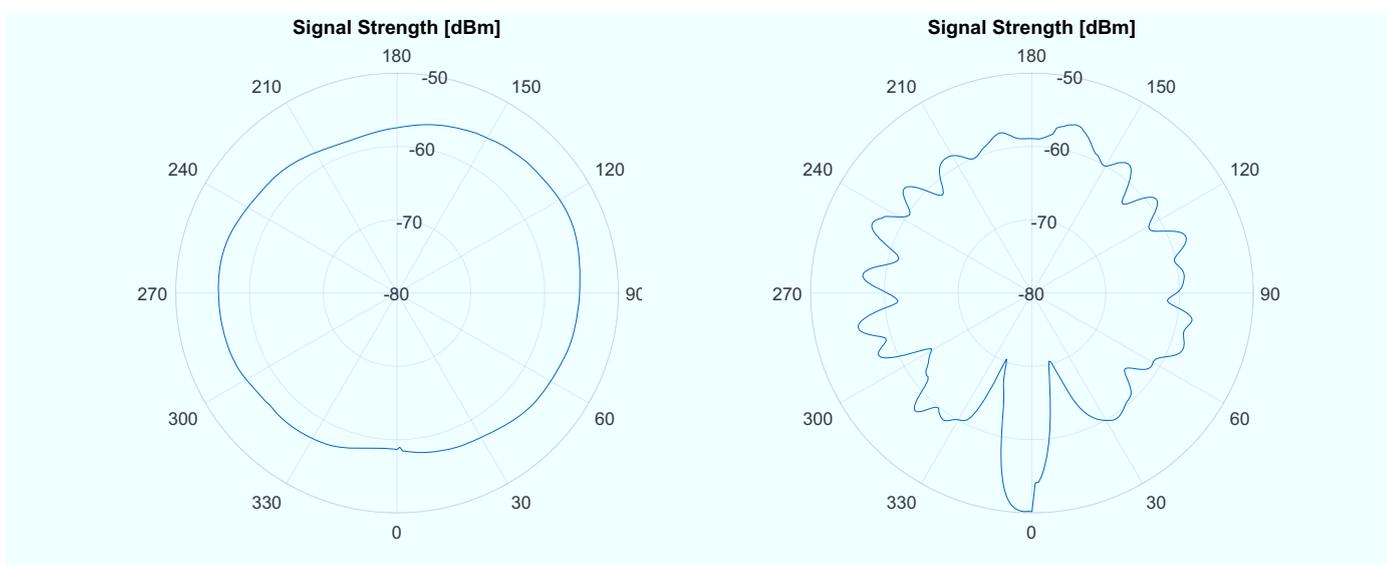


Abbildung 4.3: Vergleich der unterschiedlichen Messvarianten in der XY-Schnittebene
links: *Turn Unit* rotiert
rechts: *Compact Table* rotiert

3D-Charakteristik

Auch bei Probemessungen der 3D-Charakteristik fällt auf, dass die gravierende Messabweichung nur auftritt, wenn der *Compact Table* so gedreht ist, dass die *Turn Unit* sich zwischen der Vorrichtung für das *DUT* und der logarithmisch periodischen Empfangsantenne befindet (Abb. 4.4). Laut den Datenblättern des Herstellers kann der Positionierer nicht der Auslöser der Messabweichung sein. Die Möglichkeit einer gewissen Veränderung der Messwerte besteht aufgrund des spezifischen ϵ_r der Materialien in der *Turn Unit*. Dieses ist wie im Unterkapitel Aufbau beschrieben nahe dem ϵ_r von Luft und sollte keine Messabweichungen über 10-20 dB

auslösen. Deshalb wird eine Beeinflussung durch das Messkabel und dessen Kabelführung vermutet.

Zur Vermeidung der Abweichung kann die Antenne mit einer um 180° gedrehten Ausrichtungen zusätzlich vermessen werden. Nun entspricht die Seite der Charakteristik ohne Messabweichung, der fehlerhaften Seite der Messung mit Standardausrichtung. Dies wird jedoch für die späteren Messungen nicht eingesetzt, da es die Messabweichung nur vermeidet und nicht eliminiert.

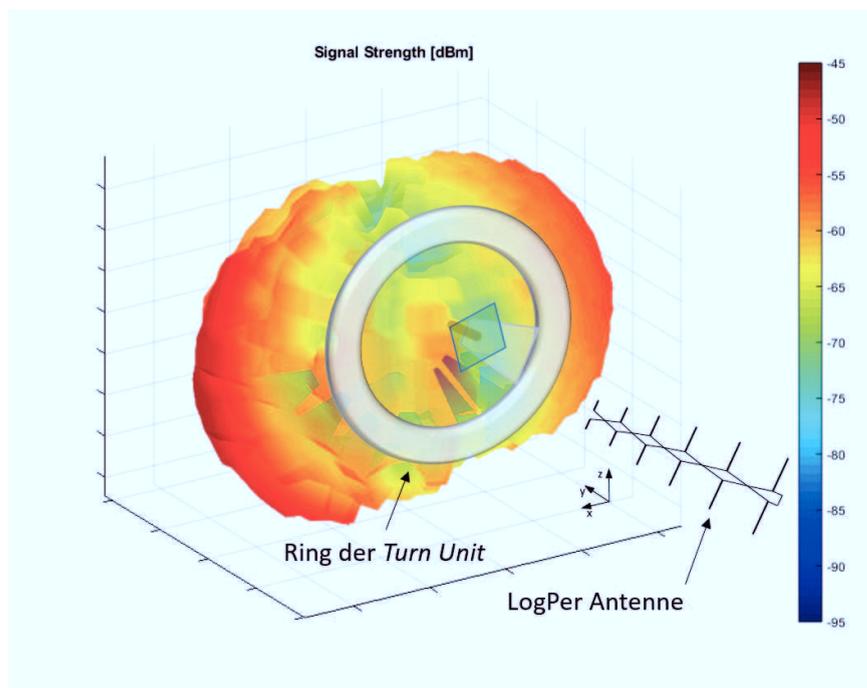


Abbildung 4.4: Skizze der Ausrichtung der IPS-Antenne, wenn die *Turn Unit* zwischen beiden Antennen steht

Koaxialkabel für Hochfrequenzanwendung

Aufgrund ihrer spezifischen Eigenschaften (siehe Unterkapitel 2.3) werden in der Hochfrequenzmesstechnik oft Koaxialkabel eingesetzt. Die Wahl des Kabels und dessen Kabelführung sind für einen reproduzierbaren Messaufbau relevant.

HF-Kabel

Als flexibles Messkabel wird ein Koaxialkabel mit $50\ \Omega$ Wellenwiderstand benötigt. Dies ist ein gängiger Standard in der Hochfrequenzmesstechnik. Die fest installierten Koaxialkabel der Absorberkammer-Anschlüsse haben einen Durchmesser von ca. 2 cm und besitzen eine geringe Signaldämpfung. Die Dicke impliziert ein sehr starres und unflexibles Verhalten seitens des Kabels. Es wird allerdings ein Kabel benötigt, das flexibel ist und eine Torsionsbewegung nicht direkt an das *DUT* weitergibt und somit dessen Ausrichtung auf der *Turn Unit* nicht beeinflusst. Solche Koaxialkabel bieten aber nicht die geringe Signaldämpfung der unflexiblen Kabel. Das Signal-Rausch-Verhältnis am Messempfänger darf ebenfalls nicht zu gering werden, weshalb ein Kompromiss zwischen den Anforderungen gefunden werden muss.

Für die ersten Messungen wurden ein selbst konfektioniertes Kabel verwendet. Zu Beginn betrug die Dämpfung mit 7 dB einen für den Messaufbau akzeptablen Leistungsverlust. Allerdings ist das Kabel nicht phasenstabil und reagierte nach längerer Benutzung mit veränderter Dämpfung auf Bewegung. Das lässt keine reproduzierbaren Ergebnisse zu und das Kabel ist somit ungeeignet. Das neue Messkabel ist von der Firma Crystek Corporation. Wie in Abbildung 4.5 zu erkennen ist, nehmen die Verluste linear zu. Sie verändern sich bei der Bewegung des Kabels ebenfalls kaum. Die Dämpfung bei 5,8 GHz beträgt 5,43 dB und ist somit akzeptabel. In einem Smith Diagramm des Netzwerkanalysators lässt sich die vorhandene Phasenstabilität positiv überprüfen. Zur Vermeidung der Weitergabe der Torsion auf dem Kabel wird ein frei rotierender SMA auf SMA Koaxialkabeladapter (Eng. *rotary joint*) zwischen die Kabel installiert. Der Adapter stammt aus der RADAR Technik und ist für Drehbewegungen optimiert.

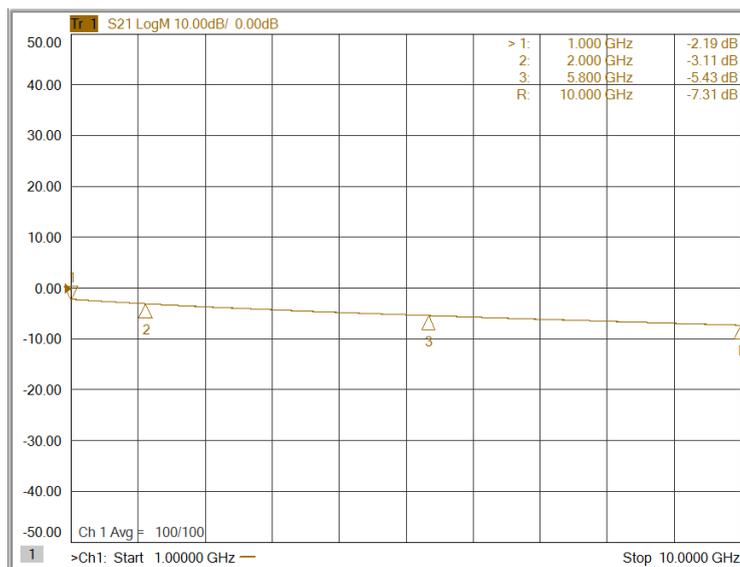


Abbildung 4.5: S21 Parameter des neuen flexiblen Messkabels

Zur Untersuchung des Verhaltens des Kabels ohne ein *DUT* wird das Kabel mit einem $50\ \Omega$ Impedanz Anpassungsabschluss versehen und eine 3D-Charakteristik erstellt. In dieser zeigt sich erneut die bekannte Messabweichung (Abb. siehe Anhang A.7).

Kabelführung

Ohne das flexible Messkabel kann kein Signal gespeist werden und der Messaufbau wäre nicht umsetzbar. Allerdings beeinflusst das Kabel immer die Messung, weshalb nur eine gleichbleibende Kabelführung einen reproduzierbaren Messverlauf möglich macht. Für die 2D- und 3D-Charakteristik werden jeweils zwei unterschiedliche Kabelführungen verwendet. Optimal wäre es, das Kabel senkrecht von dem *DUT* wegzuführen. Dies ist allerdings nur bei der 2D-Charakteristik umsetzbar für den Fall, dass allein der *Compact Table* rotiert und sich somit das Kabel nicht in der vertikalen Ausrichtung verändert. Aufgrund der Rotation beider Achsen des Positionierers bei der 3D-Charakteristik, gibt es immer Positionen an denen das *DUT* nach unten und somit der Kabelanschluss nach oben zeigt. Bei einem frei hängenden Kabel - wie bei der 2D-Charakteristik - würde dieses durch die Nähe zur Antenne eine Beeinflussung der Messergebnisse verursachen, da die Bewegung des Kabels zufällig ist.

Für die 3D-Charakteristik wird ein Loch durch die Halterung der *Turn Unit* gebohrt. Diese gewährleistet über einen kurzen Abschnitt die senkrecht zum *DUT* stehende Kabelführung. Danach wird es fixiert durch die *Turn Unit* auf die andere Seite geführt, am Rand des *Compact Tables* erneut fixiert und zuletzt mit dem Kabelanschluss der Absorberkammer verbunden.

Streifenleitung auf der Testplatine

Die Hypothese, dass die Streifenleitung auf der Testplatine die Messung der Antennencharakteristik beeinflusst, soll widerlegt werden. Da die Länge der Streifenleitung in etwa der Länge des Monopols entspricht, könnte diese bei einem Signal von 5,8 GHz selbst zu einer Antenne mit Abstrahlcharakteristik werden. Ebenso könnte die aufgrund des SMA-Anschlusses unsymmetrische Testplatine das Abstrahlverhalten beeinflussen. Zur Überprüfung werden drei Hilfsmessungen mit unterschiedlichen Ausrichtungen der Testplatine durchgeführt. Diese sehen eine Drehung der Platine auf der Haltevorrichtung der *Turn Unit* jeweils um 90° , 180° und 270° vor. Die unterschiedlichen 3D-Charakteristiken zeigen alle die Messabweichung an der gleichen Stelle in ihrer Analyse, womit eine Beeinflussung der Messung von der Streifenleitung oder die Testplatine auszuschließen ist. Eine von der Testplatine oder der Streifenleitung abhängige Messabweichung würde in der 3D-Charakteristik mit rotieren und bei jedem 90° Schritt an einer anderen Stelle auftreten.

Polarisation

Die linear polarisierten Antennen schwanken bei einer 360° Messung automatisch zwischen der vertikalen und der horizontalen Polarisation. Die wurde bei den ersten Messungen jedoch nicht berücksichtigt. Folglich wird in den ersten Messungen nur ein Teil der Signale aufgenommen. Die Empfangseinbrüche entlang der z -Achse in Abbildung 4.2 sind darauf zurückzuführen. Das *DUT* sendet bei der Drehung dauerhaft in unterschiedlichen Polarisationsrichtungen ein Signal aus. Die ebenfalls linear polarisierte LogPer Empfangsantenne von Rohde und Schwarz kann aber nur die Signale einer Polarisationsrichtung aufnehmen. Folglich wird das Signal der anderen Polarisationsrichtung nur minimal gemessen. Eine Lösung dieser Schwierigkeit ist es zwei Messungen durchzuführen. Bei der ersten Messung wird die Empfangsantenne horizontal ausgerichtet (Abb. 4.6 links). Eine Drehung der Empfangsantenne um 90° sorgt für eine vertikale Ausrichtung (Abb. 4.6 rechts). Der restliche Aufbau darf nicht verändert werden. Die Verdopplung des Messaufwands kann durch die Verwendung einer kreuzpolaren

Antenne, diese kombiniert eine Antenne mit vertikaler und horizontaler Polarisation, oder einer zirkular polarisierten Antenne verhindert werden.

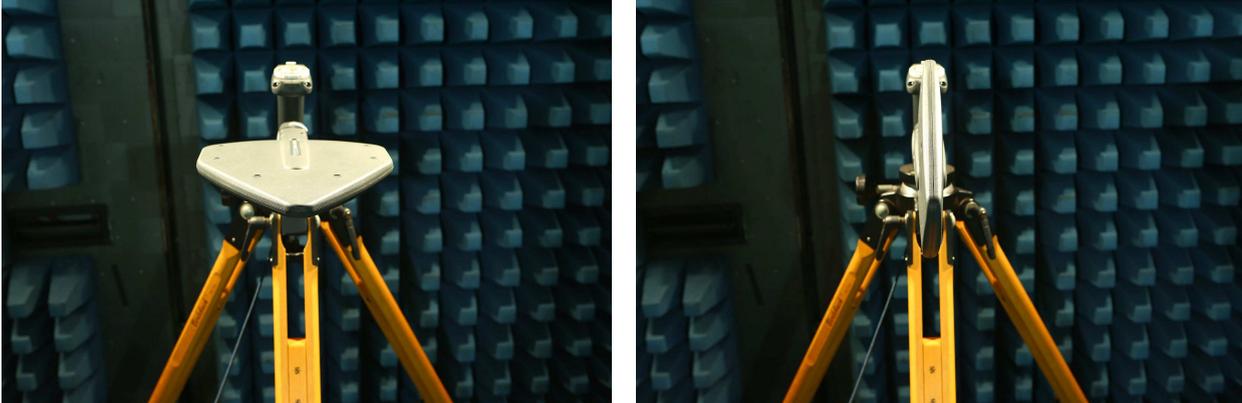


Abbildung 4.6: Aktive logarithmisch periodische Dipolantenne
links: Horizontal polarisiert
rechts: Vertikal polarisiert

Reziproker Messaufbau

Der letzte Optimierungsversuch beinhaltet die Überprüfung des reziproken Verhaltens des Messaufbaus. Es soll ausgeschlossen werden, dass der hohe Leistungspegel an dem nicht gänzlich angepassten *Devices Under Test* Verfälschungen der Messergebnisse auslöst. Als Verursacher wird die zu hohe Leistung und die damit verbundene Abstrahlung des Koaxialkabels und Reflexionen in der Nähe des 2-Achsen Positionierers vermutet. Für den Test wird die aktive LogPer von Rohde und Schwarz durch die *ESLP 9145 - Mikrowellen Log.-Per. Antenne* der Firma Schwarzbeck ausgetauscht. Diese Antenne hat ein passives Verhalten und kann sowohl als Empfangs- und wie für den neuen Messaufbau auch als Sendeantenne eingesetzt werden. Der Signalgenerator speist nun die alternative Antenne bei 5,8 GHz. Das *DUT* wird zur Aufnahme der Messwerte mit dem Spektrumanalysator verbunden und zum Test eine 2D-Charakteristik der Monopolantenne ohne Dielektrikum in XY-Richtung vermessen. Bei Betrachtung der Charakteristiken mit vorgesehenem und vertauschtem Messaufbau zeigen sich in der Darstellung keine Unterschiede. Die stark ausgeprägte Messabweichung bei 0° ist in beiden Ergebnissen sichtbar, ebenso die Schwankungen der Messung um mehrere dB. Der durchgängig erhöhte Leistungspegel ist dem größeren Antennengewinn der *ESLP 9145* geschuldet. Dieser beträgt laut Spezifikation bei 6 GHz ca. 7 dBi. Dies sind 4 dB höher als der Antennengewinn der *HE 300*.

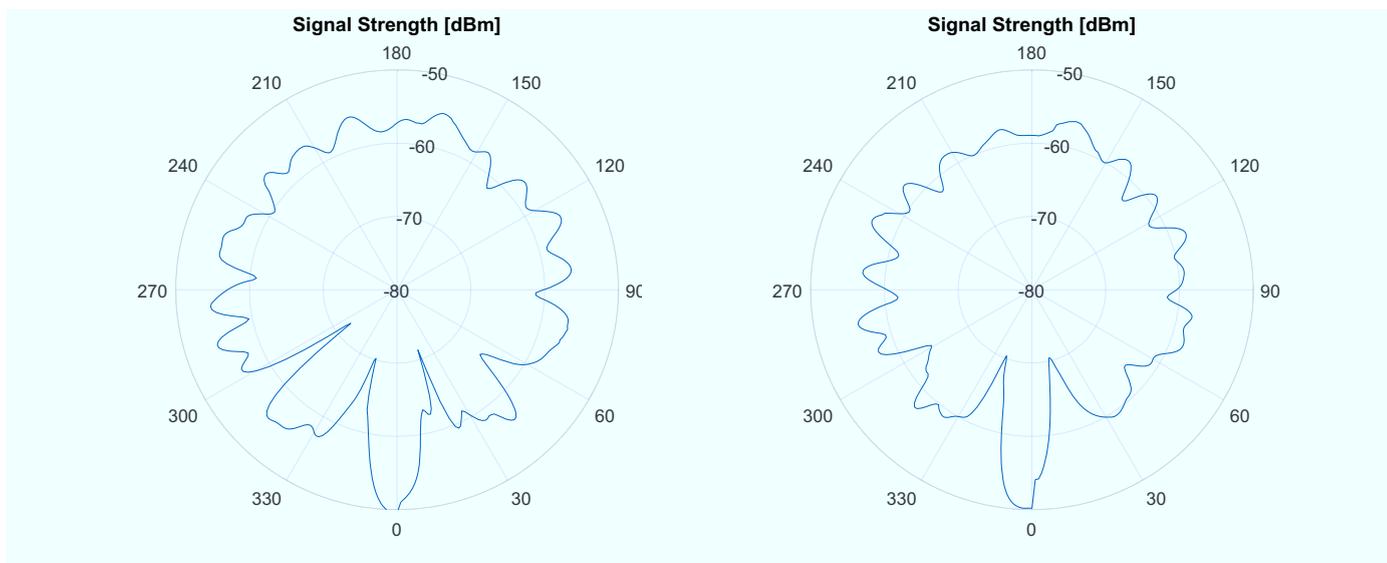


Abbildung 4.7: 2D-Charakteristik der XY-Schnittfläche
 links: Getauschter Messaufbau
 rechts: Vorgesehener Messaufbau

4.3 Verifikation mit bekanntem Objekt

Zur Verifikation des Messaufbaus wird eine bekannte Antenne neu vermessen und die Ergebnisse mit denen aus dem zugehörigen Datenblatt verglichen. Dafür wird die im Unterkapitel Device Under Test unter 3.1 vorgestellte Antenova Sharpi Wi-Fi Antenne (SRC5G027) verwendet. Das Datenblatt enthält drei 2D-Charakteristiken sowie eine komplette 3D-Charakteristik. Eine 2D-Charakteristik ist in Abbildung 4.8 dargestellt und wird genau wie die 3D-Charakteristik mit der Vermessung durch den Messaufbau verglichen. Die anderen Vergleiche der 2D-Charakteristiken sind im Anhang dokumentiert. Als Referenzkoordinatensystem gilt jenes aus der 3D-Charakteristik in Abbildung 3.5 und es ist von der Ausrichtung der Testplatine abhängig. Die Verluste über die Messstrecke werden von den Messergebnissen abgezogen. Die Messergebnisse sind noch immer relativ und nicht absolut.

Für die 3D-Charakteristik der Verifikation werden aufgrund der linearen Polarisierung der Empfangsantenne von Rohde und Schwarz pro *Device Under Test* zwei Messungen durchgeführt. Eine Messung in horizontaler und eine in vertikaler Polarisierung (siehe Beschreibung in Kapitel Polarisierung 4.2) enthält jeweils 400 gemessene Raumpunkte. Dies entspricht in Kombination einer kreuzpolaren Antenne. Übereinander gelegt entsteht die eigentliche 3D-Charakteristik. Für die 2D-Charakteristiken müssen für die XY- und XZ-Schnittebenen zwei Messungen mit 360 Raumpunkten durchgeführt werden. Die Chipantenne behält in der

YZ-Schnittebene die horizontale Polarisation bei; es genügt eine einfache Vermessung der Antenne.

Die 2D-Charakteristiken des Datenblattes bestehen aus drei ineinander geplotteten Polarplots unterschiedlicher Frequenz. Die rote Charakteristik ist mit 5,9 GHz die zu vergleichende Frequenz. Da die Startpositionen der Messungen sich von denen des Datenblattes abweichend, unterscheiden sich die Angaben der Gradzahlen an den Polarplots. Bei Aufnahme der YZ-Charakteristik dreht die *Turn Unit* und der *Compact Table* steht still. So tritt keine Messungenauigkeit in den Messwerten auf und die Charakteristik entspricht in der Darstellung der Charakteristik des Datenblattes. Die anderen beiden 2D-Charakteristiken sind im Anhang zu finden (siehe A.8). Sie ähneln denen des Datenblattes, weisen jedoch die bekannte Messabweichung und Unsicherheiten auf.

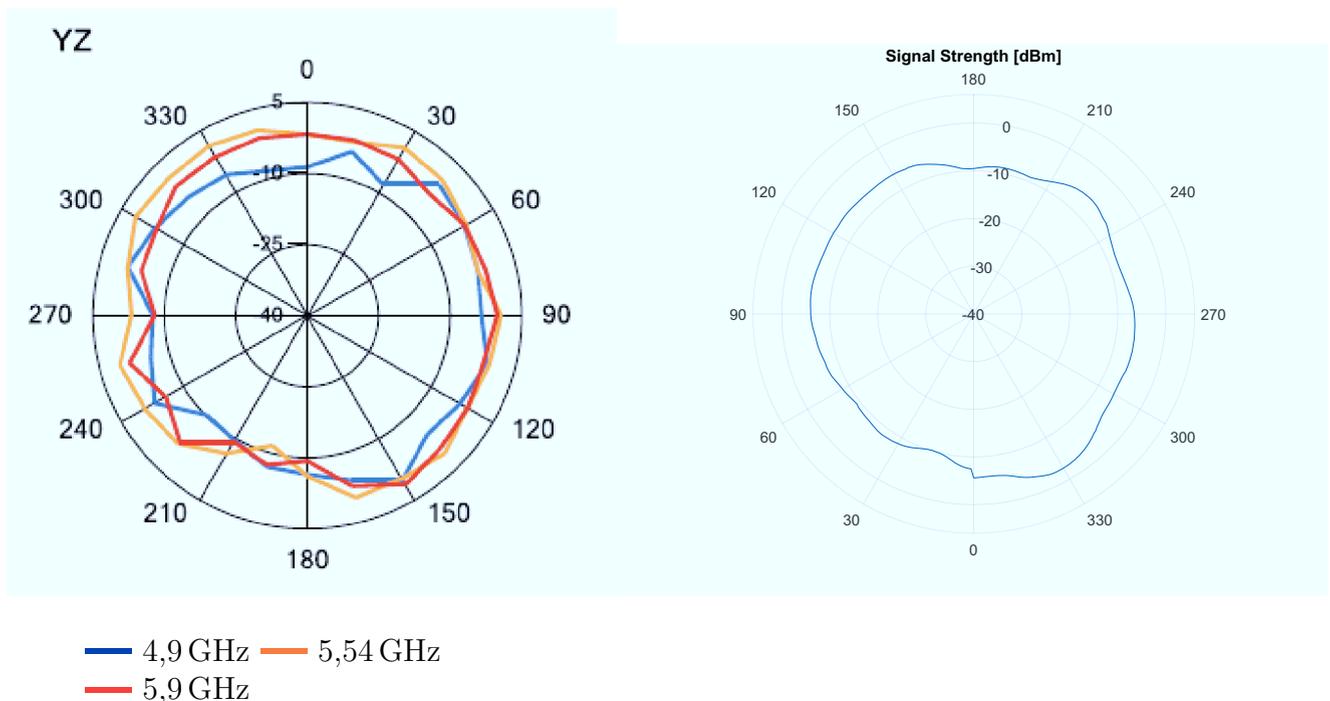


Abbildung 4.8: Vergleich der vorhandenen und vermessenen 2D-Antennencharakteristik der YZ-Schnittfläche der Sharpi Chipantenne [13]; Koordinatensystem aus Abbildung 3.5
links: Charakteristik aus Datenblatt
rechts: Charakteristik vermessen

Bei Gegenüberstellung der 3D-Charakteristik der Messung (Abb. 4.9 rechts) mit der bestehenden Charakteristik (Abb. 4.9 links) zeigen sich Übereinstimmungen. Die vordere Ausbuchtung der Messergebnisse ist auf den SMA-Anschluss zurückzuführen und findet sich auch im Datenblatt wieder. Dazu zählen ebenfalls die Einkerbungen ober- und unterhalb der

Ausbuchtung. Die restliche Charakteristik erscheint gleichmäßiger, als die eigentliche verifizierte Charakteristik. Dies kann zum einen auf Unterschiede in der Darstellung zurückgeführt werden. Leichte Abweichungen treten zum anderen auch aufgrund der unterschiedlichen Messfrequenzen auf. Der Messaufbau ist auf 5,8 GHz ausgelegt, weshalb die Verifikation auch bei dieser Frequenz durchgeführt wird. Eine Umstellung hätte eine komplette Neuberechnung der Verluststrecke nach sich gezogen. Die 3D-Charakteristik von Antenova selbst ist bei 5,46 GHz vermessen worden, eine Charakteristik für 5,8 GHz liegt nicht vor. Die Frequenz 5,8 GHz befindet sich jedoch in der von Antenova angegebenen Frequenzspanne von 4900 MHz - 5900 MHz die den Arbeitsbereich der Chipantenne definiert. Die Chipantenne weist über diese Bandbreite keine gleichmäßige Anpassung auf und Reflexionen auf der Leitung verursachen so minimale Messabweichungen. Lediglich der ausgeprägte Kamm im unteren Teil der Kugel stimmt nicht mit dem Datenblatt überein.

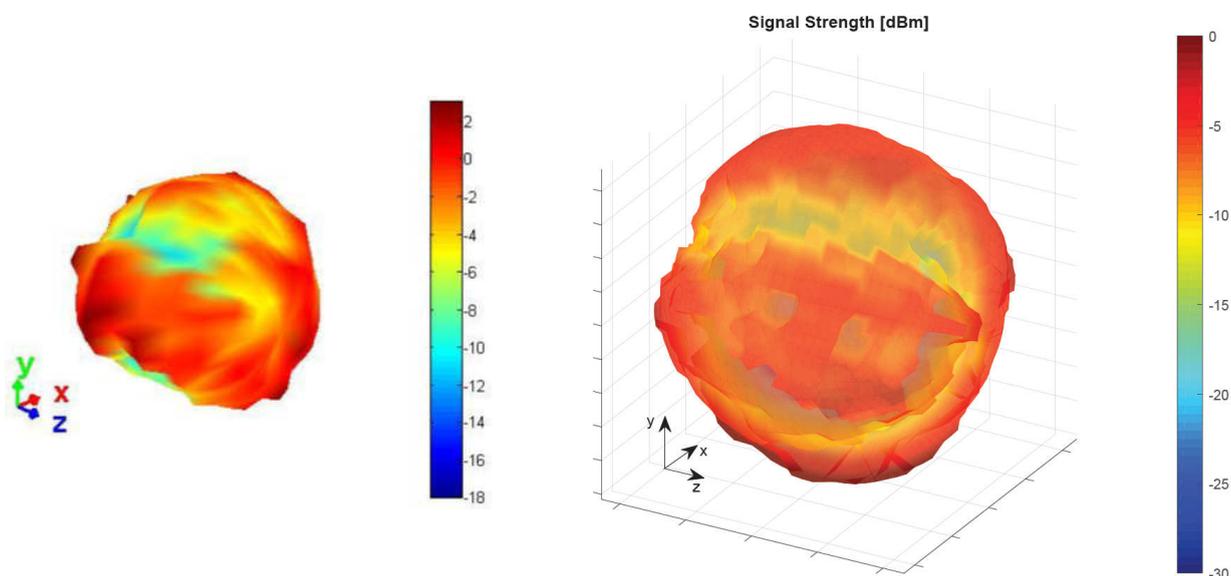


Abbildung 4.9: Vergleich der vorhandenen und vermessenen 3D-Charakteristik der Sharpi Chipantenne [13]
 links: Charakteristik aus Datenblatt bei 5,46 GHz
 rechts: Charakteristik vermessen bei 5,8 GHz

Die Messungen lassen den Schluss zu, dass die Optimierungen keine Einflüsse auf die reproduzierbaren Messabweichungen haben.

4.4 Messergebnisse

Die finalen Messergebnisse werden wie die Verifikation ohne die Verluste und Gewinne der Signalverlaufsstrecke dargestellt. Diese werden vor den Messwerten subtrahiert. Die Charakteristiken sind wie bei den vorherigen Ergebnissen relativ.

2D-Charakteristik

In der 2D-Charakteristik sind 360 Messpunkte auf einer Schnittebene verteilt. Das entspricht bei einer Kreisdrehung von 0° bis 360° einem Messpunkt pro Gradzahl. Beispielhaft wird nun die 2D-Charakteristik der YZ-Schnittebene durch die Variante der Rotation der *Turn Unit* aufgezeigt. Die Ausrichtung der Monopolantenne entspricht bei dem Aufbau der vertikalen Polarisation. Dementsprechend wird die logarithmisch periodische Empfangsantenne auch vertikal ausgerichtet.

Die Empfangseinbrüche bei 0° und 180° sind der Monopolcharakteristik verschuldet. Die gemessene Charakteristik stimmt mit der Simulierten überein.

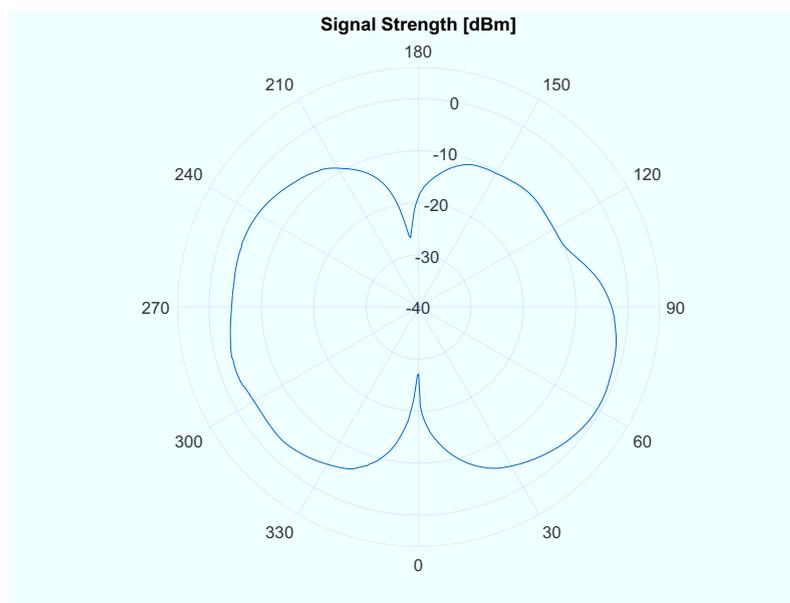


Abbildung 4.10: 2D-Charakteristik der YZ-Schnittebene der Monopolantenne ohne Dielektrikum

3D-Charakteristik

Für die finalen 3D-Messergebnisse werden aufgrund der linearen Polarisierungen erneut zwei Messungen pro *Device Under Test* durchgeführt. Wird die Simulation des Monopols ohne Dielektrikum aus Unterkapitel 3.1 passend zur gemessenen 3D-Charakteristik ausgerichtet, sind Übereinstimmungen deutlich zu erkennen. Die beiden sichtbaren Empfangseinbrüche in Richtung der y -Achse sind auf die Systematik des Monopols zurückzuführen. Zeigt dieser direkt auf die Empfängerantenne oder von ihr weg, kann die Empfangsantenne kein Signal empfangen, da in dieser Richtung kaum Übertragung stattfindet. Auch in dieser Charakteristik zeigt sich die reproduzierbare Messabweichung bei der eine Verstärkung eintritt.

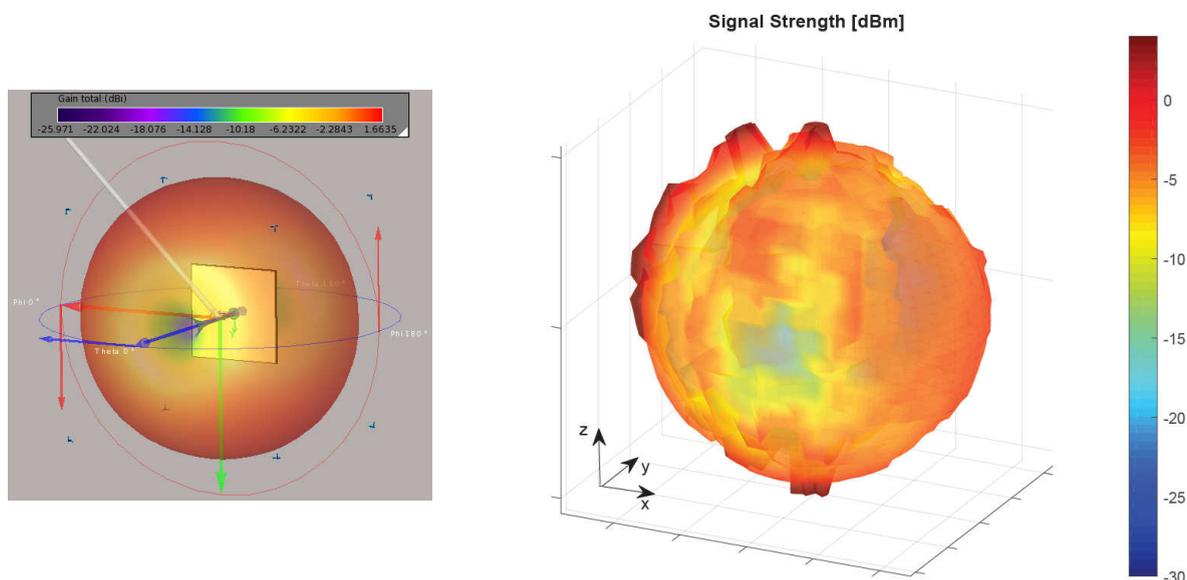


Abbildung 4.11: Vergleich der simulierten und vermessenen 3D-Antennencharakteristik des Monopols ohne Dielektrikum
 links: Charakteristik simuliert
 rechts: Charakteristik vermessenen

Messungen mit gekürzter Monopolantenne, Keramikummantelung und zusätzlicher Abdeckung durch einen Deckel zeigen im Aussehen die gleichen Charakteristiken wie die des aufgezeigten Monopols ohne Dielektrikum (siehe Abb. 4.12). Lediglich der Leistungspegel ist etwas geringer. Dies lässt sich mit dem Verlustfaktor $\tan \delta$ der Oxidkeramik und des Deckels begründen und zusätzlich liegt eine schlechtere Anpassung der Monopolantenne auf der Testplatine für 5,8 GHz vor. Das Dielektrikum verändert somit die generelle Abstrahlcharakteristik der Monopolantenne nicht.

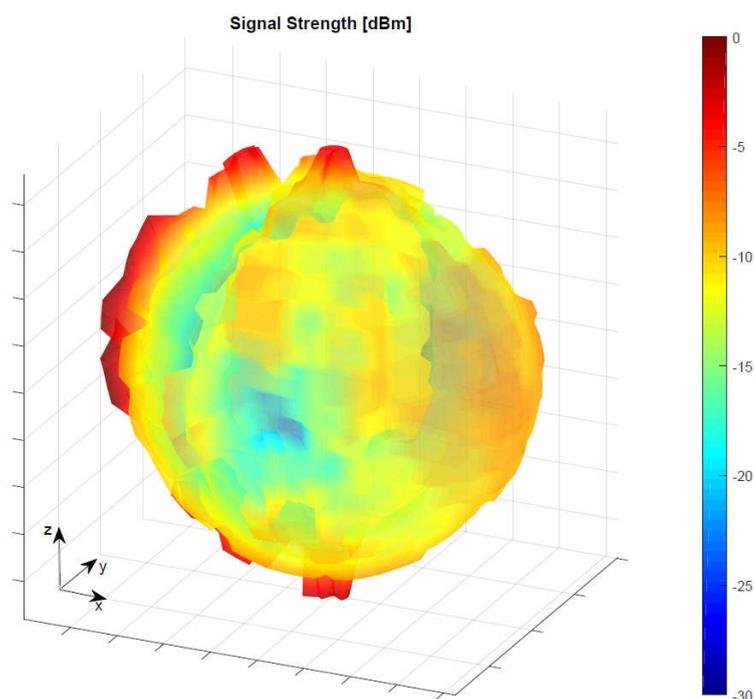


Abbildung 4.12: 3D-Charakteristik der Monopolantenne mit Dielektrikum

In den gesamten Auswertungen der Verifikation und den finalen Ergebnissen fallen leicht verminderte Ergebnisse der Leistungspegel auf. Dies begründet sich durch Reflexionen, ausgelöst durch minimale Fehlanpassungen und Impedanzsprünge über die Messstrecke. Bei Summierung können diese die Messunsicherheiten auslösen. Bei der 3D-Charakteristik und einer Variante der Aufnahme der 2D-Charakteristik lässt sich die Drehung des *Compact Tables* nicht vermeiden. Es entstehen zusätzliche Messunsicherheiten die Verluste des Leistungspegels nach sich ziehen.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung

Für ein *Indoor Positioning System for Motion Analysis* (IPS-MA) wurde ein automatisierter Antennenmessplatz für kleine und mobile Antennen bei 5,8 GHz implementiert. Dabei stand besonders die Inbetriebnahme, Optimierung und Verifikation im Vordergrund. Die Inbetriebnahme stellt eine iterative Entwicklung aus ersten Messungen, Anpassung der Automatisierung und Überarbeitung der Visualisierung zur korrekten Darstellung der Messergebnisse dar. Es zeigt sich, dass die Inbetriebnahme von der Automatisierung des Positionierers und der Messgeräte abhängig ist. Hervorzuheben sind die Optimierungsergebnisse der Erarbeitung unterschiedlicher 2D-Messvarianten sowie die Verbesserung der Kabelführung des speziellen Messkabels. Diese Modifikationen des Messaufbaus garantieren eine Reproduzierbarkeit des Messplatzes. Die doppelte Vermessung aufgrund der verschiedenen Polarisationsrichtungen der linearen Antennen stellt eine korrekte Darstellung der 2D- und 3D-Charakteristiken sicher. Der Aufbau und die Optimierungen wurden mit einer Verifikation einer schon bekannten Chipantenne bestätigt. Lediglich an einer bestimmten Stelle tritt in den 2D- und 3D-Charakteristiken kontinuierlich eine Messabweichung auf, deren Auslöser selbst durch die verschiedenen Messdurchläufe der Optimierungsverfahren nicht identifiziert werden kann. Allerdings ist die Messabweichung reproduzierbar und kann so durch weitere Maßnahmen genauer geprüft werden.

Als Zusatzergebnis wurden die Charakteristiken zweier unterschiedlicher Monopolantennen präsentiert. Diese sind als eine Demonstration des Messplatzes zu verstehen. Sie zeigen deutlich eine Korrelation der simulierten und gemessenen Abstrahlcharakteristiken auf. Die 2D-Charakteristiken deuten darauf hin, dass in Zukunft der reproduzierbare Messplatz auch ohne reproduzierbare Messabweichung 2D- und 3D-Charakteristiken vermessen kann.

Ausblick

Zur Vermeidung der Schwankungen um mehrere dB Werte und das Auftretens der reproduzierbaren Messabweichung sollten erneute Optimierungsversuche vorgenommen werden. Eine Möglichkeit ist es, den Motor des *Compact Tables* z.B. auf Reflexionen genauer zu untersuchen. Dort könnte ein Unterschied vorliegen, welcher die verschiedenen Ergebnisse aus Unterkapitel 4.2 erklären würde. Die reproduzierbare Messabweichung soll ebenfalls identifiziert und dann optimiert werden. Ein Sweep durch verschiedene Frequenzen kann neue Aufschlüsse über das Verhalten des Messaufbaus geben. Dafür wird eine bekannte, schon verifizierte Antenne benötigt, die klein und mobil genug ist, damit sie auf der Halterung der *Turn Unit* angebracht werden kann. Gleichzeitig sollte die Antenne über eine große Bandbreite verfügen. Zum Ende der Messabläufe zeigen sich hin und wieder Dämpfungen im Pfad die auf Fehler im Messkabel zurückgehen. Der Fahrweg des Positionierers und die Kabelführung strapazieren das flexible Koaxialkabel noch immer. Das heißt, die Kabelführung ist noch nicht komplett perfektioniert. Eine Umprogrammierung des Positionierers könnte ebenfalls weiterhelfen. Wie schon in der Optimierung aufgezeigt bietet sich eine Integration einer kreuzpolaren oder einer zirkularen Breitbandmessantenne in den Messaufbau an. Sie könnte anstelle der linearen logarithmisch periodischen Breitbandantenne agieren.

A Anhang

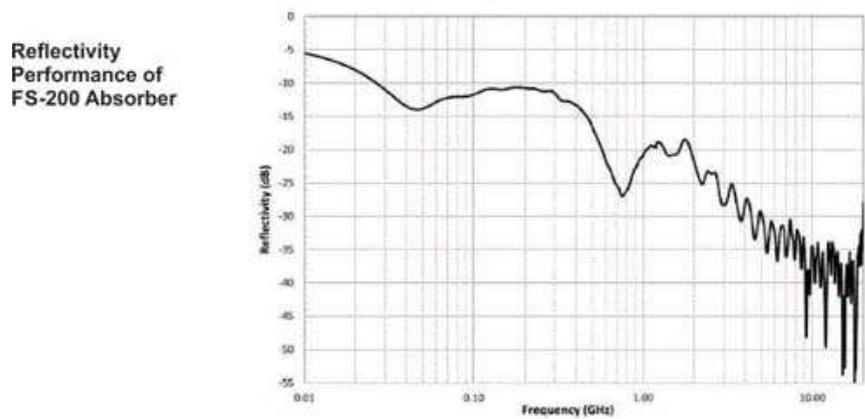


Abbildung A.1: Reflexion der Absorber [21]

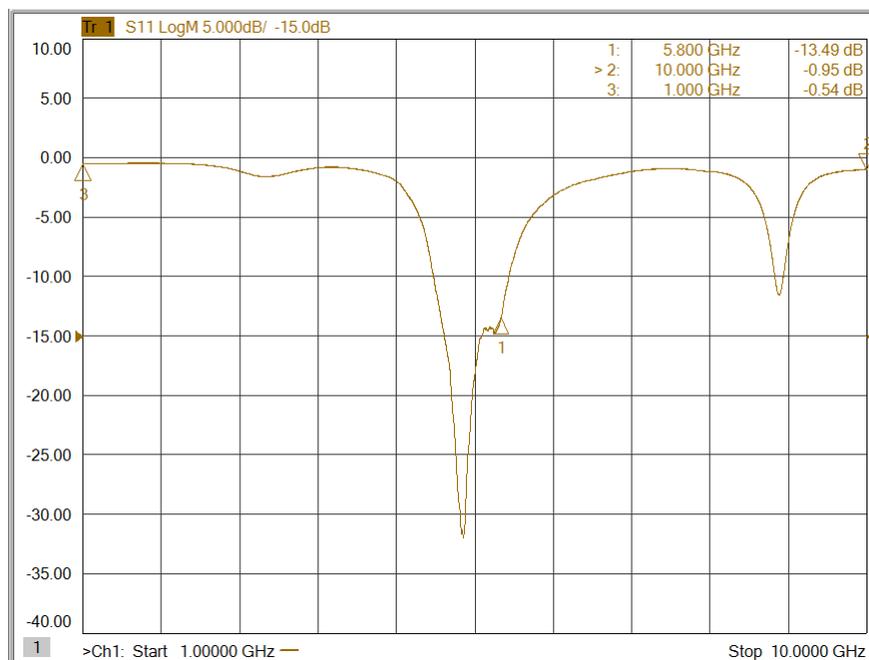


Abbildung A.2: S11 Parameter der Antenna Chipantenne

```

1  %startet eine 360° Messung bei der jeder Sphärenpunkt einzeln angefahren wird
2  %von dem Drehtisch und danach ein Messwert aufgenommen wird. Dieser wird in
3  %einer Matrix gespeichert
4
5  global dev;
6
7  %Baut die Verbindung zum Signal Generator und dem Spektrumanalysator auf
8  %und setzt die Geräte in die gewollte Voreinstellung
9  instruments_running();
10
11 %ruft die eigentliche Messfunktion auf und gibt den Messwert zurück
12 erg = measure(setPointsBall(400),@measurement, false);
13
14 %schaltet die Instrumente aus und trennt die Verbindung
15 instruments_off();
16 dev.spectrumanalyzer.instance = instrument_disconnect(dev.spectrumanalyzer.ip, dev.spectrumanalyzer.name);
17 dev.signal_generator.instance = instrument_disconnect(dev.signal_generator.ip, dev.signal_generator.name);
18
19 %speichert die Matrix
20 save(date, 'erg');

```

Abbildung A.3: Matlab Skript: Run

```

1  function instruments_running()
2
3  global dev;
4
5  %% Setup instruments and connect
6  Setup_5();
7
8  %% Signalgenerator to 5.8GHz and 10dBm and Output ON
9  fprintf(dev.signal_generator.instance, 'FREQ 5800000000');
10 fprintf(dev.signal_generator.instance, 'POW:LEV 30');
11 fprintf(dev.signal_generator.instance, 'OUTP:STAT ON');
12
13 %% Measurement setup Spectrumanalyzer
14
15 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, '*RST'); % Reset
16 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'INST SAN'); % Instrument in Spectrumanalyzer Mode
17 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'CALC:UNIT:POW DBM'); % Unit to dBm
18 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'ROSC:SOUR EXT'); % Set to external reference
19 %fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'SYST:PRES:COMP SAN'); % Reset to
20
21 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'FREQ:CEN 5800000000'); % Center Frequency 5.8GHz
22 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'FREQ:SPAN 2000000'); % Span 2Mhz
23 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'DISP:TRAC:Y:RLEV -30'); % Y Axis Referenz Level -49dBm
24 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'BAND:RES 30000'); % Resolution Bandwidth 3kHz
25 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'CALC:MARK 5800000000'); % Marker 1 to 5.8GHz
26 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'BAND:VID:AUTO ON'); % VBW Auto on
27 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'SWE:TIME:AUTO ON'); % Sweeptime (SWI) Auto ON
28 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'INP:ATT 0');
29 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'SWE:COUN 200'); % Sweep Count
30 fprintf(dev.spectrumanalyzer.instance, 'DISP:TRAC:MODE AVER'); % Trace Mode Average
31
32 end
33

```

Abbildung A.4: Matlab Funktion: Einstellung der Instrumente für die Messdurchführung

```
instrument_connect.m x +
1  function instrument = instrument_connect(ip,InputBufferSize,Timeout,name)
2
3      conStr = ['TCPIP0::' ip '::inst0::INSTR'];
4
5      % Find a VISA-TCPIP object.
6      instrument = instrfind('Type', 'visa-tcpip', 'RsrcName', conStr, 'Tag', '');
7
8      % Create the VISA-TCPIP object if it does not exist
9      % otherwise use the object that was found.
10     if isempty(instrument)
11         instrument = visa('rs', conStr);
12     else
13         fclose(instrument);
14         instrument = instrument(1);
15     end
16
17     set(instrument, 'InputBufferSize', InputBufferSize);
18     set(instrument, 'Timeout', Timeout);
19
20     try
21         fopen(instrument);
22         fprintf([' Instrument ' name ' opened.\n']);
23     catch
24         fprintf([' Instrument ' name ' cannot be opened.\n']);
25     end
26
27
28     end
```

Abbildung A.5: Matlab Funktion: Instrument connect

```
instrument_disconnect.m x +
1  function instrument = instrument_disconnect(ip,name)
2
3      conStr = ['TCPIP0::' ip '::inst0::INSTR'];
4
5      % Find a VISA-TCPIP object.
6      instrument = instrfind('Type', 'visa-tcpip', 'RsrcName', conStr, 'Tag', '');
7
8      % Do nothing if the tcpip object does not exist
9      % otherwise close the object that was found
10     if ~isempty(instrument)
11         fclose(instrument);
12     end
13
14     instrument = 1;
15
16     fprintf([' Instrument ' name ' disconnected.\n']);
17     end
```

Abbildung A.6: Matlab Funktion: Instrument disconnect

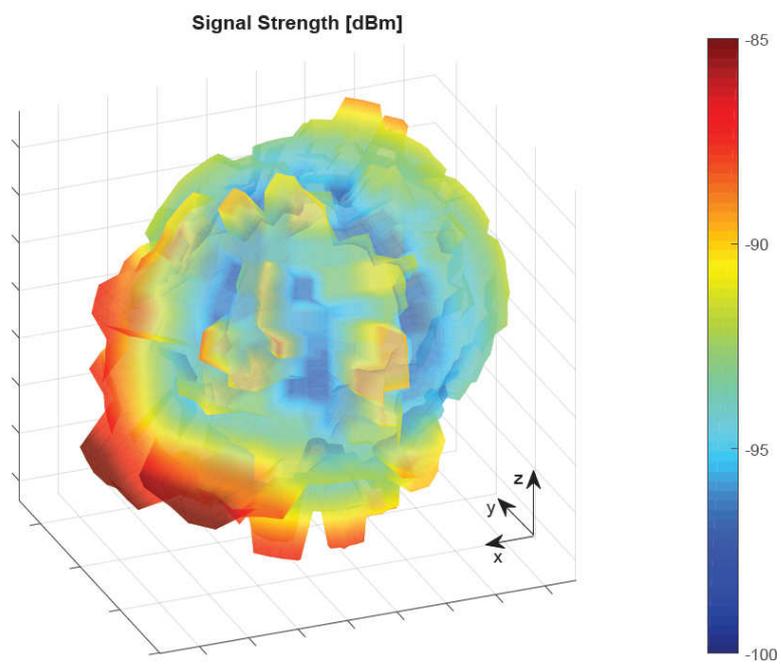
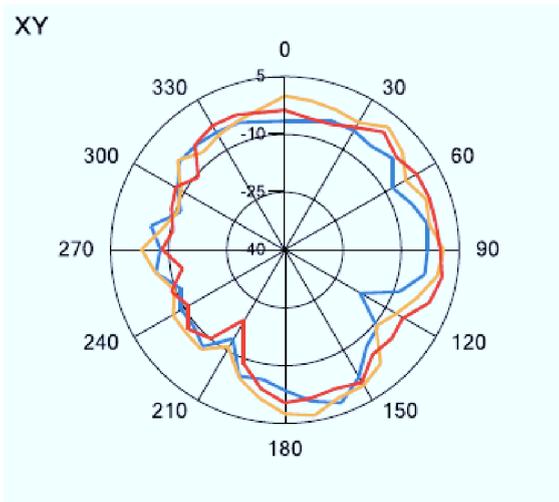
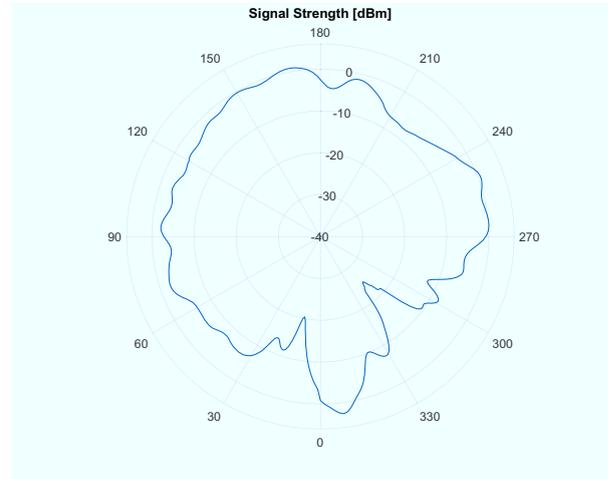


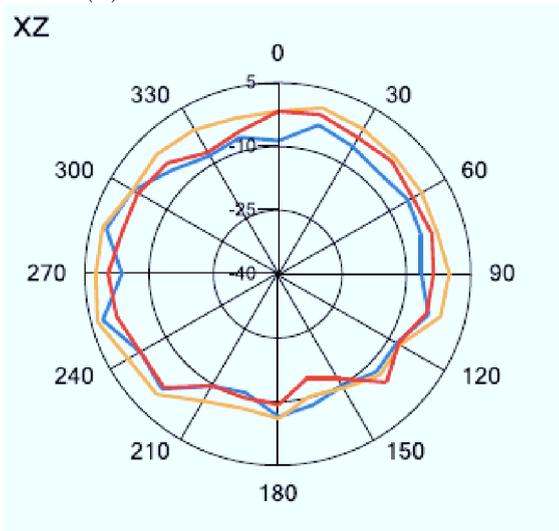
Abbildung A.7: 3D-Charakteristik des Kabel mit $50\ \Omega$ Terminierung



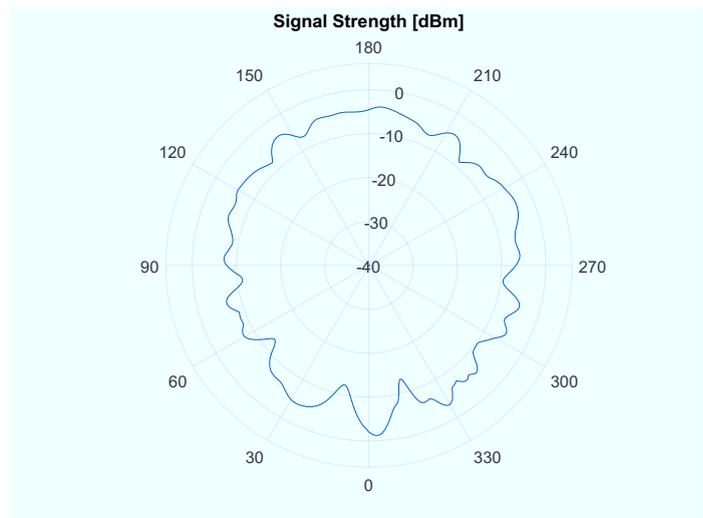
(a) XY-Charakteristik



(a) XY-Charakteristik



(a) XZ-Charakteristik



(b) XZ-Charakteristik

— 4,9 GHz — 5,54 GHz
 — 5,9 GHz

Abbildung A.8: Vergleich der gemessenen und vorhandenen 2D-Antennencharakteristiken der Sharpi Chipantenne [13]; Koordinatensystem aus Abbildung 3.5
 links: Charakteristik vermessen
 rechts: Charakteristik aus Datenblatt

Abbildungsverzeichnis

1.1	Indoor Positioning System <i>Base Station</i> (BS) <i>Mobile Device</i> (MD)	2
1.2	Beispielhafter Aufbau des IPS <i>Mobile Device</i>	3
2.1	Vertikal linear polarisierte elektromagnetische Welle im Vakuum	6
2.2	S-Parameter als Zweitor [7, S.11]	7
2.3	Linear polarisierte elektromagnetische Wellen links: Vertikal rechts: Horizontal	10
2.4	Linksdrehende zirkular polarisierte elektromagnetische Welle [10]	11
2.5	Übergang eines Schwingkreises in eine Dipolantenne	12
2.6	Aufbau einer logarithmisch-periodischen Dipolantenne (LPDA)	13
3.1	Skizze des Messaufbaus mit allen Komponenten	15
3.2	Verschiedene Varianten der Monopolantenne	17
3.3	S11-Parameter der Monopolantenne ohne Dielektrikum	18
3.4	aktive logarithmisch periodische Dipolantenne	19
3.5	3D-Simulation aus dem Datenblatt der Chipantenne bei 5,46 GHz [13]	20
3.6	<i>Base Station</i> mit Patchantenne für Bluetooth bei 2,4 GHz (links) und Patchan- tenne für 5,8 GHz (rechts)	21
3.7	Absorberkammer aus der Weitwinkelperspektive	22
3.8	2-Achsen Positionierer	24
3.9	Turnunit	24
3.10	Spirale für die äquidistante Punkteverteilung	26
3.11	Darstellung einer Kurve um die Kugel	27
3.12	Signal Verluststrecke	29
3.13	Levelplan der Verluststrecke von zwei logarithmisch periodischen Antennen .	31
3.14	Skizze der Komponenten der Verluststrecke mit unbekanntem <i>Device Under Test</i>	32
4.1	Drehung in XY - Schnittebene	34
4.2	Erste Vermessung der Monopolantenne	35
4.3	2-Achsen Positionierer	36

4.4	Skizze der Ausrichtung der IPS-Antenne, wenn die <i>Turn Unit</i> zwischen beiden Antennen steht	37
4.5	S21 Parameter des neuen flexiblen Messkabels	39
4.6	aktive logarithmisch periodische Dipolantenne	41
4.7	2-Achsen Positionierer	42
4.8	2-Achsen Positionierer	43
4.9	2-Achsen Positionierer	44
4.10	2D-Charakteristik der YZ-Schnittebene der Monopolantenne ohne Dielektrikum	45
4.11	2-Achsen Positionierer	46
4.12	3D-Charakteristik der Monopolantenne mit Dielektrikum	47
A.1	Reflexion der Absorber [21]	51
A.2	S11 Parameter der Antenna Chipantenne	51
A.3	Matlab Skript: Run	52
A.4	Matlab Funktion: Einstellung der Instrumente für die Messdurchführung . .	52
A.5	Matlab Funktion: Instrument connect	53
A.6	Matlab Funktion: Instrument disconnect	53
A.7	3D-Charakteristik des Kabel mit 50 Ω Terminierung	54
A.8	Vergleich der gemessenen und vorhandenen 2D-Antennencharakteristiken der Sharpi Chipantenne [13]; Koordinatensystem aus Abbildung 3.5	
	links: Charakteristik vermessen	
	rechts: Charakteristik aus Datenblatt	55

Tabellenverzeichnis

2.1	Reflexionsdämpfung (<i>Return Loss</i>)	8
2.2	Dämpfung durch die unterschiedlichen Polarisationen zwischen Feld und Antenne [9, S. 130]	10
3.1	Kabelverluste	30
3.2	Antennengewinne	30

Literaturverzeichnis

- [1] *Forschungszentrum Jülich - Systeme der Elektronik (ZEA-2)*. Zuletzt geprüft am: 31.10.2018. URL: https://www.fz-juelich.de/zea/zea-2/DE/Home/home_node.html.
- [2] *Forschungszentrum Jülich - Systeme der Elektronik (ZEA-2): Systemintegration, Verifikation und Test*. Zuletzt geprüft am: 31.12.2018. URL: https://www.fz-juelich.de/zea/zea-2/DE/Leistungen/Systemintegration-Verifikation-Test/_node.html.
- [3] Bundesnetzagentur. *Allgemeinzuteilung von Frequenzen in den Frequenzbereichen gemäß Frequenzbereichszuweisungsplanverordnung(FreqBZPV), Teil B: Nutzungsbestimmungen (NB) D138 und D150 für ie Nutzung durch die Allgemeinheit für ISM-Anwendungen*. URL: [Online%20auf%20Bundesnetzagentur.de](https://www.bundesnetzagentur.de).
- [4] Kark, K. W. *Antennen und Strahlungsfelder: Elektromagnetische Wellen auf Leitungen, im Freiraum und ihre Abstrahlung*. 3., erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2010. ISBN: 9783834897558. DOI: 10.1007/978-3-8348-9755-8. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9755-8>.
- [5] Meschede, D. *Gerthsen Physik*. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. ISBN: 3-540-25421-8. DOI: 10.1007/3-540-29973-4.
- [6] Küpfmüller, K. E. u. a. *Theoretische Elektrotechnik: Eine Einführung*. 18. Aufl. Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. ISBN: 978-3-540-78589-7. DOI: 10.1007/978-3-540-78590-3. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-540-78590-3>.
- [7] Heuermann, H. *Hochfrequenztechnik: Komponenten für High-Speed-und Hochfrequenzschaltungen*. 2., durchgesehene und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2009. ISBN: 9783834899750. DOI: 10.1007/978-3-8348-9975-0. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9975-0>.

- [8] Keller, A. *Breitbandkabel und Zugangsnetze: Technische Grundlagen und Standards: Kapitel 4 - Drahtlose Übertragung*. 2. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, 2011. ISBN: 9783642176302. URL: <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=666988>.
- [9] Krischke, A. und Rothammel, K. *Rothammels Antennenbuch: Mit 1607 Abbildungen und 268 Tabellen*. 13., aktualis. u. erw. Aufl. DARC-Buchreihe Antennentechnik. Baunatal: DARC-Verl., 2013. ISBN: 9783886920655. URL: <http://www.vlb.de/GetBlob.aspx?strDisposition=a&strIsbn=9783886920655>.
- [10] Heuermann, H. *Antennen und Ausbreitung: Skript*. 2010.
- [11] Klawitter, G. *Antennen-Ratgeber: Empfangsantennen für alle Wellenbereiche: Außen-, Innen-, Behelfs- und Aktivantennen*. 6., völlig neue und erw. Aufl. Vth-Fachbuch. Meckenheim: Siebel, 2005. ISBN: 388180613X.
- [12] Huang, K. C. und Edwards, D. J. *Millimetre Wave Antennas for Gigabit Wireless Communications: A Practical Guide to Design and Analysis in a System Context*. Wiley, 2008. ISBN: 9780470712139. URL: <https://books.google.de/books?id=G4CggacS5qUC>.
- [13] Antenova. *Sharpi Wi-Fi Antenne: SRC5G027*. 2018.
- [14] Schwab, A. J. und Kürner, W. *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 6., bearb. und aktual. Aufl. VDI-Buch. Berlin: Springer, 2011. ISBN: 9783642166105. DOI: 10.1007/978-3-642-16610-5.
- [15] Innco Systems. *Compactable CT 0800: Data Sheet*. 2018.
- [16] Innco Systems. *Turnunit DE 3600: Data Sheet*. 2018.
- [17] Innco Systems. *Controller CO 3000: Data Sheet*. 2018.
- [18] Innco Systems, Hrsg. *Operating Instructions and Service Manual: Documentation for CT0800, DE3600-RH, CO3000*.
- [19] Rohde und Schwarz. *HE 300 Active Directional Antenna: Data Sheet*. URL: www.rohde-schwarz.de.
- [20] Aaronia. *HyperLOG 7060: Data Sheet*.
- [21] ETS Lindgren. *FS-200 Hybridabsorber: Data Sheet*.

Jül-4420 • März 2019
ISSN 0944-2952

Mitglied der Helmholtz-Gemeinschaft

