

Entwurf einer Kompaktantenne

Bachelordiplomarbeit



Autor	Pascal Schantl pascal.schantl@stud.hslu.ch
Dozierender	Marcel Joss marcel.joss@hslu.ch
Experte	Hanspeter Oppliger hanspeter.oppliger@wavelab.ch
Abteilung	Elektrotechnik
Klassifikation	Einsicht
Abgabe	Horw, 06. Juni 2014

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Sämtliche verwendeten Textausschnitte, Zitate oder Inhalte anderer Verfasser wurden ausdrücklich als solche gekennzeichnet.

Ort, Datum:

Unterschrift:

Abstract

In this work two integrated compact antennas are developed for a "near pilot network" and a Bluetooth Low energy communication. The difficulty in the development of the antenna for this device is to keep the transmission frequency and simulated radiation to maintain after manufacture. Many electrically conductive surfaces in the near field of the antenna affect the radiation characteristics of the device. The place of the antenna is provided on the remote keypad.

After incorporation into the theory, different antenna patterns were created using the simulation software EMPIRE XCcel to get to know this. The first antenna model, which was produced, was measured with the measuring system of Satimo. By using this measurement system, the system can get better known.

The latest print, which was manufactured, consisting of a monopole and a loop antenna. The monopole antenna radiates an electric field and the loop antenna radiates a magnetic field. The propagation of these different fields is the same in the far field. The receiving antenna can not distinguish the different field components and receives an electromagnetic field.

The measurements show that the antennas are not optimally adjusted to the transmission frequency because the various transitions between the lines. This is evident both in the Z-plane, which represents the real and imaginary parts of a signal as well as the radiation. The measurements also shows, that the resonance is close to the transmission frequency.

The simulation must be adjusted. This includes the physical adjustment of the length of the antenna, so that the resonances are matched correctly. In addition must be made a lossless LC network, to the ohmic matching of the antenna. After that, the antennas must be produced and measured again and possibly be redesigned.

Management Summery

In dieser Arbeit wird für ein „near pilot network“ und eine Bluetooth-Low-Energy Kommunikation zwei integrierte Kompaktantennen entwickelt. Diese werden in einem Fluggerät für Tuchflieger eingesetzt. Die Schwierigkeit bei der Antennenentwicklung für dieses Fluggerät liegt darin, die simulierte Sendefrequenz und Abstrahlcharakteristik nach der Fertigung bei zu behalten. Viele elektrisch leitende Flächen im Nahfeld der Antennen beeinflussen die Abstrahlcharakteristik des Fluggeräts. Der Platz der Antennen ist auf der abgesetzten Tastatur vorgesehen.

Nach dem Einarbeiten in die Theorie wurden verschiedene Antennenmuster mit der Simulationssoftware EMPIRE XCcel erstellt, um diese kennen zu lernen. Das erste Antennenmodell, welches produziert wurde, wurde mit dem Messsystem von Satimo ausgemessen. So konnte der Umgang mit diesem Messsystem kennen gelernt werden.

Der aktuelle Print, welcher gefertigt wurde, besteht aus einer Monopol- und einer Loopantenne. Die Monopolantenne strahlt ein elektrisches Feld und die Loopantenne ein magnetisches Feld ab. Die Ausbreitung dieser unterschiedlichen Felder ist im Fernfeld identisch. Die Empfangsantenne kann die unterschiedlichen Feldanteile nicht unterscheiden und empfängt ein elektro-magnetisches Feld.

Die Messungen zeigen, dass die Antennen durch verschiedene Übergänge der Leitungen nicht optimal an die Sendefrequenz angepasst sind. Dies zeigt sich sowohl in der Z-Ebene, welche den Real- und den Imaginärteil eines Signals darstellt, als auch in der Abstrahlcharakteristik. Die Messungen zeigen auch, dass nahe bei der Sendefrequenz Resonanzen liegen.

Als weiteres Vorgehen wird die Simulation angepasst. Dies beinhaltet die physikalische Anpassung der Länge der Antenne, um so die Resonanzen korrekt abzustimmen. Des Weiteren wird mit einem verlustfreien LC-Netzwerk die ohmsche Anpassung der Antenne an die Leitung erreicht. Fortsetzend müssen die Antennen erneut produziert und ausgemessen und gegebenenfalls noch ein weiteres Redesign gemacht werden.

Inhaltsverzeichnis

Eigenständigkeitserklärung	I
Abstract.....	II
Management Summery	III
Inhaltsverzeichnis	IV
1 Einleitung	1
2 Projektziele.....	2
3 Ausgangslage.....	2
3.1 Rahmenbedingungen	2
3.2 Spezifikationen.....	3
3.2.1 Distanz.....	3
3.2.2 Antennengewinn	3
3.2.3 Richtwirkung.....	3
3.2.4 Polarisisation	3
4 Kompaktantennen.....	4
4.1 Entwicklung	4
4.2 Theorie	5
4.2.1 Linkbudget.....	6
4.2.2 Fernfeld/Nahfeld	7
4.2.3 Elektromagnetische Schirmung.....	8
4.2.4 Kompaktantennen.....	8
5 Entwurf.....	10
5.1 Antennenmodelle	10
5.2 Simulationswerkzeug.....	15
6 Messung.....	18
6.1 Messsystem Satimo	18
6.2 Ausmessen der Antennen	20
6.3 Messergebnisse	21
6.3.1 Resonanzfrequenz	21
6.3.2 Z-Ebene	22
6.3.3 Abstrahlcharakteristik.....	23
7 Auswertung.....	26
7.1 Monopolantenne	26
7.2 Loopantenne.....	27

7.3	Spezifikationen.....	29
7.4	Risiken.....	29
8	Ausblick.....	30
8.1	LC-Anpassungsnetzwerk.....	30
8.1.1	Reaktanzen der Monopolantenne.....	31
8.1.2	Reaktanzen der Loopantenne.....	31
9	Schlussdiskussion.....	32
10	Reflektion.....	33
11	Anhang.....	34
12	Verzeichnisse.....	35
	Literaturverzeichnis.....	35
	Tabellenverzeichnis.....	36
	Abbildungsverzeichnis.....	36

1 Einleitung

Durch die schwierige Orientierung in der Luft greifen Gleitschirmpiloten auf technische Hilfsmittel zurück. Mit einem Variometer wird der Luftdruck gemessen. Dies hilft dem Piloten festzustellen, ob er sich im Steig- oder im Sinkflug befindet und auf welcher Höhe er fliegt. Um nicht dauernd auf das Hilfsgerät sehen zu müssen, wird der Sinkflug mit einem Pipton signalisiert. Der Steigflug wird nicht akustisch signalisiert. Weiter nutzen viele Piloten auch ein GPS-Gerät zur Positionsbestimmung. [1]

Die Firma Flytec stellt seit über 30 Jahren unter anderem verschiedene Fluginstrumente für die Tuchfliegerei her. Im neusten Gerät ist nun auch ein GPS eingebaut, welche den aktuellen Standort auf einer Karte im Display darstellt.

In dieser Arbeit wird für die neue Fluginstrumentenserie 7000 zwei Kompaktantennen entwickelt. Zu erst wird die Ausgangslage aufgenommen. Diese Arbeit behandelt einen Teil der Theorie der Kompaktantennenentwicklung, um ein gutes Verständnis der anschliessenden Simulationen zu erhalten. Die simulierte Antenne wird nach der Produktion ausgemessen und mit der Theorie und der Simulation verglichen. Als Abschluss wird das weitere Vorgehen vorgeschlagen und ein Fazit der gesamten Arbeit gezogen.

Die Dokumentation ist wie folgt aufgebaut:

- Kap. 1: Einleitung, kurze Einleitung in die Tuchfliegerei und den Aufbau der Arbeit
- Kap. 2: Projektziele, Aufgabenstellung der Arbeit
- Kap. 3: Ausgangslage, Rahmenbedingungen und Spezifikationen
- Kap. 4: Kompaktantennen, Theorie zur Kompaktantennenentwicklung
- Kap. 5: Entwurf, Übersicht Entwurfsvorgehen
- Kap. 6: Messung, Messübersicht und Resultate
- Kap. 7: Auswertung, Vergleich zwischen Theorie, Simulation, Messung
- Kap. 8: Ausblick, weiteres Vorgehen
- Kap. 9: Schlussdiskussion, Vergleich erreichte Resultate mit der Aufgabenstellung
- Kap. 10: Reflektion, Fazit des gesamten Projekts

2 Projektziele

Die Kompaktantennen werden für das ISM Band im Frequenzband zwischen 2.4 GHz und 2.5 GHz ausgelegt. Der Vorteil dieses Frequenzbandes ist, dass es ein offenes Band ist, welches jeder lizenzfrei benutzen darf.

Neben dem Einarbeiten in die theoretischen Eigenschaften von integrierten Kompaktantennen wird auch das Simulationstool Empire XCcel kennen gelernt. Dies ist ein 3D EM-Simulationstool. Die Antennen werden im Empire XCcel modelliert und können zusammen mit den importierten Gehäusedaten simuliert werden. Es werden verschiedene Lösungsansätze erarbeitet.

Neben der Simulationssoftware wird auch das Antennenmesssystem von Satimo kennen gelernt und erste Messungen zur Einarbeitung gemacht.

Das fertige Antennenmuster wird an der Hochschule produziert. Dieses Muster wird mit Satimo ausgemessen. Nach dem Ausmessen folgt ein Redesign des Musters, weitere Produktionen und Test zur Überarbeitung des Musters und optimaler Anpassung der Antennen an das Fluginstrument. [2]

3 Ausgangslage

In diesem Kapitel werden die Spezifikationen und Ziele Antennen erläutert.

3.1 Rahmenbedingungen

Eine der beiden Antennen, welche in diesem Projekt entwickelt werden, wird für das „near pilot network“ verwendet. Diese Antenne kommuniziert mit Sensoren, welche sich sowohl bei den Händen, als auch am Rücken beim Motor befinden. Die zweite Antenne wird an einem Bluetooth Low-Energy-Chip angeschlossen. Dieser dient zur Kommunikation mit einem Smartphone.

Die beiden Antennen werden mit einer unsymmetrischen Leitung gespeist. Die Impedanz dieser Leitungen beträgt 50 Ohm. Mit Streifenleitungen wird die Impedanz der Antennen an jene der Zuleitung angepasst. Die abgesetzte Tastatur bietet Platz für die Realisation dieser Antennen.

Die Leistung der Sender-IC's beträgt 0 dBm. Dies entspricht einer Leistung von 1 mW. Der Ausgang des Baluns hat eine Impedanz von 50 Ω .

3.2 Spezifikationen

Die Spezifikationen sind zusammen mit der Firma Flytec ausgearbeitet worden.

3.2.1 Distanz

Der Abstand zwischen den Antennen und den Sensoren an den Händen und am Rücken beträgt maximal zwei Meter. Über mindestens diese Distanz müssen die Antennen ein elektromagnetisches Feld mit genügender Leistung abstrahlen. Die Abbildung 1 zeigt die Platzierung des Gerätes und den Abstrahlradius.

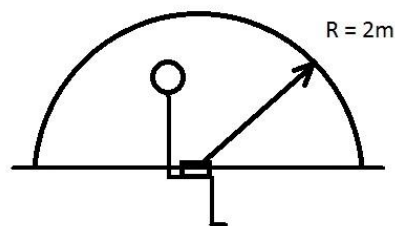


Abbildung 1: Platzierung des Gerätes

3.2.2 Antennengewinn

Für die Distanz von zwei Meter muss der Antennengewinn mindestens -15 dBi betragen. Dieser Wert geht aus der Abschätzung des Linkbudgets im Kapitel 4.2.1 Linkbudget hervor.

3.2.3 Richtwirkung

Die Antennen sollen halbkugelförmig nach oben abstrahlen. Die Abstrahlung soll homogen in alle Richtungen sein.

3.2.4 Polarisation

Die Antennen sollen zirkular polarisiert werden, damit das Gerät nicht exakt ausgerichtet auf dem Oberschenkel platziert werden muss. So kann der Empfang immer sichergestellt werden.

4 Kompaktantennen

In diesem Abschnitt wird die Kompaktantennentheorie behandelt.

4.1 Entwicklung

Integrierte Kompaktantennen sind Leiterbahnen auf einem Elektroprint, welche als Antennen ausgelegt und eingesetzt werden. Diese Leiterbahnen werden bereits beim Layout in die gewünschte Form gebracht. Es gibt keine Musterantenne, welche für jede Schaltung, respektive Platine, eingesetzt werden kann. Jede Schaltung hat andere Bauteile, unterschiedliche Geometrien und leitende Flächen im Nahfeld der Antenne. Alle diese Unterschiede haben Einfluss auf die Antennencharakteristik.

Es gibt verschiedene Simulationstools, welche das Entwickeln einer Antenne unterstützen. Die Simulationstools können helfen, eine erste Abschätzung der Antenneneigenschaften zu machen und die Form der Antenne zu geben.

4.2 Theorie

Eine Antenne ist ein elektrischer Leiter, welcher Energie durch ein elektrisches oder magnetisches Feld abstrahlt.

Die Sendefrequenz der Antenne hängt stark von der Geometrie ab. Je besser die Frequenz der Antenne auf die Sendefrequenz des HF-IC's abgestimmt ist, umso mehr Energie kann die Antenne abstrahlen.

Damit die Antenne bei der entsprechenden Sendefrequenz optimal betrieben werden kann, wird die Impedanz der Antenne an die Zuleitung angepasst. Wird die Antenne über eine 50 Ω reelle Leitung gespeist, muss die Antenne ebenfalls eine Impedanz von real 50 Ω haben. Um dies zu erreichen, muss der Imaginärteil der Antenne, das heisst der kapazitive und induktive Anteil, auf 0 Ω gebracht werden. Dies wird bei Resonanz des Schwingkreises von Impedanz und Kapazität erreicht. Die Resonanz des Schwingkreises liegt bei einem Vielfachen der physikalischen Länge von $\lambda/4$. Die Abbildung 2 zeigt den ohmschen Verlauf der Reaktanzen einer offenen Leitung.

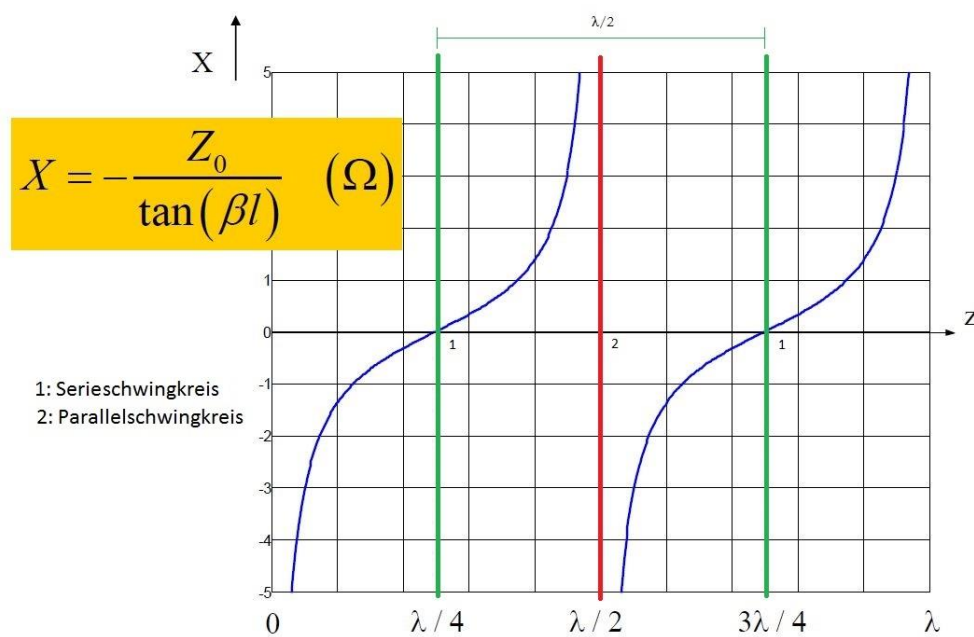


Abbildung 2: Resonanzerscheinung [3]

Beim Serieschwingkreis liegt der Blindwiderstand X bei 0 Ω . Das bedeutet, dass keine Energie in den Reaktanzen verbraucht wird. Die erste Resonanz vom Serieschwingkreis liegt bei der Länge $\lambda/4$ und wiederholt sich danach alle $\lambda/2$ wieder.

Der erste Parallelschwingkreis liegt bei einer physikalischen Länge von $\lambda/2$ und wiederholt sich ebenfalls alle $\lambda/2$.

4.2.1 Linkbudget

Im Linkbudget in der Tabelle 1 werden alle Parameter aufgelistet, welche für eine erste Abschätzung des Empfangspegels nötig sind. Da die minimale Empfangsempfindlichkeit des Empfängers ist bekannt, kann der benötigte Antennengewinn der Sendeantenne hergeleitet werden. Die Formel 1 ist die Ausgangslage des Linkbudgets. Diese Formel wird nach dem Antennengewinn aufgelöst werden, wie dies bei der Formel 2 gemacht wird. [4]

$$(1) P_{Rx} = P_{Tx} + G_{Tx} + L_{Tx} + L_{Fs} + L_M + G_{Rx} + L_{Rx}$$

Tabelle 1: Linkbudget

Sendeparameter		
P_{Tx}	Senderleistung	0 dBm
G_{Tx}	Antennengewinn Sender	zu bestimmen
L_{Tx}	Anschlussdämpfung Sender	-0.5 dB
Pfadverluste		
L_{Fs}	Freiraumdämpfung	-46 dB [5]
L_M	Dämpfung durch Körper/Beugung	-20 dB [6]
Empfängerparameter		
G_{Rx}	Antennengewinn Empfänger	-3 dB
L_{Rx}	Anschlussdämpfung Empfänger	-0.5 dB
P_{Rx}	Minimal Empfangsempfindlichkeit	-85 dBm [7]

$$(2) \Rightarrow G_{Tx} = (P_{Rx} - G_{Rx} - L_{Rx}) - (L_{Fs} + L_M) - (L_{Tx} + P_{Tx}) = (-85 \text{ dBm} + 3 \text{ dB} + 0.5 \text{ dB}) - (-46 + -20) \text{ dB} - (-0.5 \text{ dB} + 0 \text{ dBm}) = -15 \text{ dB}$$

$$L_{Fs} = P_{Tx} / P_{Rx} = 1 \text{ mW} / 23.74 * 10^{-6} \text{ mW} = 42.1 * 10^3$$

$$L_{Fs, dB} = 10 * \log_{10}(L_{Fs}) = 10 * \log_{10}(40.4 * 10^3) = 46 \text{ dB}$$

$$P_{Rx} = P_{Tx} * K * \left(d_0 / D \right)^{\gamma} = P_{Tx} * \left(\lambda / 4 * \pi * D \right)^{\gamma} = 1 \text{ mW} * \left(0.122 \text{ m} / 4 * \pi * 2 \text{ m} \right)^2$$

$$= 23.74 * 10^{-6} \text{ mW}$$

$$K = \left(\lambda / 4 * \pi * d_0 \right)^2 * G_{Tx} * G_{Rx}$$

K : Konstante, welche die Antennencharakteristik und die mittlere Kanaldämpfung wiedergibt

γ : Tabellenwert für die Ausbreitungsverluste [5]

λ : Wellenlänge

In den Berechnungen zum Linkbudget, wird die Annahme getroffen, dass das Microwave-Engineering und die Anpassung optimal gemacht wurden.

Beim Antennengewinn auf der Empfängerseite ist eine Reserve eingerechnet. Im Normalfall kann für den Antennengewinn mit dem Faktor 1 gerechnet werden, was 0 dB entspricht.

4.2.2 Fernfeld/Nahfeld

Die abgestrahlte Energie kann im Nahfeld als zwei verschiedenen Feldern auftreten, als ein elektrisches oder als ein magnetisches Feld. Im Fernfeld ergibt sich aus den elektrischen und magnetischen Feldkomponenten ein elektromagnetisches Feld. Aus diesem kann ein Empfänger nicht mehr zurückschliessen, um welche Art von Quelle es sich handelt.

Ist die Distanz zwischen einem absorbierenden Bauteil kleiner als die Wellenlänge der Übertragungsfrequenz ($d < \lambda$), befindet sich das Bauteil im Nahfeld. Wird die abgestrahlte Energie einem Nahfeld entzogen, hat dies Einfluss auf die Quelle. Die Quelle speichert die Energie in einem magnetischen oder elektrischen Feld, um sie dem Feld gleich wieder zu entziehen. Elektrische Bauteile oder metallene Flächen können diese Energie ebenfalls absorbieren. Diese Reduktion der Energie sieht die Quelle als ohmschen Widerstand R_{rad} . Dies hat zur Folge, dass sich die Spannung und/oder der Strom im Primärkreis ändert. Somit beeinflusst jeder Leiter, welcher sich im Nahfeld befindet, die Abstrahleigenschaften von Antennen.

Ist die Distanz viel grösser als die Wellenlänge ($d \gg \lambda$), wird das Fernfeld beachtet. Die abgestrahlte Energie breitet sich solange aus, bis sie komplett absorbiert ist. Eine Absorption im Fernfeld hat keinen Einfluss mehr auf die Abstrahleigenschaft der Antenne.

Die Abbildung 3 zeigt das Ersatzschaltbild einer Antenne.

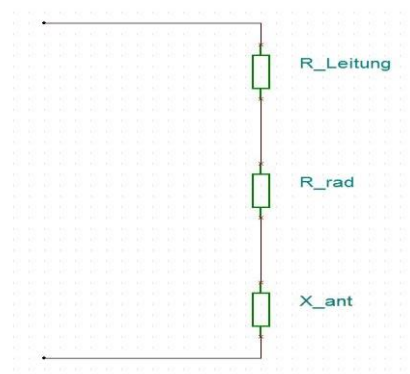


Abbildung 3: Ersatzschaltbild einer Antenne

Der Übergang vom Nahfeld zum Fernfeld findet bei einer Distanz von $d \approx \lambda/\pi$ statt und ab einer Distanz von $d = 3 \cdot 10 \cdot \lambda$ kann das Nahfeld vernachlässigt werden. [8]

4.2.3 Elektromagnetische Schirmung

Metallische Leiter absorbieren elektromagnetische Wellen bei hohen Frequenzen. [9] Im Gehäuse des neuen Fluginstrumentes sind viele verschiedene metallische Leiter vorhanden. Die Hauptplatine ist eine für die Antennen eine grosse Massefläche. Auch das Display wird als grosse Absorptionsfläche betrachtet. Ebenfalls absorbierend wirkt das galvanisierte Gehäuse auf die abgestrahlte Energie. Da sich alle diese Teile im Nahfeld befinden, müssen diese in der Auslegung der Antenne berücksichtigt werden. Dipol- oder Monopolantennen sind typische Quellen für E-Felder. Die E-Felder werden von elektrischen Leitern stark absorbiert. Darum muss bei der Antennenentwicklung mit Monopolantennen ein besonderes Augenmerk auf die, sich im Nahfeld befindenden, elektrischen Leiter gelegt werden. Im Gegensatz dazu können Rahmenantennen eingesetzt werden. Diese erzeugen ein H-Feld. Das H-Feld wird von den elektrischen Leitern weniger stark absorbiert. Darum haben elektrische Leiter im Nahfeld weniger Einfluss auf die Rahmenantenne. [9]

4.2.4 Kompaktantennen

Kompaktantennen finden vor allem dort Einsatz, wo der Platz für eine Antenne sehr klein und begrenzt ist. Es gibt viele verschiedene Arten und Formen von Kompaktantennen. Es gibt jedoch keine Musterantenne, welche für jedes Einsatzgebiet ideal ist. Es muss für jeden Antenneneinsatz ein separates Engineering betrieben werden.

4.2.4.1 Antennenfamilien

Die Antennen können grundsätzlich auf die folgenden Antennenfamilien zurückgeführt werden:

- Loop
- Dipol

Den Dipolen können weitere Unterarten zugeordnet werden. Monopol, Helix, (P)ILA und (P)IFA gehören zu dieser Familie. Dipole haben im Gegensatz zu Monopolen einen symmetrischen Eingang und haben eine Gesamtlänge von $\lambda/2$. Monopolantenne haben einen unsymmetrischen Eingang. Sie eine physikalische Länge von $\lambda/4$.

Die Abbildung 4 zeigt die beiden Antennenbauformen Monopol (links) und Dipol (rechts).

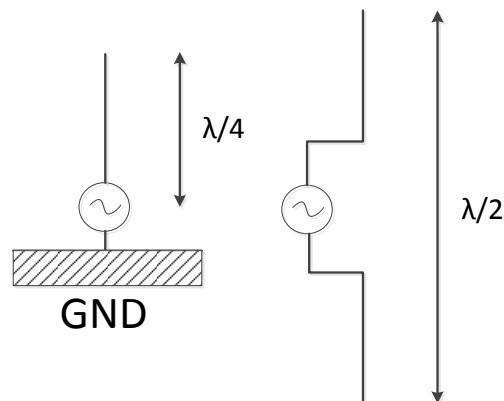


Abbildung 4: Unterschied Monopol/Dipol

Loopantennen sind meistens ringförmig oder rechteckig. Am Speisepunkt haben sie einen symmetrischen Eingang. Die physikalische Länge der Loopantenne sollte gleichlang sein wie die Wellenlänge der Sendefrequenz. Es werden vielfach Loopantennen eingesetzt, welche kürzer als die Wellenlänge sind. Dies kann dazu führen, dass der Strahlungswiderstand so klein wird, dass er niedriger als der Verlustwiderstand wird. Dies hat zur Folge, dass die verkleinerten Loopantennen einen geringen Wirkungsgrad aufweisen. [10]

4.2.4.2 Miniaturisierung

Kompaktantennen können auf verschiedene Arten verkleinert werden. Die Miniaturisierungstechniken reichen vom Verwenden von diskreten Bauteilen, Einsetzen von hochdielektrischen Materialien, Kurzschlüssen mit der Massefläche oder der Optimierung der Antennen geometrie und der Antennen umgebung.

Die einfachste Art ist das Einsetzen von diskreten Bauteilen. Mit diesen Bauteilen kann die elektrische Länge einer Antenne vergrößert werden, ohne die Dimensionen zu verändern. Damit können kleinere Resonanzfrequenzen erreicht werden.

Um eine Monopolantenne zu verkleinern, kann diese meanderförmig aufgebaut werden. Dies verringert die Höhe der Antenne. Wenn der Platz nicht ausreicht, um eine gerade Monopolantenne aufzubauen, kann diese auch angewinkelt werden. Diese Antenne bezeichnet man als PILA. Die Höhe und die Länge der Antenne ergeben zusammen die $\lambda/4$ -Länge. Wird die PILA am Knickpunkt mit einer Massefläche kurzgeschlossen entsteht eine PIFA.

Der Abstand zwischen dem Anschluss an die Massefläche und dem Speisepunkt ist bei der PIFA hat massgeblichen Einfluss auf die Impedanz der Antenne.

5 Entwurf

Im folgenden Abschnitt wird der Vorgang zu den verschiedenen Entwurfsmodellen erläutert.

5.1 Antennenmodelle

Antennenmodelle gibt es in vielen verschiedenen Formen und Varianten. Modelle wie PILA oder PIFA können einfach entwickelt werden. Diese eignen sich gut für die ersten Versuche mit dem Simulationstool eine Antenne zu modellieren und simulieren.

Damit die Länge der Antennen bereits in der Nähe der Resonanzfrequenz liegt, wird als erstes die physikalische Wellenlänge berechnet.

$$\text{Wellenlänge } \lambda = \frac{\text{Phasengeschwindigkeit } c}{\text{Frequenz } f} = \frac{3 * 10^8 \text{ [m/s]}}{2.45 * 10^9 \text{ [Hz]}} = 0.122 \text{ m}$$

Dies führt zu einer verkürzten Antennenlänge von:

$$l = \frac{\lambda}{4} = \frac{122 \text{ [mm]}}{4} = 30.5 \text{ mm}$$

Als erster Versuch wird eine PILA modelliert. Das Substrat wird mit bereits mit den Abmessungen der Originalplatine modelliert. Ebenfalls werden die Kupferschichten der Antenne und der Massefläche mit den vorgegebenen Dicken modelliert.

Die Massefläche wird nur bis auf einen Millimeter an die Antenne geführt. In diesen Spalt zwischen Massefläche und Antenne wird eine Signalquelle platziert. Beim gefertigten Print wird in diesen Spalt das Anschlusskabel angelötet.

Mit dem Verändern der Leiterbahndicke oder dem Abstand der Leiterbahn zur Massefläche kann die Impedanz an die Quelle angepasst werden. Mit der Sweepfunktion können die gewünschten Parameter durchiteriert um die Impedanz und die Resonanzfrequenz einfach einzustellen.

Der Reflektionskoeffizient S11 dient zur ersten Abschätzung, bei welcher Frequenz sich eine, an die Quelle angepasste Resonanz befindet. Um weitere Resonanzfrequenzen zu finden, wird der Frequenzgang in der Z-Ebene betrachtet. Eine Resonanz tritt bei jenen Frequenzen auf, bei denen die Kurve des Imaginärteils bei 0 Ω liegt.

Die Abbildung 5 zeigt den Reflektionskoeffizienten S11 der ersten PILA.

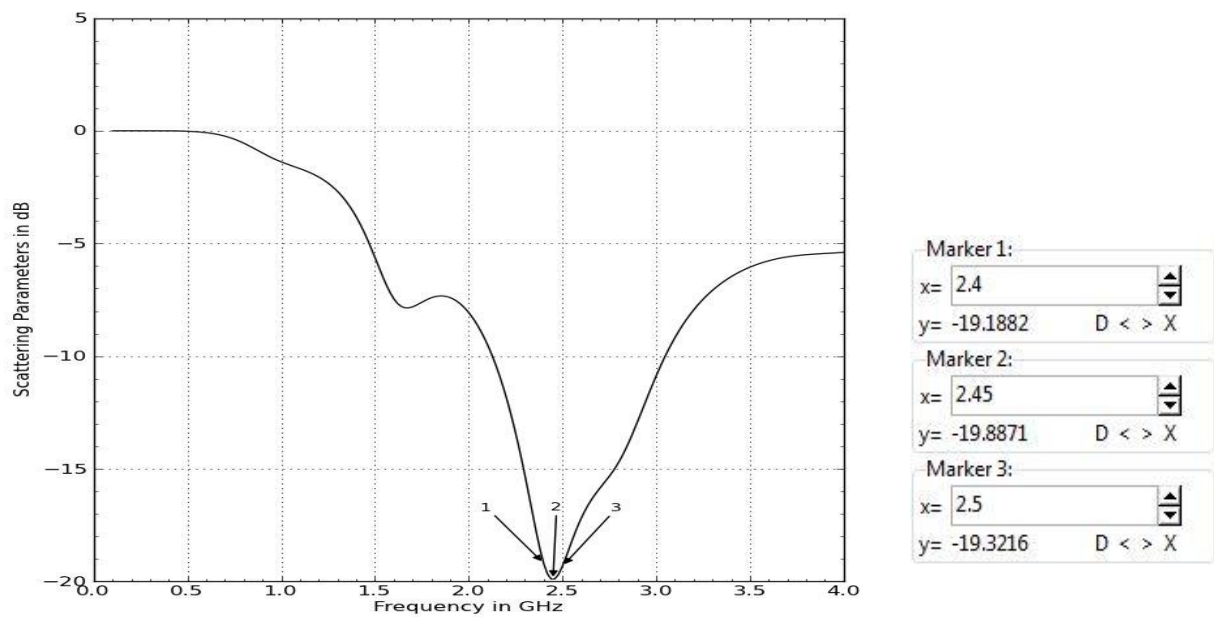


Abbildung 5: S11 PILA

Im Vergleich zum Reflektionskoeffizienten wird in der Abbildung 6 die Impedanz der PILA angezeigt. Der Imaginäranteil bei der Mittelfrequenz von 2.45 GHz ist mit -8Ω nahe bei 0Ω . Der Realanteil ist mit 55Ω nahe bei der Anpassung an die 50Ω Leitung.

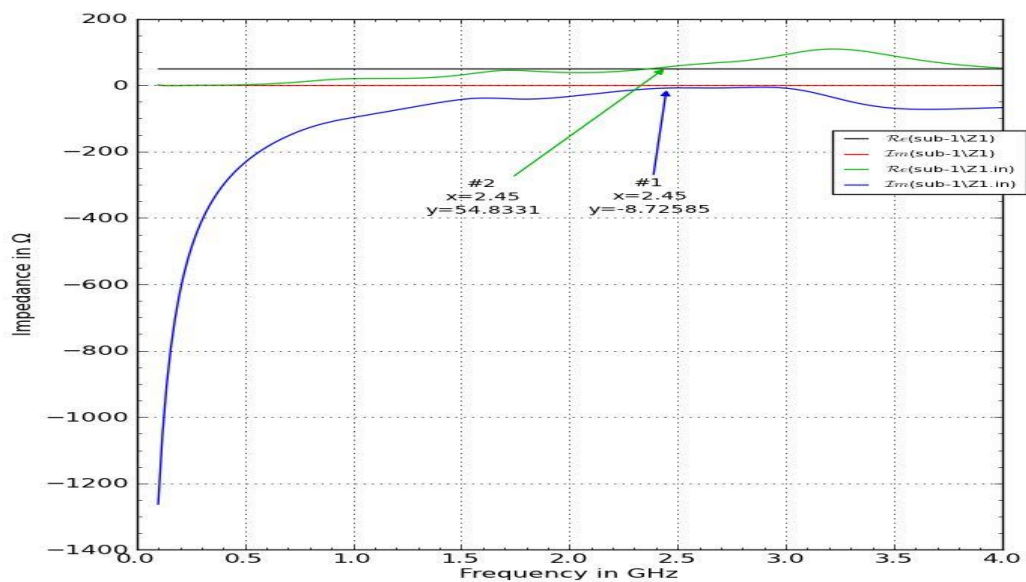


Abbildung 6: Z-Ebene PILA

Weiter wird auch eine PIFA modelliert. Die Simulation dient wieder als Vergleich mit der Theorie. Nach dem ersten Simulationsdurchlauf werden die Parameter so angepasst, dass die Resonanzfrequenz und die Impedanz optimal sind.

Die Abbildung 7 zeigt das 3D-Modell dieser PIFA.



Abbildung 7: 3D-Modell PIFA

Diese PIFA wird auch benutzt um den ersten Print zu fertigen. Die Daten der PIFA werden als *.gbr-Dateien (Gerber-Files) exportiert und im CircuiteCAM importiert. Im CircuitCAM werden die Daten der PIFA aufbereitet, sodass diese in den Laser geladen werden können und die PIFA produziert werden kann. Diese Printantenne ist die erste Antenne, welche von der Modellierung bis zur Produktion alle Schritte durchlaufen hat.

Für dieses Projekt werden die Printantennen auf einer abgesetzten Platine platziert. Aus diesem Grund werden auch die weiteren Muster im Simulationstool auf zwei verschiedenen Platinen modelliert und mit Via-Leitungen verbunden. Die ersten Antennen sind wieder Monopolantennen. Die Antennen werden verschieden meanderförmig aufgebaut und simuliert. Die Massefläche auf der Hauptplatine ist für diese Antennen vorerst nicht verändert worden.

Der nächste Schritt ist das Modellieren der zweiten Antenne. Da durch die zweite Antenne neue Kupferbahnen dazugekommen sind, hat sich das Verhalten der ersten Antenne verschoben. Durch Anpassen der Parameter Dicke und Länge werden die Resonanzfrequenz und die Impedanz wieder korrigiert.

Werden zwei Monopolantennen verwendet, wie sie bei der Abbildung 8 gezeigt werden, wird der Kopplungsfaktor gross.

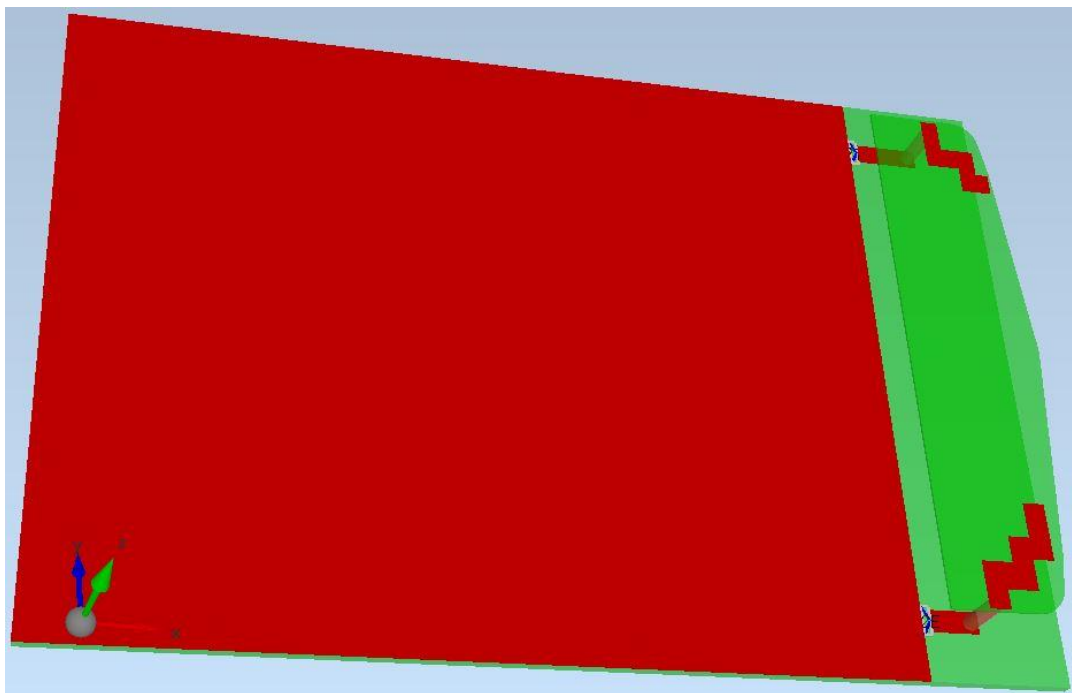


Abbildung 8: ILA inkl. Via

Bei einem Kopplungsfaktor von -10 dB wird 1/10 der abgestrahlten Energie direkt von der zweiten Antenne absorbiert. Beide Antennen strahlen ein E-Feld ab.

Um unterschiedliche Strahlungsfelder zu erhalten, welche im Nahfeld um 90° gedreht zueinander sind, werden bei weiteren Simulationen eine Loopantenne entwickelt. Diese strahlt die Energie in einem H-Feld ab. So wird die Kopplung zwischen den unterschiedlichen Antennentypen vergrößert. Aus der Theorie ist bekannt, dass die Loopantenne eine Länge von λ haben muss. Der Platz auf der Tastatur ist sehr begrenzt. Der Loop wird zwischen zwei Tasten platziert. Die restliche Länge bis zum Anschlusspunkt wird mit Streifenleiter modelliert. Die Gesamtlänge der so modellierten Loopantenne ist zu kurz für die vorgegebene Frequenz. Die elektrische Länge der Antenne wird mit einem diskreten Kondensator vergrößert.

Wichtig bei der Verwendung von diskreten Bauteilen ist, dass sie unterhalb ihrer Eigenresonanz betrieben werden. Oberhalb der Eigenresonanz ändern die Bauteile ihre Eigenschaft, das heisst eine Kapazität wird zu Induktivität und eine Induktivität wird zu Kapazität. [11]

Die Loopantenne wird symmetrisch gespeist. Das Messsystem hat einen unsymmetrischen Anschlusspunkt. Ein 50 Ω -Balun mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:1 wandelt die unsymmetrische Zuleitung zur benötigten symmetrischen Leitung um.

Die Abbildung 9 zeigt das NF- und HF-Verhalten der diskreten Bauteile.

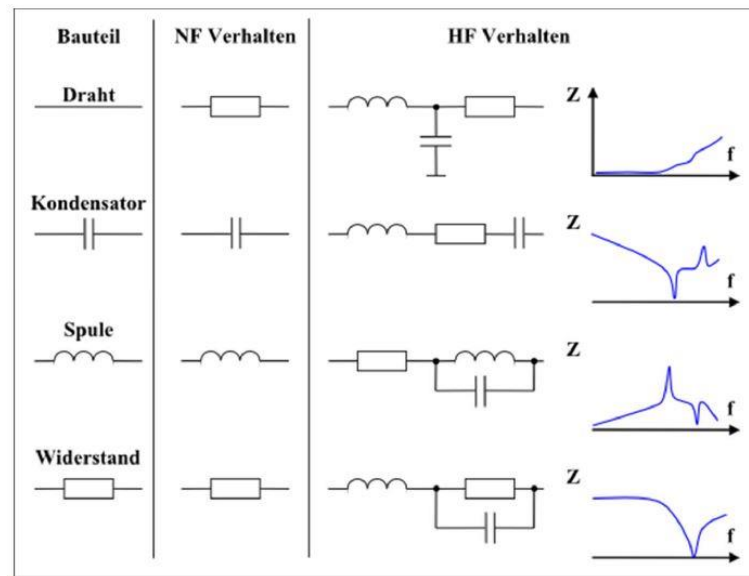


Abbildung 9: HF-Verhalten diskreter Bauteile [11]

Die Resonanzfrequenz kann anhand der Impedanz erkannt werden. Hersteller geben oftmals auch die Güte der Bauteile in Abhängigkeit der Frequenz an. Auch aus diesem Diagramm kann die Resonanzfrequenz herausgelesen werden.

Nach der Entwicklung der Loopantenne in einer eigenen Simulation, wird diese zusammen mit einer Monopolanterenne simuliert und Optimierungen vorgenommen. Nach der Optimierung sind die beiden Platinen zur Produktion gegeben worden.

Die 2D-Darstellung des gefertigten Print wird in der Abbildung 10 gezeigt.



Abbildung 10: aktueller Print

Es ist erkennbar, dass die Antennen nicht in die Nähe der Tasten kommen. P1 und P2 sind die beiden Speisepunkte. Das ‚E‘ beim Speisepunkt 1 bedeutet, dass dieser für die aktuelle Simulation aktiv ist.

5.2 Simulationswerkzeug

Im Simulationswerkzeug Empire XCcel können Antennenmuster modelliert und simuliert werden. Um den Umgang mit dem Empire zu erlernen, gibt es unterschiedliche Tutorials, welche die verschiedenen Funktionen des Programmes durchspielt. So ist es einfach erste Antennesimulationen durchzuführen. Neben den Tutorials stehen Antennebeispiele als Examples und Templates zur Verfügung, welche sich leicht verändern lassen.

Der erste Schritt, um eine Antenne zu modellieren, ist das Erstellen von verschiedenen Gruppen. In diesen Gruppen werden die unterschiedlichen Layer vorbereitet. Die Layer bestehen aus den verschiedenen Materialien und Dicken eines Musters. Die Materialien und Dicken werden direkt im Ordner „Groups“ zugeordnet. Die Abbildung 11 zeigt die Oberfläche des Simulationstools im Register „Draft“.

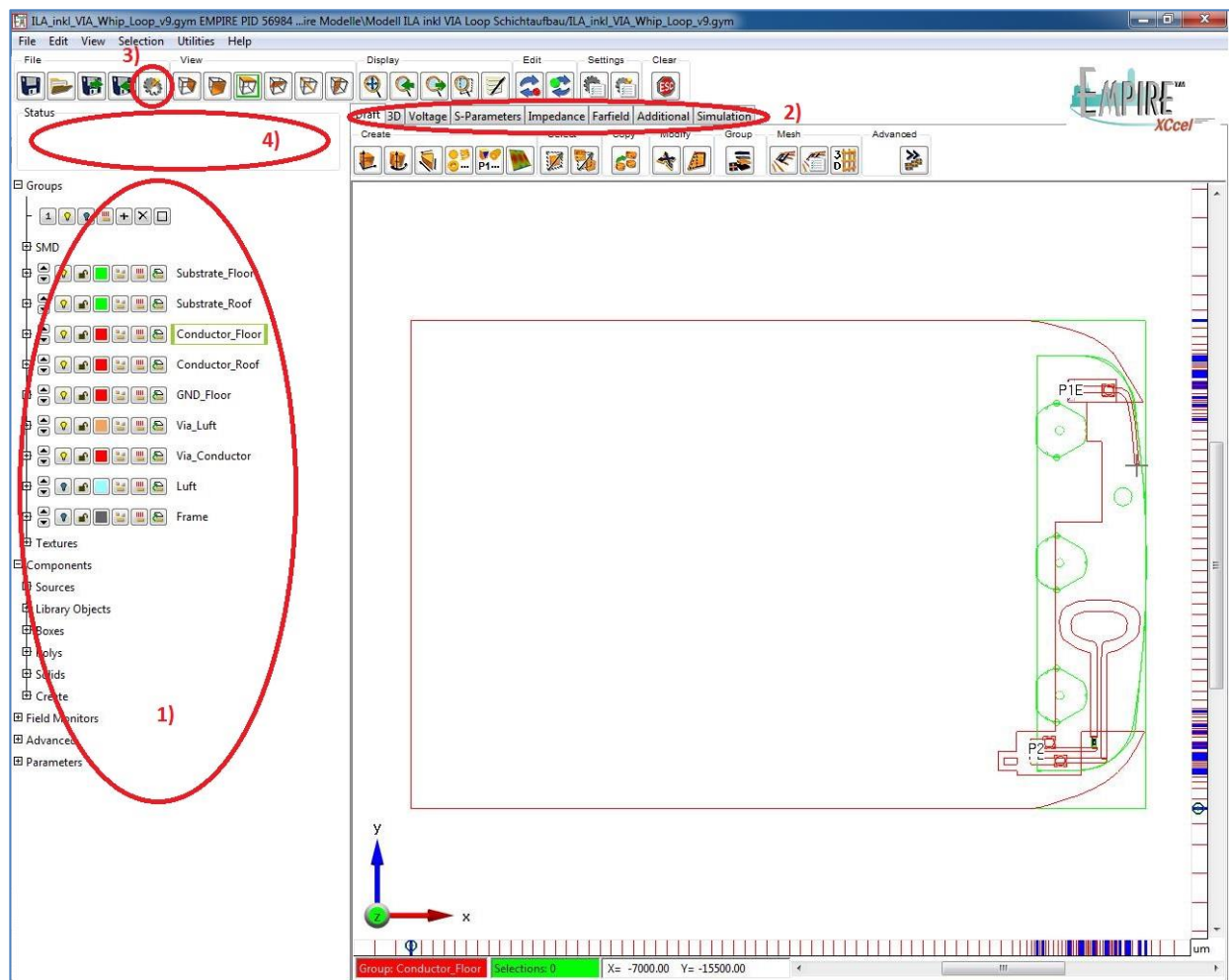


Abbildung 11: Empire XCcel

- 1) Objektverwaltung
- 2) Anzeigeregister
- 3) Button „Simulation start“
- 4) Fortschrittsanzeige

Nun können die verschiedenen Komponenten den Gruppen zugeordnet werden, in dem die entsprechende Gruppe ausgewählt und die zu platzierende Komponente im Register „Draft“ gezeichnet wird. Leiterbahnen, Masseflächen oder Substrate werden als „Boxes“ gezeichnet. Dies sind rechteckige Felder, welche dem entsprechenden Layer zugeordnet wurde. Diese „Boxes“ können nach dem Platzieren in Poligone umgewandelt werden. Der Vorteil von den Polygonen ist, dass diesen zusätzliche Eckpunkte hinzugefügt und die mit einem gewünschten Radius abgerundet werden können. Sind alle Layer platziert, wird noch eine Quelle gesetzt. Diese erzeugt das abzustrahlende Signal im entsprechend festgelegten Frequenzbereich.

Ist ein Draft fertig erstellt, kann dieser im 3D-Register begutachtet werden. Sind keine Fehler vorhanden, wird die Simulation gestartet. Im Statusfenster ist der aktuelle Fortschritt der Simulation angezeigt. Das Programm wechselt nach dem Start der Simulation zum „Voltage“-Register. Dieses zeigt den Sprungantwortverlauf des Signals an. Ist die Simulation beendet, wechselt das Programm automatisch zu den S-Parametern. In diesem Register wird der Reflektionskoeffizient und der Kopplungsfaktor der verschiedenen Quellen dargestellt. Dieses Register und das Register „Impedance“ dienen zur Eruiierung der Resonanzfrequenz der modellierten Antennen. Die Anzeigefenster können auch angepasst werden, um den Frequenzverlauf zum Beispiel im Smith-Chart zu beurteilen.

Stimmt die Resonanzfrequenz im Register „S-Parameter“ nicht mit der gewünschten Resonanzfrequenz überein, können die Antennen mit einem Parametersweep in der Länge oder Breite verändert werden. Das Programm rechnet alle Parameterkombinationen durch und zeigt die unterschiedlichen Kurven in den Registern an. Damit der Parametersweep effizient genutzt wird, kann in der 3D-Darstellung die Stromverteilung in den Antennen angezeigt werden. An jenen Stellen der Antenne mit grosser Stromkonzentration reagiert der Frequenzverlauf stark auf die Veränderung der Geometrie. Die Stromkonzentration wird mit einem „Field Monitor“ angezeigt. Dabei gilt, je intensiver das Rot, umso grösser der Strom.

Wie diese Stromverteilung beim aktuellen Print aussieht, zeigt die Abbildung 12.

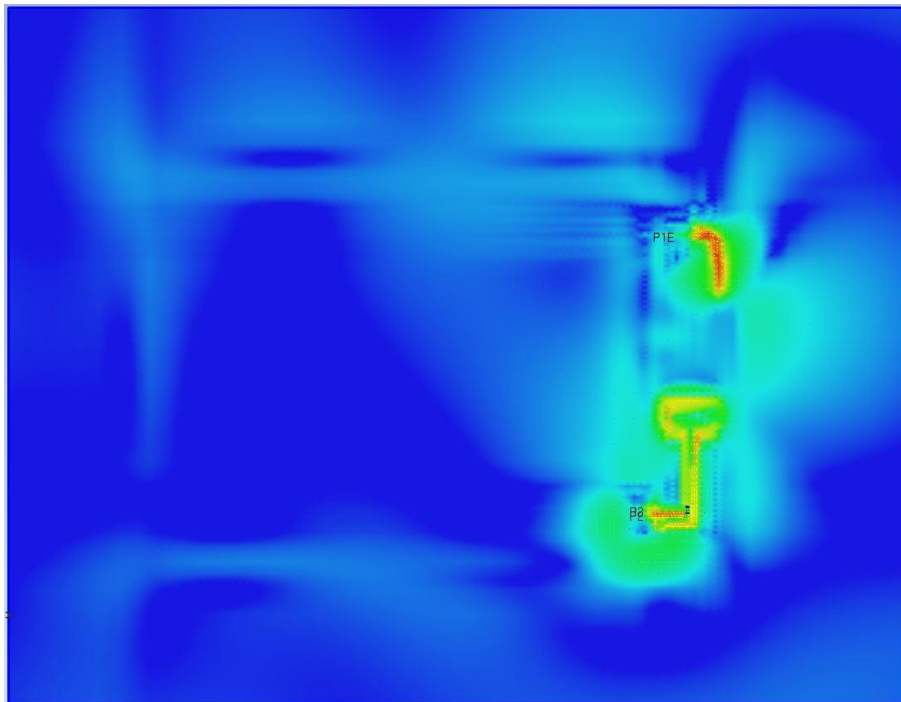


Abbildung 12: Stromverteilung bei aktiver Monopolantenne

6 Messung

Dieses Kapitel beschreibt das Vorgehen beim Messen und deren Resultate

6.1 Messsystem Satimo

Das Messsystem von Satimo besteht aus zwei Teilen. Der erste Teil ist die Messapertur. Diese beinhaltet zwölf kreuzförmigen Antennen, welche im orangen Kreis um das Messobjekt angebracht sind. Neben diese Antennen sind Absorberkegel befestigt. Diese Kegel verhindert Reflektionen der elektromagnetischen Wellen. Die beiden Öffnungen der Messapertur werden mit verschiebbaren Wänden, an welchen Absorberpanels angebracht sind, verschlossen. Die Abbildung 13 zeigt ein Messobjekt im Zentrum der Messapertur.



Abbildung 13: Messapertur

Das Objekt wird mit Sagex angehoben, damit die Antenne genau in der Mitte der Messapertur platziert werden kann. Sagex hat nur minimalen Einfluss auf die elektromagnetischen Wellen und ist daher gut geeignet um Objekte zu stützen, welche ausgemessen werden.

Der zweite Teil des Systems ist in einem 19“-Rack neben der Messapertur aufgebaut, wie die Abbildung 14 zeigt.

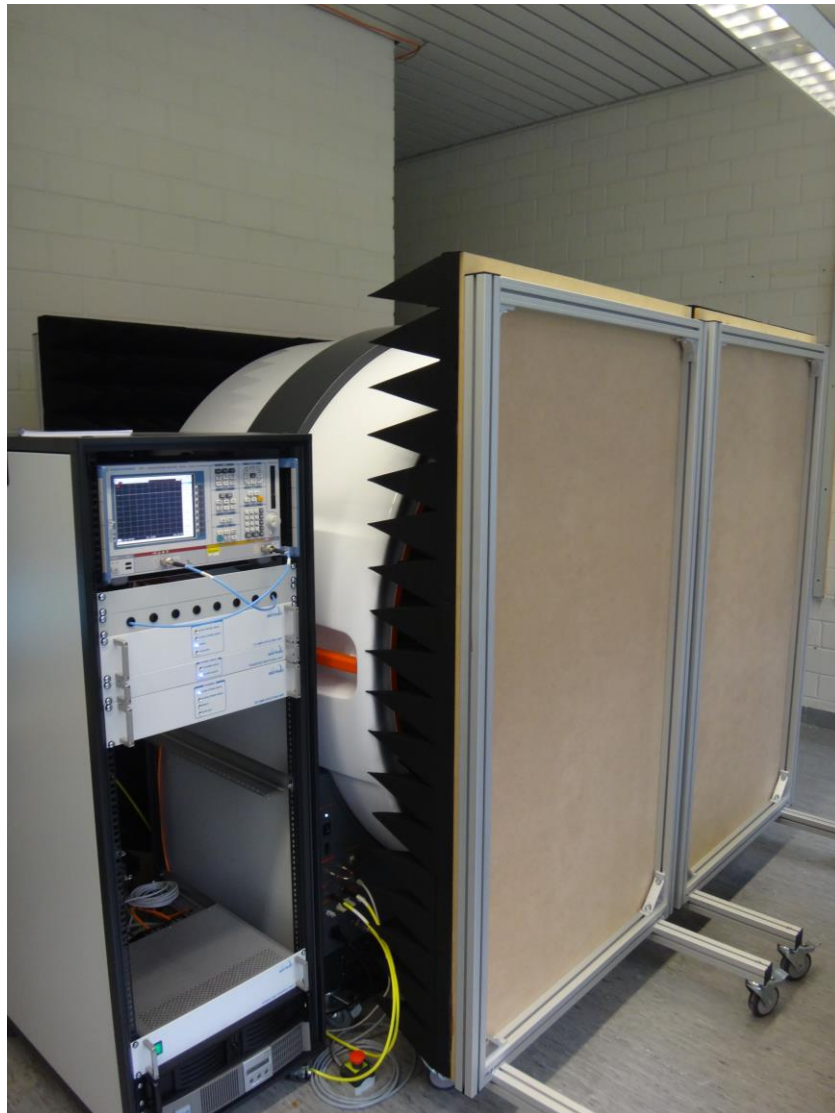


Abbildung 14: Messsystem mit Rack und Messapertur

Im Rack befindet sich eine unterbrechungsfreie Spannungsversorgung, ein Industrie-PC und diverse Einschübe, welche das Messsignal generieren, senden, empfangen und zusammen mit dem Netzwerkanalysator auswerten.

Wird eine Antenne im Messsystem von Satimo ausgemessen, sind diese exakt ins Zentrum der Messapertur gelegt. Die Antenne wird mit einem SMA-Stecker mit dem System verbunden.

Am PC wird eingegeben, ob die auszumessende Antenne als Empfangs- oder Sendeantenne eingesetzt wird. Danach wird eingestellt, über welchen Frequenzbereich gemessen und wie gross die Frequenzschritte des Frequenzsweeps sein sollen. Der maximal einstellbare Frequenzbereich ist vom installierten Netzwerkanalysator abhängig.

Die gemessenen Daten werden am PC in ein weiteres Programm exportiert. Im zweiten Programm können die Daten ausgewertet und in verschiedenen Abbildungen dargestellt werden.

6.2 Ausmessen der Antennen

Nachdem der Print fabriziert und zusammengelötet ist, wird die Resonanzfrequenz bestimmt. Mit einem Netzwerkanalyser werden die S-Parameter vom gesamten Übertragungssystem aufgenommen. Dazu muss der Netzwerkanalyser, welcher in der Abbildung 15 mit dem fertigen Print verbunden ist, kalibriert werden.

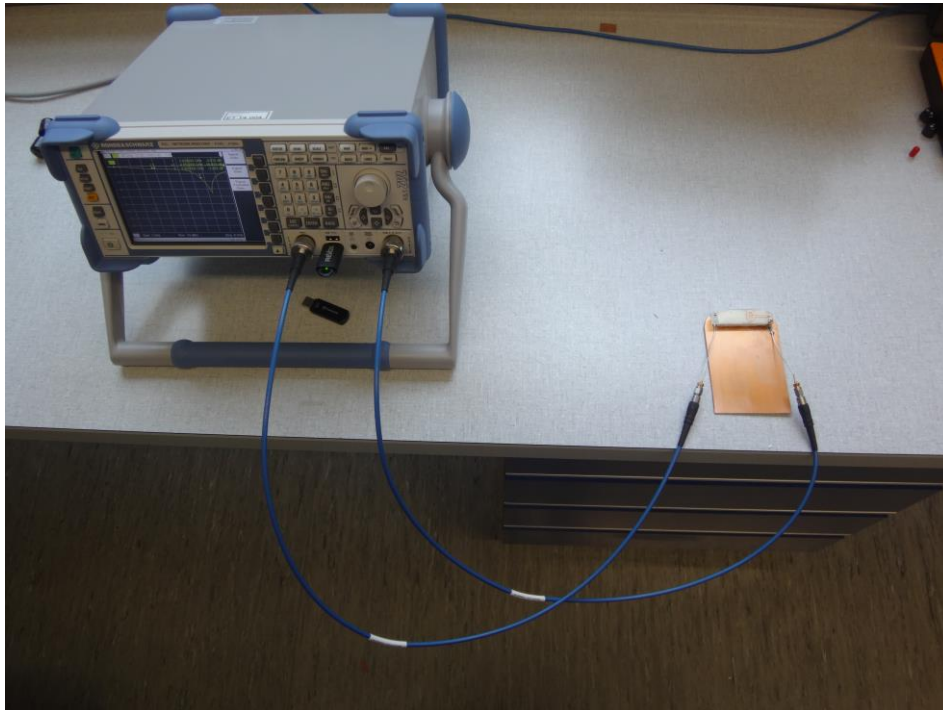


Abbildung 15: Netzwerkanalyser mit fertigem Print

Für die Kalibration wird ein Kalibrationsset verwendet, bei welchem verschiedene Leiterabschlüsse simuliert werden. Nach der Kalibration hat das Ende des Anschlusskabels eine Impedanz von $50\ \Omega$.

Um parasitäre Kapazitäten vom menschlichen Körper auf die Schaltung zu vermeiden, wird der Print abgelegt und so die Messungen durchgeführt. Nach dem Ausmessen des freiliegenden Prints wird dieser in das Gehäuse des Fluggerätes gelegt, um die Messdaten unter möglichst realen Bedingungen zu erhalten.

Die Daten der S-Parameter werden als *.s1p-Datei im Touchstoneformat auf einen Memorystick abgespeichert und im AWR Design Programm als S-Parameterverlauf dargestellt.

Nach dem Eruiern der Resonanzfrequenz werden die Antennen in die Messaperatur von Satimo gelegt und mit Klebeband befestigt. Diejenige Antenne, welche nicht ausgemessen wird, wird mit einem $50\ \Omega$ -Widerstand abgeschlossen. Durch diese Anpassung wird das in die zweite Antenne eingekoppelte Signal absorbiert und nicht direkt wieder abgestrahlt.

6.3 Messergebnisse

Es sind vier Messungen gemacht worden. Beide Antennen sind ohne und mit Gehäuse ausgemessen worden. Die Messdaten mit dem Gehäuse sind im Anhang C aufbereitet dargestellt.

6.3.1 Resonanzfrequenz

Nach der Kalibration des Netzwerkanalysers ZLV von Rohde und Schwarz werden die S-Parameter aufgenommen. Der Netzwerkanalysator hat einen Frequenzbereich von 9 kHz bis 6 GHz. Diese Parameter dienen zur Abschätzung, wo die Antennen eine Serieresonanz haben. Der Port 1 gehört zur Monopolantenne und am Port 2 ist die Loopantenne angeschlossen. Die Abbildung 16 zeigt den gemessenen S-Parameter-Verlauf ohne Gehäuse.

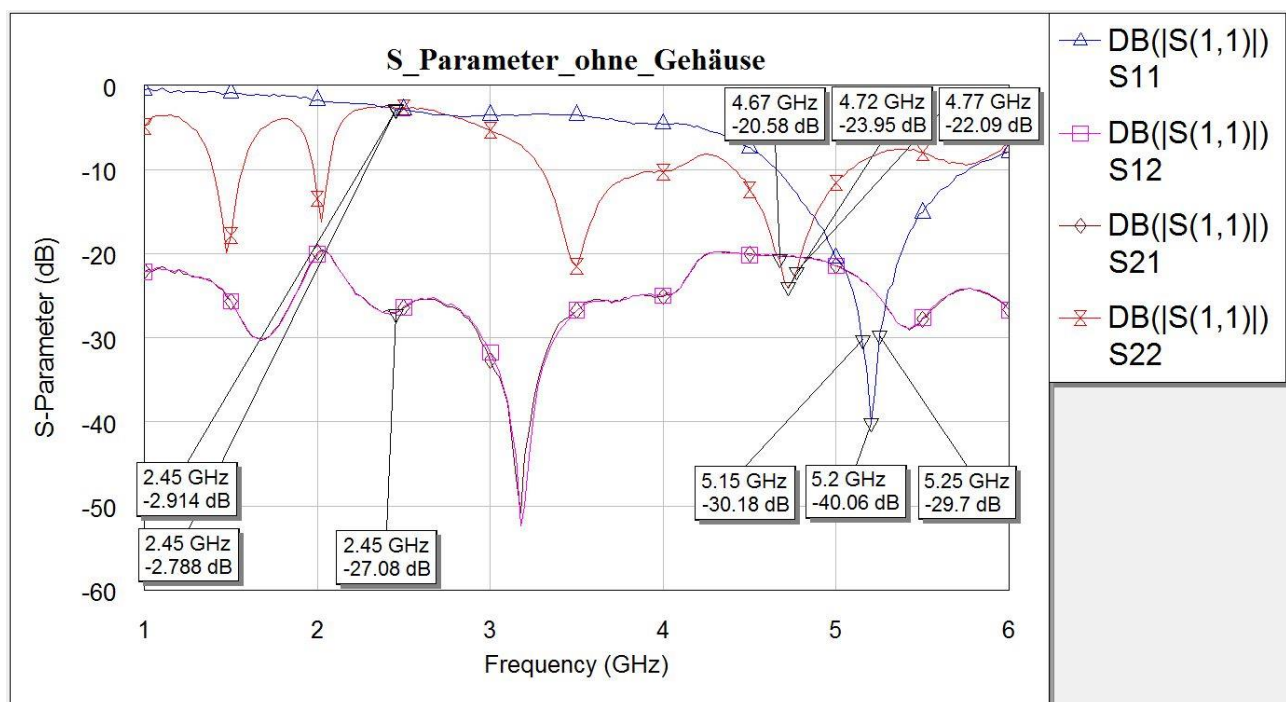


Abbildung 16: gemessene S-Parameter ohne Gehäuse

Blau) S11: Reflektionskoeffizient der Monopolantenne

Rot) S22: Reflektionskoeffizient der Loopantenne

Pink) S12: Kopplungsfaktor mit Loopantenne als Sendeantenne

Braun) S21: Kopplungsfaktor mit Monopolantenne als Sendeantenne

6.3.2 Z-Ebene

Die S-Parameter widerspiegeln gut angepasste Resonanzen. Diese sind bei der Messung um 2.75 GHz bei der Monopolantenne und um 2.27 GHz bei der Loopantenne verschoben. Bei der Kontrolle der Resonanzen in der Z-Ebene wird ersichtlich, dass bei der Frequenz 2.45 GHz ebenfalls Resonanzen liegen, die jedoch nicht an 50 Ω angepasst sind.

Die Abbildung 17 zeigt den Impedanzverlauf der Monopolantenne ohne Gehäuse.

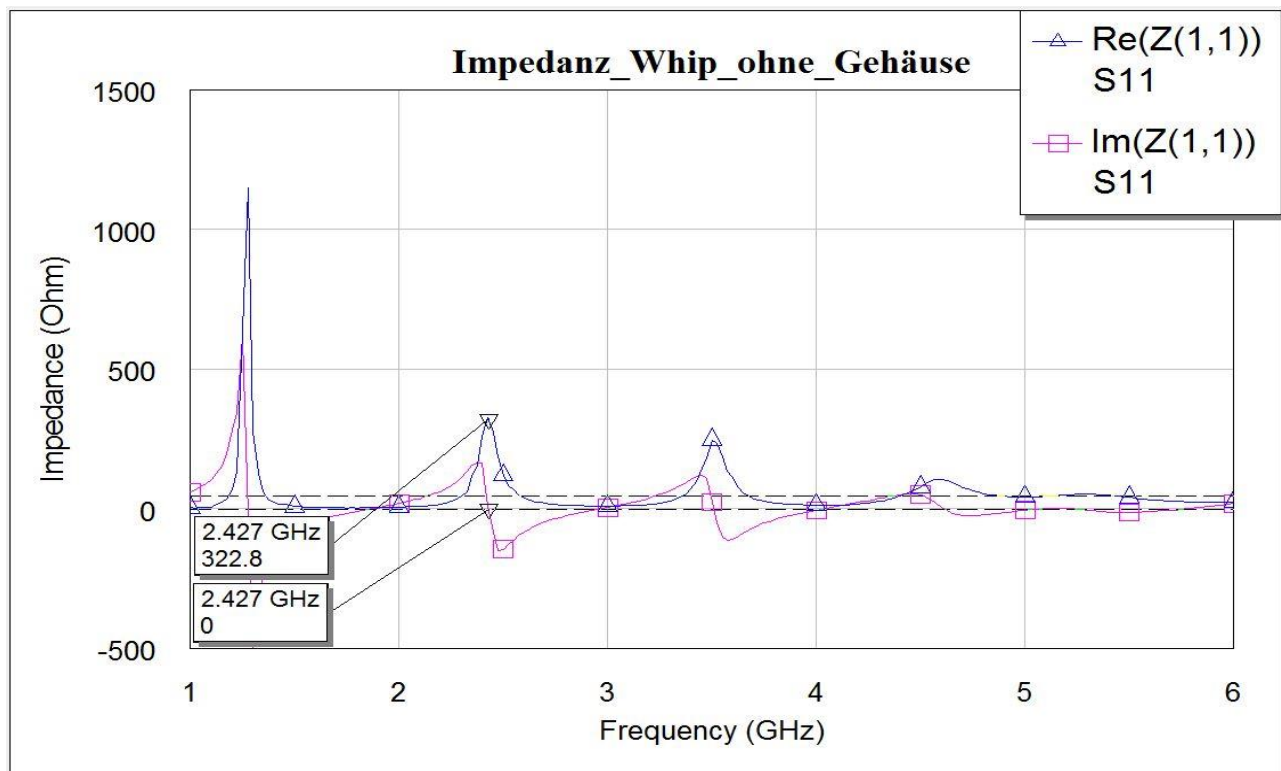


Abbildung 17: Impedanzverlauf Monopolantenne ohne Gehäuse

Der Imaginärteil einer Resonanz liegt bei 0 Ω . Bei der Messung ohne Gehäuse liegt diese Nullstelle bei der Frequenz 2.427 GHz. Bei dieser Frequenz liegt der Realanteil bei 322.8 Ω .

Die Abbildung 18 zeigt den Impedanzverlauf der Loopantenne ohne Gehäuse.

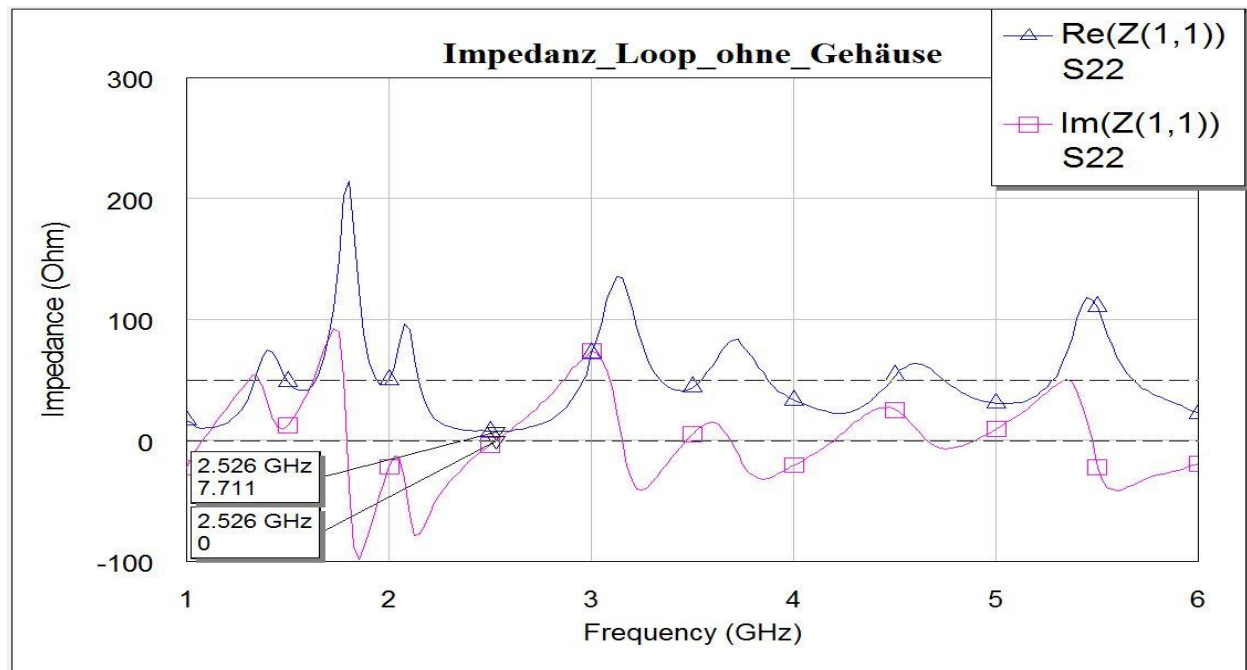


Abbildung 18: Impedanzverlauf Loopantenne ohne Gehäuse

Bei der Messung ohne Gehäuse liegt eine Nullstelle der Loopantenne bei der Frequenz 2.526 GHz. Bei dieser Frequenz liegt der Realanteil bei 7.711 Ω .

6.3.3 Abstrahlcharakteristik

Die Abbildung 19 zeigt die Farbcodes der folgenden Vergleiche zwischen den Abstrahlcharakteristiken. Der obere Farbcode gehört zur Simulation, der unter Farbcode gehört zu Messung.

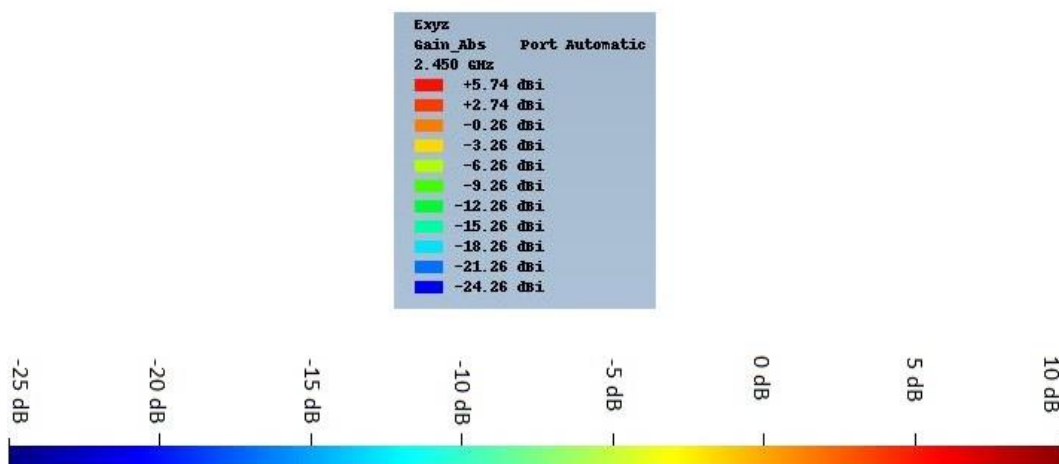


Abbildung 19: Farbcode

Die Abstrahlcharakteristiken der Monopolantenne zwischen der Simulation links und der Messung in der Mitte werden in der Abbildung 20 graphisch miteinander verglichen. Die Lage des Prints gegenüber der Charakteristik wird in der rechten Spalte gezeigt. Dargestellt wird der Antennengewinn in den drei Koordinatenachsen X, Y und Z.

Dabei werden nur die Charakteristik der beiden Antennen bei der Frequenz 2.45 GHz und ohne Gehäuse einander gegenübergestellt. Die Abstrahlcharakteristiken mit Gehäuse, sind im Anhang C.4 aufgeführt.

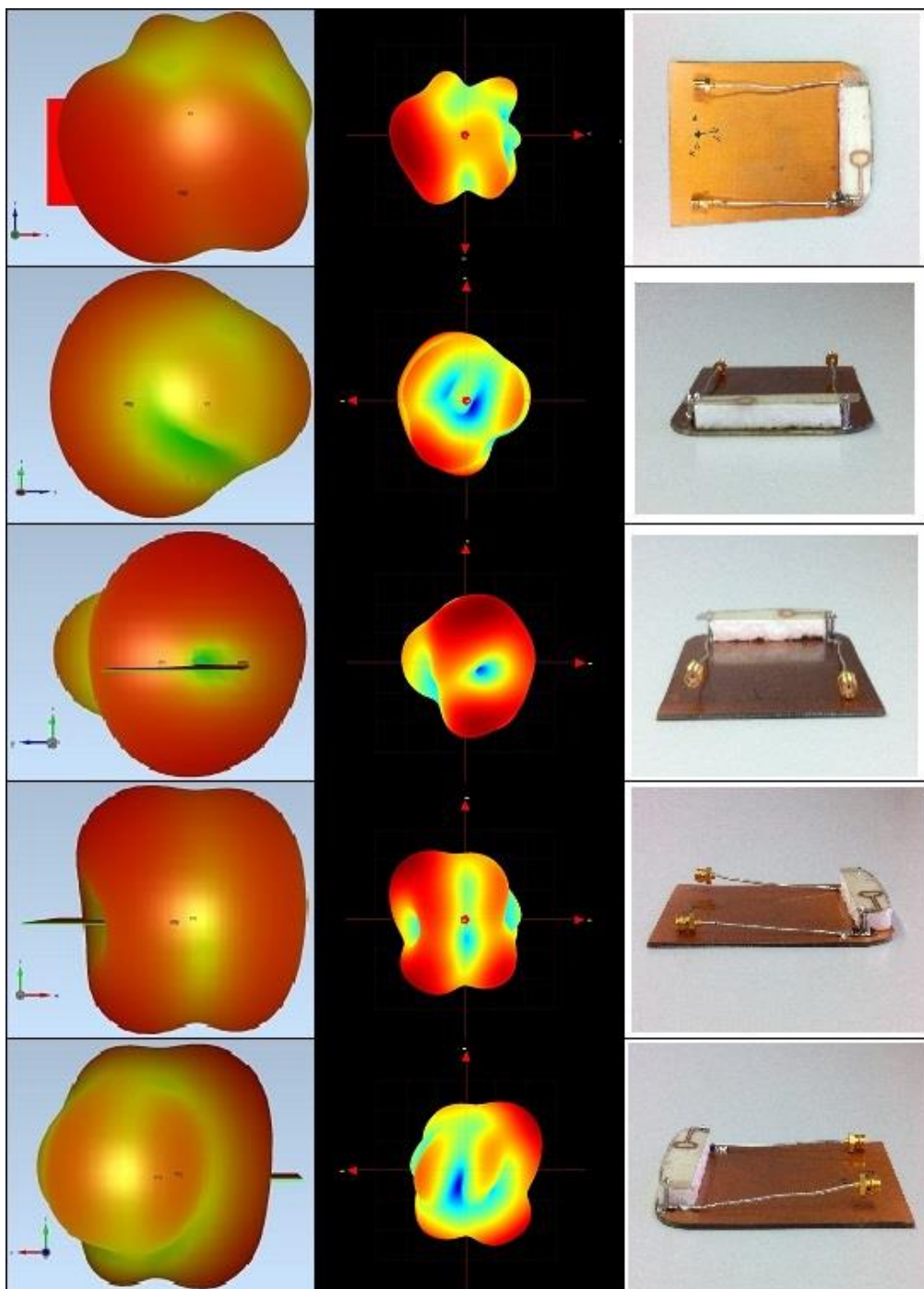


Abbildung 20: Vergleich der Monopolantenne

Die Abstrahlcharakteristiken der Loopantenne zwischen der Simulation links und der Messung in der Mitte werden in den Abbildung 21 graphisch miteinander verglichen. Dargestellt wird der Antennengewinn in den drei Koordinatenachsen X, Y und Z.

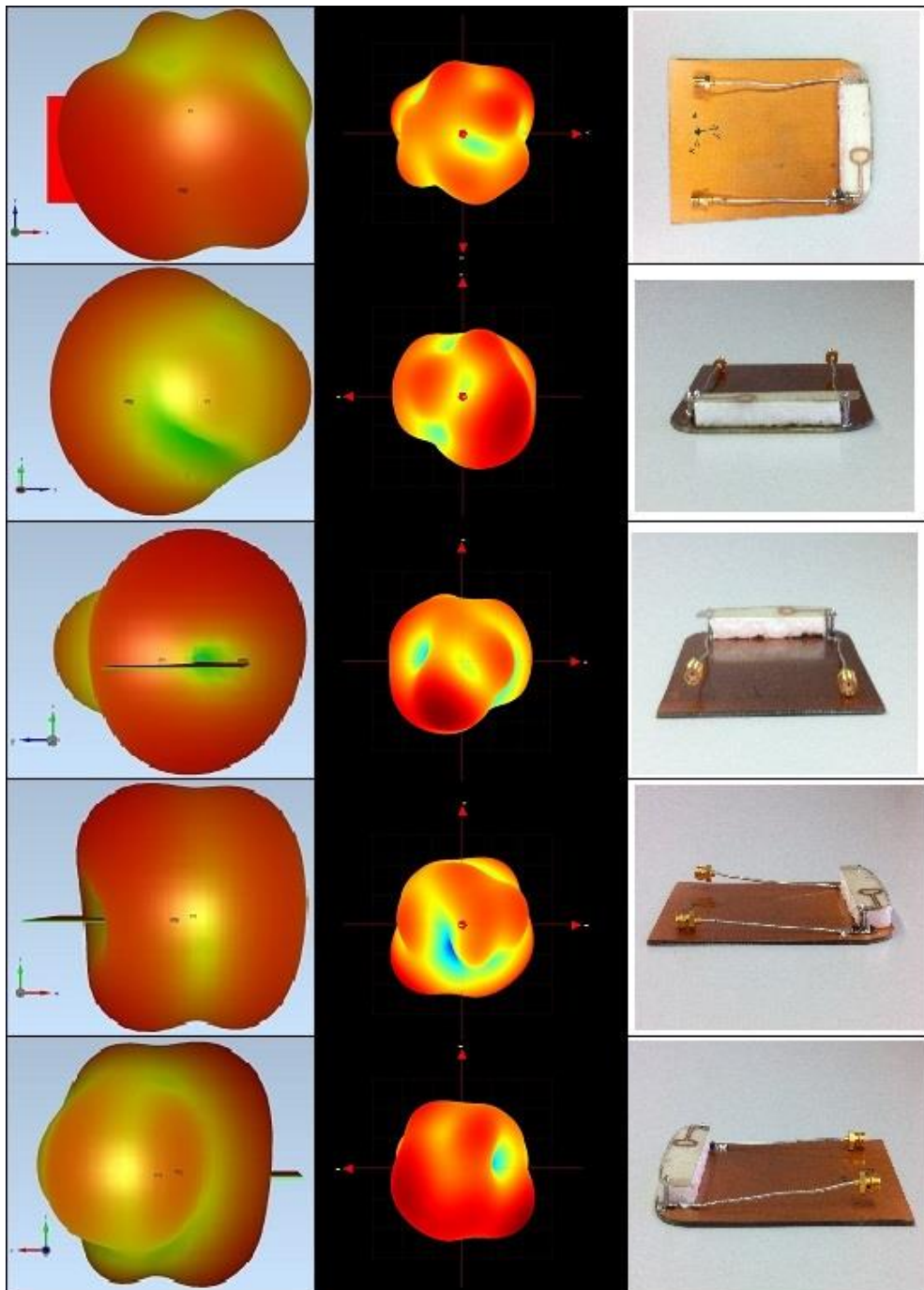


Abbildung 21: Vergleich der Loopantenne

Die beiden Abbildungen zeigen, dass die Abstrahlcharakteristik der Monopol- und der Loopantenne vom Simulationstool exakt gleich berechnet worden sind. Diese können aber nicht so exakt identisch sein. Die Messung der Probe bestätigt, dass die beiden Abstrahlcharakteristiken unterschiedlich sind.

7 Auswertung

Dieses Kapitel behandelt die Auswertungen und Vergleiche zwischen der Theorie, der Simulation und der Messung der Antennen.

7.1 Monopolantenne

Die Theorie besagt, dass eine $\lambda/4$ -Leitung einer Serieresonanz entspricht. Die Gesamtlänge der Monopolantenne vom Einspeisepunkt bis zur Spitze entspricht dieser $\lambda/4$ -Leitung von 30.5 mm. In der Simulation wird deutlich, dass bei der Frequenz 2.45 GHz eine Parallelresonanz entsteht. Dies zeigt die Abbildung 22.

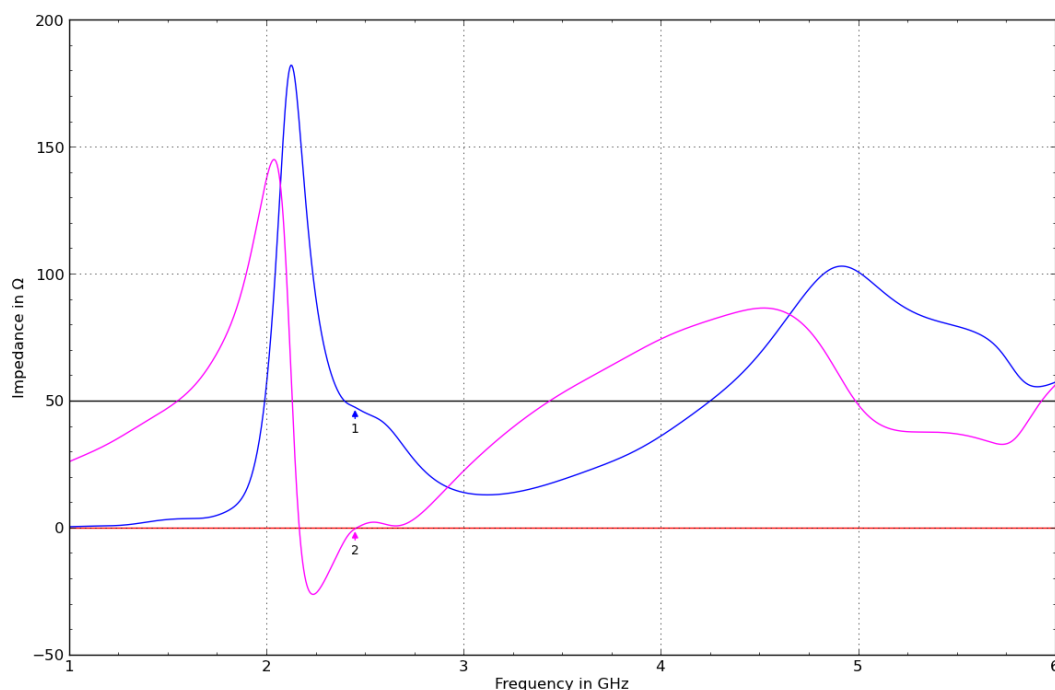


Abbildung 22: simulierte Z-Ebene der Monopolantenne

Blau) Realteil der Monopolantenne

Pink) Imaginärteil der Monopolantenne

In der Abbildung 17 auf der Seite 22 ist eine Frequenzverschiebung der Serieresonanz von ca. 500 MHz zu erkennen. Diese auftretende Frequenzverschiebung ist auf die vorhandene Diskontinuitäten zurückzuführen, die bei offenen Leitungen und verschiedenen Leitungsübergängen auftreten. Durch entsprechende Anpassung der Antennenlänge kann die Frequenzverschiebung kompensiert werden. [12]

Ebenfalls möglich ist es, die, bei der gewünschten Mittelfrequenz von 2.45 GHz, entstandene Parallelresonanz, mit einem LC-Netzwerk, wie sie im Kapitel 8.1 beschrieben wird, an die 50 Ω -Leitung angepasst werden.

Die Abstrahlcharakteristik kann nicht aus der Theorie abgeleitet werden. Es müssen die äusseren Einflüsse im Nahfeldbereich der Antenne beachtet werden.

Die Charakteristik der Messung kommt sehr nahe an die simulierte Abstrahlcharakteristik. Die abgestrahlte Energie gegenüber einem isotropen Strahler ist noch zu klein. Nach der ohmschen Anpassung bei der Sendefrequenz wird der Reflektionskoeffizienten bei dieser kleiner. Dies führt dazu, dass mehr Energie von der Antenne abgestrahlt werden kann und sich so die Leistung der Antenne erhöhen lässt.

7.2 Loopantenne

In der Theorie strahlt die Loopantenne bei einer Länge von λ . Dies entspricht einer Gesamtlänge von 122 mm. Die Resonanz bei einer Länge von λ entspricht einer Parallelresonanz, wie sie in der Abbildung 23 dargestellt ist.

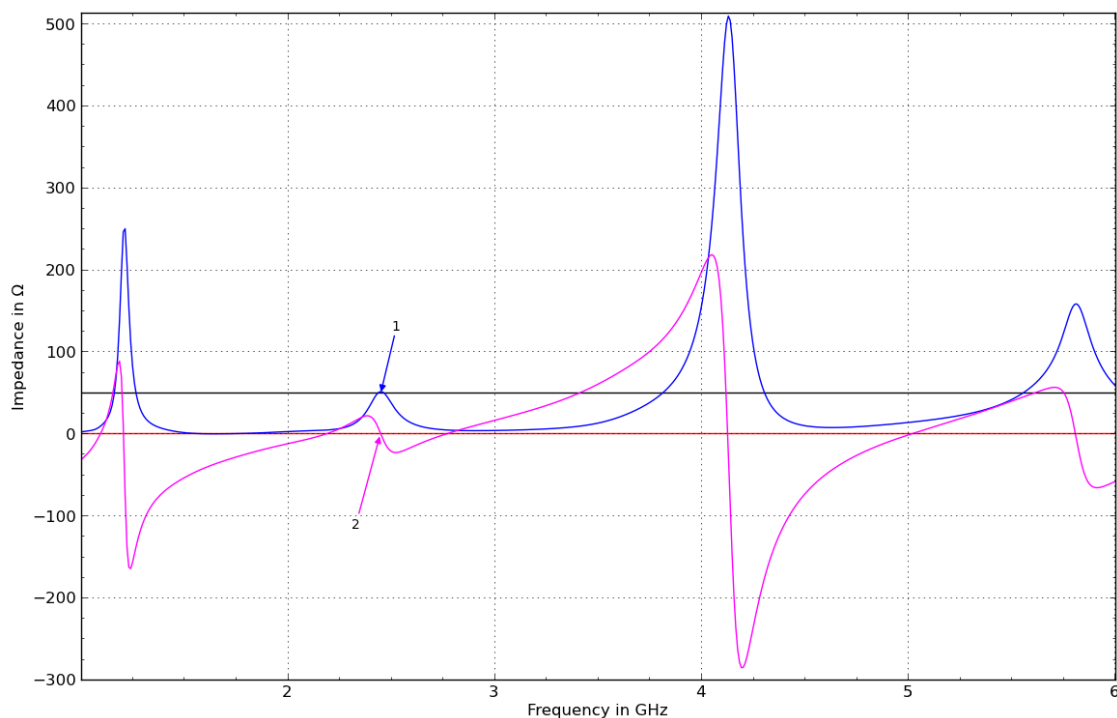


Abbildung 23: simulierte Z-Ebene der Loopantenne

Blau) Realteil der Loopantenne

Pink) Imaginärteil der Loopantenne

Die Resonanzen der Loopantenne bei der Sendefrequenz sind ebenfalls um ca. 500 MHz verschoben. Dies ist, wie bei der Monopolantenne, auf die vorhandene Diskontinuität der Leiterübergänge zurück-

zuführen. Die Abbildung 18 auf Seite 23 zeigt, dass die Resonanz bei 2.45 GHz eine Seriersonanz ist. In der Simulation wird diese Frequenz parallel erregt. Diese Frequenzverschiebung kann mit der Anpassung der physikalischen Länge der Antenne angepasst werden. Um die ohmsche Impedanz des Serienschwingkreises der Loopantenne an die Leitung anzupassen, muss diese mit einem LC-Netzwerk angehoben werden.

Dass dem Simulationstool nicht ohne Hinterfragungen vertraut werden kann, zeigt der Vergleich zwischen der simulierten und gemessenen Abstrahlcharakteristik der Loopantenne. Die simulierte Charakteristik der Loopantenne entspricht exakt der Charakteristik der Monopolantenne. Die Messung zeigt auf, dass diese Simulationen nicht stimmen. Weitere Fehler der Simulationssoftware werden im Anhang D aufgezeigt.

Nach der Anpassung der Leitungen sollten die gemessenen S-Parameter der Antennen der S-Parameter der Simulation gleichen, wie sie in der Abbildung 24 gezeigt werden.

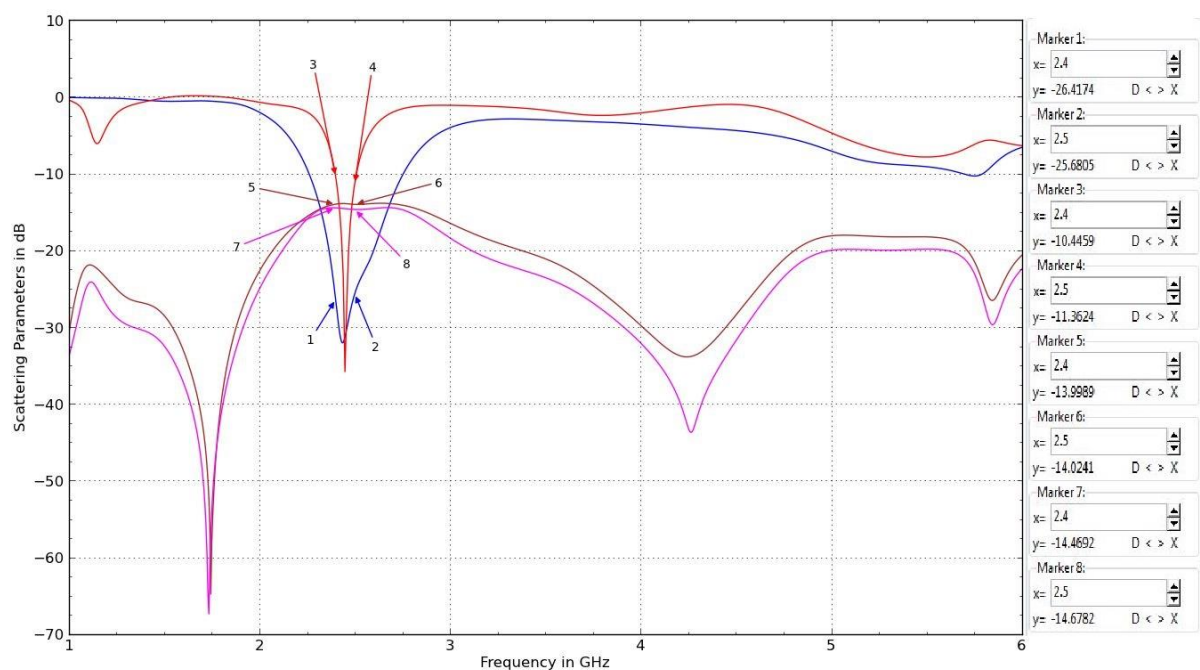


Abbildung 24: simulierte S-Parameter

Blau) S11: Reflektionskoeffizient der Monopolantenne

Rot) S22: Reflektionskoeffizient der Loopantenne

Pink) S12: Kopplungsfaktor mit Loopantenne als Sendeantenne

Braun) S21: Kopplungsfaktor mit Monopolantenne als Sendeantenne

Für die Simulation des Reflektionverlaufs der Loopantenne werden zwei Ports für eine symmetrische Speisung eingesetzt. Für die Kopplungsfaktoren sind die beiden Ports durch ein Port ersetzt worden.

7.3 Spezifikationen

Die Messungen des ersten Antennenentwurfs zeigen, dass die Resonanzfrequenz korrekt ist, nicht aber die ohmsche Anpassung. Werden die gemessenen Antennengewinne in den Abbildung 20 und 21 mit dem Farbcode ausgewertet, wird erkannt, dass die Monopolantenne einige blaue Stellen aufweist. Dies bedeutet ein Antennengewinn von -15 dB und kleiner. Dieser ist zu klein gegenüber dem im Linkbudget berechneten Antennengewinn. Die Antenne muss angepasst werden, damit mehr Leistung in die Antenne gebracht werden kann, welche von dieser nicht wieder reflektiert sondern abgestrahlt wird. Dies kann erst nach einem weiteren Release ausgewertet werden. Die Loopantenne hat auch hellblaue Stellen in der Abstrahlcharakteristik, was einen Antennengewinn von -10 dB bis -15 dB bedeutet. Dieser liegt oberhalb des minimal geforderten Antennengewinns. Die dunkelblauen Stellen sind nahe bei der Massefläche oder unterhalb. Da die Sensoren oberhalb von Gerät angebracht sind, können diese vernachlässigt werden. Nach der Anpassung wird diese Charakteristik noch verbessert. Auch diese Verbesserung kann erst mit dem neuen Release bestätigt werden.

Die Abstrahlung nach oben ist bei der Loopantenne rund. Dies zeigt das erste Bild der Messung der Abbildung 21 auf Seite 25. Bei der Monopolantenne muss bei der zweiten Produktion die Form verändert werden, damit die Abstrahlung homogener wird.

Damit das Gerät nicht exakt ausgerichtet auf dem Oberschenkel platziert werden muss, wird eine zirkular polarisierte Antenne verlangt. Diese zirkulare Polarisation kann aus zeitlichen Gründen nicht realisiert werden. Die Antennen, welche entwickelt wurden, sind linear polarisiert.

7.4 Risiken

Im Verlauf der Arbeit sind mögliche Risiken aufgefallen:

- Durch die Bedienung der Tastatur mit den Fingern entsteht eine kapazitive Kopplung im Nahfeld der Antenne. Dies führt zu einer Frequenzverschiebung.
 - Lösung: Da die Bedienung des Geräts ausschliesslich am Boden statt findet, hat diese keinen Einfluss auf die Kommunikation während des Fluges.
- Durch die lineare Polarisation und der Abstrahlcharakteristik könnte es vorkommen, dass die Verbindung zwischen Gerät und Sensor kurzzeitig unterbrochen wird, wenn sich der Pilot in der Luft bewegt und den Oberschenkel mit dem Gerät anders hält.
 - Lösung: Die Firma Flytec bestätigte, dass die Kommunikation nicht mit einer hochausfallsicheren Verbindung sichergestellt werden muss. Die Daten werden bei Verbindungsunterbruch kurzzeitig gespeichert und später gesendet.

8 Ausblick

In einem weiteren Release der Antennen muss die Mittelfrequenz der Loopantenne leicht herabgesetzt werden. Die Resonanzfrequenz der Monopolantenne liegt bereits bei 2.45 GHz. Wenn die Resonanzfrequenzen am gewünschten Ort liegen, muss die ohmsche Anpassung gemacht werden. Dazu werden weitere Simulationen, Prints und Messungen benötigt.

8.1 LC-Anpassungsnetzwerk

Die Anpassung von reellen Widerständen wird mit einem verlustfreien LC-Netzwerk realisiert. Die Abbildung 25 zeigt den Aufbau eines solchen Netzwerkes.

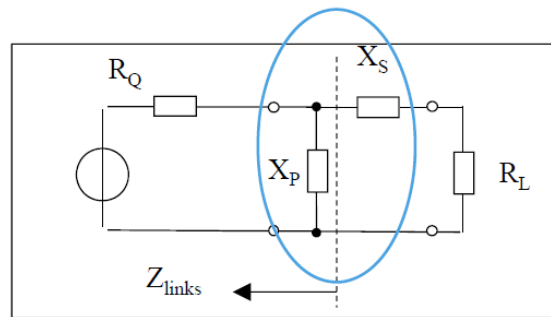


Abbildung 25: Anpassungsnetzwerk [13]

Die Grösse der Bauteile wird mit den Formeln unten berechnet.

Berechnung von Z_{links} :

$$Z_{links} = R_{links} + jX_{links} = \frac{R_Q * X_p^2 + jR_Q^2 * X_p}{R_Q^2 + X_p^2}$$

X_p so wählen, dass der Realteil gleich wird:

$$R_{links} = R_L$$

Resultierender Blindwiderstand X_{links} mit X_s kompensieren:

$$X_{links} = -X_s$$

Wichtig ist zu beachten, dass der Blindwiderstand X_p zum grösseren Widerstand geschaltet wird. [13]

Bei der Monopolantenne ist dies die Antenne, bei der Loopantenne die Zuleitung.

8.1.1 Reaktanzen der Monopolantenne

Bei der Monopolantenne entspricht der ohmsche Widerstand der Antenne dem R_Q , weil dieser 322.8Ω beträgt. Die Reaktanz X_p wird daher parallel zur Antenne platziert. R_L entspricht den 50Ω der Zuleitung.

Gegeben: $R_Q = 322.8 \Omega$ Gesucht: $X_p = ?$
 $R_L = 50 \Omega$ $X_s = ?$

$$R_{links} = Re \left\{ \frac{R_Q * X_p^2 + jR_Q^2 * X_p}{R_Q^2 + X_p^2} \right\} = 50 \Omega$$

$$\Rightarrow X_p = -138.2 \Omega$$

$$\Rightarrow X_p = -\frac{1}{\omega * C} \Rightarrow C = 470 \text{ fF}$$

$$X_{links} = Im \left\{ \frac{R_Q * X_p^2 + jR_Q^2 * X_p}{R_Q^2 + X_p^2} \right\} = -X_s = 116.8 \Omega$$

$$\Rightarrow X_s = \omega * L \Rightarrow L = 7.6 \text{ nH}$$

Als Parallelreaktanz bei der Monopolantenne kann eine HF-taugliche Kapazität mit 470 fF und als Seriemarktanz eine HF-taugliche Induktivität mit 7.6 nH eingesetzt werden.

8.1.2 Reaktanzen der Loopantenne

Bei der Loopantenne entspricht der Leitungswiderstand dem R_Q , weil dieser grösser ist als der ohmsche Widerstand der Antenne. Die Reaktanz X_p wird daher parallel zur Zuleitung platziert. R_L entspricht den 7.7Ω der Antenne.

Gegeben: $R_Q = 50 \Omega$ Gesucht: $X_p = ?$
 $R_L = 7.7 \Omega$ $X_s = ?$

$$R_{links} = Re \left\{ \frac{R_Q * X_p^2 + jR_Q^2 * X_p}{R_Q^2 + X_p^2} \right\} = 7.7 \Omega$$

$$\Rightarrow X_p = -21.3 \Omega$$

$$\Rightarrow X_p = -\frac{1}{\omega * C} \Rightarrow C = 3 \text{ pF}$$

$$X_{links} = Im \left\{ \frac{R_Q * X_p^2 + jR_Q^2 * X_p}{R_Q^2 + X_p^2} \right\} = -X_s = 18 \Omega$$

$$\Rightarrow X_s = \omega * L \Rightarrow L = 1.2 \text{ nH}$$

Als Parallelreaktanz bei der Loopantenne kann eine HF-taugliche Kapazität mit 3 pF und als Seriemarktanz eine HF-taugliche Induktivität mit 1.2 nH eingesetzt werden.

9 Schlussdiskussion

Die Einarbeitung in den theoretischen Teil wurde ganz zu Beginn der Arbeit vernachlässigt. Ich konnte das Gelesene noch nicht direkt in eigenen Simulationen anwenden. Im weiteren Verlauf der Arbeit konnte ich vermehrt auf die Theorie zurückgreifen.

Das Simulationstool Empire XCcel war für mich völlig neu. Die Einarbeitung in die Software machte ich mit den vorhandenen Tutorials. Als ich einige Tutorials durchgespielt hatte, begann ich mit Hilfe der Theorie eigene Beispielantenne aufzubauen. Dadurch lief der Umgang mit dem Simulationstool immer besser.

Bereits ab dem ersten Funktionsmuster übernahm ich die Abmessungen des Originalprints. Auf diese Musterantennen konnte ich immer weitere Antennen modellieren. Ein PIFA-Funktionsmuster bereite ich dann soweit auf, dass ich dieses in die Produktion gegeben konnte. Die Aufbereitung für den Laser war mit dem EMPRIE XCcel aufwendiger, als mit dem Altium Designer, welchen ich bereits kannte.

Das gefertigte Muster konnte ich gleich ausmessen, nachdem die Firma Satimo ihr Messsystem fertig installiert hatte. Mit dieser Antenne und einer weiteren Antenne in einem USB-Gehäuse machte ich meine ersten Messungen mit dem neuen Messsystem. Die Messung des Funktionsmusters stimmte mit der Simulation, bis auf eine Frequenzverschiebung von 200 MHz und der Verbreiterung der Bandbreite, überein. Beide Abweichungen von der Messung zu Simulation konnten mit der Theorie erklärt werden. Die Frequenzverschiebung der hergestellten PIFA kann auf die offene Leitung zurückgeführt werden und die Bandbreitevergrößerung auf das verlustbehaftete Material, welches in der Simulation als verlustfrei angenommen wurde.

Das Messsystem verwendete ich gegen Ende der Arbeit wieder. Ich liess meinen aktuellen Print produzieren und habe diesen nach der Fertigung ausgemessen.

Das in der Aufgabenstellung geforderte Redesign des Funktionsmusters und deren weiteren Tests konnten aus zeitlichen Gründen nicht mehr durchgeführt werden. In dieser Arbeit werden allerdings im weiteren Vorgehen bereits Bauteilberechnungen für ein Redesign gemacht.

10 Reflektion

Projekt: In diesem gab es eine sehr lange Simulationsphase, in welchem die verschiedenen Antennen simuliert wurden. Die einzelnen Simulationen dauerten lange. Besonders gegen Ende der Arbeit, als das Tool zwei Antennen auf einem abgesetzten Print berechnen musste, verging viel Zeit, in der ich nichts Produktives erledigen konnte. Aus diesem Grund konnte ich kein Redesign der Antenne erstellen und so die Arbeit richtig abschliessen.

Interessant zu sehen war, wie gut die erste Musterantenne mit der Simulation übereinstimmte. Aber auch, dass bei spezielleren Antennengebilde die Messung stärker von der Simulation abweichen kann.

Persönlich: Die Arbeit im Bereich der Hochfrequenztechnik hat mir sehr viel Freude bereitet. Einen Teil des, in der EMF-Blockwoche Gelernten, konnte ich in dieser Arbeit bereits anwenden.

Weniger gut war die lange Simulationsphase, in der ich nur am Laptop Parameter anpasste und nichts Praktisches ausmessen konnte.

11 Anhang

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	1
A Aufgabenstellung.....	1
B Projektplan.....	3
C Messdaten mit Gehäuse.....	6
C.1 S-Parameter	6
C.2 Z-Ebene	7
C.3 Smith-Chart	8
C.4 Abstrahlcharakteristik mit Gehäuse.....	9
D Fehlererscheinungen Simulationstool	11

12 Verzeichnisse

In diesem Kapitel werden die Verzeichnisse aufgeführt.

Literaturverzeichnis

In der Tabelle 2 werden im Dokument verwendetet Abkürzungen ausgeschrieben.

Tabelle 2: Literaturverzeichnis

[1]	Gleitschirmfliegen	http://de.wikipedia.org/wiki/Gleitschirmfliegen , 21.05.2014
[2]	Aufgabenstellung	Prof. Joss, Marcel (14.02.2014): Diplomarbeit im Fachbereich Elektrotechnik, Entwurf einer Kompaktantenne, Aufgabenstellung
[3]	Resonanzerscheinung	Prof. Joss, Marcel (2013): Mikrowellentechnik, Leitungstheorie, S. 22
[4]	Linkbudget	http://de.wikipedia.org/wiki/Leistungs%C3%BCbertragungsbilanz , 25.02.2014
[5]	Freiraumdämpfung	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2012): Einführung in die Nachrichtentechnik, Kapitel 2 Übertragungskkanäle, S. 51+52
[6]	Dämpfung durch Körper	Boschung, Patrick (Juni 2012): Bachelor Diplomarbeit FS12 „2.45 GHz Antenne“, S. 21
[7]	Empfangs-IC	NORDIC SEMICONDUCTOR (Juni 2010): nRF24AP2, Product Specification v1.2, S. 8
[8]	Nah-/Fernfeld	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2012): Einführung in die Nachrichtentechnik, Kapitel 2 Übertragungskkanäle, S. 23+24
[9]	Elektromagnetische Schirmung	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2012): Einführung in die Nachrichtentechnik, Kapitel 3 Elektromagnetische Schirmung, S. 60-63
[10]	Antennenfamilien	L. Jofre, M. Martinez, R. Serrano, G. Roqueta (März 2012) : Handbook on Small Antennas, Kapitel 2.3 Antenna Families. 1.Auflage. Brüssel: EurAAP
[11]	HF-Verhalten diskreter Bauteile	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2013): Einführung in die Mikrowellentechnik, Einleitung, S. 6
[12]	Frequenzverschiebung	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2013): Einführung in die Mikrowellentechnik, Schaltungstechnik mit Mikrostreifenleiter, S. 11
[13]	LC-Anpassungsnetzwerk	Prof. Joss, Marcel (Herbstsemester 2012): Einführung in die Mikrowellentechnik, Schaltungstechnik mit Streifenleitung, S. 18

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Linkbudget.....	6
Tabelle 2: Literaturverzeichnis	35

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Platzierung des Gerätes	3
Abbildung 2: Resonanzerscheinung [3]	5
Abbildung 3: Ersatzschaltbild einer Antenne.....	7
Abbildung 4: Unterschied Monopol/Dipol	9
Abbildung 5: S11 PILA	11
Abbildung 6: Z-Ebene PILA	11
Abbildung 7: 3D-Modell PIFA.....	12
Abbildung 8: ILA inkl. Via.....	13
Abbildung 9: HF-Verhalten diskreter Bauteile [11]	14
Abbildung 10: aktueller Print.....	14
Abbildung 11: Empire XCcel.....	15
Abbildung 12: Stromverteilung bei aktiver Monopolantenne	17
Abbildung 13: Messaperatur	18
Abbildung 14: Messsystem mit Rack und Messaperatur.....	19
Abbildung 15: Netzwerkanalyser mit fertigem Print	20
Abbildung 16: gemessene S-Parameter ohne Gehäuse.....	21
Abbildung 17: Impedanzverlauf Monopolantenne ohne Gehäuse	22
Abbildung 18: Impedanzverlauf Loopantenne ohne Gehäuse	23
Abbildung 19: Farbcode.....	23
Abbildung 20: Vergleich der Monopolantenne	24
Abbildung 21: Vergleich der Loopantenne.....	25
Abbildung 22: simulierte Z-Ebene der Monopolantenne	26
Abbildung 23: simulierte Z-Ebene der Loopantenne.....	27
Abbildung 24: simulierte S-Parameter	28
Abbildung 25: Anpassungsnetzwerk [13]	30