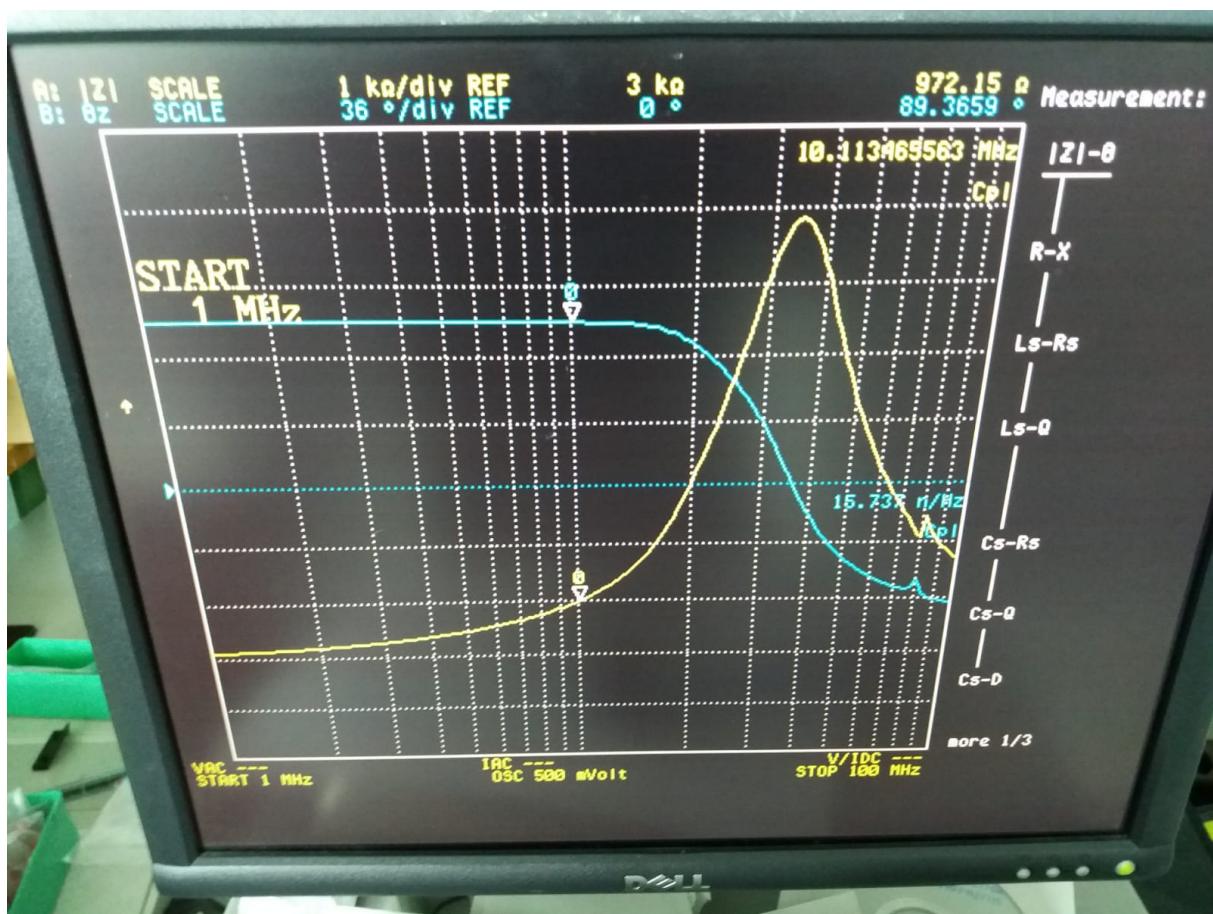


Balun

Bericht hf1

Windisch, 6. Februar 2019

**Hochschule**

Hochschule für Technik - FHNW

Studiengang

Elektro- und Informationstechnik

Autor

Adrian Annaheim und Alexander Stutz

Betreuer

Peter Niklaus

Version

1.0

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	1
2	Grundlagen	3
2.1	Spannungsbalun	3
2.2	Strombalun	3
2.2.1	Guanella-Balun	4
3	Dimensionierung des Baluns	5
3.1	Ersatzschaltung	5
3.2	Die Kernfrage	7
3.3	Windungszahl	8
3.4	Draht oder Litze?	9
4	Realisierung	10
5	Validierung	12
5.1	Impedanzanpassung	12
5.2	Symmetrische Ströme	14
6	Erkenntnisse	16
7	Schlusswort	17
	Literatur	18

1 Problemstellung

In der HF-Technik kommt es sehr oft zur Situation, in welcher zwei Komponenten miteinander verbunden werden. Dieses auf den ersten Blick simple Vorhaben, kann einige Probleme bereiten. Haben die Komponenten unterschiedliche Impedanzen, spricht man von Fehlanpassung und es treten unerwünschte Reflexionen in der Leitung auf. Diese führen zu Verlusten und Verzerrungen des Signals. In diesem Bericht wird nun folgende Ausgangslage genauer betrachtet:

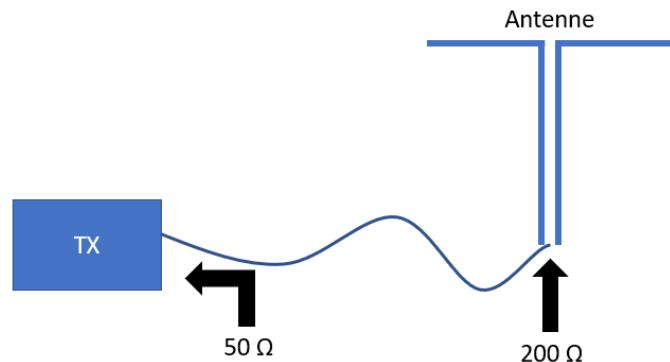


Abbildung 1.1: Ausgangslage Quelle an Antenne

Eine 50Ω -Quelle wird an eine 200Ω -Dipol-Antenne mit einer Arbeitsfrequenz von 20 MHz angeschlossen. Schliesst man die Antenne direkt an die Quelle wie in Abbildung 1.1, kommt es zur Fehlanpassung und den erwähnten Effekten. Die Impedanzanpassung ist jedoch nicht die einzige Herausforderung dieser Konstellation.

Weil nur die wenigsten Dipol-Antennen symmetrisch sind, fliessen Gleichtakt-Ausgleichsströme auf dem Außenmantel der Leitung. Dadurch strahlt die Leitung ab und empfängt Störungen. Um diesen Sachverhalt genauer zu verstehen, betrachten wir zuerst eine ideale Dipol-Antenne.

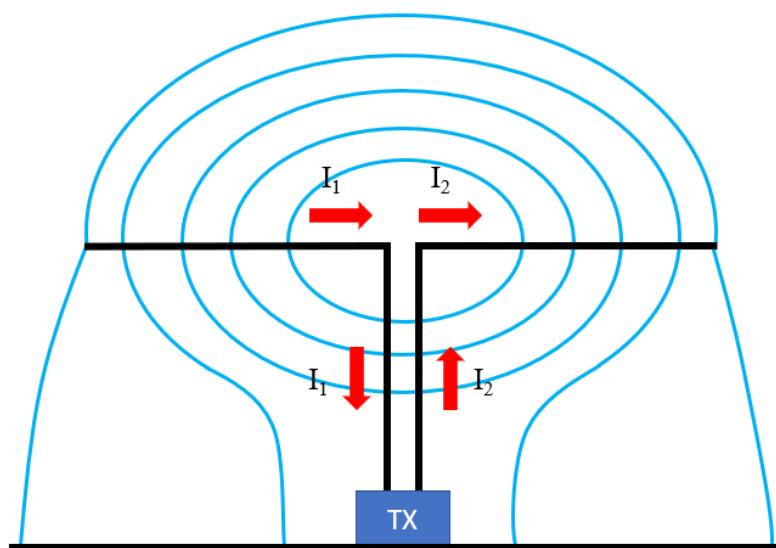


Abbildung 1.2: Ströme und Felder bei einer idealen Dipol-Antenne

Sind beide Dipoläste exakt symmetrisch, sind die Impedanzen der einzelnen Äste gleich. Damit gilt für die Ströme $I_1 = -I_2$. Sind die Ströme im Kabel Betragsgleich und entgegengesetzt, heben sich die Felder auf und die Leitung strahlt nicht ab.

Abbildung 1.3 zeigt zum Vergleich die Felder wie sie in der Realität auftreten.

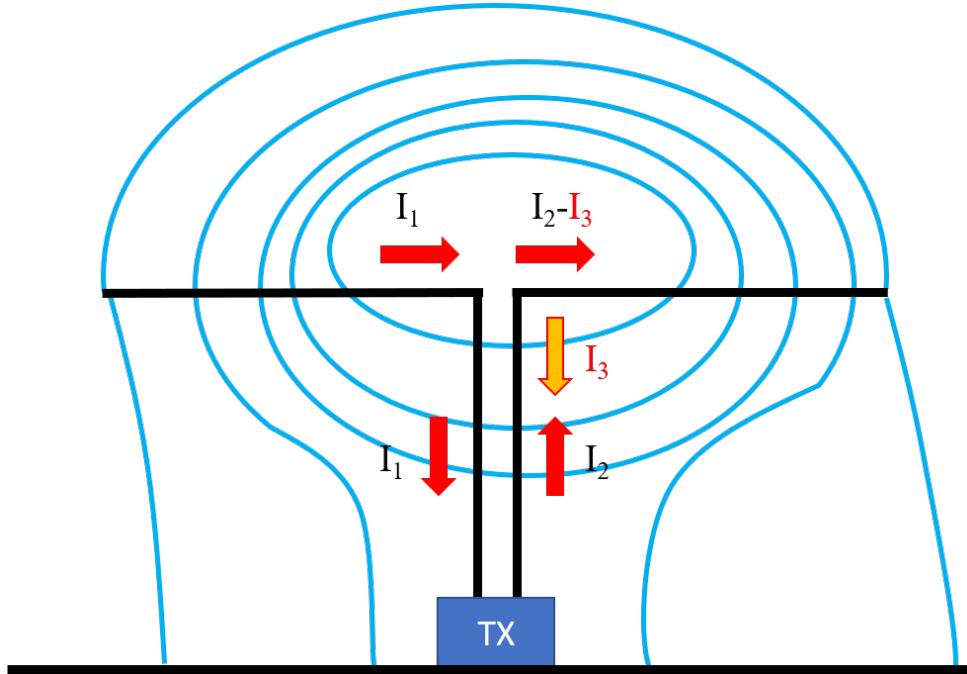


Abbildung 1.3: Ströme und Felder bei einer realen Dipol-Antenne

Durch die Potentialunterschiede der Dipoläste kommt es zu Gleichtakt-Ausgleichsströmen auf der Speiseleitung. Die Leitung selber strahlt dadurch ab und wirkt als Antenne.

Das Ziel dieses Berichts liegt nun darin, einen Guanella-Balun, welcher die Impedanzanpassung und die Gleichtaktstromunterdrückung vornimmt, zu dimensionieren und zu realisieren. [1]

2 Grundlagen

Sowohl das Problem der störenden Mantelwellen als auch die Fehlanpassung der Antenne an das Koaxialkabel lässt sich mittels eines sogenannten Baluns lösen. Ein solcher kann auf verschiedene Wege realisiert werden. Grundsätzlich unterscheidet man dabei zwischen Strom- und Spannungsbalun. Natürlich gibt es auch Hybride aus beiden Typen.

2.1 Spannungsbalun

Ein Spannungsbalun transformiert eine unsymmetrische in eine symmetrische Spannung. Dies kann zum Beispiel durch einen Transformator, so wie in Abbildung 2.1 gezeigt, erreicht werden. Falls die Antenne ideal symmetrisch ist, kann damit das nicht symmetrische Koaxialkabel an die Antenne angepasst werden. Ideal symmetrisch bedeutet, dass die beiden Dipole eine identische kapazitive und induktive Kopplung zur Erde haben. Durch das Windungszahlverhältnis kann eine beliebige Impedanzanpassung realisiert werden. Da die gesamte Energie, welche den Balun passiert, als Magnetfeld durch den Kern fliesst, muss dieser eine hohe Güte haben.

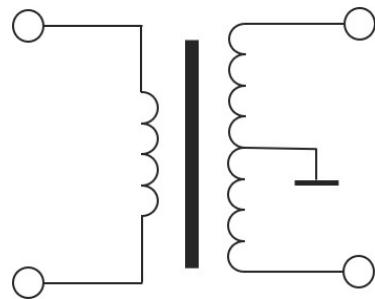


Abbildung 2.1: Einfaches Beispiel für einen Spannungsbalun

2.2 Strombalun

Ein Strombalun zwingt der Leitung einen symmetrischen Strom auf. Dabei werden die störenden Mantelwellen idealerweise unterdrückt. Ein einfaches Beispiel für einen Strombalun ist in Abbildung 2.2 ersichtlich. Da sich bei dieser Schaltung die beiden Magnetfelder für das gewünschte Gegentaktsignal aufheben, fliesst nur die Energie des störenden Signals als Magnetfeld durch den Kern. Dieser darf deshalb eine niedrigere Güte haben. Das kann sogar gewünscht sein, da dadurch das störende Gleichtaktsignal in Wärme umgewandelt wird und eine tiefe Güte ausserdem einen breitbandigen Betrieb ermöglicht. Aufgrund der Eigenschaft dass der Strombalun Mantelwellen zumindest dämpft, kann er auch bei nicht idealen Dipolantennen verwendet werden. Eine Impedanzanpassung ist bei der klassischen Schaltung in der Abbildung 2.2 nicht möglich.

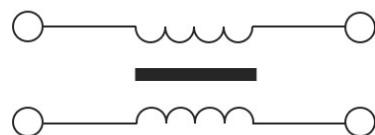


Abbildung 2.2: Einfaches Beispiel für einen Strombalun

2.2.1 Guanella-Balun

Der Guanella-Balun ist ein Spezialfall des Strombaluns, bei welchem durch Zusammenschalten von mehreren klassischen Stufen eine Impedanzanpassung für bestimmte Verhältnisse erreicht werden kann. In Abbildung 2.3 ist ein Beispiel mit zwei Stufen ersichtlich. Unter der Annahme, dass die beiden Strombalune ideal funktionieren, fliessen die mit orangen Pfeilen eingezeichnete Ströme. Auf der linken Seite addieren sich je zwei Strompfade zusammen, wodurch der Strom, welcher von links in den Balun fliesst, doppelt so gross ist, wie der Strom auf der rechten Seite. Da die Schaltung idealerweise keine Verlustbehafteten Komponenten enthält muss die Eingangsleistung gleich gross wie die Ausgangsleistung sein. Daraus folgt, dass die Spannung auf der rechten Seite doppelt so gross wie links sein muss. Das Impedanzverhältniss berechnet sich wie folgt:

$$\frac{Z_2}{Z_1} = \frac{U_2/I_2}{U_1/I_1} = \frac{2 \cdot U_1/I_2}{U_1/(2 \cdot I_2)} = 4 : 1 \quad (2.1)$$

Durch Hinzufügen von weiteren Stufen lassen sich folgende Verhältnisse realisieren:

$$\frac{Z_{out}}{Z_{in}} = n^2 : 1 \quad n \in \mathbb{N} \quad (2.2)$$

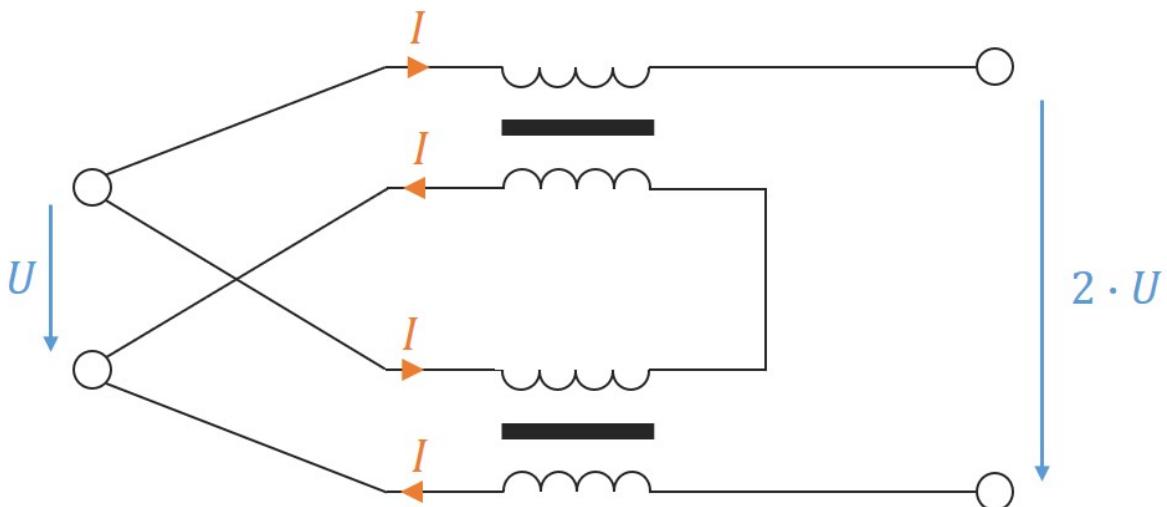


Abbildung 2.3: Ein Guanella-Balun mit zwei Stufen.

3 Dimensionierung des Baluns

Wie im Abschnitt ?? ersichtlich ist, hat ein Strombalun einige Vorteile gegenüber dem Spannungsbalun. Da vor allem die Anforderungen an den Kern kleiner sind und damit die Dimensionierung vereinfacht wird, haben wir uns für einen Strombalun entschieden. Da beim klassischen Strombalun keine Impedanzanpassung geschieht, diese jedoch für unsere Anwendung gewünscht wird, verwenden wir einen Guanella-Balun. Der Guanella-Balun ist ein Spezialfall, bei dem mehrere klassische Strombaluns zusammengeschaltet werden, so dass das Impedanzverhältnis von Ein-zu Ausgang der folgenden Formel entspricht: Dabei entspricht n der Anzahl klassischer Balunstufen.

$$\frac{Z_{out}}{Z_{in}} = n^2 \quad n \in \mathbb{N} \quad (3.1)$$

Um unsere 200Ω -Dipol-Antenne an das 50Ω -Koaxialkabel anzupassen benötigen wir dementsprechend einen Guanella-Balun mit zwei Stufen. Daraus resultiert ein Impedanzverhältnis von $1 : 4$.

3.1 Ersatzschaltung

Bei nachfolgender Betrachtung beschränken wir uns auf den klassischen Strombalun. Damit werden die Berechnungen (wie z.B. die Resonanzfrequenz) stark vereinfacht und können später auf den Guanella-Balun übertragen werden. In Abbildung 3.1 ist das Ersatzschaltbild einer realen Spule ersichtlich. Dies besteht aus einer idealen Induktivität L , aus zwei Widerständen, welche die Magnetisierungs- (R_{fe}) und Kupferverluste (R_{cu}) modellieren und einer parallelen Kapazität C_p für die Kapazität zwischen den einzelnen Windungen.

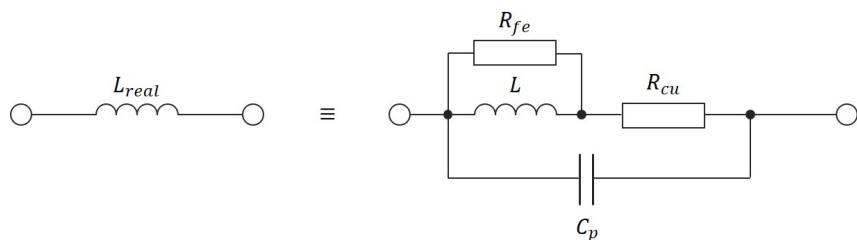


Abbildung 3.1: Ersatzschaltung einer realen Spule

Die Abbildung 3.2 zeigt den einfachen Strombalun. Die Induktivitäten können seriell betrachtet werden, was die nachfolgenden Berechnungen vereinfacht. Bei der Dimensionierung des Baluns, wird der Lastwiderstand R_L vernachlässigt und nur die Impedanz des Baluns ($2 \cdot L'$ in Serie) untersucht. Ist diese Impedanz viel grösser als der Lastwiderstand ($\gg 200\Omega$), so sperrt der Balun, was für Gleichtaktströme gewünscht wird. Ist die Impedanz kleiner als der Lastwiderstand ($\ll 200\Omega$), so wird das Signal durchgelassen. Dies wird im Gegentaktmodus angestrebt.

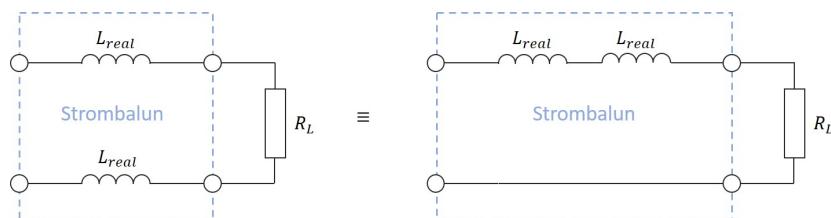


Abbildung 3.2: Einfacher Strombalun

Um das Verhalten eines Baluns zu beschreiben, macht es Sinn, zwischen Gleich- und Gegentaktmodi zu unterscheiden. Wir versuchen nun unseren Balun so zu dimensionieren, damit er bei der gewählten Arbeitsfrequenz von 20 MHz im Gleichtaktmodus sperrt, und im Gegentaktmodus leitet. Können wir dies gewährleisten, haben wir keine störenden Mantelwellen auf dem Koaxialkabel.

Gegentaktbetrieb

In Abbildung 3.3 ist ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Gegentaktbetrieb ersichtlich. Dies hat Gültigkeit unter der Annahme, dass sich die Felder der beiden Spulen komplett aufheben. In diesem Fall kann man die Spulen als Kurzschluss und die Magnetisierungsverluste als Unterbruch betrachten. Weil der Kupferwiderstand viel kleiner als der Lastwiderstand ist und somit gilt: $R_{cu} \ll R_L$, passieren Gegentaktströme praktisch ungehindert den Balun.

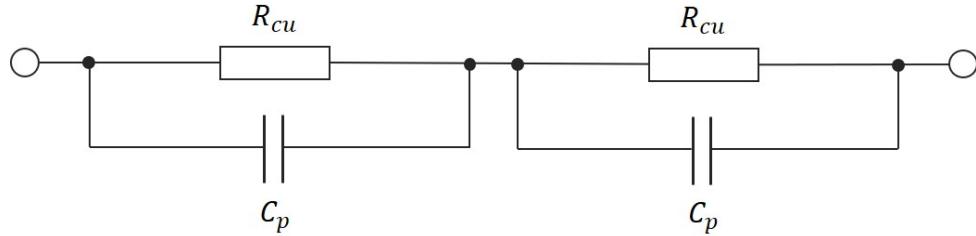


Abbildung 3.3: Situation im Gegentaktbetrieb

Gleichtaktbetrieb

In Abbildung 3.4 ist ein vereinfachtes Ersatzschaltbild für den Gleichtaktbetrieb dargestellt. In diesem Fall kann der Kupferwiderstand vernachlässigt werden. Die beiden Parallelschwingkreise, welche in Serie geschaltet sind, können zu einem einzelnen Parallelschwingkreis zusammengefasst werden. Da unser Ziel darin besteht, eine möglichst hohe Impedanz zu erreichen, wird dieser der Balun so dimensioniert, dass die Resonanzfrequenz im Arbeitspunkt zu liegen kommt. Aus den Grundformeln des Parallelschwingkreises, lassen sich folgende Formeln für den Balun ableiten.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_p}} \quad (3.2)$$

$$Q = 2 \cdot R_{FE} \cdot \sqrt{\frac{C_p}{4 \cdot L}} \quad (3.3)$$

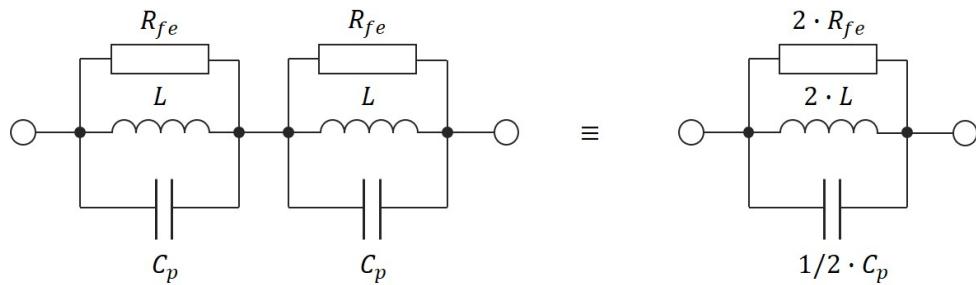


Abbildung 3.4: Situation im Gleichtaktbetrieb

3.2 Die Kernfrage

Damit sich die Felder im Gegentaktmodus aufheben, muss ein Kern mit hoher Permeabilität verwendet werden. Dadurch wird ein höherer Kopplungsfaktor zwischen den Spulen ermöglicht und gleichzeitig kann eine höhere Induktivität bei gleicher Windungszahl erreicht werden. In der Formel 3.3 ist ersichtlich, dass die Güte des Schwingkreises umgekehrt proportional zu den Magnetisierungsverlusten R_{FE} bei der Resonanzfrequenz ist. Verwendet man einen Kern mit hohen Magnetisierungsverlusten, wird der Balun breitbandiger, sperrt jedoch unerwünschte Mantelwellen weniger. Verwendet man einen Kern mit wenigen Verlusten, ist das Gegenteil der Fall. Für unsere Anwendung ist kein breitbandiger Balun gefordert, aber um das Wickeln der Spulen zu vereinfachen, verwenden wir einen eher breitbandigen Kern. Dies gibt uns einen Spielraum bei der Realisierung. Deshalb verwenden wir anstelle eines Eisenkerns einen Ferritkern. (Erster ermöglicht eine hohe Güte, bei geringer Bandbreite.)

Wir haben mit folgenden Kriterien nach einem Ferrit gesucht:

- Form: Toroid
- Material: Ferrit
- Permeabilität: möglichst hoch bei 20MHz und wenn möglich konstant

Weil der Werkstoff 4C65 gemäss Abbildung 3.5 bei 20MHz die höchste Permeabilität aufweist und diese auch ziemlich konstant ist, fiel die Wahl auf diesen Werkstoff.

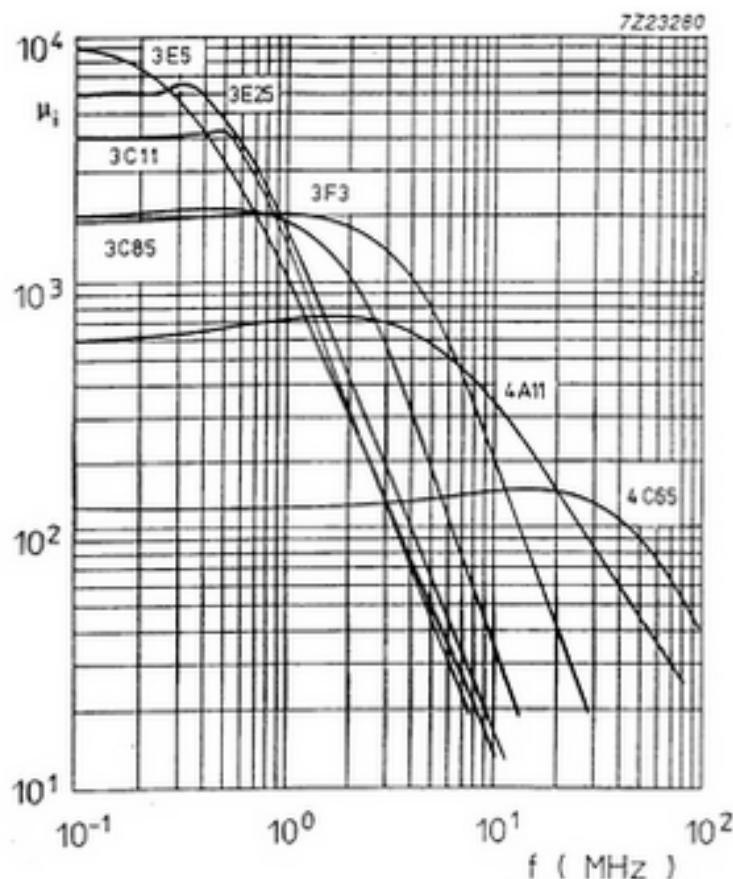


Abbildung 3.5: Permeabilität in Abhängigkeit der Frequenz verschiedener Werkstoffe

3.3 Windungszahl

Da der Kern nun bestimmt ist, gilt es die Windungszahl zu bestimmen. Mit der Anzahl Windungen soll die Resonanzfrequenz auf unsere Arbeitsfrequenz abgestimmt werden. Wie bereits erwähnt, ist die Resonanzfrequenz folgendermassen definiert:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C_p}} \quad (3.4)$$

Die Induktivität einer Toroidspule kann mit folgender Formel berechnet werden. Dabei ist N die Windungszahl, b die Höhe des Toroids, r_2 der Aussendurchmesser und r_1 der Innendurchmesser des Toroids.

$$L_{Toroid} = N^2 \cdot \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot b}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \quad (3.5)$$

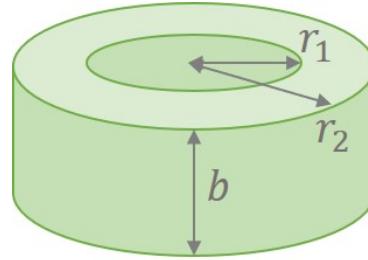


Abbildung 3.6: Geometrie Toroid

Für die Eigenkapazität C_p der Spule gibt es keine Eindeutige Formel. Wir haben deshalb versucht, diese mit starken Vereinfachungen zu berechnen. Dabei haben wir die runden Oberflächen zweier verdrillter Drähte als Plattenkondensatoren approximiert. Mit dem Korrekturfaktor $K1$ wird der Drahtdurchmesser auf die Plattenoberfläche abgebildet. Weil zwei Drähte nicht ideal aneinanderliegen, ist der Plattenabstand grösser als $2 \cdot d_I$. Um dem gerecht zu werden, wurde der Korrekturfaktor $K2$ eingeführt. Die dabei entstandene Formel ist nachfolgen ersichtlich. Dabei ist b wieder die Höhe des Toroids, N die Windungszahl, r_{cu} der Drahtradius und d_I die Isolationsdicke.

$$C_{Toroid} = \varepsilon \cdot 2\pi \cdot b \cdot N \cdot \frac{r_{cu} \cdot K_1}{d_I \cdot 2 \cdot K_2} \quad (3.6)$$

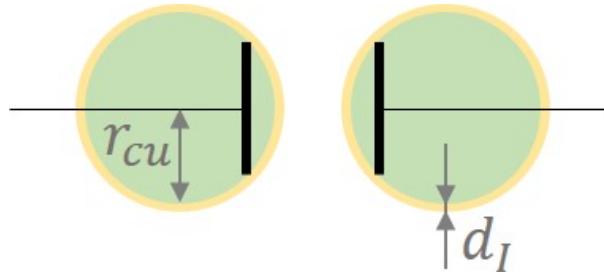


Abbildung 3.7: Vereinfachte Kapazität zweier benachbarter Windungen

Substituiert man 3.6 und 3.5 in Formel 3.4 und löst nach der Windungszahl N auf, erhält man schliesslich folgende Formel:

$$N = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot d_I \cdot K_2}{\omega_0^2 \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r \cdot b^2 \cdot \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \cdot K_1 \cdot r_{cu}}} \quad (3.7)$$

Variable	Wert	Typ
ω_0	$2\pi \cdot 20\text{MHz}$	Aufgabenstellung
μ_0	$4\pi \cdot 10^{-7}\text{N/A}^2$	Konstante
ε_0	$8.854 \cdot 10^{-12}\text{As/Vm}$	Konstante
d_I	$50\text{ }\mu\text{m}$	Datenblatt
μ_r	150	Datenblatt
ε_r	2.2	Datenblatt
b	5.3 mm	Datenblatt
r_{cu}	$250\text{ }\mu\text{m}$	Datenblatt
r_1	13.1 mm	Datenblatt
r_2	23.7 mm	Datenblatt
K_1	1.5	Geschätzt
K_2	3	Geschätzt

Eingesetzt in Formel 3.7 resultiert eine Windungszahl N von: 9.39 Windungen.

3.4 Draht oder Litze?

Grundsätzlich wäre für beste Resultate Litze zu verwenden, um den Skin-Effekt zu minimieren. Dafür müsste spezielle HF-Litze verwendet werden. Bei dieser müssten die Leiter zueinander isoliert sein und im Mittel über den Querschnitt gleich verteilt sein. Da auch mit dem Skin-Effekt der Kupferwiderstand im Gleichtaktmodus vernachlässigt werden kann und im Gegentaktmodus bei hohen Frequenzen C_p dominiert, können wir hier Draht verwenden.

4 Realisierung

Aus den Dimensionierungen im letzten Kapitel ist nun ein Balun realisiert worden. Zuerst haben wir eine Stufe des Guanella-Baluns gewickelt. Mit einem Impedanzmessgerät konnten wir anschliessend überprüfen, ob Gleichtaktströme bei der gewünschten Arbeitsfrequenz unterdrückt werden. Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau einer solchen Impedanzmessung.

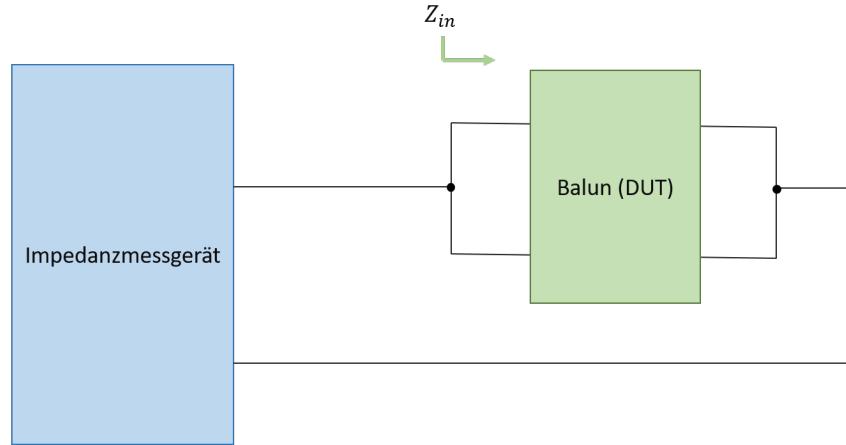


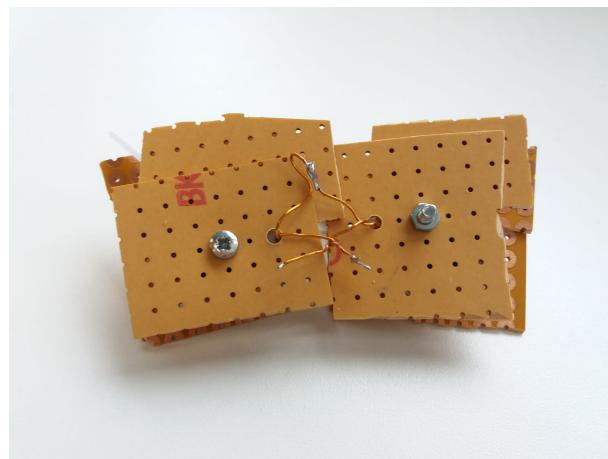
Abbildung 4.1: Messaufbau der Impedanzmessung

Das Messresultat der ersten Messung ist in folgender Abbildung ersichtlich. Man kann erkennen, dass die Resonanzfrequenz nicht wie dimensioniert bei 20 MHz, sondern bei ca. 35 MHz liegt. Durch Erhöhung der Windungszahl, konnte die Resonanzfrequenz auf 20 MHz verändert werden.

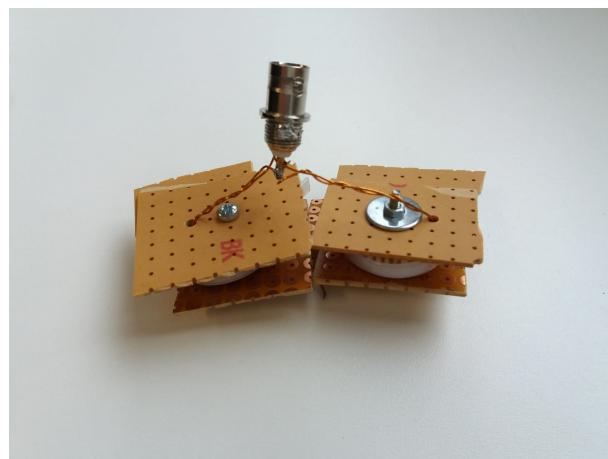


Abbildung 4.2: Messung der Impedanz der ersten Guanella-Balun Stufe

Während der Messung hat sich herausgestellt, dass schon leichte Manipulationen (unterschiedlicher Anpressdruck) an der Wicklung die Resonanzfrequenz stark ($\pm 50\%$) beeinflussen. Um dem entgegenzuwirken, wurden die beiden Stufen des Baluns mit einer mechanischen Konstruktion fixiert. Dies wird in Abbildung 4.3 gezeigt. Wie man in den Abbildungen erkennen kann, wurden



(a) Symmetrische Seite



(b) Unsymmetrische Seite



(c) Seitenansicht

Abbildung 4.3: Der realisierte Guanella-Balun

jeweils zwei Leitungen verdrillt, um die unerwünschten Induktionseffekte zu reduzieren.

5 Validierung

Um den gebauten Balun zu testen, werden die beiden Aufgaben, die Impedanzanpassung und das Erzwingen symmetrischer Ströme, unabhängig voneinander überprüft.

5.1 Impedanzanpassung

Um die Impedanzanpassung zu verifizieren, wurde am Ausgang des Baluns eine Last von 200Ω angeschlossen. Da es sich um einen Guanella-Balun mit einem Übersetzungsverhältnis von 1:4 handelt, muss man am Eingang nun eine Impedanz von 50Ω sehen. Dies wurde mit zwei Messungen überprüft.

Impedanzmessung

Mit folgender Messanordnung wurde die Impedanz des Baluns direkt gemessen. Das Messresultat ist in Abbildung 5.2 ersichtlich.

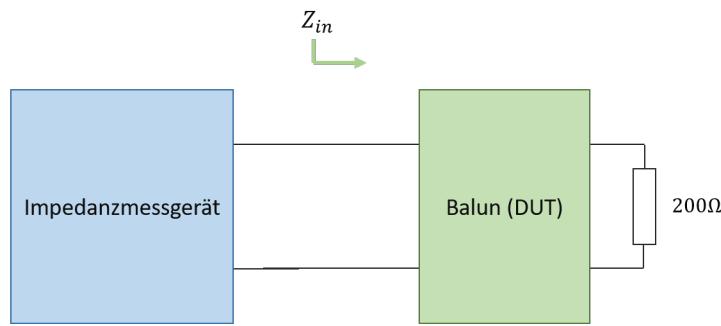


Abbildung 5.1: Eingangsimpedanz in logarithmischer Darstellung

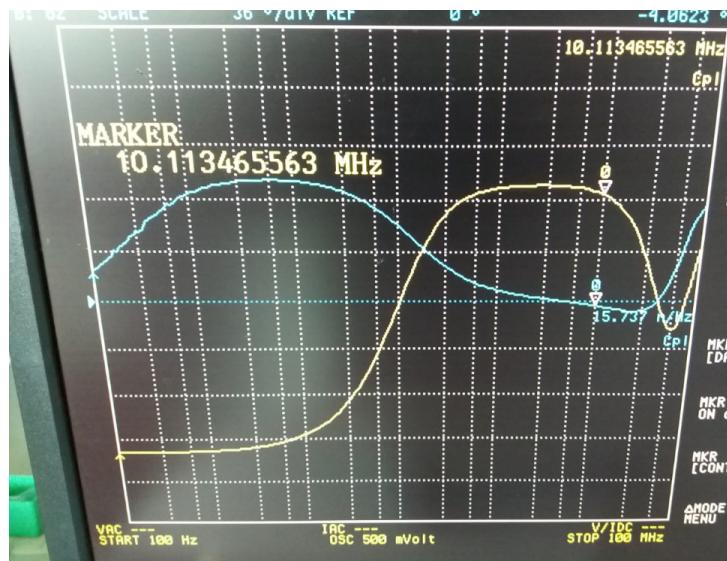


Abbildung 5.2: Eingangsimpedanz in logarithmischer Darstellung

Liegt die gemessene Impedanz in der Nähe von 50Ω funktioniert die Impedanzanpassung. Wie zu erkennen ist, ist dies im Bereich zwischen 200 kHz und 10 MHz der Fall. Bei tiefen Frequenzen funktioniert die Impedanzanpassung nicht, weil die Wirkung der einzelnen Wicklungen noch zu schwach ist. Bei höheren Frequenzen beginnt die Wicklungskapazität zu wirken.

Reflexionsmessung

Auch hier wird überprüft, ob die Eingangsimpedanz 50Ω beträgt. Dazu wird der Balun in ein 50Ω -Netzwerk integriert und auf Reflexionen untersucht. Die dafür verwendete Messschaltung ist in Abbildung 5.3 gezeigt.

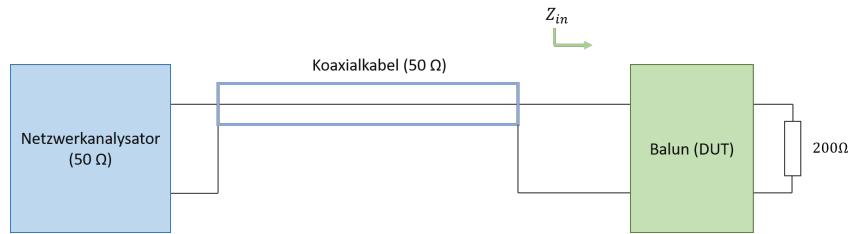


Abbildung 5.3: Eingangsimpedanz in logarithmischer Darstellung

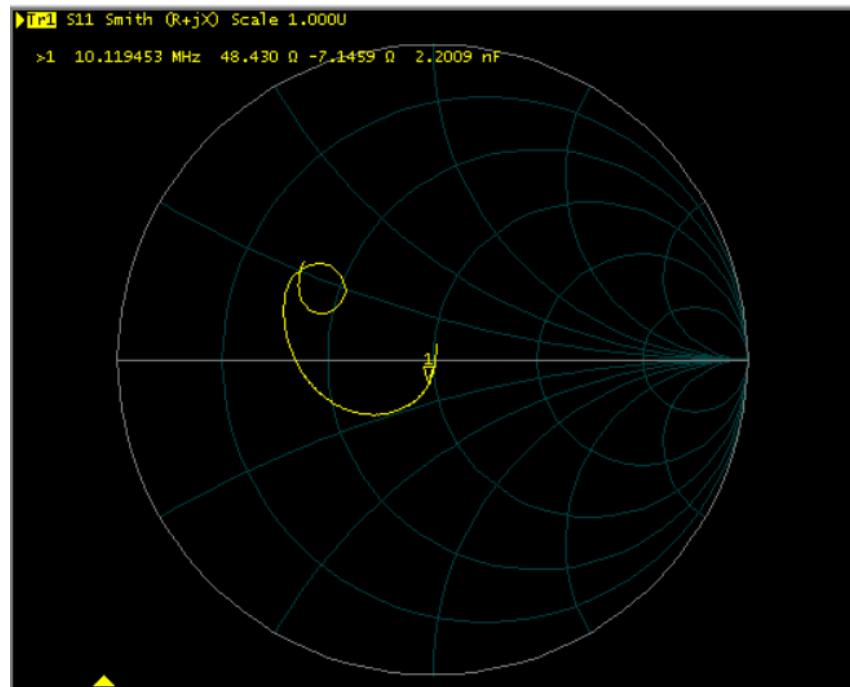


Abbildung 5.4: Eingangsimpedanz dargestellt in der Smith-Chart

In der Abbildung 5.4 ist die gemessene Reflexion in der Smith-Chart dargestellt. Wie erwartet, deckt sich das Ergebnis mit der vorherigen Impedanzmessung.

5.2 Symmetrische Ströme

Um die zweite Aufgabe des Baluns, das Erzwingen symmetrischer Ströme, zu verifizieren, haben wir die im folgenden dargestellte Messung durchgeführt.

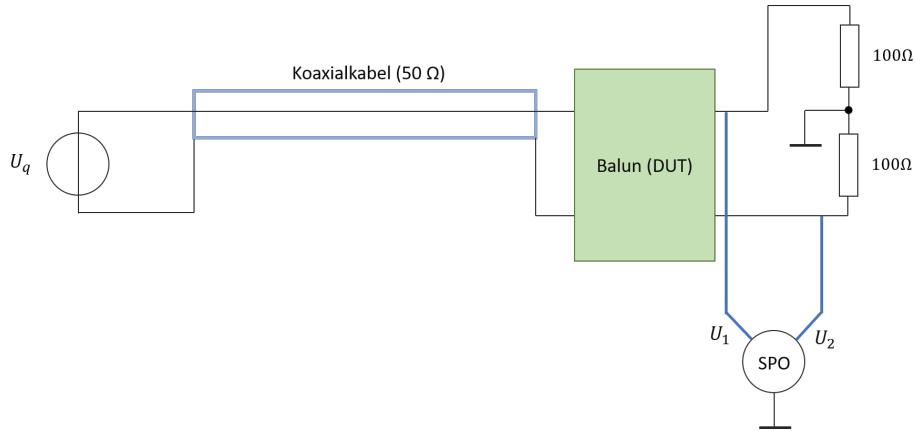


Abbildung 5.5: Eingangsimpedanz dargestellt in der Smith-Chart

Die beiden Widerstände am Ausgang bilden eine symmetrische Last. Ohne Balun würde die gesamte Spannung über einem der Widerstände abfallen. Bei korrekter Funktion des Baluns liegt an beiden Widerständen die selbe Spannung mit einer Phasenverschiebung von 180° an.

In folgender Abbildung ist das Verhältnis der beiden Amplitudenbezüge dargestellt. Man erkennt, dass der Balun zwischen 5 MHz und 80 MHz symmetrische Stromamplituden erzeugt.

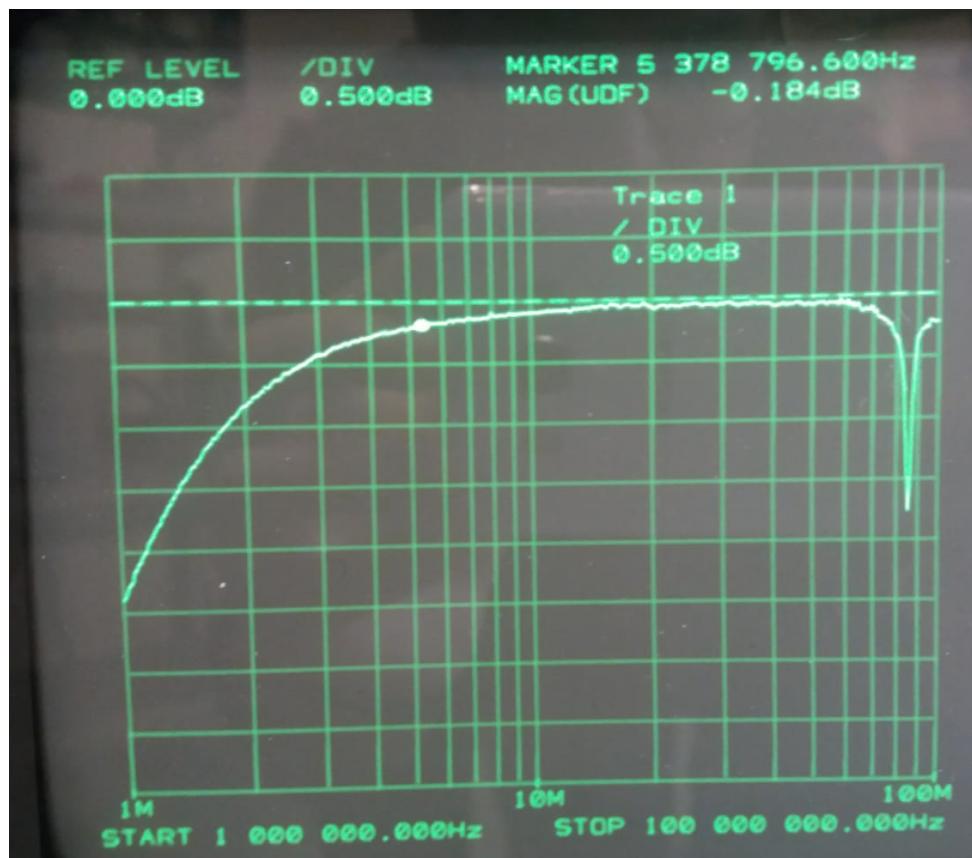


Abbildung 5.6: Eingangsimpedanz dargestellt in der Smith-Chart

Nun wird überprüft, ob die Phasenverschiebung 180° beträgt. Wie man in Abbildung 5.7 erkennen kann, ist dies praktisch über dem ganzen Messbereich der Fall.

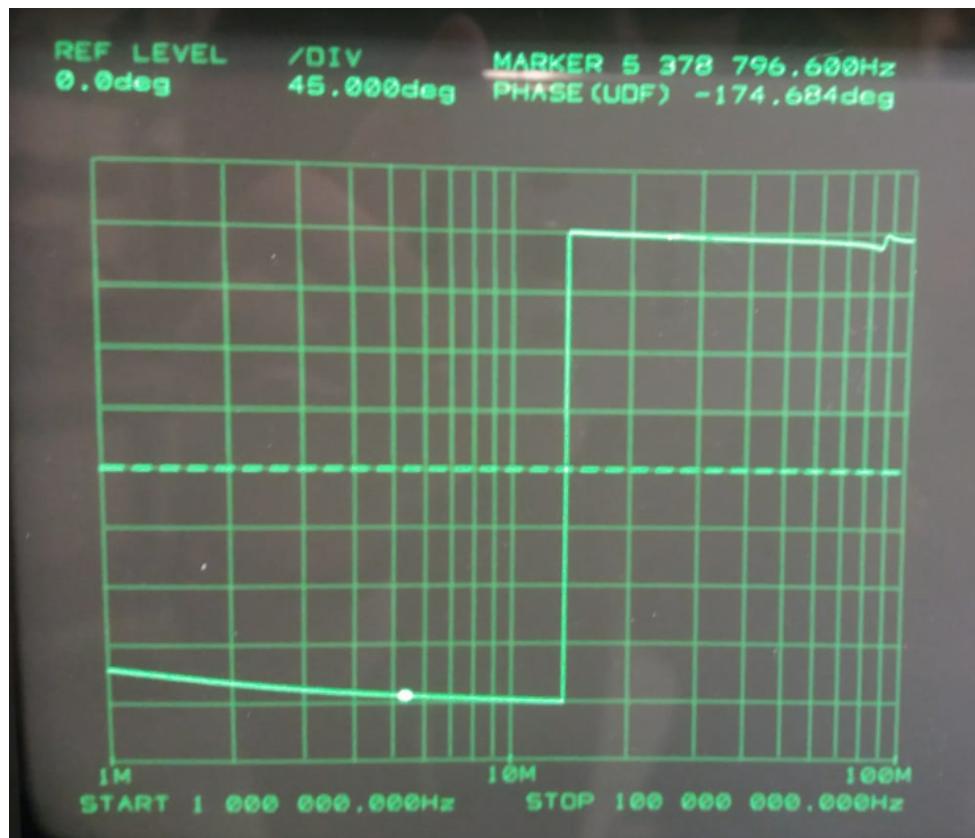


Abbildung 5.7: Eingangsimpedanz dargestellt in der Smith-Chart

6 Erkenntnisse

Die Validierung hat folgendes aufgezeigt: Bei der gewählten Arbeitsfrequenz von 20 MHz erzwingt der Guanella-Balun wie gewünscht symmetrische Ströme. Die Impedanzanpassung funktioniert jedoch nur bis zu einer Frequenz von ca. 10 MHz. Diese obere Grenzfrequenz wird durch das Verhältnis von Wicklungskapazität zu Induktivität bestimmt, und kann deshalb wie folgt erhöht werden:

- Abstand zwischen den Wicklungen erhöhen
- Anzahl der Wicklungen erhöhen

Damit solche Änderungen keine Einflüsse auf die Resonanzfrequenz des Baluns haben, muss ein anderer Parameter, wie zum Beispiel der Kern, entsprechend verändert werden. Möchte man

den realisierten Balun ohne Änderungen verwenden, muss eine andere Arbeitsfrequenz gewählt werden. In Frage kommen die Frequenzbereiche, bei welchen sowohl die Impedanzanpassung als auch die Symmetrieverteilung erfüllt ist. Dies ist zwischen ungefähr zwischen 5 MHz und 10 MHz der Fall.

7 Schlusswort

Im Verlaufe dieser Arbeit hat sich gezeigt, dass die Realisierung eines qualitativ hochwertigen Baluns viel Erfahrung benötigt. Die Dimensionierung basiert auf vielen Abschätzungen und Annahmen. Da es keine allgemein gültige Anleitung zur Dimensionierung eines Baluns gibt, gestattet sich die Definition eines geeigneten Models als heikel. Einige Effekte, welche man im Model vernachlässigt hat, haben trotzdem einen Einfluss und müssen später durch Nachjustierung korrigiert werden. Dies gilt besonders bei der Verwendung von gekoppelten Spulen und deren Herstellung von Hand. Gerade das Wickeln der Spulen hat gezeigt, welchen Einfluss auf die späteren Eigenschaften der Anpressdruck und Abstand jeder einzelnen Windung hat. Gerade die Tatsache, dass es kein „Kochrezept“ für Baluns gibt, machte die Arbeit anspruchsvoll und wir konnten viel Gelerntes einfließen lassen. Schliesslich war es für uns eine spannende Thematik und interessante Arbeit von der Dimensionierung bis zur Realisierung und Validierung.

Literatur

- [1] G. F. Mandel. (). Balun Workshop, Adresse: https://www.dl4zao.de/_downloads/Balun_dl4zao.pdf (besucht am 18. Dez. 2018).