

Workshop Notes

Messen mit dem VNWA & Hilfen für Anfänger und Fortgeschrittene

Einführung in den VNWA

Smith-Diagramme

Einfache Messbeispiele

Messbeispiele für Fortgeschrittene

Version 25

Jörn Bartels, DK7JB

49088 Osnabrück

mail@dk7jb.de

<http://www.bartelos.de>

13. Juni 2019

Workshop Notes – Volume 1

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	5
2	<i>Was macht ein Vektor Netzwerk Analysator oder ein Skalarer Netzwerk Analysator?</i>	6
2.1	S-Parameter	7
2.2	Warum und wie müssen die Geräte kalibriert werden?	8
3	<i>Das Smith Chart</i>	9
3.1	Physikalische Grundlagen	9
3.2	Historie	9
3.3	Das Smith-Diagramm	9
3.4	Betrachtung der Widerstände und Blindwiderstände (VNWA: Impedance Grid)	12
3.5	Betrachtung der Leitwerte und Blindleitwerte (VNWA: Admittance Grid).....	13
3.6	Das vollständige Smith-Diagramm	14
3.7	Werte von Bauteilen in das Diagramm eintragen.....	15
3.8	Messbeispiele mit realen Kondensatoren, Spule und Widerständen	16
3.8.1	Beispiel 1	16
3.8.2	Beispiel 2	16
3.8.3	Beispiel 3	17
3.8.4	Beispiel 4	17
3.9	Parallelschaltung oder Reihenschaltung von Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen	18
3.10	Das Matching-Tool des VNWA	20
3.11	Impedanztransformation am Beispiel eines LC-Antennentuners	22
3.12	Beispiel: Anpassung einer Antennennachbildung:.....	23
4	<i>Einstieg in den VNWA – vom Kauf bis zu den ersten Schritten</i> -	26
4.1	Was kann man mit dem VNWA von DG8SAQ alles machen?	26
4.2	Kauf eines VNWA mit einigem Material	27
4.3	VNWA-Software und Help-Files.....	28
4.4	Empfehlenswerte Bücher und Videos und andere Quellen.....	28
4.5	Erste Schritte mit dem VNWA	29
4.6	Hinweise für den VNWA-Einsteiger, wenn die ersten Hürden schon überwunden worden sind.....	29
5	<i>Messungen für den Anfang - Praktische Hinweise</i>	30
5.1	VNWA: Anleitung zum Erstellen einer Master Calibration	30
5.2	4,915 MHz Quarzfilter vermessen und richtig anpassen	31
5.3	Balune, UnUns und Mantelstromsperrern	34
5.3.1	Unterschied: Strombalun - Spannungsbalun - Unun.....	34
5.3.2	Der Strombalun	36

5.3.2.1	Energietransport auf Koaxialkabeln	36
5.3.2.2	Gegentaktstrom und Gleichtaktstrom	37
5.3.2.3	Mantelströme	37
5.3.2.4	Der Strombalun.....	39
5.3.2.5	Wie soll ein Strombalun idealerweise gebaut sein?	40
5.3.2.6	Beispiel: Strombalun koaxial aufgebaut 1:1, 50 Ohm	40
5.3.2.7	Beispiel: Strombalun 1:1, 50 Ohm	41
5.3.3	Spannungsbalun	43
5.3.4	Unun.....	43
5.3.5	Gleiche Wicklung – unterschiedliches Ergebnis	44
5.3.5.1	Übertrager.....	44
5.3.5.2	UnUn	45
5.3.5.3	Strombalun	45
5.3.5.4	Spannungsbalun.....	46
5.3.6	Andere Messverfahren.....	47
5.3.7	Links zu Balunen	47
6	Messungen mit dem VNWA Testboard Kit.....	48
7	Messungen für Fortgeschrittene.....	49
7.1	4 MHz Quarzfilter vermessen mit Matching-Tool	49
7.2	Stecker und Adapter herauskalibrieren.....	50
7.3	Vermessen eines Kabels.....	51
7.4	Powersweep - Der 1 dB Kompressionspunkt eines Verstärkers	55
7.4.1	Vermessung der Vorverstärkers.....	55
7.4.2	Vermessung des Bandpasses.....	55
7.4.3	Das Messobjekt - ein erster Überblick.....	55
7.4.4	Power Sweep Utility	56
7.5	Messungen an Kabeln	58
7.5.1	Das Messverfahren - Time Domain Reflectometry und Frequency Domain Reflectometry	58
7.5.1.1	Verkürzungsfaktor eines Koaxialkabels bestimmen	58
7.5.1.2	Länge eines Koaxialkabels bestimmen.....	59
7.5.1.3	Messen des Wellenwiderstandes	59
7.6	Der Optimizer am Beispiel einer Vermessung einer Schleifenantenne	60
7.7	Check der Kalibrierung	62
8	Sonstiges	63
8.1	dB-Maßstab.....	63

Workshop Notes – Volume 1

1 Einleitung

Seit mehreren Jahren führen wir mit viel Freude und mit großem Aufwand Workshops zum Umgang mit Netzwerkanalysatoren mit dem VNWA von DG8SAQ durch. In diesen Workshops zeigen wir die Möglichkeiten auf, die diese Messgeräte bieten und welche Hilfe sie sein können die faszinierende Welt der Hochfrequenz besser verstehen zu können. Die erste Version dieses Einstiegs ist nach der Hamradio 2017 entstanden, um die Teilnehmer des VNWA-Workshops mehr Hinweise zum Nachlesen zu geben.

Die Zeit wandelt sich und mit ihr auch die Fragen der Teilnehmer, ihre Wünsche und auch ihr Vorwissen. In den letzten Jahren sind viele weitere Geräte auf den Markt gekommen – mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften und es geht die Übersicht verloren.

Dieses Dokument soll euch helfen einen ersten Überblick zu bekommen:

- Was macht ein Netzwerkanalysator?
- Welche unterschiedlichen Typen gibt es und welche Vor- und Nachteile haben sie.
- Wie schaffe ich die ersten Schritte.
- Woran muss ich denken, wenn ich mir einen VNWA kaufen möchte.
- Eine erste Hilfestellung für VNWA-Neulinge die eine kleine Einführung zur Anwendung des VNWA benötigen. Hier werden Themen des Workshops wieder aufgegriffen.
- Die nachfolgenden Kapitel, in der zweiten Hälfte des Basteltagebuches, sind an die Fortgeschrittenen VNWA-Nutzer gerichtet und sollen zeigen was sonst noch alles mit dem VNWA möglich ist. Das Help-File des VNWA zeigt aber schnell, dass die hier beschriebenen Messversuche nur eine kleine Auswahl der Möglichkeiten sein können.

Ich möchte euch drei Bücher ganz besonders an Herz legen, die ich persönlich sehr gut finde:

Gerfried Palme DH8AG hat mit viel Herzblut zwei Bücher zum VNWA geschrieben, in denen er viele Zusammenhänge erklärt und sehr kleinschrittig euch durch unterschiedlichste Experimente führt. Ich empfehle die Versuche nachzubauen und eigene Messungen durchzuführen. In meinem Basteltagebuch verweise ich an vielen Stellen auf seine Bücher, da sie eine sehr gute Ergänzung oder Fortführung sind.

Gerfried Palme; „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3“; www.dh8ag.de

Gerfried Palme; „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 2“; www.dh8ag.de

Joachim Müller hat ein sehr gutes Buch über Smith-Diagramme geschrieben. In meinem Kapitel zu Smith-Diagrammen werde ich mich immer wieder auf dieses Buch beziehen und verstehe es als Grundlage und Fortführung.

Joachim Müller; „Smith-Diagramm Einführung und Praxisleitfaden“; beam-Verlag

2 Was macht ein Vektor Netzwerk Analysator oder ein Skalarer Netzwerk Analysator?

In der Hochfrequenztechnik werden Baugruppen aus Widerständen, Kondensatoren und Halbleitern als Netzwerke bezeichnet. Dies können z.B. Antennen, Quarze, Filter, Balune, Übertrager, Leitungen oder sogar ganze Verstärker sein.

Bei der Netzwerkanalyse möchte man typischerweise die Durchgangsdämpfung eines elektrischen Netzwerkes wie eines ZF-Filters bestimmen. Dazu legt man ein Signal bekannter Frequenz und bekannter Leistung an den Eingang des Netzwerkes an und misst die Ausgangsleistung. Die Durchgangsdämpfung ist dann das Verhältnis Ausgangs- zu Eingangsleistung. Benutzt man zusätzlich eine VSWR-Messbrücke, so kann auch die vom Eingang zurückreflektierte Leistung gemessen werden. Die Reflexionsdämpfung ist dabei das Verhältnis reflektierte Leistung zu zulaufender Leistung.

Bei der **vektoriellen Netzwerkanalyse** (z.B. mit einem VNWA von DG8SAQ) misst man nicht nur die Leistungsbeträge von reflektiertem und durchgehendem Signal, sondern auch die Phasenverschiebungen der beiden gegenüber dem Eingangssignal. Auf den ersten Blick scheinen die Phasen uninteressant, aber bei genauerer Betrachtung können aus den Phasen viele wichtige Informationen gezogen werden.

Beispiel: Sowohl ein kurzgeschlossenes als auch ein offenes Leitungsende reflektieren 100 % der einlaufenden Leistung. In beiden Fällen ist die Reflexionsdämpfung also 1. Man kann somit mit der Reflexionsdämpfung allein nicht zwischen Kurzschluss und offenem Leitungsende unterscheiden.

Nimmt man die Phaseninformation dazu, so gelingt die Unterscheidung ohne weiteres:

Ein offenes Leitungsende reflektiert ohne Phasenverschiebung, ein Kurzschluss reflektiert mit 180° Phasenverschiebung.

Aus der Reflexionsdämpfung zusammen mit der Phasenverschiebung kann man sogar die genaue Eingangsimpedanz des Netzwerkes berechnen, aus welcher man wiederum ein Anpassnetzwerk zur Leistungsanpassung berechnen kann. Eine typische Anwendung wäre z.B. die Leistungsanpassung des 50 %-Ausgangs eines Senders an eine Sendeantenne.

Eine andere Anwendung wäre die Vermessung eines unbekanntem Kondensators oder einer Spule. Dabei erhält man nicht nur die Kapazität bzw. Induktivität, sondern auch die elektrische Güte des Bauelements.

Vermisst man bei einem elektrischen Zweitor (z.B. einem Quarzfilter) sämtliche Reflexionsdämpfungen und Transmissionsdämpfungen in Vorwärts- und Rückwärtsrichtung und die zugehörigen Phasen, dann kann man diese Messungen zur Simulation des Zweitors in einer beliebigen elektrischen Schaltungsumgebung auf dem Computer benutzen. Die Schaltungsumgebung kann dabei rechnerisch optimiert werden. (Quelle: DG8SAQ; CQ DL 3-2007)

Es gibt auch sehr einfache Geräte, die nicht die Phase messen können. Sie nennt man **Skalare Netzwerk Analysatoren** (z.B. FA NWT2). Hier fehlt die wichtigste Größe, die Phase. Sie liefern eine eingeschränkte Sicht auf die Welt der Hochfrequenz, haben dafür aber eine kürzere Einarbeitungszeit und sind etwas günstiger in der Anschaffung.

Workshop Notes – Volume 1

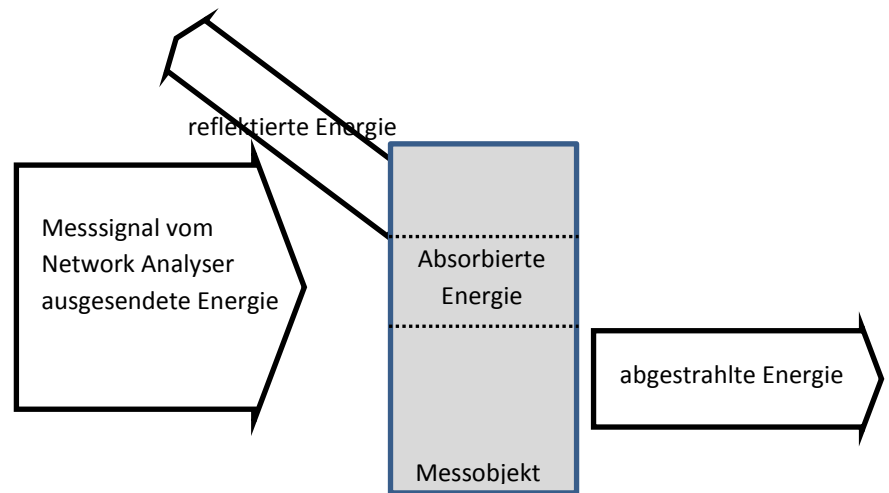
2.1 S-Parameter

Die S-Parameter geben an, wie das Messsignal vom Messobjekt gedämpft/verstärkt oder reflektiert wird. Ein Verstärker hat einen Eingang und einen Ausgang. Das Messsignal kann einmal auf den Eingang und einmal auf den Ausgang gerichtet werden.

- **S₂₁**: Gibt an wie stark die Dämpfung/Verstärkung des Messsignals ist (Hin-Richtung).
- **S₁₁**: Gibt an wie stark die Reflexion des Messsignals ist (Hin-Richtung) und wie gut der Eingang angepasst ist.

Jetzt kann das Messsignal auch noch auf den Ausgang des Messobjektes treffen. Es ergeben sich dann die S-Parameter der Rück-Richtung.

- **S₁₂**: Gibt an wie stark die Dämpfung des Messsignals ist (Rück-Richtung).
- **S₂₂**: Gibt an wie stark die Reflexion des Messsignals ist (Rück-Richtung) und wie gut der Ausgang angepasst ist.



Für ein leichteres Verständnis wähle ich zunächst ein vereinfachtes optisches Modell. Wenn Licht auf ein gefärbtes Stück Glas trifft, wird ein Teil des Lichtes reflektiert, ein Teil des Lichtes durchgelassen und ein Teil des Lichtes in dem Gegenstand absorbiert. Das Licht kann dann auch von der anderen Seite auf den Gegenstand treffen.

Die S-Parameter werden in dem logarithmischen Maßstab dB angegeben. 0 dB bedeutet dass die gesamte Energie zurück reflektiert wird oder dass die gesamte Energie des Messsignals ungedämpft das Objekt wieder verlässt.

Häufig werden **zwei unterschiedliche Darstellungsformen** gewählt um die vier S-Parameter grafisch darzustellen: Das normale **kartesische Koordinatensystem** für die skalaren Informationen: Dämpfung, Verstärkung und Anpassung. Eine solche Darstellung reicht aber noch nicht aus, da z.B. Informationen fehlen die notwendig sind, wenn man verstehen möchte warum eine Anpassung besonders gut oder schlecht ist. Hat z.B. der Eingang einer zu untersuchenden Schaltung einen kapazitiven Anteil oder ist er doch induktiv? Die zweite Form der Darstellung ist das **Smith-Diagramm**. Es wird in Kapitel Das Smith Chart wie in Kapitel 3 erklärt.

Der Hauptvorteil von einem Vektor Netzwerk Analysator ist, wie bereits geschrieben, dass sowohl die Amplitude wie auch die Phase gemessen werden. Während eine simple Amplitudenmessung beim Skalaren Netzwerk Analysator viel einfacher durchzuführen ist, muss bei einem Vektor Netzwerk Analysator VNWA ein deutlich größerer Aufwand getrieben werden. Eine rein skalare Amplitudenmessung (z.B. mit dem FA-NWT2) kann in vielen Fällen ausreichend sein. Ein Beispiel wäre die Verstärkungskurve eines selbstentwickelten Verstärkers. Mit dem skalaren Netzwerk Analyser erhält man eine Rückmeldung ob die Anpassung gut oder schlecht ist – mehr aber auch nicht. Eine Messung eines Vektor Netzwerk Analysators (VNWA), die sowohl die Phase als auch die Amplitude umfasst, ermöglicht es jedoch viel mehr über das zu untersuchende Testobjekt herauszufinden. Nur so kann beispielsweise untersucht werden, ob eine Fehlanpassung kapazitiv oder induktiv ist und wie eine Anpassschaltung aussehen könnte.

2.2 Warum und wie müssen die Geräte kalibriert werden?

Alle Bestandteile eines Vektor Netzwerk Analysators verfügen über einen Frequenzgang und Phasengang – jedes Leitungstück und jeder Stecker, Widerstand oder Halbleiter. Je höher die Messfrequenz, umso stärker die Effekte. Dies trifft auf günstige Einstiegsgeräte zu, wie auch auf die Profigeräte die einen Preis von einem kleinen Einfamilienhaus haben. Bei der Korrektur dieser Effekte trennt sich die Spreu vom Weizen.

Erst durch die Kalibrierung des Analysators werden diese Systemfehler mit Hilfe der Mathematik herausgerechnet und somit fast vollständig kompensiert. Der VNWA von DG8SAQ nimmt aufgrund einer sauberen Umsetzung der Mathematik an dieser Stelle eine herausragende Stellung ein. Mit viel Mathematik kann ein guter Vektor Netzwerk Analyser dann Ergebnisse anzeigen, als ob es direkt ohne Leitung am Messobjekt (DUT) angeschlossen wäre. Gerade auf eine exzellente Software die auch gepflegt und weiterentwickelt wird, kommt es an.

Für eine Kalibrierung werden nacheinander Kalibrierstandards (Short, OPEN, LOAD, THROUGHT) mit bekannt elektrischen Eigenschaften an die Messkabel angeschlossen und vermessen. Aus diesen Messungen wird eine Fehlerkorrektur ermittelt, die den Systemfehler des Analysators vollständig beschreibt und die so eine spätere Kompensation dieser Fehler ermöglicht. Jede Veränderung fließt mit in die aufwändige Fehlerkorrektur mit ein. Wie schon geschrieben trennt sie hier die Spreu vom Weizen.

Weitere Hinweise findet ihr hier:

- Kapitel 5.1 „VNWA: Anleitung zum Erstellen einer Master Calibration“ auf Seite 30 in diesem Dokument.
- Hilfe-Datei in der VNWA-Software
- In dem Buch von Gerfried Palme DH8AG; „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 1“; Kapitel 1
- „Vektorielle Netzwerkanalyse am Beispiel des VNWA3 erklärt 1+2; Gerfried Palme DH8AG; FUNKAMATEUR FA 8/12 S. 822-825 und FA 9/12 S.926-929

Mit welchen Kalibrierstandards wird beim VNWA gearbeitet?

OPEN: Beim Open ist die Messleitung wie das englische Wort schon ausdrückt offen, also definiert mit nichts verbunden. Das offene Leitungsende bewirkt eine Totalreflexion des gesamten Messsignals. Bei dieser Messung werden Dämpfungen und Phasenverschiebungen der Leitungen etc. ermittelt.

SHORT: Bei einem SHORT wird die Messleitung kurzgeschlossen, was ebenfalls eine Totalreflexion des Messsignals bewirkt. Die Phasenlage des Signals ist gegenüber der OPEN-Messung um 180° gedreht.

LOAD: Bei einer LOAD-Messung wird die Leitung mit einem definierten Lastwiderstand (hier 50 Ohm) abgeschlossen. Alle Leistung wird hier kompensiert.

THROUGH: Bei einer THROUGH-Messung werden beide Messleitungen (TX- und RX-Port des VNWAs) miteinander verbunden. So kann z.B. der Eingangsport des Messgerätes kalibriert werden.

Workshop Notes – Volume 1

3 Das Smith Chart

In diesem Kapitel beschreibe ich die stark vereinfachten Grundlagen des Smith-Diagramms. Ich verzichte weitestgehend auf Formeln und erlaube mir einige Vereinfachungen um das erste Verständnis zu erleichtern. Zunächst beschreibe ich die physikalischen Grundlagen rund um Widerstand, Spule und Kondensator und gehe dann auf die historischen Hintergründe ein um dann anschließend die Art der Darstellung im Smith-Diagramm zu erläutern.

3.1 Physikalische Grundlagen

- **Widerstand – Spannungs- und Stromverlauf**

Der Widerstand verhält sich unkompliziert. Wird eine Spannung angelegt steigt sofort der Strom an. Es gibt keine Phasenverschiebung.

- **Kondensator – Spannungs- und Stromverlauf**

Wird eine Spannung an einen Kondensator angelegt, muss er sich zunächst aufladen. Zwischen den Platten wird Energie gespeichert, indem sofort der volle Strom fließt. Verzögert steigt dann auch die Spannung langsam an. Man sagt hierzu auch, dass der Strom der Spannung vorausseilt. Beschrieben wird dies durch die Größe „kapazitiver Blindwiderstand“.

- **Spule – Spannungs- und Stromverlauf**

Wird eine Spannung an eine Spule angelegt, muss sich zunächst das magnetische Feld aufbauen. In diesem Feld wird die zugeführte Energie gespeichert. Strom und Spannung verhalten sich genau umgekehrt wie beim Kondensator. Es liegt zunächst die volle Spannung an und der Strom steigt langsam an, während sich das magnetische Feld aufbaut. Hier eilt die Spannung dem Strom voraus. Beschrieben wird dies durch die Größe „induktiver Blindwiderstand“.

Zusammenfassung: Beim ohmschen Widerstand sind Spannung und Strom phasengleich. Beim kapazitiven oder induktiven Blindwiderstand sind Spannung und Strom nicht phasengleich.

3.2 Historie

Das Smith-Diagramm wurde von dem Funkamateurliebling Phillip Smith (1905-1987) entwickelt, der als Ingenieur bei den amerikanischen Bell Laboratories gearbeitet hatte. Er hat sich mit der Anpassung von Antennen und HF-Leitungen beschäftigt. Das heutige Smith-Diagramm ist aus seinen Bemühungen heraus entstanden, die Zusammenhänge übersichtlich grafisch darstellen zu können. Diese Art der Darstellung hat in der Fachwelt einige Jahre gebraucht, um sich durchzusetzen. Heute ist sie eine der wichtigsten Darstellungsformen der HF-Elektrotechnik um Anpassungen übersichtlich darstellen zu können. Früher wurden auch Anpassnetzwerke über das Smith-Diagramm „berechnet“. Heutzutage erledigen dies kleine Softwareprogramme. Das Matching-Tool des VNWA, welches solche Anpassaufgaben in Sekunden erledigt, erkläre ich an spätere Stelle in diesem Dokument – ein mächtiges und bequemes Werkzeug.

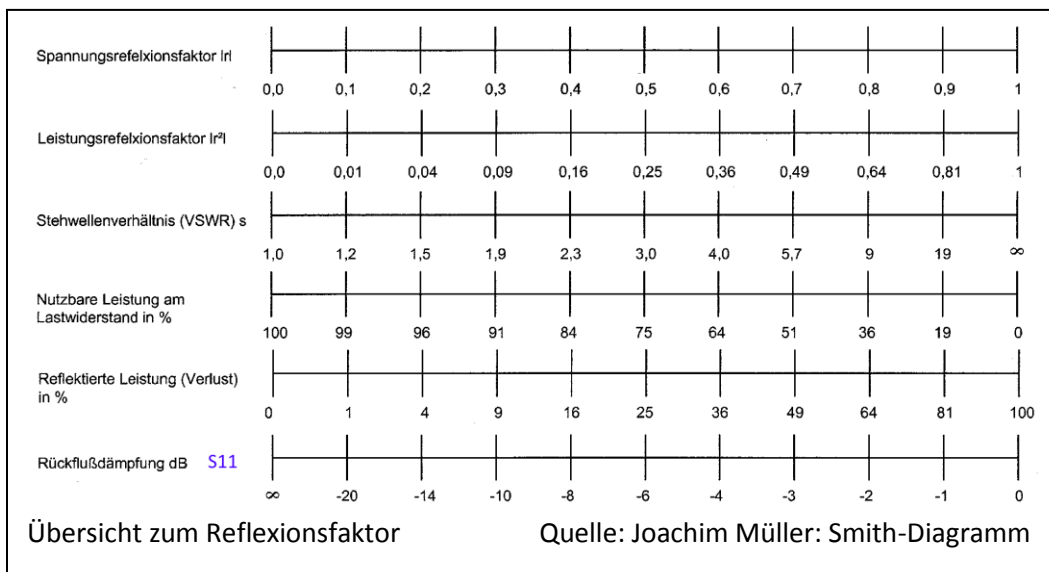
3.3 Das Smith-Diagramm

Wie schon geschrieben wurde das Smith-Diagramm entwickelt um die Zusammenhänge rund um Anpassung, Impedanz, Reflexion, VSWR-Faktor und Transformation besser verstehen und grafisch darstellen zu können. Dieses mächtige Werkzeug zur grafischen Darstellung ist leider etwas komplex und der erste Einstieg daher schwierig.

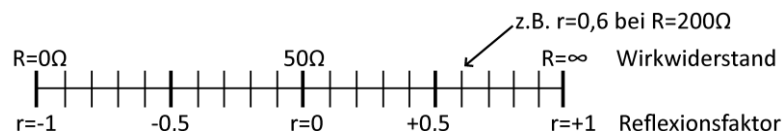
Es gibt ein sehr gutes Buch von **Joachim Müller „Smith-Diagramm – Einführung und Praxisleitfaden“**. Das Buch solltet ihr wirklich intensiv durcharbeiten – auch die von ihm vorgeschlagenen Versuche – es lohnt sich. Ich möchte euch bei den Grundlagen helfen, damit ihr es noch leichter habt den Erklärungen von Joachim in seinem Buch zu folgen. Um diese zu erleichtern, sind einige der Diagramme und Bilder aus diesem Kapitel sehr ähnlich zu denen im Buch. Auch führe ich in meinen Workshops beispielhaft einige Experimente vor, die in diesem Buch vorgeschlagen worden sind. Die Beschäftigung mit dieser Materie lohnt sich wirklich auf dem Weg zu einem tieferen Verständnis der Zusammenhänge im Bereich der Hochfrequenz. Leider gibt es das Buch nur in deutscher Sprache.

Sehr bewusst versuche ich stark zu vereinfachen, auch wenn diese manchmal zu Lasten der Genauigkeit und Tiefgründigkeit geht. Ich gehe davon aus, dass ein tiefes Verständnis sich erst einstellt, wenn ihr die Experimente aus dem Buch und aus diesem Dokument selbst durchgeführt und alles in dem Buch von Joachim nochmals nachgelesen habt. Ich bin sowieso davon überzeugt, dass komplexe Zusammenhänge nur begriffen werden können, wenn man sich immer wieder mit dem Thema beschäftigt – ähnlich einer Spirale. Bei jeder Wiederholung wird es etwas tiefgründiger.

Wenn ein HF-Signal an einem Kabel anliegt und es nicht richtig abgeschlossen ist, wird ein Teil des Signals reflektiert. **Je schlechter die Anpassung, umso stärker die Reflexion** – bis hin zur Totalreflexion bei einem Kurzschluss oder einem offenen Ende (Widerstand unendlich). Aus dem Verhältnis der rücklaufenden Welle zur hinlaufenden Welle wird der Reflexionsfaktor berechnet. In unseren Betrachtungen bewegen wir uns in der 50 Ohm Umgebung. Wenn das Kabel mit 50 Ohm abgeschlossen wird, gibt es keine Reflexion. Der Reflexionsfaktor ist 0. Bei einem Kurzschluss oder einem offenen Ende, also Totalreflexion, beträgt der Reflexionsfaktor +1 oder -1 (100%).



Im folgenden Bild ist der Reflexionsfaktor auf einem Zahlenstrahl dargestellt. Bei Kurzschluss beträgt er $r = -1$ und bei offenem Ende (Widerstand unendlich) $r = +1$. Je mehr der Abschluss eines Kabels von Systemwiderstand von 50 Ohm abweicht, umso stärker ist die Reflexion. Zugehörige reelle ohmsche Widerstände, die dies hervorrufen, stehen oberhalb des Zahlenstrahls. Aus dieser Darstellung lässt sich in wenigen Schritten übersichtlich der Übergang zum Smith-Diagramm herleiten.

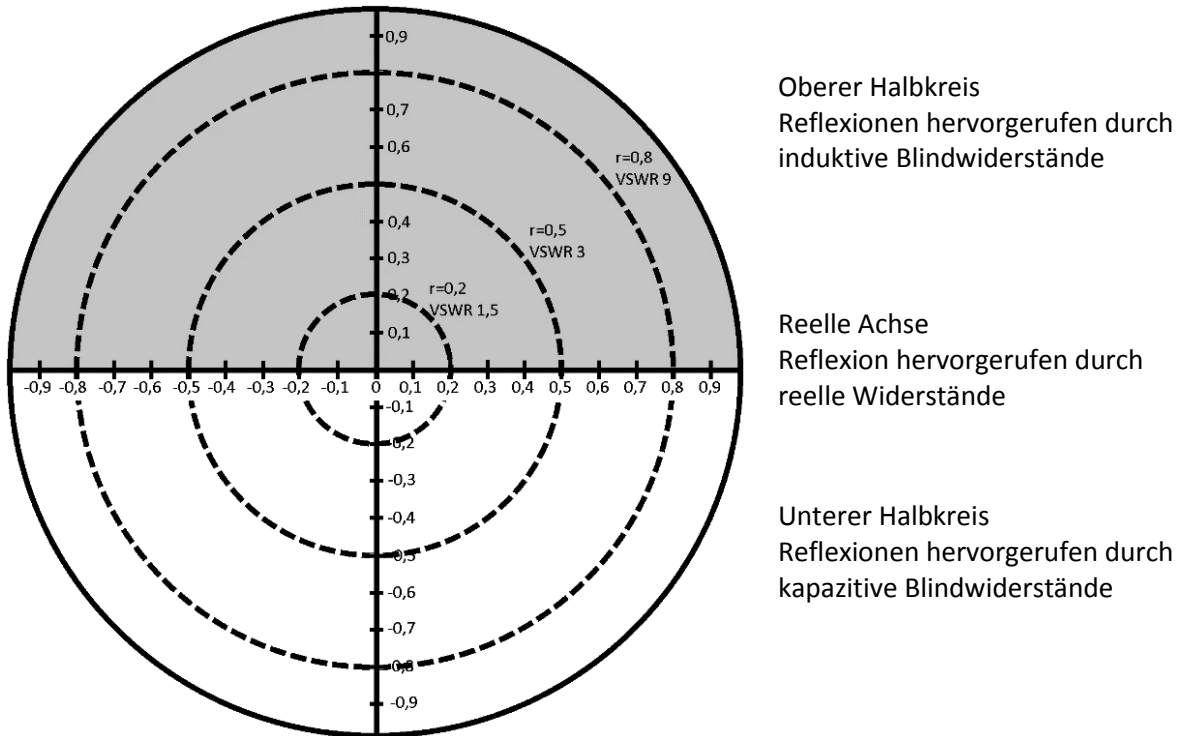


Workshop Notes – Volume 1

Der Zahlenstrahl lässt sich in einer weiteren Dimension leicht um die Darstellung der Reflexion erweitern, die durch Blindwiderstände hervorgerufen werden können (Induktivitäten und Kapazitäten). Bewährt hat sich hier die Darstellung in einem Kreis, wie man es von Polardiagrammen (Kreisdiagrammen) her kennt. Überall auf dem Außenkreis herrscht Totalreflexion und daher können keine Werte außerhalb des Kreises liegen!

Für ein besseres Verständnis habe ich für euch das Stehwellenverhältnis mit eingetragen.

Auf jeder Kreislinie liegen Punkte mit gleichem VSWR.



Darstellung der Reflexionsfaktoren in Form eines Kreisdiagramms

Das vollständige Smith-Diagramm erhalten wir, wenn wir jetzt nacheinander die Linien einzeichnen die den gleichen induktiven Blindwiderstand X_L haben, aber einen anderen reellen Widerstand R . Weitere Linien für den gleichen kapazitiven Widerstand X_C oder den gleichen ohmschen Widerstand R kommen dann später auch noch hinzu. Später werden diese Linien dann auch noch mit Hilfe des Leitwertes erweitert.

Ihr könnt euch jetzt schon vorstellen, dass es dann teilweise recht unübersichtlich wird. Schritt für Schritt sollte es aber kein Problem sein.

Warum all diese vielen Linien? - Für den besseren Überblick

Eine Reihenschaltung von Widerständen lässt sich leicht berechnen, da einfach die Werte der Bauteile addiert werden. Aus diesem Zusammenhang heraus ergibt sich eine Gruppe von Linien im Smith-Diagramm, die wir auf der nächsten Seite betrachten.

Bei einer Parallelschaltung von Widerständen müssen wir, wie bekannt, immer mit den Kehrwerten rechnen – es werden Kehrwerte addiert, um wiederum einen Kehrwert zu erhalten: $\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

Hinter dieser Rechnung steckt physikalisch der Leitwert (siehe übernächste Seite).

Auch aus diesem Zusammenhang heraus ergibt sich wiederum eine Gruppe von Linien im Smith-Chart, die wir auf der übernächsten Seite betrachten.

Workshop Notes – Volume 1

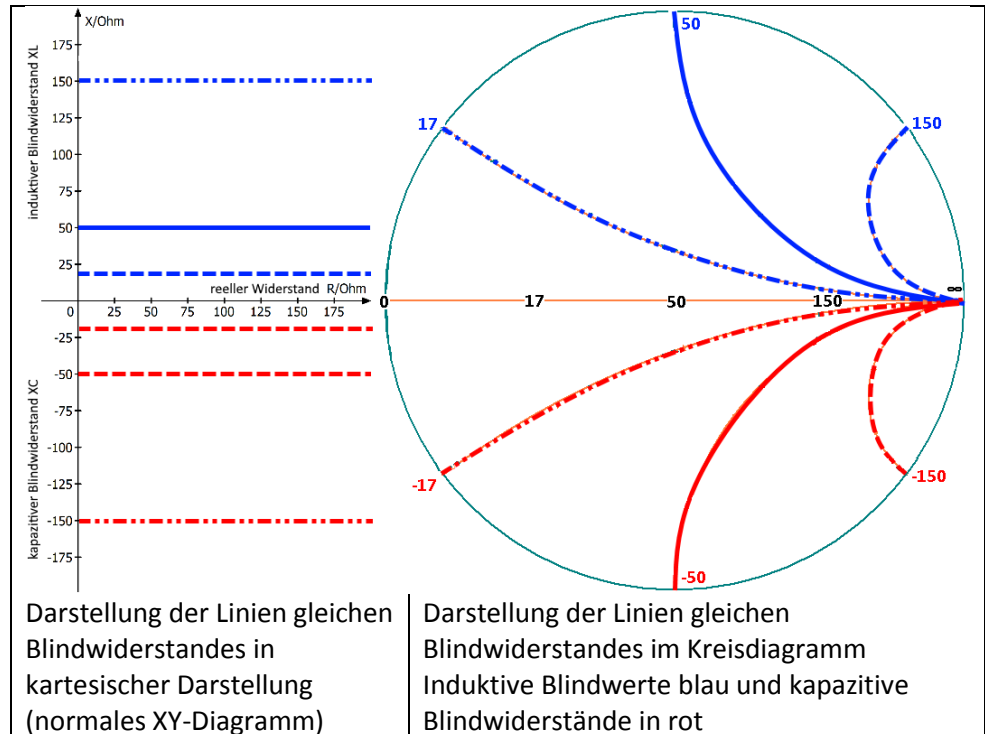
3.4 Betrachtung der Widerstände und Blindwiderstände (VNWA: Impedance Grid)

In diesem Kapitel betrachten wir Widerstände und Blindwiderstände

Linien gleichen Blindwiderstandes

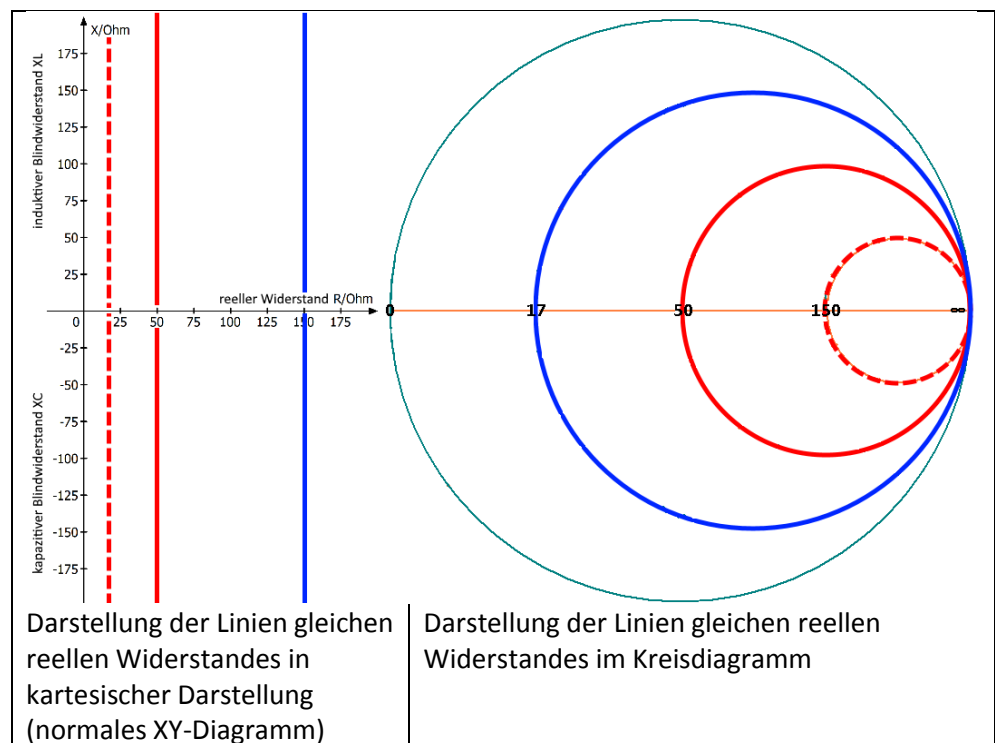
In der linken Bildhälfte in kartesischer Darstellung (normales XY-Diagramm) werden auf der x-Achse die ohmschen Widerstände und auf der Y-Achse die induktiven Blindwiderstände X_L aufgetragen (in blau). Im negativen Bereich entspricht dies dem kapazitiven Blindwiderstand X_C (in rot).

Farbig habe ich Linien mit jeweils gleichem induktiven Blindwiderstand eingetragen. Nun werden diese Linien in das Kreisdiagramm gezeichnet. Dies geht nur, wenn die Linien gebogen werden.



Linien mit gleichem reellen ohmschen Wirkwiderstands

Nun folgen die Linien mit gleichem reellen ohmschen Wirkwiderstand. Im rechten kartesischen Diagramm sind dies die farbigen senkrechten Linien. Es ändert sich jeweils nur der Blindwiderstand. Auch hier müssen im Polardiagramm wieder die Linien gebogen werden. Im induktiven wie auch im kapazitiven Teil des Diagramms ergeben sich die bekannten gebogenen Linien. Diesmal aber spiegelsymmetrisch zur reellen Achse – daher die Kreise.



Workshop Notes – Volume 1

3.5 Betrachtung der Leitwerte und Blindleitwerte (VNWA: Admittance Grid)

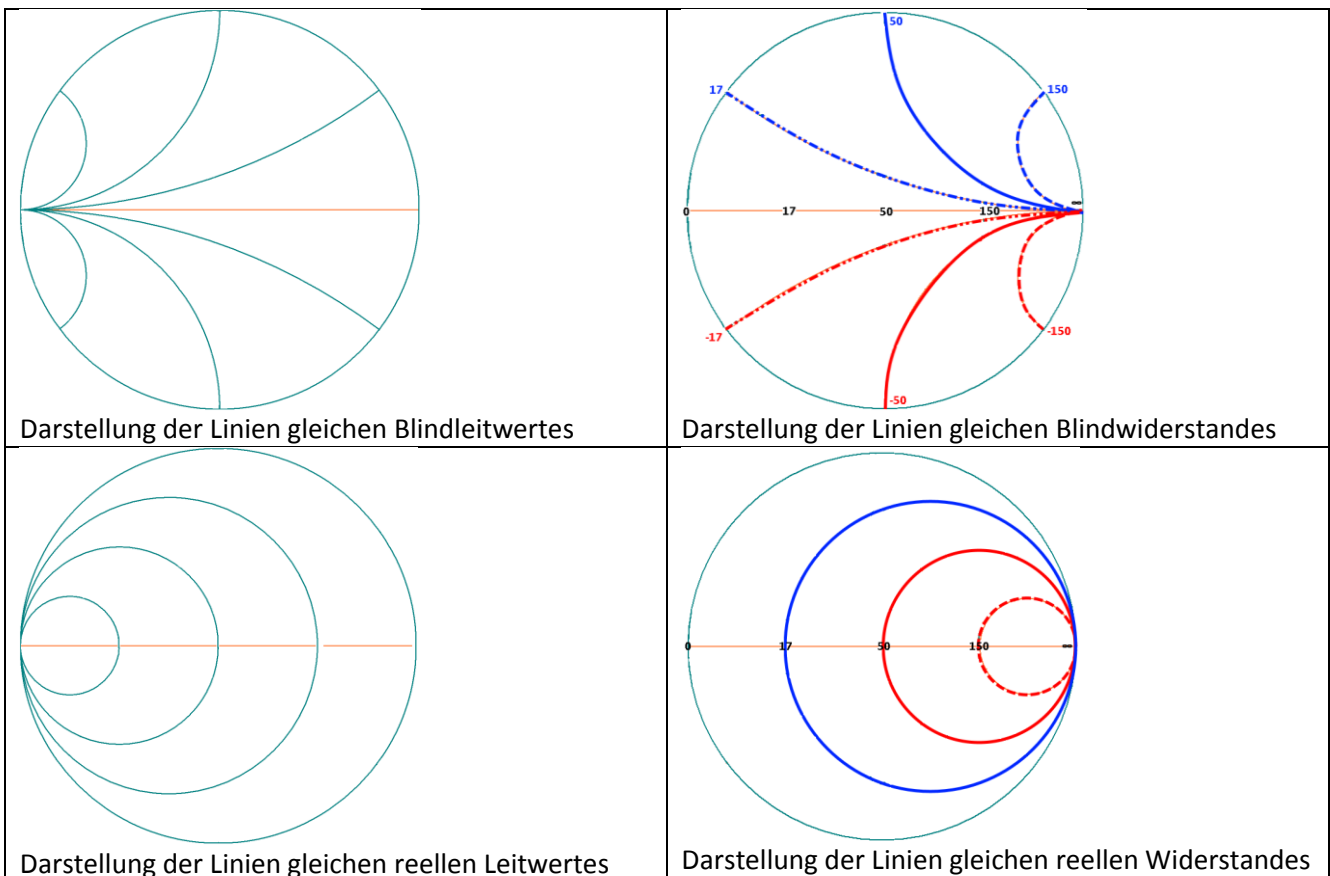
Die bisher vorgestellten Linien helfen uns Reihenschaltungen von reellen Widerständen und von Blindwiderständen besser verstehen zu können. Bei einer Parallelschaltung von Widerständen lassen sich die Zusammenhänge leichter verstehen und darstellen, wenn man statt dem Widerstand den Leitwert betrachtet. Der Leitwert ist der Kehrwert des Widerstandes und gibt an wie gut ein Gegenstand den elektrischen Strom leitet (bitte nicht mit der Leitfähigkeit zu verwechseln).

Vor zwei Seiten hatte ich schon geschrieben, dass bei einer Parallelschaltung von Widerständen immer mit den Kehrwerten gerechnet wird: $\frac{1}{R_{ges}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$. Es werden Kehrwerte addiert, um wiederum einen Gesamt-Kehrwert zu erhalten.

Wenn man nun alle Werte und Linien nicht auf Widerstände, sondern auf Leitwerte bezieht, ergibt sich ein Spiegelbild aller bisher vorgestellter Linien (siehe vorherige Seite).

Auf diese „Leitwert-Linien“ könne wir leider nicht verzichten, da ich weiter hinten im Kapitel erkläre werde, wie man mit einer Reihenschaltung und Parallelschaltung von Kondensatoren und Induktivitäten komplexe Impedanzen anpassen kann.

Für den Anfang reicht es, dass ihr wisst wie diese Linien im Smith-Diagramm verlaufen und dass es sie gibt. ☺
Also sehr grobes Überblickswissen.



Alle Kreise, die Widerstände darstellen treffen sich am rechten Rand ($R=\infty$). Das macht Sinn, da bei einer Reihenschaltung die Werte größer werden.

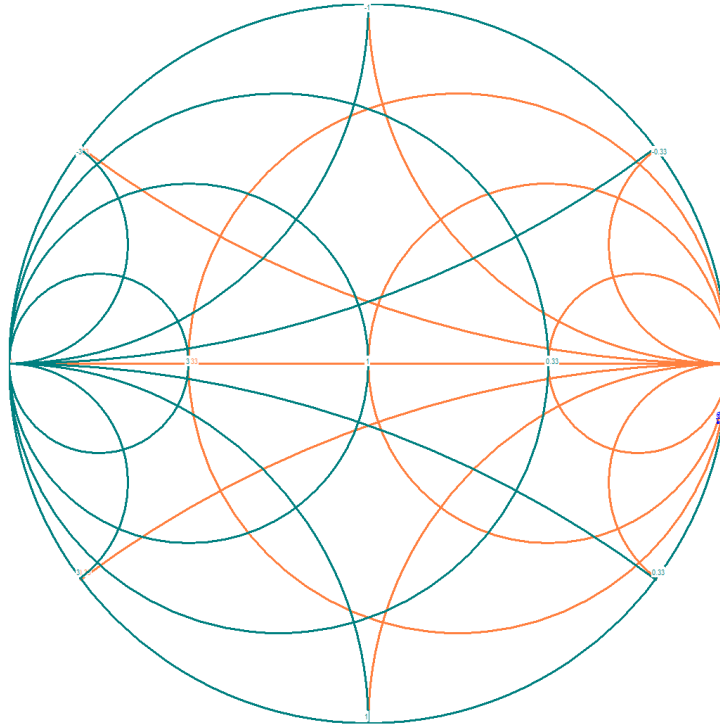
Alle Kreise der Leitwerte treffen sich am linken Rand ($R=0$ Ohm), da bei einer Parallelschaltung die Werte kleiner werden.

Wer mehr hierzu wissen möchte kann es im Buch von Joachim nachlesen.

3.6 Das vollständige Smith-Diagramm

Wenn man nun alle vorgestellten Diagramme übereinanderlegt (siehe Bild), erhält man das doch etwas unübersichtliche Smith-Diagramm. Ich blende immer die Linien aus, die gerade nicht benötigt werden und fast immer arbeite ich nur mit dem Impedance Grid und nicht mit den Leitwerten.

Dieses Diagramm sieht aus wie der Plan des öffentlichen Nahverkehrs einer Großstadt oder der Schnittmusterplan einer Nähzeitschrift...



Etwas Mathematik

Komplexe Zahlen: In unserem Fall haben wir auf der x-Achse die Widerstände und auf der y-Achse die Blindwiderstände. Beides steht senkrecht aufeinander. In der Mathematik gibt es den Zahlenraum der komplexen Zahlen, für den die gleichen Zusammenhänge gelten. Ein Realteil und ein senkrecht dazu stehender Imaginärteil. Daher bietet es sich an auch diesen Zahlenraum zu verwenden. Wenn wir uns die komplexe Darstellung der Impedanz ansehen, wird zuerst der reelle Widerstand von 33Ω und dann hinter einem „j“ der induktive Blindwiderstand geschrieben. Der Teil mit dem „j“ wird auch Imaginärteil genannt.

Skalarer Betrag $|\cdot|$: Normalerweise bedeutet Betrag, dass von einer Größe das Vorzeichen nicht betrachtet wird. Also nur der positive Zahlwert. Geschrieben wird der Betrag in senkrechten Strichen: z.B. $|-4|=4$

Vektorieller Betrag $|Z|$: Im zweidimensionalen Raum ist der Betrag der Abstand zwischen zwei Punkten im Raum. In unserem Fall haben wir auf der x-Achse den reellen Widerstand und auf der y-Achse den induktiven Blindwiderstand (siehe Bild). Die Impedanz ist nichts anderes als der Abstand vom Koordinatenursprung (Nullpunkt) zum eingezeichneten Wert. Abstände lassen sich mit der Pythagoras-Formel berechnen, da die senkrecht aufeinander stehenden Größen ein rechtwinkliges Dreieck bilden. (Beispiel auf der nächsten Seite)

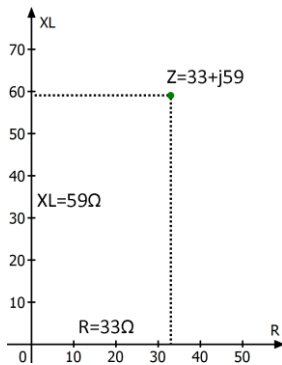
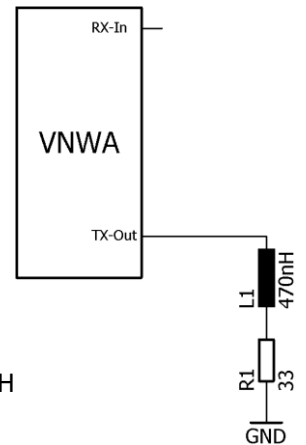
Liebe Mathematiker und Ingenieure: Bitte verzeiht mir diese stark vereinfachte Darstellung.

Workshop Notes – Volume 1

3.7 Werte von Bauteilen in das Diagramm eintragen

Wie lassen sich nun reale Messwerte in dieses Smith-Diagramm einzeichnen?

Im folgenden Beispiel werden ein Widerstand (33 Ω) und eine Induktivität (470 nH) in Reihe geschaltet und an den TX-Port des VNWA angeschlossen. Anschließend wird eine S11 Messung von 0,1 MHz bis 50 MHz durchgeführt. Wir betrachten zunächst nur den Messwert für 20 MHz.



Für 20 MHz ergeben sich nun (rechnerische Vorhersage):

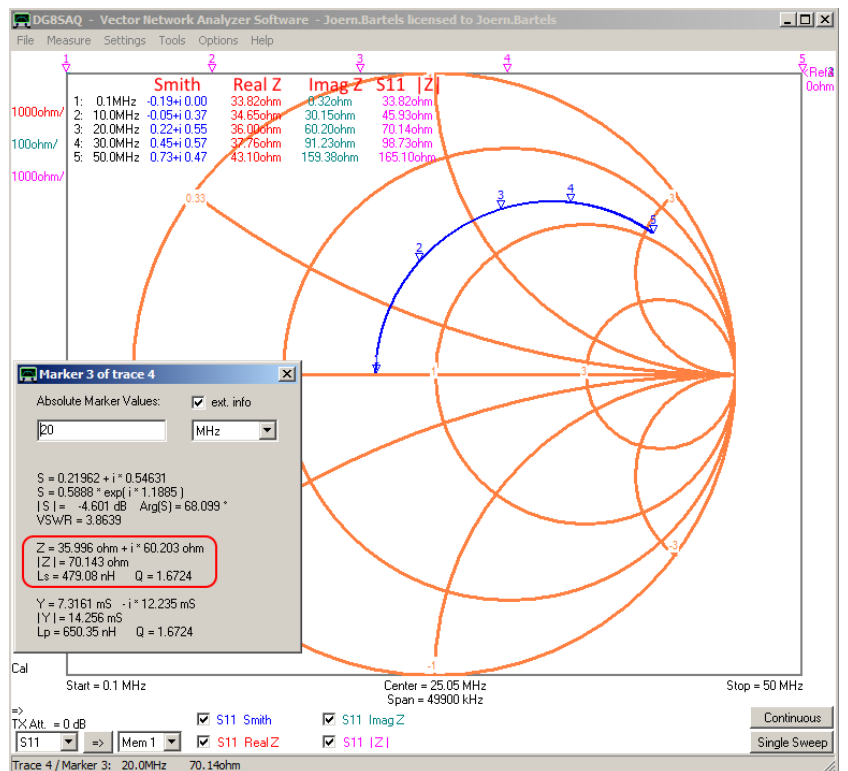
Ohmscher Widerstand: $R=33\Omega$

Induktiver Blindwiderstand: $X_L = \omega L = 2\pi \cdot 20 \text{ MHz} \cdot 470 \text{ nH}$

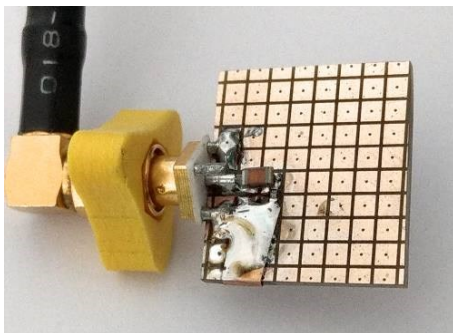
Impedanz in komplexer Darstellung: $Z = 33 + j59$

Impedanz in skalarer Darstellung: $|Z| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = 68 \Omega$

Die reale Messung: (gemessen wurde von 0,1 MHz bis 50 MHz)



Hier ein Foto vom Aufbau mit SMD Bauteilen.



In der Messung wurden die entsprechenden Marker eingeblendet und mit einem Doppelklick auf Marker 3 die ausführlichen Informationen für 20 MHz angezeigt (siehe Bild). Die gemessenen Werte sind etwas größer und lassen sich durch Bauteiltoleranzen erklären.

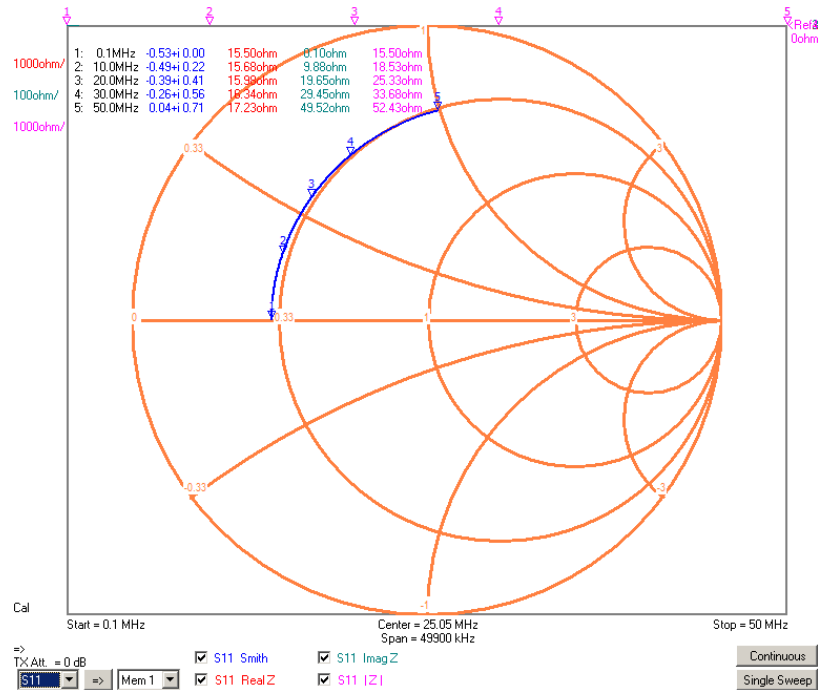
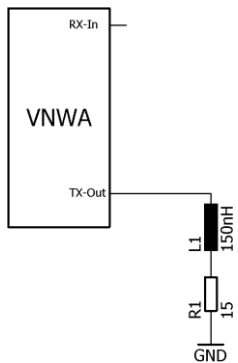
Bei steigender Frequenz bewegt sich die Messkurve auf einer Kreisbahn im Uhrzeigersinn. Der Wert des Widerstands (33 Ohm) ist unabhängig von der Frequenz und der Wert für den induktiven Blindwiderstand steigt mit wachsender Frequenz. Wir bewegen uns auf einer Kurve mit gleichem reellen ohmschen Wirkwiderstand, aber mit veränderlichem Blindwiderstand. Die Werte für die anderen Frequenzen sind leicht abzulesen und können von euch nachgerechnet werden.

3.8 Messbeispiele mit realen Kondensatoren, Spule und Widerständen

3.8.1 Beispiel 1

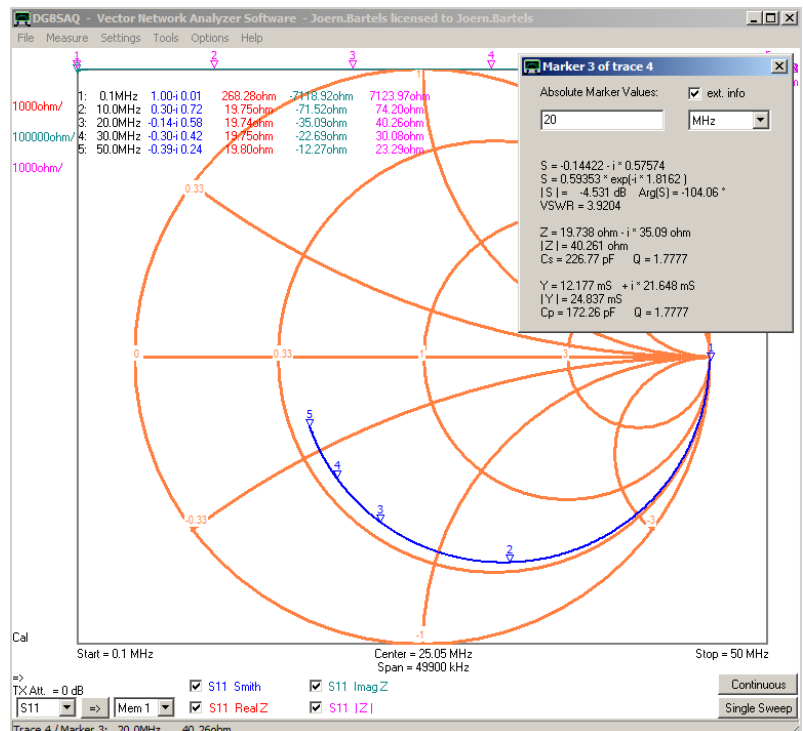
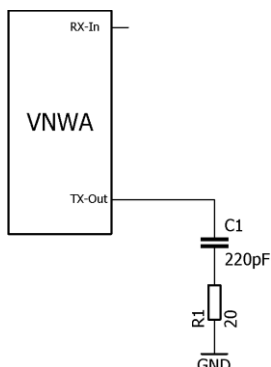
In diesem Beispiel wird eine Spule (150 nH) mit einem Widerstand (15 Ohm) in Reihe geschaltet und eine S11 Messung im Frequenzintervall von 0,1 MHz bis 50 MHz durchgeführt.

Wie erwartet beginnt der Kurvenverlauf bei 0,1 MHz auf der reellen waagerechten Achse, da hier fast nur der ohmsche Widerstand von 15 Ohm wirkt und der induktive Blindwiderstand der 150 nH Spule vernachlässigbar ist. Bei steigender Frequenz nimmt der Blindwiderstand der Spule zu und wir bewegen uns auf einem Kreis mit jeweils gleichen ohmschen Widerstandswerten.



3.8.2 Beispiel 2

Jetzt werden 220 pF mit 15 Ohm in Reihe geschaltet. Bei 0,1 MHz beginnen wir bei einem sehr hohen Widerstand auf der reellen Achse da der Kondensator noch sperrt. Mit steigender Frequenz wird der Blindwiderstand des Kondensators kleiner und die Gesamtimpedanz sinkt bei 50 MHz auf rund 23 Ohm. Wie auf Seite 12 erklärt bewegen wir uns wegen der kapazitiven Blindwiderstände auf den unteren Halbkreisen.



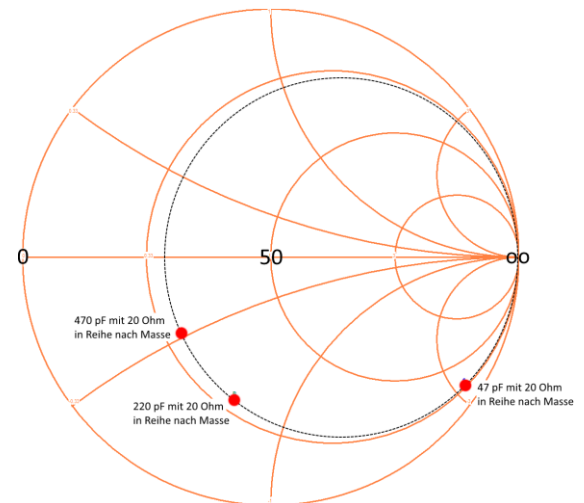
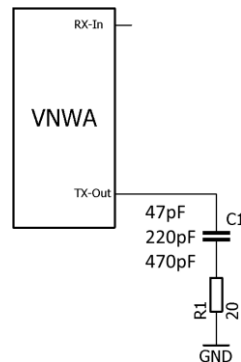
Workshop Notes – Volume 1

3.8.3 Beispiel 3

In diesem Beispiel werden Messungen bei einer festen Frequenz, aber mit drei unterschiedlichen Kapazitäten durchgeführt (siehe Schaltplan).

Bei nur einer Frequenz zu messen ist irgendwie schwierig. Daher wird jeweils in dem kleinen Intervall von 20 MHz bis 20,1 MHz gemessen, was einem Frequenzpunkt recht nahekommt.

Die ersten beiden Messungen werden in den Zwischenspeicher Mem1 und Mem2 geschoben, damit man sich nach der dritten Messung alles im Überblick ansehen kann. Im Bild liegen die Messwerte unter den roten Punkten.



Was beobachten wir?

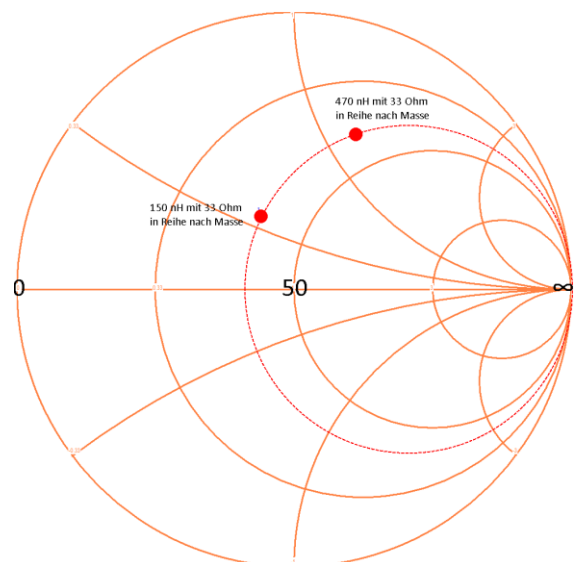
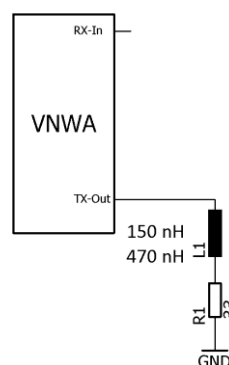
Alle Messwerte liegen auf einem Kreis, den ich nachträglich mit einem Grafikprogramm mit einer gestrichelten Linie eingezeichnet habe. Mit sinkender Kapazität wandert der 20 MHz-Punkt auf dem Kreis gegen den Uhrzeigersinn. Das war auch zu erwarten, da bei einer kleineren Kapazität der kapazitive Blindwiderstand steigt und sich somit der Frequenzpunkt im Diagramm etwas weiter dem „Unendlich-Punkt“ nähern muss. Dieser Zusammenhang wird benötigt, wenn wir im nächsten Kapitel die Anpassung von komplexen Impedanzen verstehen wollen.

3.8.4 Beispiel 4

Die nun folgende Messung ähnelt der vorhergehenden. Jetzt werden nacheinander zwei unterschiedliche Induktivitäten mit einem Widerstand in Reihe geschaltet.

Was beobachten wir?

Mit steigender Induktivität wandert der 20 MHz-Punkt auf dem Kreis im Uhrzeigersinn. Wird zu einer Induktivität eine zweite in Reihe geschaltet, wird sie insgesamt größer. Hierdurch wandert der Frequenzpunkt weiter im Uhrzeigersinn.



Dieser Zusammenhang wird benötigt, wenn wir im nächsten Kapitel die Anpassung von komplexen Impedanzen verstehen wollen.

Workshop Notes – Volume 1

3.9 Parallelschaltung oder Reihenschaltung von Induktivitäten, Kapazitäten und Widerständen

Wenn eine komplexe Impedanz einer Antenne oder einer Baugruppe an reelle 50 Ohm angepasst werden soll, können wir diese mit einer Reihenschaltung oder einer Parallelschaltung von Kondensatoren oder Spule durchführen. Eine rein reelle Transformation kann mit Übertragern oder Balunen leicht erfolgen.

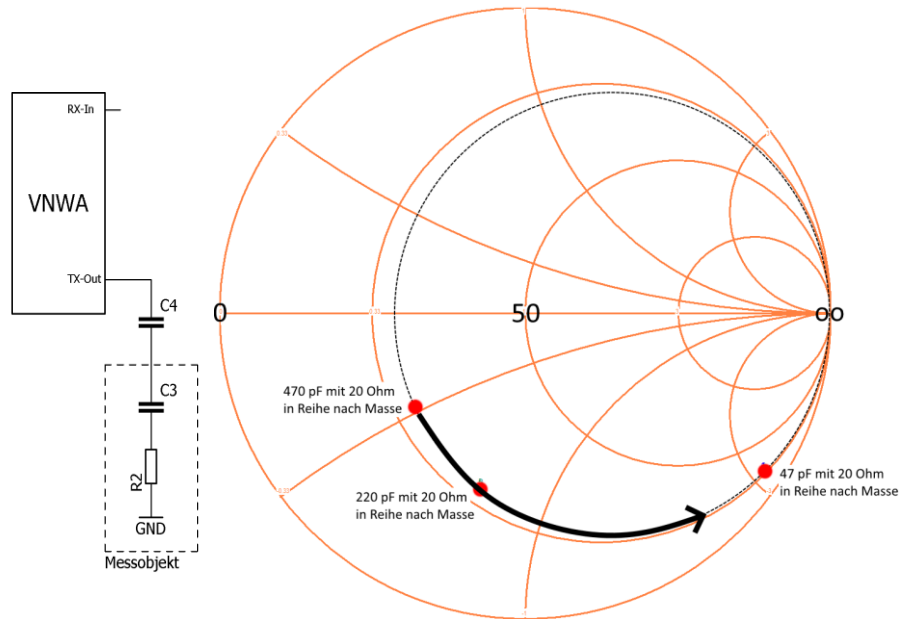
Was passiert, wenn wir einem Messobjekt mit einer komplexen Impedanz eine Kapazität in Reihe schalten?

Durch die Reihenschaltung wird die Gesamtkapazität kleiner und somit der Gesamt-Blindwiderstand größer.

In Kapitel 3.8.3 wurde dies simuliert, indem mit unterschiedlichen Kapazitäten gemessen worden ist. Zuerst wurde mit 470 pF, dann mit 220 pF und anschließend mit 47 pF gemessen.

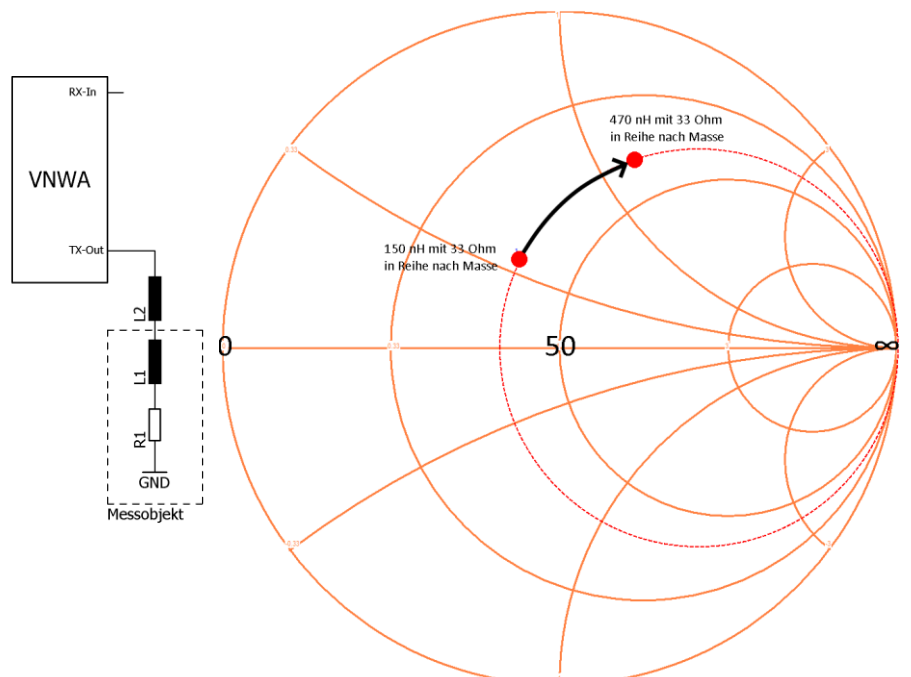
Im Smith-Diagramm haben wir beobachtet, dass bei sinkender Kapazität der 20 MHz-Punkt auf dem Kreis gegen den Uhrzeigersinn wandert.

Im nebenstehenden Bild mit den Messergebnissen aus Kapitel 3.8.3 wurde dies mit einem Pfeil verdeutlicht.



Was passiert, wenn wir einem Messobjekt mit einer induktiven Impedanz eine Induktivität in Reihe schalten?

Schaltet man einer Induktivität eine zweite Induktivität in Reihe wird die Gesamt-Induktivität größer und der Blindwiderstand vergrößert sich. Der Punkt im Smith-Diagramm wandert daher auf dem Kreis, nun aber im Uhrzeigersinn.



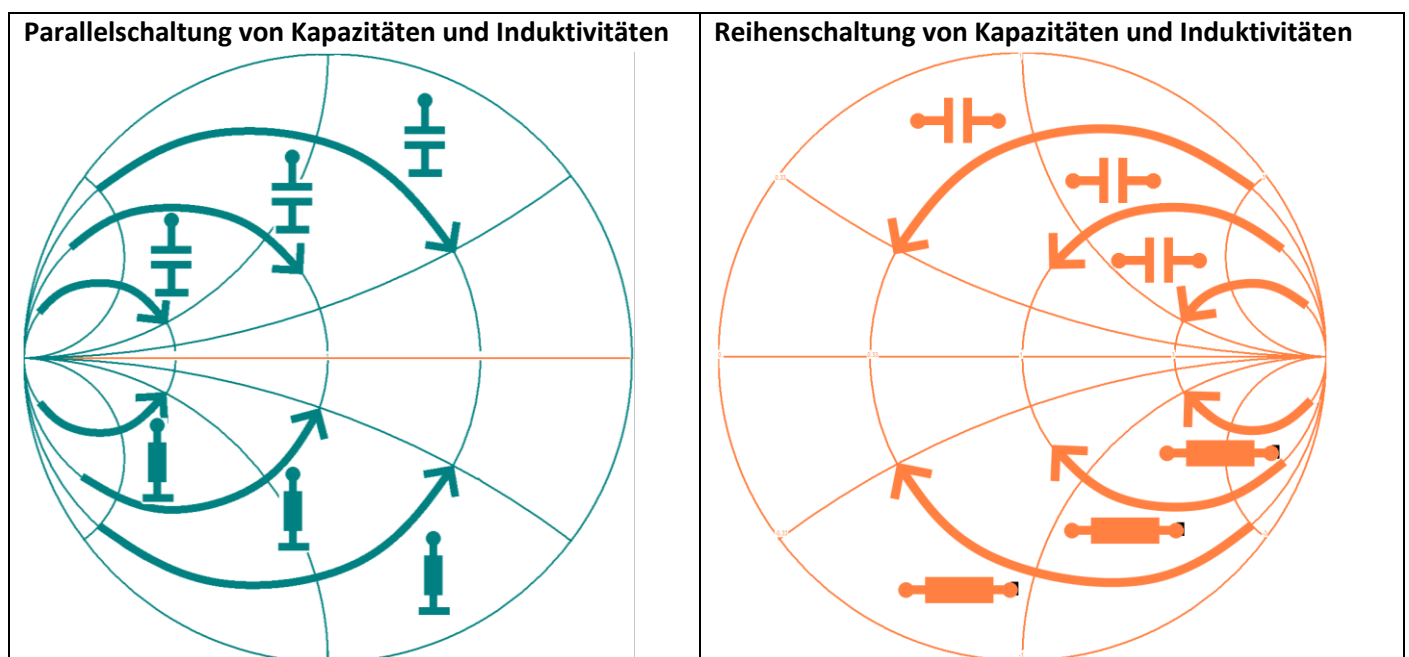
Workshop Notes – Volume 1

Parallelschaltung von Kapazitäten und Induktivitäten

Für die anderen Kombinationen schenke ich mir an dieser Stelle die Experimente und überlasse sie euch für eigene Versuche.

Zusammenfassung

Bei einer Parallelschaltung oder einer Reihenschaltung verschieben sich die Impedanzen für die eine zu untersuchende Frequenz, wie in den beiden folgenden Bildern dargestellt. Mit diesem Wissen sind wir nun fit für echte Impedanz-Anpassübungen.



Linksammlung zu Smith-Diagrammen

∞ Ω

https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d351232/smith1_new.pdf

http://www.antennenkoppler.de/smith_2/Impedanz_im_Smith_teil2.html

<https://www.robkalmeijer.nl/techniek/electronica/radiotechniek/hambladen/ukw-berichte/1984/page023/index.html>

<http://www.dl8stwblog.freiraumwelle.de/?tag=smith-chart>

<http://www.dl2jas.com/selbstbau/anpassungen/anpassungen.html>

3.10 Das Matching-Tool des VNWA

Das Matching-Tool vom VNWA funktioniert etwas anders als ein LC-Antennentuner der in Kapitel 3.11 vorgestellt wird.

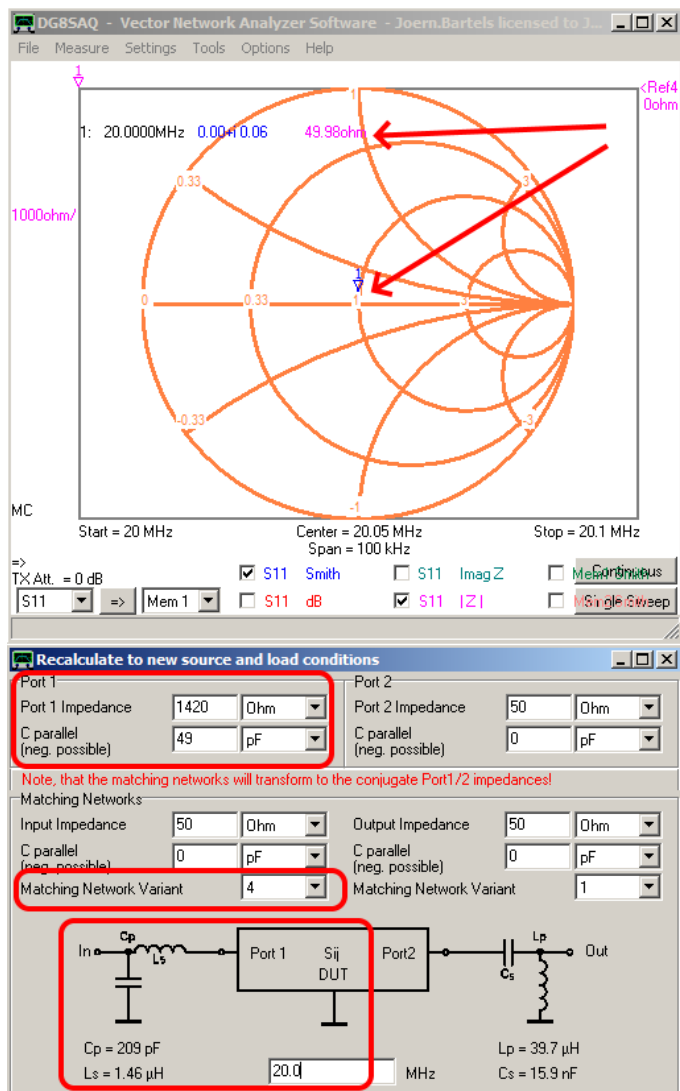
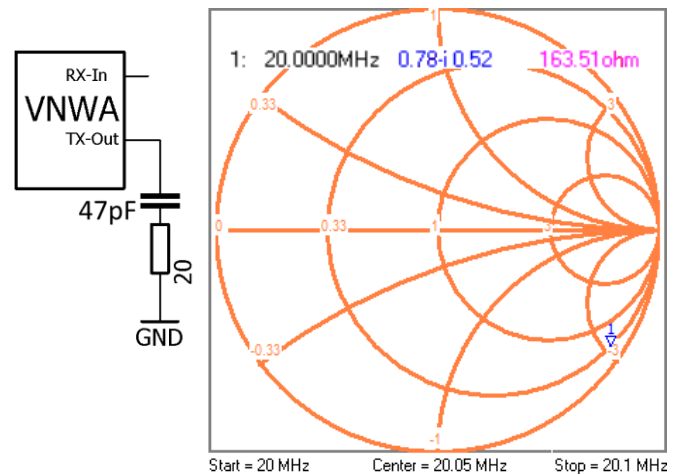
Da wir den Vektor Netzwerk Analyser VNWA haben, können die gemessenen Werte auch in eine andere Messumgebung umgerechnet werden. Der VNWA verändert mit seinem Matching-Tool die Normierung des Smith-Diagramms und berechnet in der neuen Impedanz-Umgebung alle vier S-Parameter, die dann herrschen würden und schlägt Anpassglieder vor.

Ich verdeutliche dies an einem Beispiel:

Es werden 47 pF mit 20 Ohm in Reihe geschaltet und dann bei 20 MHz bei einem kleinen „Span“ gemessen (rechtes Bild). Anschließend wird das Matching-Tool aufgerufen (Einstellung am VNWA: VNWA-Tools-Matching_Tool).

Nachdem die Messwerte in den Zwischenspeicher übernommen worden sind, öffnet sich ein Fenster mit Einstellmöglichkeiten (Bild unten). Wir brauchen nur die Bereiche die rot markiert sind.

Bitte spielt etwas mit den Eingaben der markierten Felder. Wenn ein Feld angeklickt wird, kann sehr bequem mit dem Mausrad der Feldinhalt verändert werden.



Bei Port_1 werden die Parameter für die neue Messumgebung eingestellt. Der VNWA kann nun berechnen, wie in dieser neuen Umgebung die S-Parameter aussehen würden und stellt diese neuen Parameter gleich im Smith-Diagramm da. Bei einer Portimpedanz von 1420 Ohm und einem kapazitiven Anteil von 49 pF wäre die Messung (bei 20 MHz) optimal angepasst (siehe nebenstehendes Bild). Mit „Matching Network Variant“ kann zwischen vier Anpassschaltungen ausgewählt werden, bei denen in einer 50 Ohm Umgebung optimale Anpassung herrschen würde. Im Bild habe ich mich für Nr. 4 entschieden. Es muss natürlich angegeben werden für welche Frequenz die Anpassschaltung berechnet werden soll. Sie kann immer nur für eine Frequenz gelten.

Ich verwende dieses Matching-Tool sehr häufig – es ist extrem praktisch.

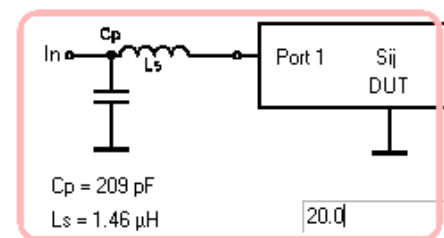
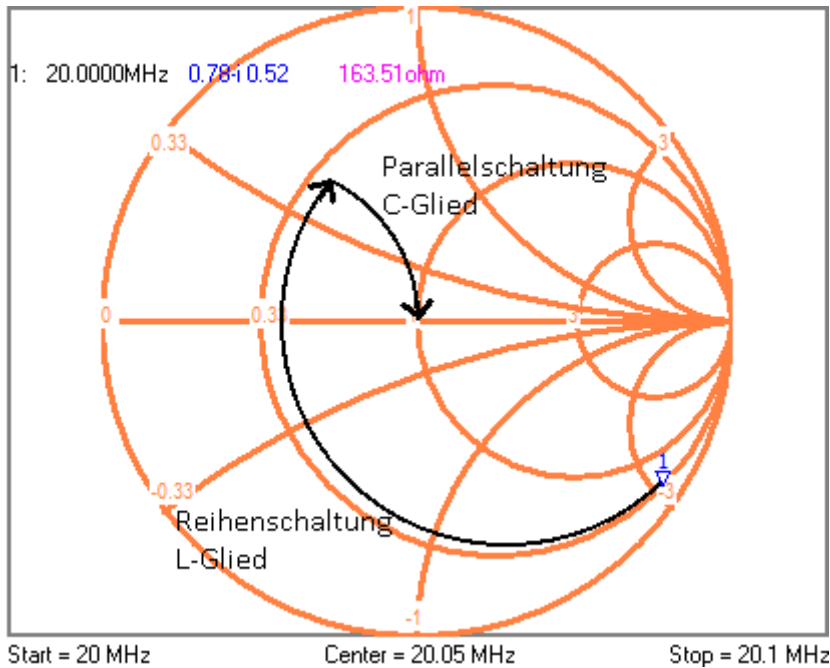
Siehe auch: Gerfried Palme DH8AG; „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 2“; Kapitel 3.

Workshop Notes – Volume 1

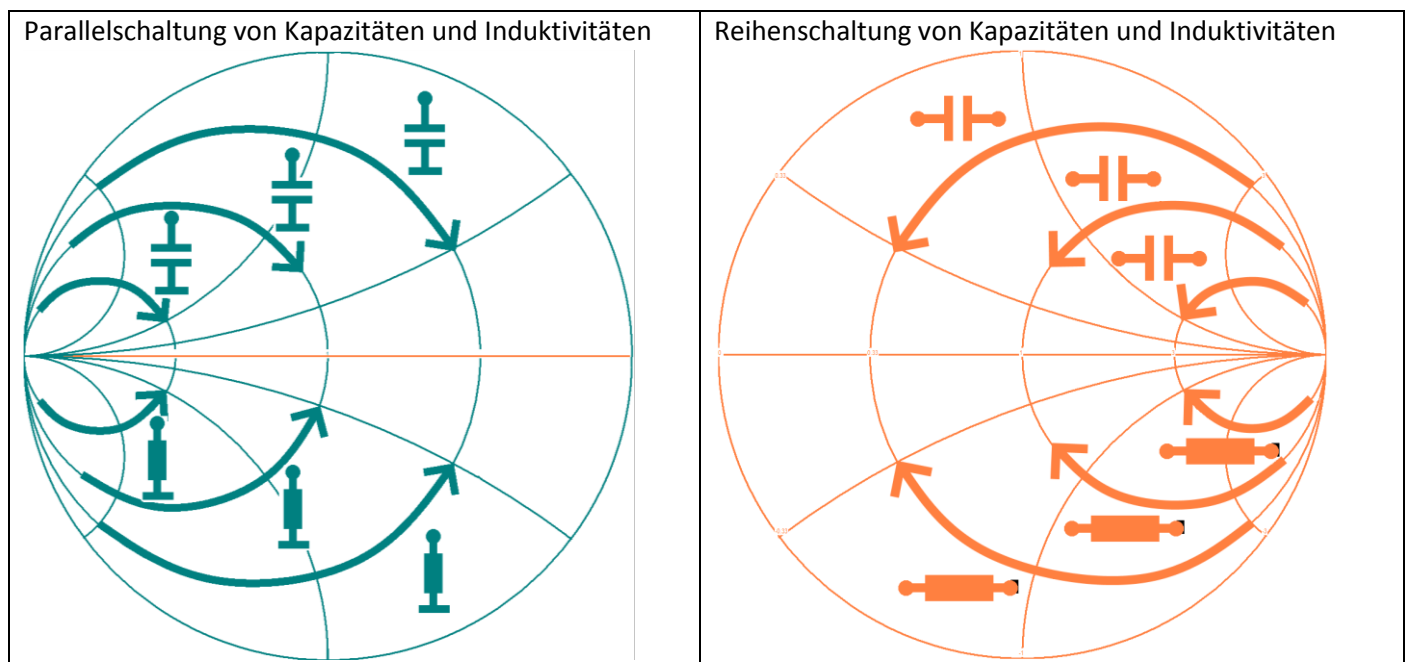
Wie transformiert das vorgeschlagene LC-Anpassglied?

In diesem Beispiel soll das Messobjekt aus Kapitel 3.9 an 50 Ohm angepasst werden. Das Matching-Tool des VNWA liefert einen Vorschlag für die Anpassung mit einem LC-Glied.

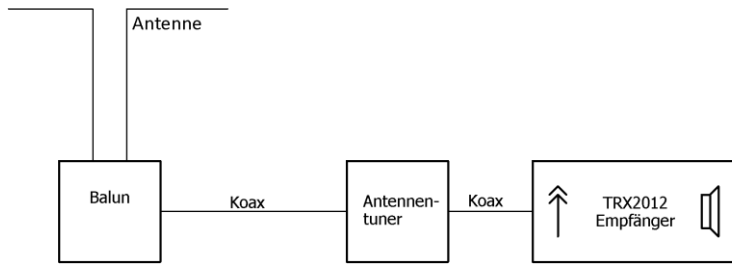
Das Messobjekt wird angepasst, indem eine Induktivität in Reihe und dann ein Kondensator nach Masse geschaltet wird. Wie im Bild dargestellt, kann man auf diese Weise eine optimale Anpassung von 50 Ohm erreichen.



Als Hilfe hier nochmals das Bild aus Kapitel 3.9.

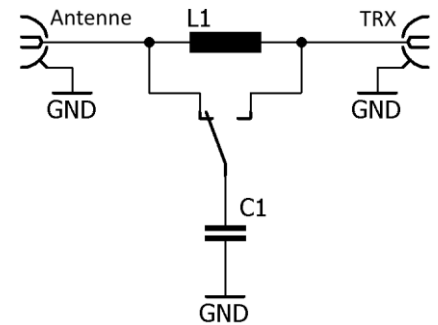


3.11 Impedanztransformation am Beispiel eines LC-Antennentuners

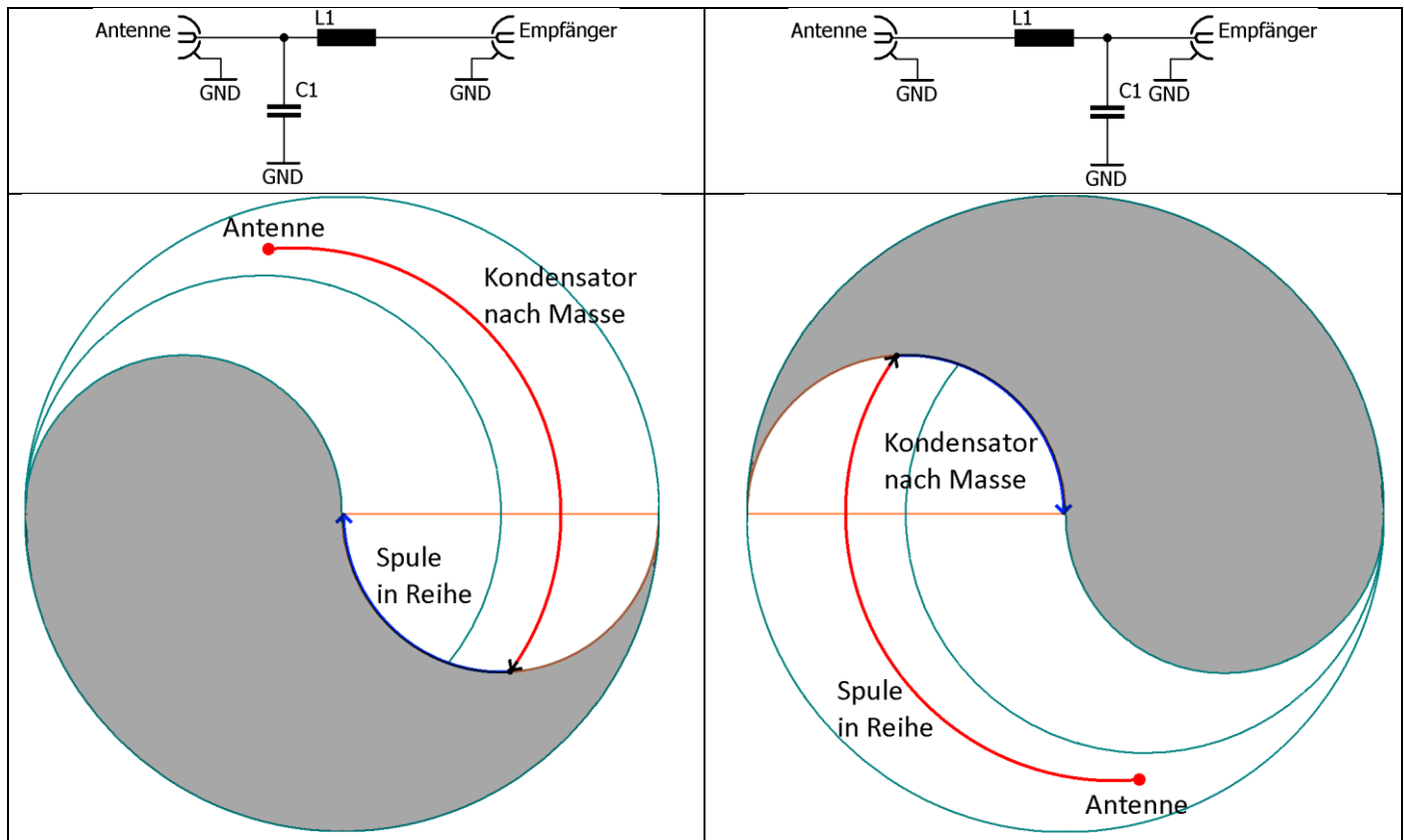


In diesem kleinen Kapitel erkläre ich wie der LC-Antennentuner vom K2 von Elecraft funktioniert und wie ein Dipol mit zufälliger Länge als Antenne angepasst werden kann. Mit einem Balun¹ für unbestimmte Impedanzen wird zunächst symmetriert² und anschließend mit dem Antennentuner auf 50 Ohm angepasst.

Der Antennentuner vom K2 ist ein einfacher LC-Tuner. Je nach Schalterstellung liegt der nach Masse geschaltet Kondensator auf der Seite der Antenne oder auf Seite des Transceivers/Empfängers. Mit dieser einfachen Schaltung kann ein sehr großer Bereich, mit meist geringen Verlusten, angepasst werden.



Das folgende Bild zeigt welche Bereiche mit welcher Schaltung angepasst werden können. Nicht mögliche Bereiche sind grau hinterlegt. Ein Beispiel wurde jeweils mit eingezeichnet:



¹ Zu Balunen schreibe ich gerade ein Basteltagebuch. Bis Ende Juli 2019 sollte es online stehen. Geht einfach auf meine Homepage www.bartelsos.de und gebt in der Suche „Balune“ ein.

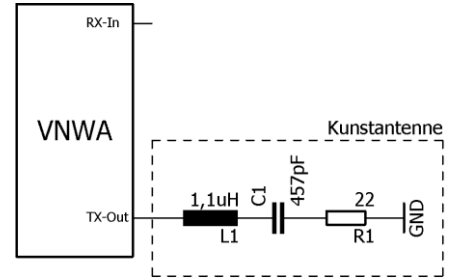
² Link: www.dg0sa.de/balun1zu1undefklein.pdf

Workshop Notes – Volume 1

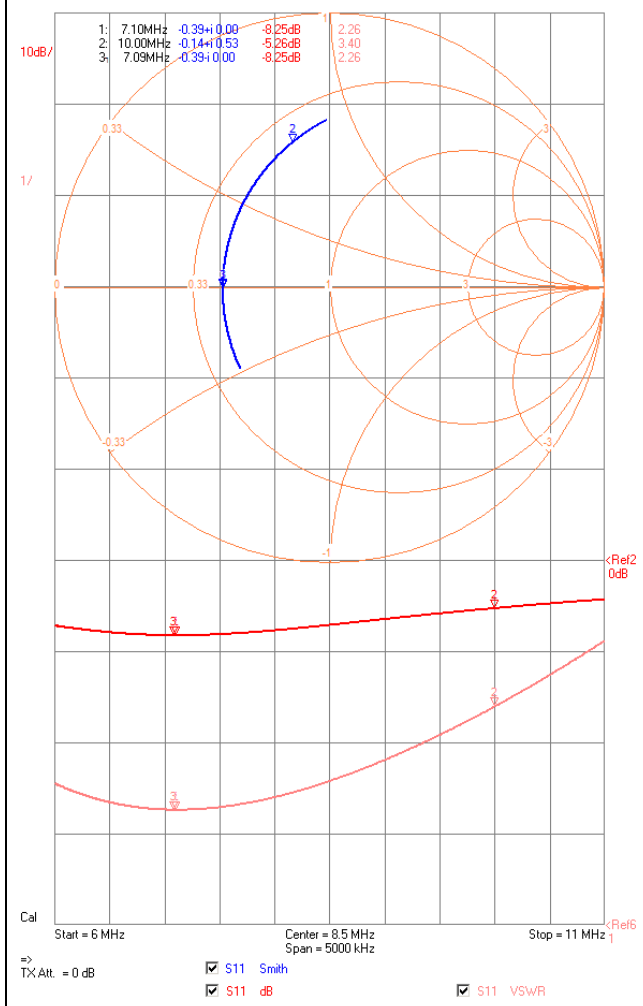
Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

3.12 Beispiel: Anpassung einer Antennennachbildung:

In diesem Kapitel beschreibe ich anhand einer künstlichen Antennennachbildung, wie eine Antenne angepasst werden kann. Der nebenstehende Schaltplan zeigt meine einfache Antennennachbildung, bestehend aus einem Serienschwingkreis in Reihe mit einem Widerstand. Es soll gezeigt werden, wie diese „Antenne“ für 10 MHz angepasst werden kann, obwohl sie eigentlich bei 7,1 MHz resonant ist.



Die Kunstantenne wird vermessen. Die Marker 1 und 2 sind feste Frequenzmarker und der Marker 3 ein Minimum-Marker. Diese „Antenne“ ist resonant auf der Mitte des 40m Bandes, aber nicht bei 50 Ohm.



Mit dem Matching-Tool des VNWA wird die Antenne auf 10 MHz angepasst. Wir betrachten nur Port 1 und bauen die vorgeschlagene LC-Anpassung nach.

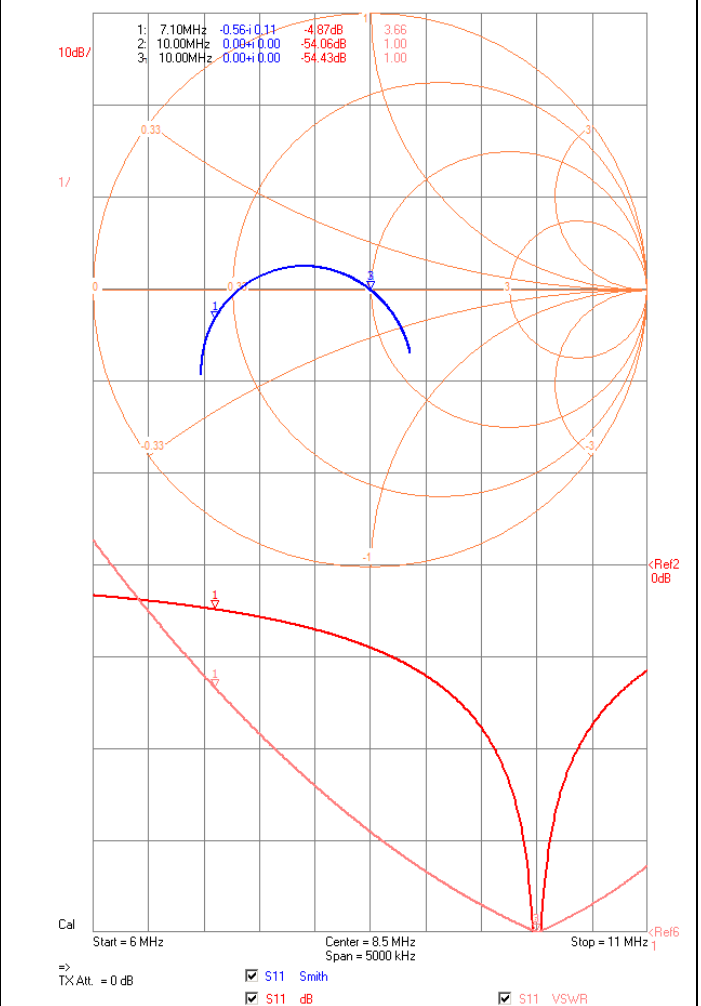
Recalculate to new source and load conditions

Port 1 Impedance	73	Ohm	Port 2 Impedance	50	Ohm
C parallel (neg. possible)	-327	pF	C parallel (neg. possible)	0	pF

Note, that the matching networks will transform to the conjugate Port1/2 impedances!

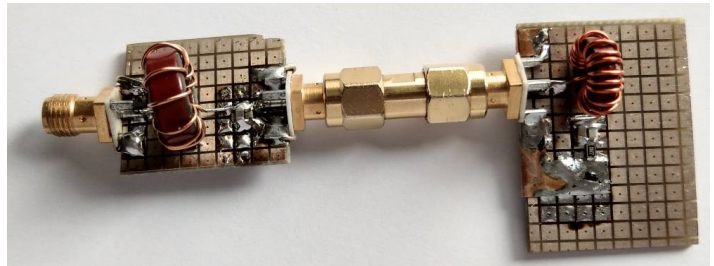
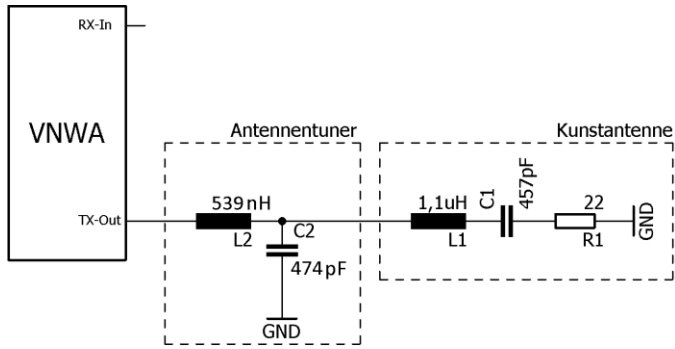
Input Impedance	50	Ohm	Output Impedance	50	Ohm
C parallel (neg. possible)	0	pF	C parallel (neg. possible)	0	pF
Matching Network Variant	2		Matching Network Variant	1	

Cp = 474 pF, Ls = 539 nH, Lp = 79.5 uH, Cs = 31.8 nF

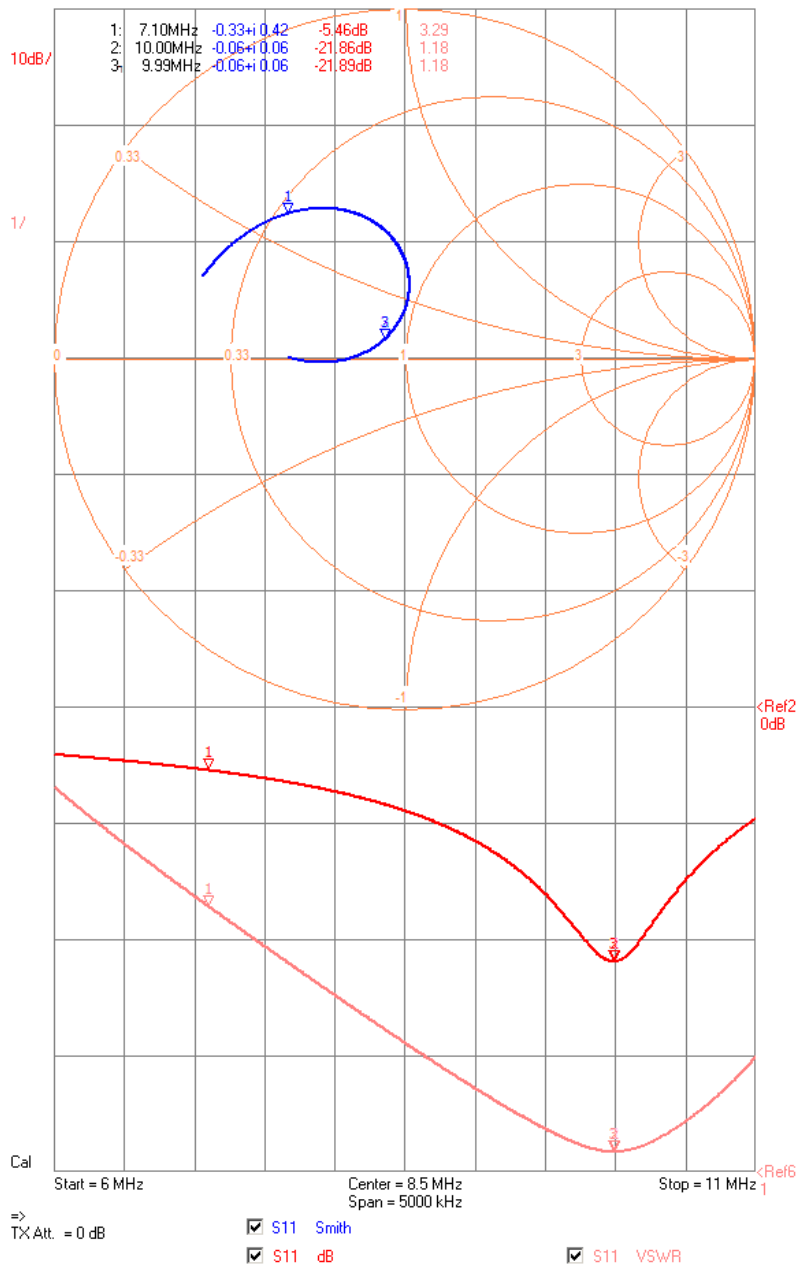


Workshop Notes – Volume 1

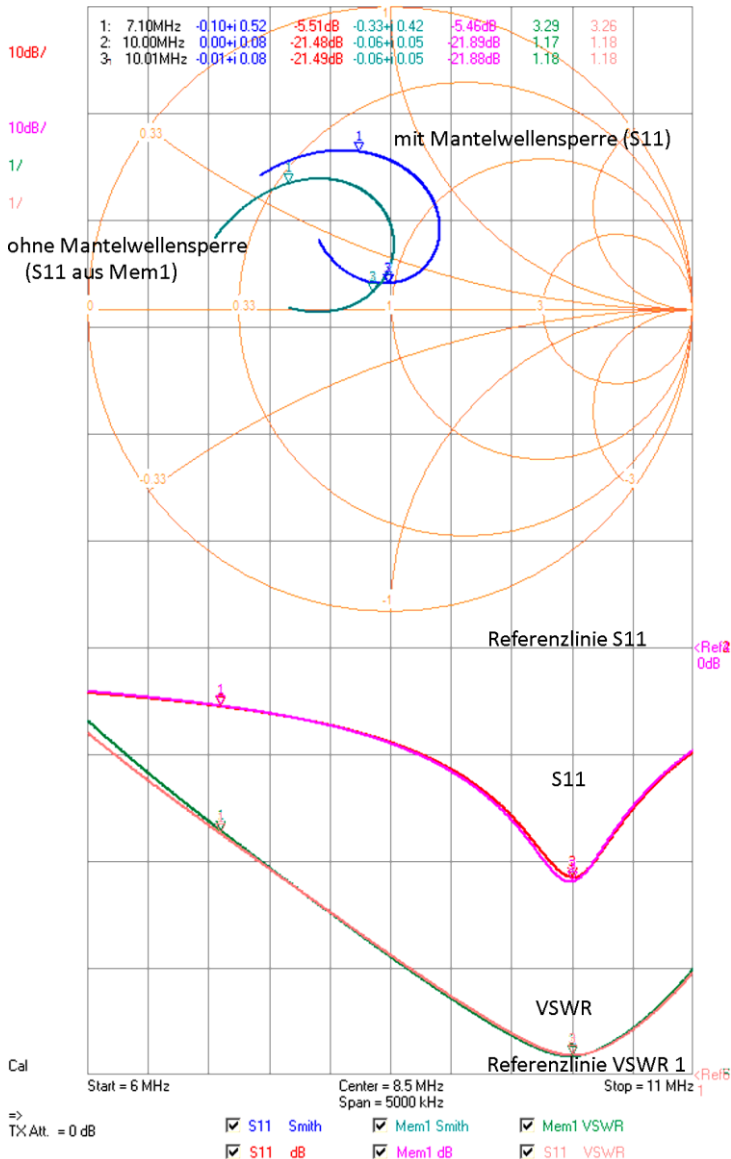
Jörn DK7JB mail@dk7jb.de



Die vorgeschlagene Anpassschaltung wurde aufgebaut und vermessen. Der Aufbau wurde nicht vollständig optimiert. Ein VSWR von 1,2 war mir gut genug um zu zeigen wie ein Antennenkoppler arbeitet. Bei 10 MHz spielt es keine Rolle, ob eine Antenne mit einem VSWR von 1,0 oder 1,2 angepasst ist. In der Realität müsste man noch an die Mantelwellensperre denken. Auf der nächsten Seite findet ihr Messungen hierzu.



Workshop Notes – Volume 1



Mit Mantelwellensperre

In der Realität würde man noch einen Strombalun der ganzen Anordnung in Reihe schalten, um die Mantelwellen einzudämmen. Da wir uns hinter der Anpassschaltung in der Nähe der 50 Ohm-Umgebung befinden, verändert der Balun das S11 und das VSWR nicht. Im Smith-Chart sind aber die Transformationen durch das Kabel der Mantelwellensperre zu sehen.



Weitere Hinweise zu koaxialen Strombaluns findet ihr in Kapitel 5.3.

Für Antenne sollte man besser die Antennen-Fachleute fragen. Hier einige Links zu den sehr empfehlenswerten Vorträgen von Max Rügger, HB9ACC (Sektion Bern) Folien zu seinen beiden Vorträgen über Antennen

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/Bern_Antennenpraesentation_Teil_1.pdf

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/Bern_Antennenpraesentation_Teil_2.pdf

Dann gibt es noch ausführliche Unterlagen zu den Vorträgen von Max Rügger, HB9ACC

Teil 1: Allgemeines, Materialkunde, Zubehör

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc1.pdf

Teil2: Speisekabel, SWR

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc2.pdf

Teil 3: Antennenkoppler, SWR-Meter, Messgeräte, Baluns

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc3.pdf

Teil 4: Antennen-Theorie, Antennensimulation

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc4.pdf

Teil 5: Dipole, Windom-Antennen, Trap-Antennen, Langdraht-Antennen

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc5.pdf

Teil 6: Ganzwellen-Dipol, L-Antennen, Sloper, Schleifenantennen, Vertikal-Antennen

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc7.pdf

Teil 7: Spannungsgespeiste Antennen, verkürzte Antennen, Sonderformen

https://www.hb9f.ch/bastelecke/pdf/HB9ACC_Antennen/hb9acc7.pdf

Hier noch einige Gedanken zum Thema Antennenbau:

www.dl2lto.de/dld/Antennenbau_Gedanken.pdf

4 Einstieg in den VNWA – vom Kauf bis zu den ersten Schritten -

In dieser kleinen Übersicht möchte ich euch einige Hinweise und Literaturempfehlungen zum Einstieg in die Arbeit mit den VNWA vorstellen. Hinweis: Kommerzielle Links sollen nur als erste Hilfe bei der Suche dienen.

4.1 Was kann man mit dem VNWA von DG8SAQ alles machen?



(c) sdr-kits.net

Daten des VNWA3 [1]

Typ: Vektor-Netzwerkanalysator (Amplituden- und Phasenmessung)
Frequenzbereich: 1 kHz bis 1,3 GHz
Dynamikbereich: 90 dB @ <500 MHz, ≥50 dB sonst (mit eingeschränkter Genauigkeit)
S-Parameter-Messung: Zweitor-S-Parameter S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} ; Dreitor-S-Parameter (mit zwischengespeicherten Werten)
Messdurchlauf: linear, logarithmisch und nach individueller Frequenzliste; max. 65 000 Datenpunkte, Sampling-Zeit einstellbar 16 ms bis 100 ms; bei Ultrafast-Sweeping bis zu 6250 Datenpunkte/s
Kalibrierung: (normale) und Master-Kalibrierung
Antennenmessung: Fußpunktswiderstand, Stehwellenverhältnis, Rückflussdämpfung, Horizontal- und Vertikal-Strahlungsdiagramm, Anpasstopf
Komponentenmessung: Widerstand, Leitwert, Kapazität und Induktivität (mit Ersatzschaltbild), Gütefaktor
Schaltungsmessung: Verstärker, Dämpfungsglied, Leistungsteiler, Anpassschaltung, Quarz, Quarzfilter, Saugkreis, Sperrkreis, Bandpassfilter, Transformationsleitung, Balun
Koaxialkabelmessung: Längenbestimmung, Aufspüren von Stoßstellen, Wellenwiderstand
Spektrumanalysator-Modus unterhalb 100 MHz
Eingangspiegel: ≤0 dBm
Signalgenerator: ohne Filter, max. Ausgangsleistung -12 dBm @ 1 MHz, mit steigender Frequenz abnehmend; einstellbares 50-dB-Dämpfungsglied in 0,1-dB-Schritten
Betriebssysteme: Windows7, Vista (64 Bit und 32 Bit); XP, ME, 2000, Windows 98
Sprache (Bedienung und Hilfedateien): Englisch
Spannungsversorgung: über USB 1.1, 2.0 oder extern 5 V / ≤ 500 mA
Anschlüsse: 2 × SMA, 1 × Mini USB-B, 1 × RJ-11

Quelle: FUNKAMATEUR; FA8/12; S.822ff

Hier eine unvollständige Sammlung der Möglichkeiten.

Wenn ihr euch das Help-File der VNWA-Software vornehmt oder in den **Büchern von Gerfried DH8AG** blättert findet ihr noch deutlich mehr Ideen und Vorschläge. Auch auf meiner Homepage www.bartelsos.de findet ihr viele Baumappen mit meinen Arbeiten.

Hier noch einige Möglichkeiten, die in dem nebenstehenden Kasten noch nicht genannt worden sind:

- LCR-Meter mit Güte der Bauteile
- Quarz-Analyzer
- Antennen ausmessen
- Abstrahlung einer Antenne messen
- Reflektion einer Leitung messen (z.B. Leitungslänge und Zustand)

Hardy DL1GLH hat auf seiner Homepage den VNWA mit einem kommerziellen Gerät von R&S verglichen:

<http://www.dl1glh.de/vnwa/vnwa.html>

Für die Fortgeschrittenen unter euch hier noch ein Paper von Thomas DG8SAQ zur Genauigkeit des VNWA:

Für den Download müsst ihr euch für die VNWA-Yahoo-Group anmelden und dann findet ihr die Datei im Ordner:

Name: Measurement_Accuracy_Considerations.pdf

<https://groups.yahoo.com/neo/groups/VNWA/files/A1%20DG8SAQ/>

Workshop Notes – Volume 1

4.2 Kauf eins VNWAs mit einigem Material

Solltet ihr noch unsicher sein, welches der VNWA Modelle ihr bestellen sollet, würde ich euch persönlich immer zu dieser Version raten:

- „DG8SAQ USB-Controlled VNWA 3EC - (Expansion board),
- VNWA Testboard Kit (Includes Test Components)
- SDR-Kits Cal Kit of Rosenberger Parts in Presentation Case“ 12 GHz
- 2 mal: SMA Connector Flat Spanner 8, 6, 5.5, 5mm and 5/16 Inch (Low cost Special SMA tool)

Das „**Expansion Board**“ **“EC**“ ist wichtig, damit die Messdauer halbiert werden kann. Beim Abgleich von Filtern und Verstärkern ist dies sehr hilfreich.

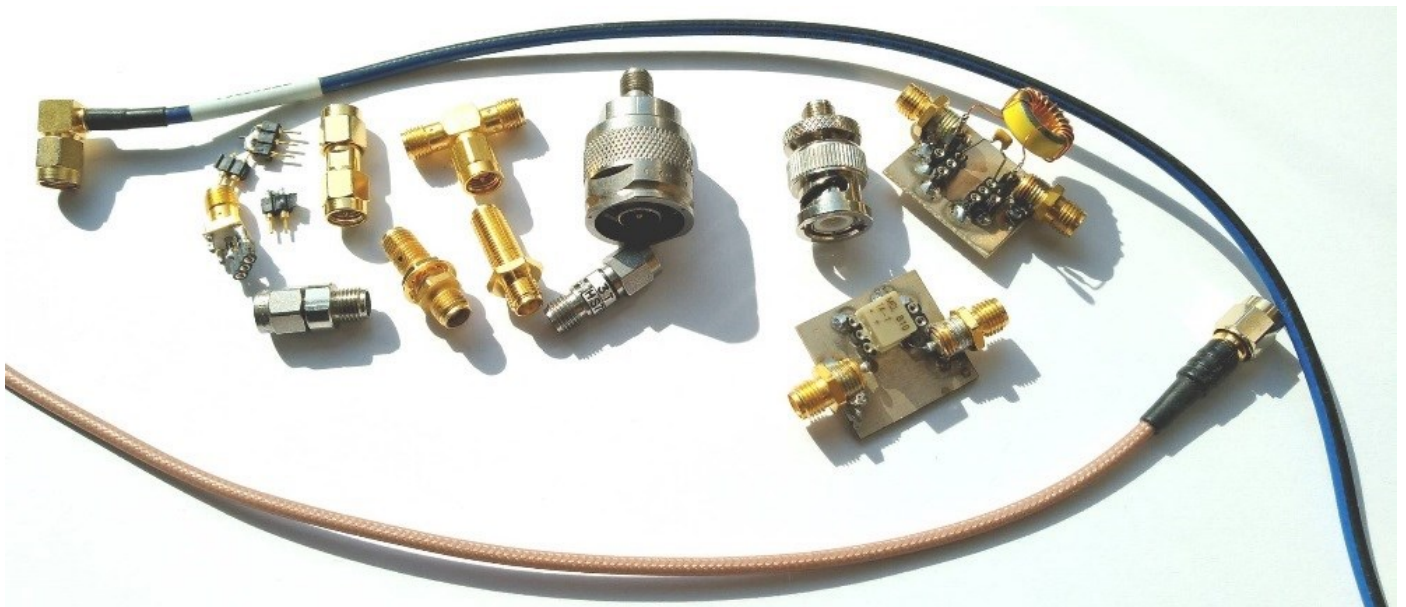
Nur beim **Cal Kit von Rosenberger** ist die Bedienung bequem! Im Bild seht ihr die von mir mit einem Lackstift markierten Stecker aus dem Kalibrierungselemente-Kit. Die Markierung schützt vor Verwechslungen mit anderen Steckern. Die elektrischen Kenndaten findet ihr hier:

https://sdr-kits.net/documents/Rosenberger_Female_Cal_Standards_rev5.pdf

Mit diesem Kalibrierungs-Kit haben wir sehr gute Erfahrungen gemacht.

Dann benötigt ihr noch **hochwertige Kabel und SMA-Stecker und Adapter**. Ich empfehle euch, dass ihr euch auf Amateurfunk-Flohmärkten damit eindeckt. An Ständen an denen GHz-Sachen verkauft werden, werdet ihr bestimmt fündig.

In diesem Bild findet ihr eine kleine Sammlung meiner Kabel, Adapter, und selbstgebaute Messhilfen. Mit diesen Materialien haben wir auch auf dem Workshop experimentiert.



Bitte **niemals** Billigstecker- oder Kabel verwenden. Damit macht ihr euch nur den VNWA oder teure Adapter kaputt. Bitte defekte Stecker oder Kabel immer sofort entsorgen.

Wichtiger Hinweis: Die Messkabel sollten möglichst nicht vom VNWA entfernt werden, um die SMA-Stecker des VNWA zu schonen. Kalibriert wird immer am Ende der Messkabel!

4.3 VNWA-Software und Help-Files

Die Software des VNWA und weitere Informationen und Help-files findet ihr hier:

<http://sdr-kits.net/DG8SAQ/VNWA-installer.exe>

<http://www.sdr-kits.net/vnwasoftware/>

Auf dieser Seite findet ihr auch das Help-file als PDF in deutscher Sprache. Bitte druckt es euch aus und lest es gründlich! Das Help-File ist als Tutorial mit vielen Beispielen geschrieben, sodass es wirklich lohnt sich durch die ca. 500 Seiten nach und nach, themenspezifisch durchzuarbeiten.

Weitere Hinweise zur Installation und zum Help-File als PDF in deutscher Sprache:

<http://www.sdr-kits.net/vnwasoftware/?21>

4.4 Empfehlenswerte Bücher und Videos und andere Quellen

Diese beiden Bücher sind sehr zu empfehlen. Sie sind als Arbeitsbuch zu verstehen und sollten wenigstens in Teilen gründlich durchgearbeitet werden:

„Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2/VNWA3“ Band 1 und 2 von Gerfried Palme

<http://darcverlag.de/Messen-mit-dem-Vektor-Netzwerkanalysator-VNWA2-VNWA3>

<http://darcverlag.de/Messen-mit-dem-Vektor-Netzwerkanalysator-VNWA2-VNWA3-Band-2>

Das Buch „HF-Messungen für den Funkamateurl“ von Hans Nussbaum, DJ1UGA, ist sehr praxisorientiert, auch wenn es nicht speziell auf den VNWA zugeschnitten ist. Empfehlenswert.

http://www.box73.de/product_info.php?products_id=2939

Sehr gute Vorträge als Videos von Thomas DG8SAQ zum VNWA findet ihr als wichtige Hintergrundinformation und Lerntutorial hier: <http://www.dg8saq.darc.de/> . Es lohnt sich diese Videos mit viel Ruhe anzusehen. Dringende Empfehlung!!!

Hier die direkten Links:

HAMRADIO 2012 DG8SAQ VNWA: <https://www.youtube.com/watch?v=SsbGAH9zdVM>

HAMRADIO 2013 with slides part 1 German version: <https://www.youtube.com/watch?v=bXfMaQBBHq4>

HAMRADIO 2013 with slides part 2 German version: <https://www.youtube.com/watch?v=nLYBcltxpeQ>

HAMRADIO 2014 German as recorded: <https://www.youtube.com/watch?v=ed3ag1ToLbc>

Dort findet ihr auch noch neuere Filme, die sich aber eher an Fortgeschrittene richten

Dringend empfehle ich euch auch das VNWA-Forum. Hier können Fragen gestellt werden und hier findet ihr auch relevante Software und PDF-Dokumente. Ihr müsst euch hierfür natürlich anmelden. Es ist ratsam sich für dieses Forum eine extra Email-Adresse zuzulegen, da alle Mitteilungen per Email verschickt werden:

<https://groups.yahoo.com/neo/groups/VNWA/info>

mini Ringkern-Rechner zur Berechnung von Induktivitäten: <http://www.dl0hst.de/mini-ringkern-rechner.htm>

Workshop Notes – Volume 1

4.5 Erste Schritte mit dem VNWA

Der VNWA ist ein sehr mächtiges Messwerkzeug. Daher bedarf es einer gewissen Einarbeitung. Ich möchte euch ans Herz legen, dass ihr euch die genannten Videos und PDFs ansieht und durcharbeitet.

Um euch die ersten Schritte zu erleichtern hat sich Kurt Poulsen OZ7OU sehr viel Mühe gegeben und Videos für Einsteiger erstellt. Diese Videos sind alle in englischer Sprache. Bitte seht euch die Videos intensiv an.

„Installing the VNWA Software – First time or as an update“: <https://www.youtube.com/watch?v=TOMj4jaUSKs>

„First time of the VNWA software“: <https://www.youtube.com/watch?v=cuLjsJYpODc>

„First time calibration of the VNWA“: <https://www.youtube.com/watch?v=cuLjsJYpODc>

Auf der VNWA-Seite von sdr-kits ist auch eine sehr gute Schritt für Schritt Anleitung für die erste Installation und die erste Messung in deutscher Sprache zu finden:

https://www.sdr-kits.net/documents/VNWA3_Ans_Laufen_bringen-W10_W8_W7.pdf

Auf der Homepage von Gunthard Kraus DG8GB (www.gunthard-kraus.de) findet ihr auch eine Einführung für den VNWA: <http://www.gunthard-kraus.de/VNWA3/VNWA3-Tutorial.pdf>

Hier wird alles Schritt für Schritt erklärt. Dies Tutorial solltet ihr auch durcharbeiten.

„Vektorielle Netzwerkanalyse am Beispiel des VNWA 3 erklärt“ Folge 1 und 2; Funkamateure FA 8/12 S. 822ff und FA9/12 S. 926ff

Wenn ihr anhand der Videos die Software installiert, die Software das erste Mal gestartet und eine Kalibrierung durchgeführt habt, ist es Zeit für eine Erste Messung. Nehmt einen Hochpass- oder Tiefpassfilter aus eurer Sammlung und führt eine Messung aus, wie wir das im Workshop zusammen geübt haben.

Das Tutorial von Gunthard hilft euch auch weiter.

4.6 Hinweise für den VNWA-Einsteiger, wenn die ersten Hürden schon überwunden worden sind

Damit ihr euch eine Vorstellung davon machen könnt was man alles mit dem VNWA machen kann, habe ich in diesem Unterkapitel Projekte aufgelistet, die ihr auf meiner Homepage finden könnt.

Alles rund um Bandfilter und Quarzfilter: <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/projekte/quarzfilter-und-bandfilter/>

Hier findet ihr viele Messungen, die man mit einem VNWA an einem Empfänger durchführen kann

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/experimente-am-k2-mit-baumappte>

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/selbstbau-trx-2012>

<http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/der-kubik-verstaerker>

Ein rauscharmer Verstärker mit Trafo Gegenkopplung und hoher Linearität. Die "eierlegende Wollmilchsau" für den Bereich der Kurzwelle: <http://www.bartelsos.de/dk7jb.php/der-kubik-verstaerker>

5 Messungen für den Anfang - Praktische Hinweise

5.1 VNWA: Anleitung zum Erstellen einer Master Calibration

Hier nun die Prozedur wie man eine "Master Calibration" macht:

Zunächst einmal ist es so, dass bei einer normalen Kalibration bei jeder Änderung der Wobbel-Start-Stop-Frequenzen, oder der Anzahl Messpunkte die Kalibration ungültig wird und somit neu kalibriert werden müsste. Um diese umständliche Vorgehensweise zu vermeiden wurde die Master Cal erfunden.

- 1) Man kalibriert mit der maximalen Punktezahl von 8192 Punkten mit maximal zulässiger Sweep Time.
- 2) Man wählt den maximal breiten Frequenzbereich von 1kHz-1300MHz
- 3) man führt eine SOLT-Kalibrierung durch (SOLT bedeutet short, open,load through) , crosstalk cal (Übersprechen) sollte man wirklich nur dann verwenden wenn man Übersprechen zu vermeiden hat, ansonsten lässt man diesen Punkt einfach aus
- 4) Nach erfolgter SOLT-Kalibration drückt man die Taste "save current calibration as master cal", die Kalibrationsdaten werden dann unter einem einzugebenden Namen abgespeichert.

Es empfiehlt sich den Namen "sprechen" zu lassen z.B.

MC_sw_koax_1khz-1300_8192pnts_8_Aug_12

Für MC: master cal, sw_koax: die verwendeten kurzen schwarzen Koax-Messleitungen, Frequenzbereich, Anzahl der Messpunkte, Datum.

Diese Angaben helfen beim Wiederfinden der richtigen Kalibration.

- 5) Hinweis: sieht man ein rotes M in den grünen Anzeigepunkten dann liegt EINE MC (master cal) vor, wurde die master cal aufgerufen und ist wirksam verschwinden die roten M

- 6) Hinweis: wird nun die Anzahl Punkte oder der Frequenzbereich geändert werden aus der master cal neue Kalibrationsdaten interpoliert.

Dieses wird angezeigt indem in den roten Anzeigepunkten (im Cal Menu) ein grünes M erscheint.

- 7) Hinweis: Man darf sich mehr als eine Master Cal Datei anlegen, aber bitteschön mit unterschiedlichen Namen

- 8) eine gespeicherte Master Cal holt man sich jederzeit über File->Retrieve->Master-Cal wieder

Ich fertige mir aber auch gerne Master Kalibrationen von 1-200 MHz mit 600 Punkten und maximaler Sweeptime an. Das ist mein Hauptmessbereich. Hierbei liegt außerdem dann der Schwerpunkt auf einer Reduzierung des Rauschens.

Die MasterCal gilt immer nur die Messleitungen, welche bei der Kalibrierung verwendet wurden.

Weitere Hinweise zur Kalibrierung findet ihr im Buch von Gerfried „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 1“ in Kapitel 3.

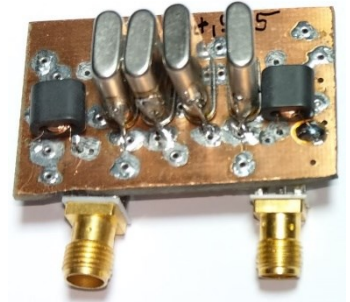
Im gesamten Buch geht Gerfried sehr ausführlich auf die Grundlagen der Kalibrierung und auch auf Besonderheiten, die beachtet werden sollten, ausführlich ein.

Workshop Notes – Volume 1

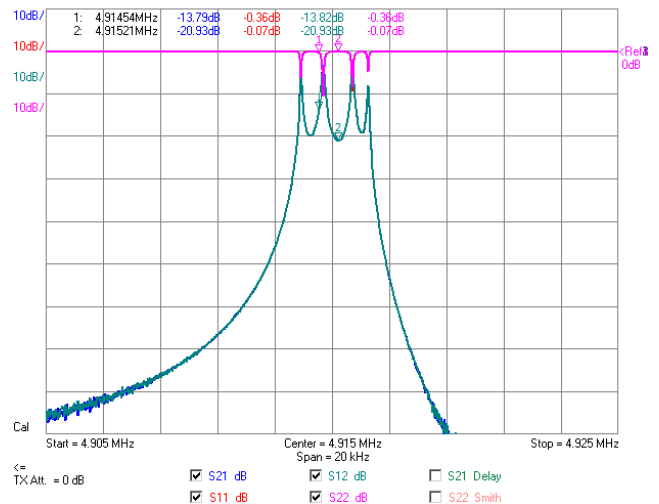
Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

5.2 4,915 MHz Quarzfilter vermessen und richtig anpassen

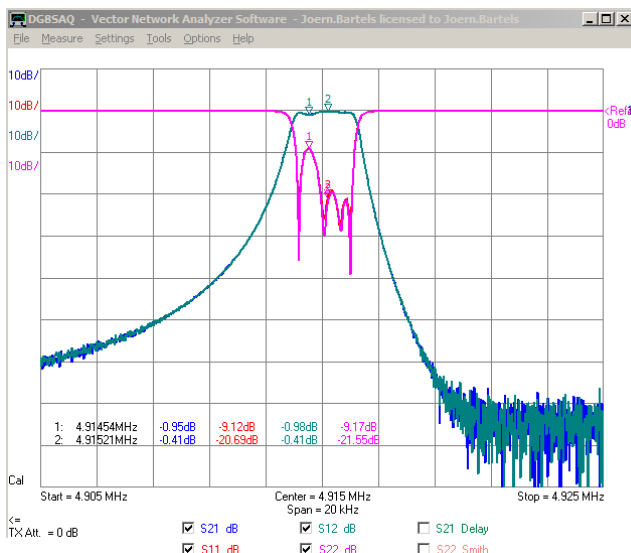
Hier wird ein Quarzfilter neu vermessen und mit neuen Übertragern zur Impedanzanpassung versehen, nachdem bei einer Fortbildung der Kupferlackdraht der Übertrager an zwei Stellen gerissen ist.



Die erste Messung zeigt den Quarzfilter, nachdem die beiden Übertrager entfernt und die Filterschaltung direkt an die SMA-Buchsen angelötet worden ist. Direkt vermessen zeigt sich die extrem schlechte Anpassung – wie zu erwarten. Für die Messung werden zuerst S11 und S21 vermessen. Dann wird der Filter an den Messkabeln des VNWA umgedreht, also Filtereingang und Filterausgang vertauscht. Die Messrichtung am VNWA wird geändert, indem unter VNWA-Measure-Direction die Rückrichtung ausgewählt wird. Vor der Messung müsst ihr euch alle vier S-Parameter anzeigen lassen – wie im Bild. Dann kann die Rückrichtung vermessen werden.



Nun wird mit dem Matching-Tool eine virtuelle Anpassung durchgeführt – siehe Bild unten. Bei einer Filterimpedanz von 1030 Ohm ergeben sich die besten Kurven für die vier S-Parameter.



Recalculate to new source and load conditions

Port 1 Impedance: 1030 Ohm | Port 2 Impedance: 1030 Ohm

C parallel (neg. possible): 0 pF | C parallel (neg. possible): 1 pF

Note, that the matching networks will transform to the conjugate Port1/2 impedances!

Matching Networks:

Input Impedance: 50 Ohm | Output Impedance: 50 Ohm

C parallel (neg. possible): 0 pF | C parallel (neg. possible): 0 pF

Matching Network Variant: 1 | Matching Network Variant: 1

Lp = 7.53 µH | Cs = 146 pF | 4.915 MHz | Lp = 7.47 µH | Cs = 146 pF

Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

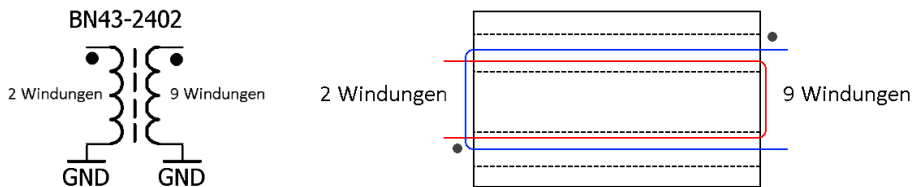
Da mir meist eine Anpassung über LC-Glieder zu umständlich ist, nehme ich überwiegend Doppellochkerne. Um die Berechnung zu beschleunigen habe ich ein kleines Excel-Sheet geschrieben. Ihr findet es auf meiner Homepage:

<https://www.bartelos.de/dk7jb.php/uebertrager-mit-doppellochkernen>

Übertrager wickle ich immer für den Kurzwellenbereich auf den Doppellochkern BN 43-2402. Für die Primärwindung reichen immer 2-4 Windungen und auf der Sekundärwindung nicht mehr als 15 Windungen. In unserem Fall wurden für die 50 Ohm Seite zwei Windungen aufgewickelt und auf der Primärseite für die 1030 Ohm dann neun Windungen.

Übertrager	
Quellimpedanz:	50 Ohm
Zielimpedanz:	1030 Ohm

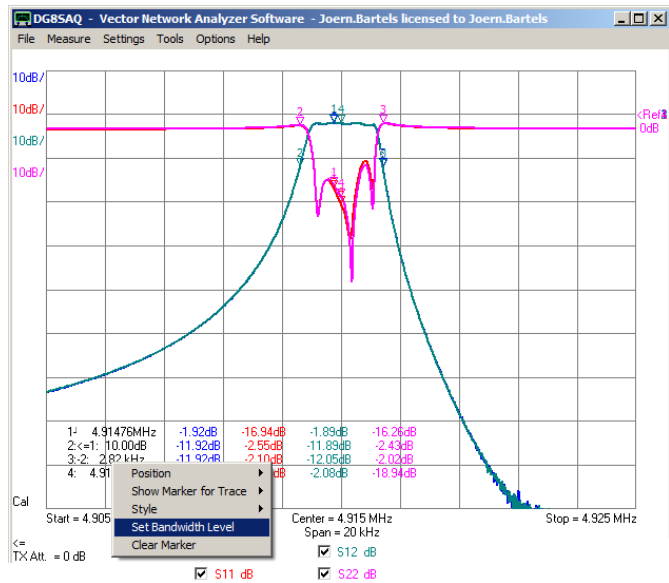
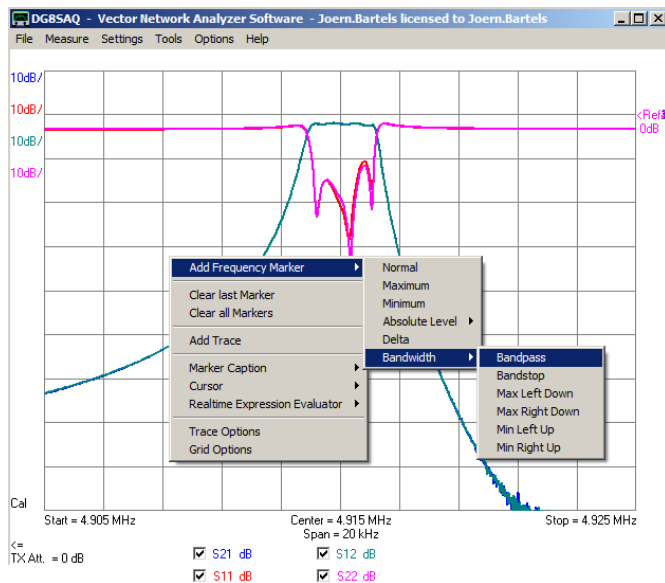
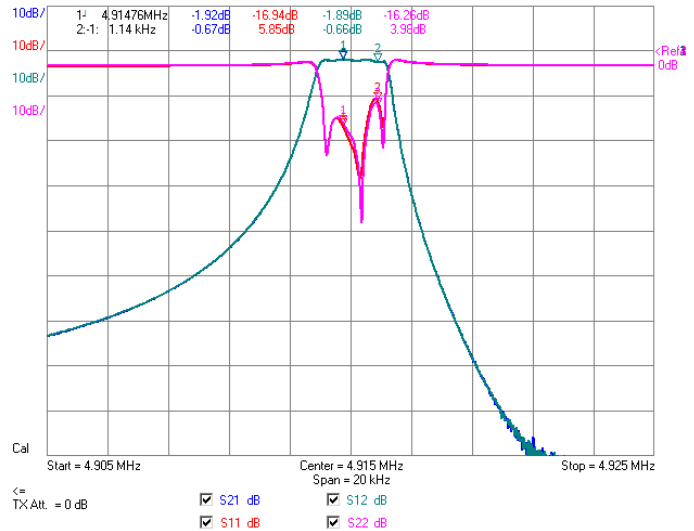
Anzahl an Windungen	
Primär	Sekundär
1	4,5
2	9,1
3	13,6
4	18,2
5	22,7
6	27,2
7	31,8



Die „heißen“ Enden des Übertragers sind mit einem Punkt gekennzeichnet.

Die folgende Abbildung zeigt die Messung, des mit Übertragern, angepassten Quarzfilters.

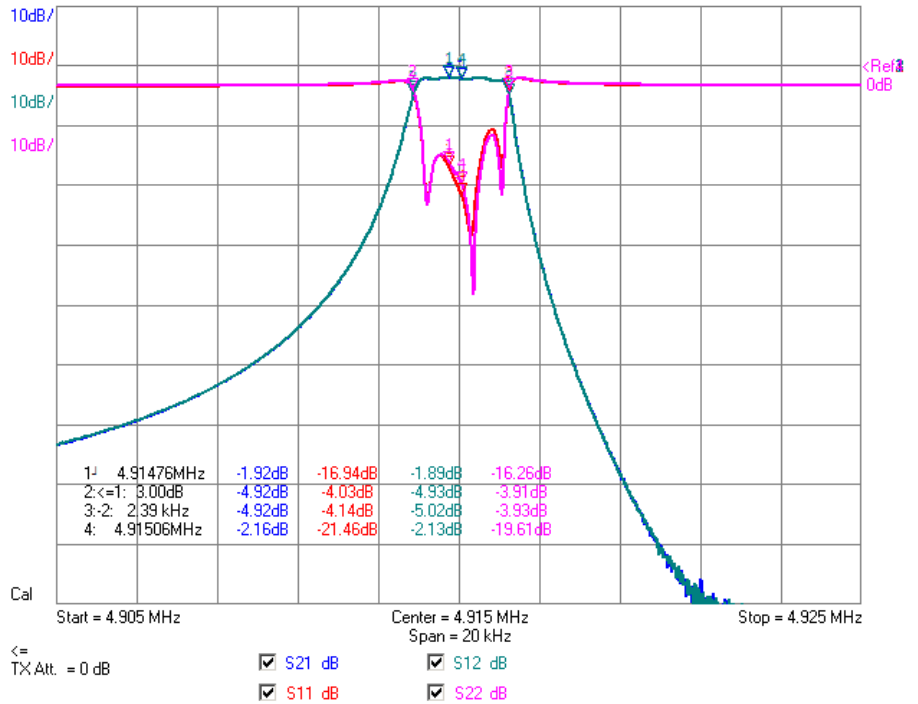
Die tabellarische Anzeige der Messwerte kann mit der Maus verschoben werden, wenn man im Bereich der Frequenzangaben mit der linken Maustaste die Tabelle „anfässt“. Wenn in diesem Bereich die rechte Maustaste betätigt wird, öffnet sich ein Kontextmenü, welches auch erlaubt die Breite der Bandbreitenmarker zu verändern. Im Bild (unten) ist eine Bandbreite von BW = 3 kHz dargestellt. Der Quarzfilter hat dann eine 3 dB-Bandbreite von BW3dB = 2,39 kHz.



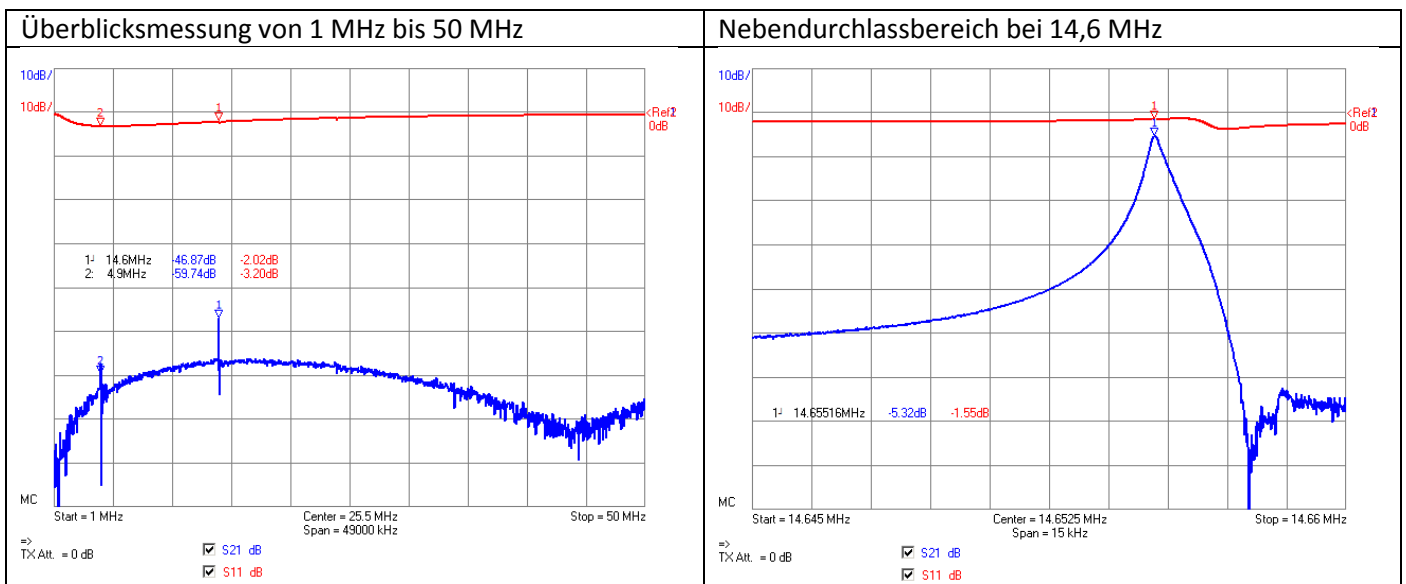
Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

Hier nun die finale Messung für den Durchlassbereich. Für einen schnellen Aufbau für einen Workshop sind die Werte gut und wir können damit zufrieden sein.



Hier nun zwei weitere Messungen. Die erste Messung zeigt einen großen Frequenzbereich von 1 MHz bis 50 MHz mit 1300 Punkten. Die Sperrdämpfung liegt bei grob 55dB, was mit nicht ausreichen würde. Der Durchlassbereich bei 4,9 MHz kann nicht vollständig dargestellt werden, da die Messpunkte des VNWA bei diesem großen Frequenzintervall zu weit auseinander liegen. Die S21 Durchlassmessung zeigt zwei Nadeln in ihrer Messkurve (Marker 1 und Marker 2). Neben dem Durchlassbereich findet sich noch eine Störung im Sperrbereich bei rund 14,6 MHz. Das sollte euch ein Anlass für eine genauere Untersuchung sein. Das rechte Bild zeigt nun eine Messung mit kleinem Frequenzintervall bei 14,6525 MHz. Hier zeigt sich, das was viel Quarzfilter haben, dass die Nebenresonanzen der Quarze auch einen Nebendurchlassbereich bilden können. Das ist etwas was niemand haben möchte. Abhilfe würden ein Diplexer schaffen oder auch eine Anpassung mit LC-Gliedern in Tiefpass-Charakteristik. Die LC-Glieder hätten nur den Nachteil der genauen Abstimmung. Die Sperrdämpfung ließe sich nur durch Quarzfilter mit mehr Quarzen verbessern.



5.3 Balune, UnUns und Mantelstromsperren

Im Laufe der Vorbereitung zum Workshop 2019 haben uns mehrere Teilnehmer Fragen zu Balunen, Ununs und Mantelstromsperren gestellt. Dieses, doch etwas längere Kapitel, soll der Vorbereitung und der Nachbereitung auf den Workshop dienen.

Besonders erwähnen möchte ich einen Vortrag von Günter DL4ZAO zum Thema Balune. Vielen Dank, dass ich mich hemmungslos der Bilder und Texte bedienen darf: https://dl4zao.de/downloads/Balun_dl4zao.pdf

Wolfgang Wippermann (+) DGOSA hat eine beeindruckende Homepage zusammengestellt, die sich schwerpunktmäßig mit Balunen und der Entstörung von Geräten befasst. Auch von ihm durfte ich Inhalte übernehmen: <http://www.wolfgang-wippermann.de/>

Am Ende des Kapitels findet ihr weitere Links.

Da in diesem Dokument der Platz begrenzt ist, werde ich nur den Strombalun intensiver behandeln – mit Experimenten. Für die anderen Balun-Arten verweise ich auf die beiden genannten Quellen.

5.3.1 Unterschied: Strombalun - Spannungsbalun - Unun

Unter dem Begriff Balun werden meist zwei Varianten unterschieden. Ein Unun muss nochmals extra betrachtet werden:

- Der „Strombalun“ erzwingt symmetrische Ströme.
Ein Strombalun wird als Gleichtaktdrossel (Mantelwellensperre, common mode choke) eingesetzt.
Die Aufgabe eines Strombaluns ist es, an den Ausgangsklemmen betragsgleiche und entgegengesetzt gerichtete Ströme zu erzeugen. Als Konsequenz kann die Ausgangsspannung, die an den Ausgangsklemmen gegen Erde anliegt, den Wert annehmen der notwendig ist, um die Stromsymmetrie zu erzeugen.
- Der „Spannungsbalun“ erzwingt symmetrische Spannungen.
Er dient häufig als Impedanztransformator zur breitbandigen Anpassung von Antenne und Leitung.
Ein Spannungsbalun erzeugt an seinen Ausgangsklemmen gleiche Spannungen bezogen auf das Erdpotential. Ein Spannungsbalun wird oft mit einem Übersetzungsverhältnis gewickelt, so dass er unterschiedliche Impedanzen zwischen Ein- und Ausgang transformiert.
- Ein UnUn transformiert nur Impedanzen
Ein Unun ist ein einfacher Übertrager, meist in Spartrafoschaltung. Es wird nichts symmetriert und nichts unterdrückt.

Ein Strombalun unterdrückt Mantelwellen. Ein Spannungsbalun ist nicht dazu geeignet, Mantelströme wirksam zu unterdrücken!

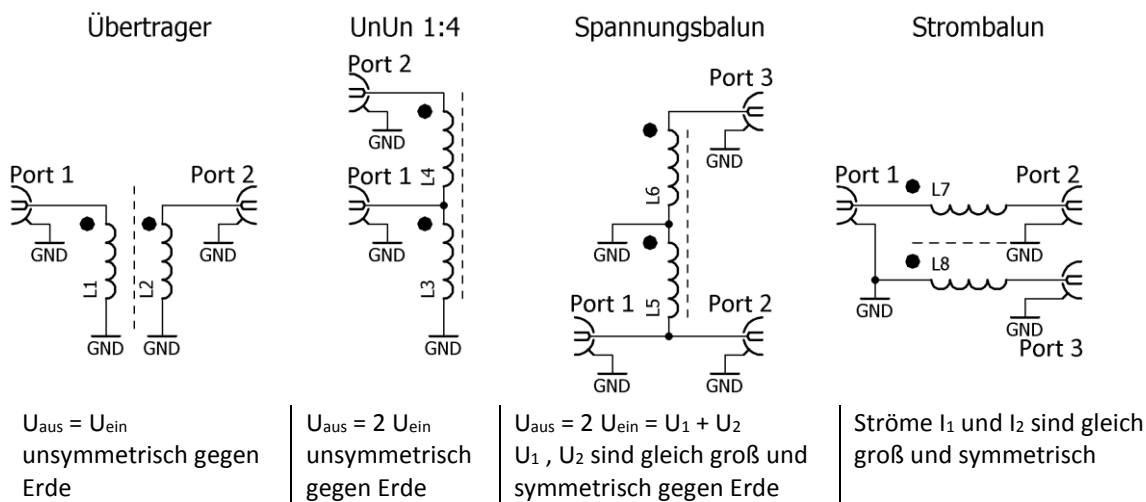
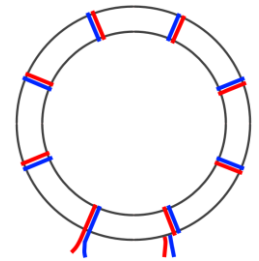
Ein Spannungsbalun kann jedoch zu diesem Zweck mit einem 1:1 Strombalun kombiniert werden (Hybridbalun).

Auf der nächsten Seite zeige ich an einem Beispiel, wie mit einem bewickeltem Ringkern ein Strombalun, ein Spannungsbalun und ein UnUn gebaut werden kann.

Gerfried beschäftigt sich in seinem Buch „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 2“ in Kapitel 10 auch mit Balunen und mit der 3-Port-Messung.

Workshop Notes – Volume 1

Gleiche Wicklung – unterschiedliches Ergebnis



Diese Abbildung zeigt deutlich, wie aus einem Ringkern, der mit zwei bewickelt worden ist einen UnUn, einen Spannungsbalun oder einen Strombalun schalten kann. Im Bild fehlt auch noch die Möglichkeit sie beiden Wicklungen zu einem 1:1 Übertrager zu schalten – also eigentlich vier Möglichkeiten.

Achtung! Vertauschte Anschlüsse machen aus einem Strom-Balun schnell einen Spannung-Balun oder UnUn

Hinweis: In Kapitel 5.3.5 werde ich, genau wie hier beschrieben, Balune und Übertrager auf vier Ringkernen wickeln und aufbauen und sie dann anschließend vermessen.

Workshop Notes – Volume 1

5.3.2 Der Strombalun

In diesem Kapitel erkläre ich zuerst die Entstehung von Mantelwellen, dann die Funktionsweise von Strombalunen und dann folgen noch zwei Beispiele.

5.3.2.1 Energietransport auf Koaxialkabeln

Ein Koaxialkabel hat wegen des Skineffektes drei Leiter:

- Innenleiter
- Der Schirm Innenseite
- Der Schirm Außenseite

Der Energietransport erfolgt als TEM Welle in einem elektromagnetischen Feld zwischen Innenleiter und Abschirmung innen. Bei einer Transversalelektromagnetische Welle, im englischen auch „Transverse Electromagnetic Mode“ (kurz TEM) befinden sich die magnetischen und elektrischen Felder ausschließlich in Ebenen senkrecht (transversal) zur Ausbreitungsrichtung. In einem Koaxialkabel bildet sich eine solche Welle als geführte Welle aus.³ Für eine solche TEM-Ausbreitung im Koaxialkabel müssen zwei ideale Leiter existieren, deren Anordnung in Ausbreitungsrichtung gleichförmig ist und sie sich in einem homogenen Raum befindet. Der Strom auf dem Innenleiter und der Strom auf der Innenseite des Schirms sind im Betrag gleich, aber entgegengesetzt gerichtet. Auf der Außenseite des Schirms findet im Idealfall kein Stromfluss statt. Wenn aber doch aufgrund von Störungen (z.B. der Symmetrie) ein Strom auf der Außenseite des Schirms fließt, spricht man von Mantelwellen. Weiter unten gehe ich hierauf ein.

Wegen des Skin-Effekts wirkt die Schirm Außenseite für HF wie eine separate Eindraht-Leitung, sie hat einen etwas geringeren Verkürzungsfaktor als die koaxiale Leitung im Inneren.

Skin-Effekt

Wird ein elektrischer Leiter von höherfrequentem Wechselstrom durchflossen, ist die Stromdichte außen höher als im Inneren des Leiters.

In manchen Quellen wird von Stromverdrängung gesprochen, was unglücklich gewählt ist. Aufgrund der hohen Leitfähigkeit des Materials eines Leiters kann das elektrische Feld bei Wechselströmen gar nicht erst vollständig in das Material eindringen. Bei Wechselströmen dienen die elektrischen Felder als Träger der Energie und nicht der Strom.

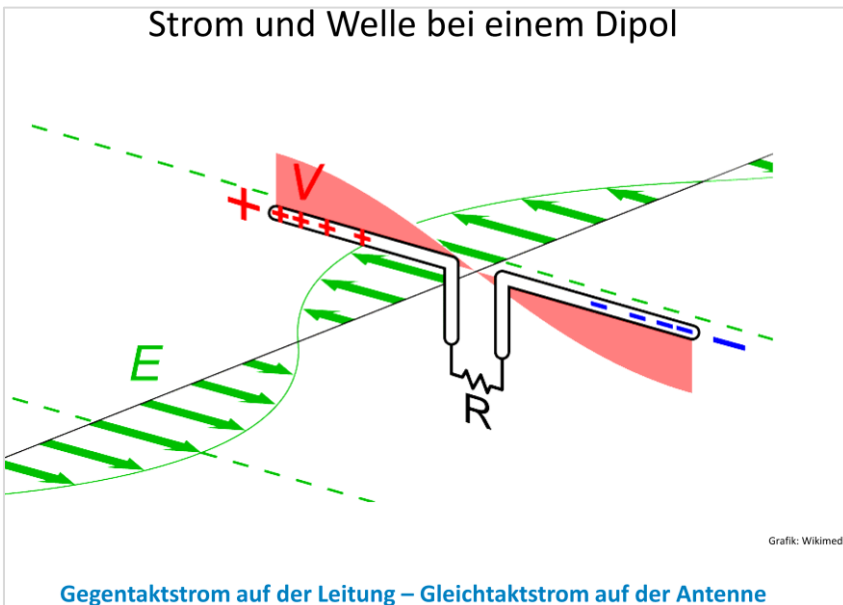
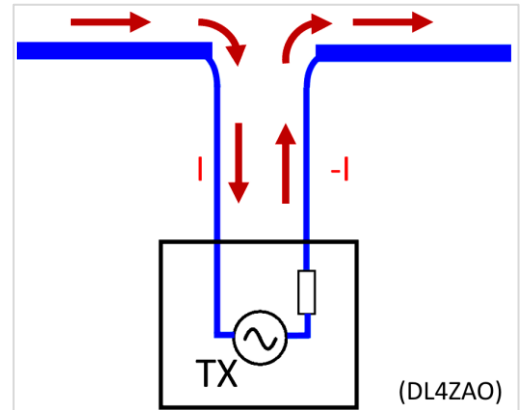
Das Innere des Leiters trägt nahezu nicht mehr zur Stromleitung bei. Der für den Elektronenfluss effektiv wirksame Leiterquerschnitt verringert sich. Der Wirkwiderstand des Leiters nimmt zu. Durch den Skin-Effekt vermindert sich mit steigender Frequenz die Eindringtiefe des Wechselstromes in einem Leiter

Frequenz	Eindringtiefe
50 Hz	9 mm
500 kHz	0,1 mm
5 MHz	30 µm
500 MHz	3 µm

³ https://de.wikipedia.org/wiki/Transversalelektromagnetische_Welle

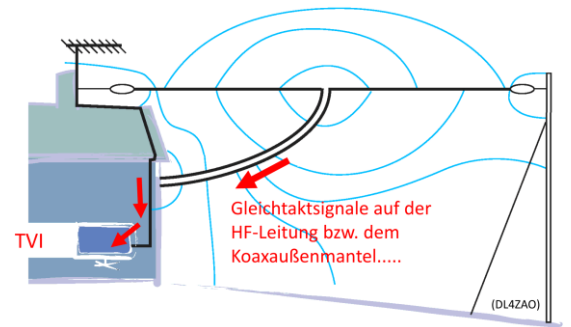
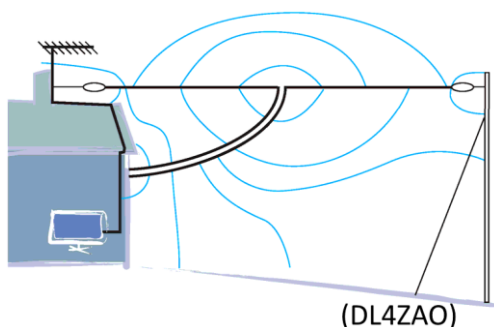
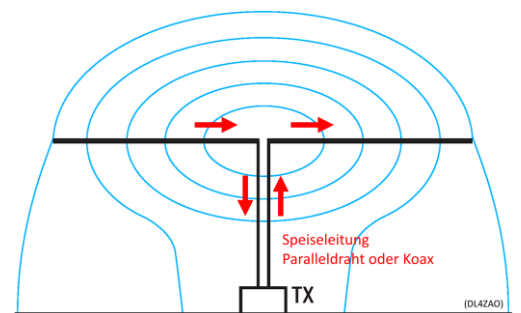
5.3.2.2 Gegentaktstrom und Gleichtaktstrom

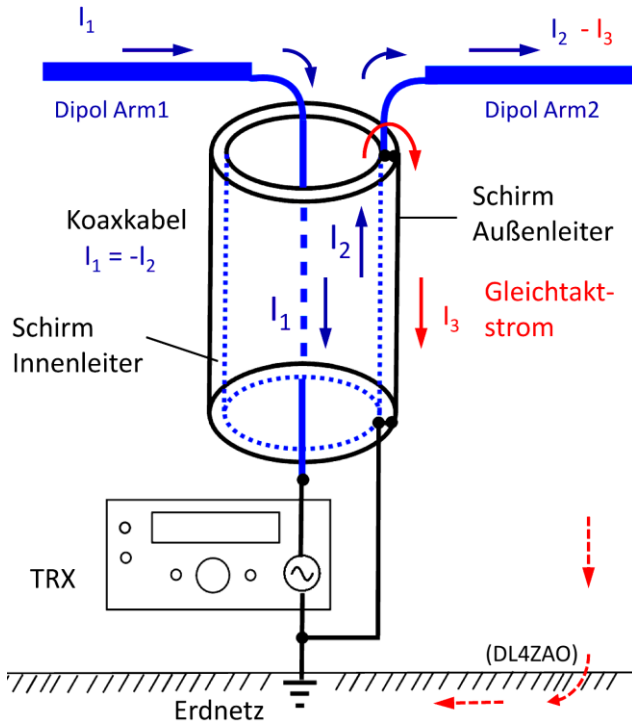
Der Energietransport erfolgt zwischen Quelle und Last in der Leitung als transversale elektromagnetische Welle (TEM-Welle). Auf beiden Leitern der Leitung fließen gleiche, aber entgegengesetzt gerichtete Ströme. Das nennt man "Gegentaktstrom". Die Gegentakt-Felder in der Leitung heben sich gegenseitig auf. Die Leitung strahlt keine Energie an die Umgebung ab. Auch findet keine Einstrahlung von Störungen auf die Leitung statt. Am Speisepunkt eines Dipols wird aus dem Gegentaktstrom auf der Leitung ein Gleichtaktstrom auf dem Strahler. Beschleunigte Ladungen von Gleichtaktströme auf der Antenne führen zu Wellenablösung (Strahlung, elektromagnetische Welle) - die Leitung/Antenne strahlt.



5.3.2.3 Mantelströme

Für einen idealen symmetrischen Dipol ergeben sich im Idealfall die Felder wie im nebenstehenden Bild dargestellt. In der Realität sind die wenigsten Antennen symmetrisch. Unterschiedliche Impedanzen der Dipoläste bedeuten Potentialunterschiede gegen Erde. Die Folge dieser Unsymmetrie sind Gleichtakt-Ausgleichsströme auf der Speiseleitung. Sie verursachen TVI (Störungen des Radio- und Fernsehempfangs) und empfangen Störungen aus dem häuslichem Störnebel.





Energie fließt als Strom I_1 auf dem Innenleiter und als Strom I_2 auf der Innenseite des Koaxaschirms zur Antenne. Dabei sind I_1 und I_2 im Betrag gleich und entgegengesetzt gerichtet. Der Außenmantel des Schirms wirkt nun als separater Leiter zwischen Dipol-Arm 2 und Erde.

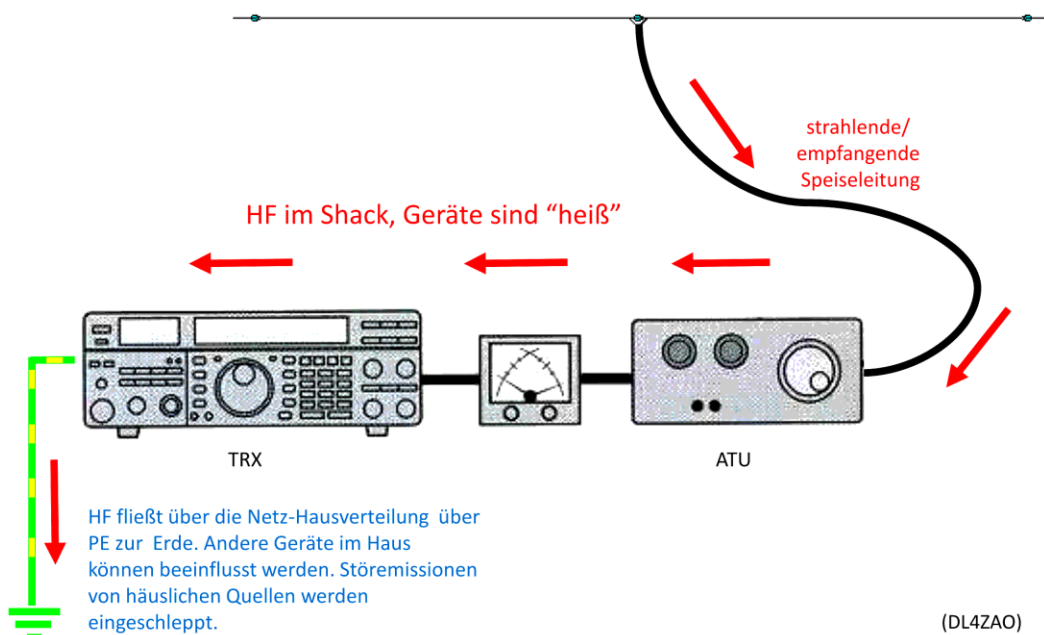
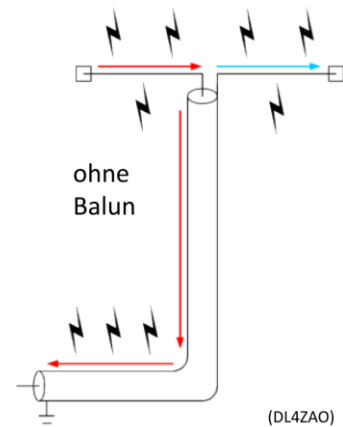
Unsymmetrie der Antenne führt zu einem Potentialunterschied gegen Erde. Als Folge fließt hochfrequenter Gleichtaktstrom (I_3) über dem Außenmantel des Koaxkabels zu Erde. Nun strahlt die Leitung und wirkt als Antenne!

Gleichtakt- bzw. Mantelströme sind Ausgleichsströme die durch unterschiedliche Potentiale zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Systemen provoziert werden.

Bei Gleichtaktströmen sind unerwünscht, da der Schirm ungewollt als Teil der Antenne wirkt. Schirm und Dipolarm wirken wie eine zusätzliche Inverted-L-Antenne – mit allen störenden Effekten beim Senden und Empfangen.

Die Gegentaktströme sind für den gewünschten Energietransport in der Leitung verantwortlich und somit erwünscht.

Wir brauchen ein Bauteil, das Gegenteilströme ungehindert fließen lässt und Gleichtaktströme wirksam reduzieren kann. Es muss dafür sorgen, dass an symmetrisch/unsymmetrischen Übergängen symmetrische Ströme fließen.



Workshop Notes – Volume 1

5.3.2.4 Der Strombalun

Ein Strombalun wirkt als Gleichtaktrossel bzw. Mantelwellensperre und ermöglicht den Übergang einer unsymmetrischen Leitung auf eine symmetrische Last.

Mantelwellensperre

Er lässt Gegentaktströme ungehindert durch. Der Energiefluss durch gleich große, aber entgegengesetzte Ströme von der Antenne zum TRX, vom TRX zur Antenne wird nicht beeinflusst.

Gleichzeitig stellt die Mantelwellensperre (auch Strombalun genannt) den Gleichtaktströmen einen möglichst hohen Widerstand entgegen, da sie als Drossel wirkt und somit an der Einbaustelle für den Gleichtaktstrom eine Impedanz mit hohem induktivem Widerstand darstellt (Gleichtaktrossel, Common-Mode Choke).

Mantelströme werden so wirksam reduziert bzw. im Idealfall unterdrückt. Die Induktivität der Spule bestimmt mit ihrem induktiven Widerstand die Drosselwirkung, die den Gleichtaktanteilen entgegengesetzt wird. Der Balun wirkt am besten, wenn er im Strombauch des Gleichtakt-Stromes eingefügt wird. Dort ist die Gleichtaktunterdrückung am höchsten. Der Energietransport von Gegentaktsignalen im Inneren der Koaxleitung wird dagegen nicht beeinflusst.

Der Strombalun besteht aus einer Übertragungs-Leitung, die auf einen Kern gewickelt wird. Als Leitung dient entweder ein paralleler Draht, oder ein Koaxialkabel (Luftspule sind manchmal auch möglich).

Betrachtet man die Teilströme auf beiden Leitern der Leitung, so sind diese betragsgleich, aber entgegengesetzt gerichtet -sie sind im Gegentakt. Das magnetische Feld der Ströme hebt sich im Idealfall auf, so dass im Kern in der Summe kein magnetischer Fluss auftritt.

Der Wellenwiderstand der verwendeten Leitung soll dem geometrischen Mittel zwischen Ein- und Ausgangsimpedanz entsprechen.

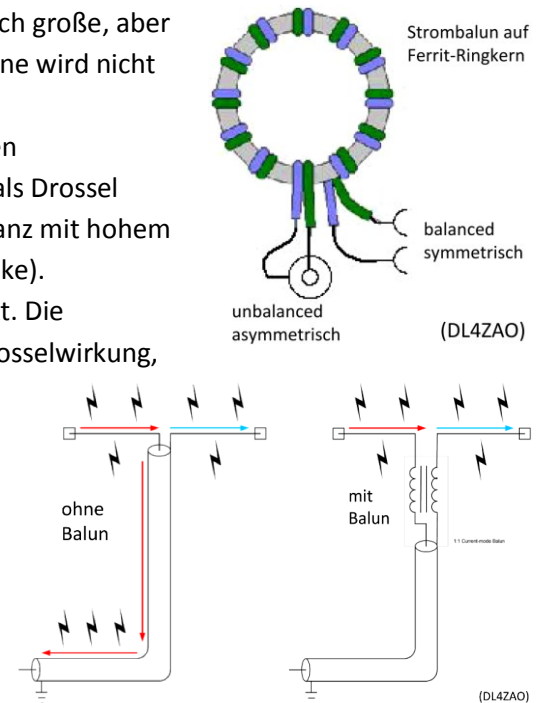
$$Z_{Leitung} = \sqrt{Z_{Ein} * Z_{Aus}}$$

Übergang einer unsymmetrischen Leitung auf eine symmetrische Last

Ein Strombalun (balanced to unbalanced) ermöglicht auch den Übergang einer unsymmetrischen Leitung (z.B. Koaxialkabel) auf eine symmetrische Last (z.B. Dipol-Antenne) oder einer symmetrischen Leitung (z.B. Paralleldraht-Feederleitung) auf eine unsymmetrische Last wie zum Beispiel Antennen mit unsymmetrischen Eigenschaften (z.B. Groundplane oder außermittig gespeister oder unsymmetrischer Dipol).

Ein Strombalun (Gleichtaktrossel) unterbricht Mantelströme und erzwingt symmetrische Ströme auf der Leitung

Nicht überall, wo Balun draufsteht, ist auch ein Balun drin! Der Begriff Balun (Kunstwort aus: Balanced-Unbalanced) wird häufig unsachgemäß verwendet. Fälschlich werden auch andere Formen von Impedanz-Übertragern als Balun bezeichnet, auch wenn sie keine symmetrierende Eigenschaften haben, und deshalb UnUn heißen müssten.



5.3.2.5 Wie soll ein Strombalun idealerweise gebaut sein?

Hohe Impedanz für Gleichtaktströme - ein Mehrfaches der zu verdrosselnden Gleichtakt-Impedanz. (Diese hängt auch von der Koax-Länge und der Einfügestelle des Balun ab: Im Strombauch – niedrige Impedanz, im Spannungsbauch – hohe Impedanz). Ein gut funktionierender Balun ist immer ein Kompromiss

- Ziel: hohe Impedanz bei wenigen Windungen und kurzer Wicklungslänge
- Große Bandbreite, Gleichtaktimpedanz mit resistivem Anteil (geringe Spulengüte)
- Wellenwiderstand der aufgewickelten Leitung = geometrisches Mittel zwischen Ein- und Ausgangsimpedanz. (schwierig beim Balun hinter einem ATU, da Z dort undefiniert)
- Spannungsfestigkeit der Wicklung (z.B. Teflonisolierung)
- Geringe Durchgangsverluste für gewünschte Gegentaktsignale
- Ausreichend bemessener Kern - kann den max. auftretenden magnetischen Fluss verkraften.

5.3.2.6 Beispiel: Strombalun koaxial aufgebaut 1:1, 50 Ohm

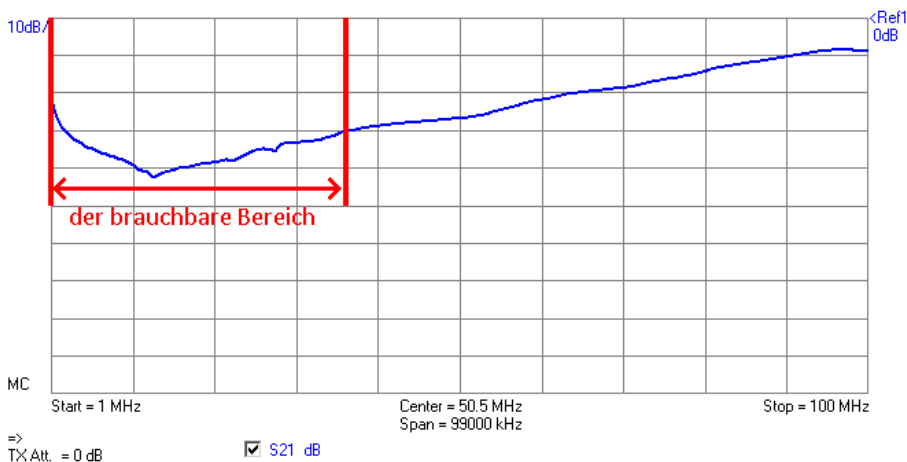
Strombalune lassen sich leicht mit einem Ringkern und einem Koaxialkabel aufbauen. Im Kurzwellenbereich die dargestellte Wickelart nach Reiser nicht unbedingt notwendig.



DL4ZAO



Hier mein Test-Aufbau mit Koax-Kabel. Der Ringkern ist ähnlich zu dem Ringkern RK1 vom DARC.



Die Messung zeigt die Sperrdämpfung im Bereich bis 100 MHz. Alles über 30 dB sollte in den meisten Fällen ausreichend sein.

Workshop Notes – Volume 1

5.3.2.7 Beispiel: Strombalun 1:1, 50 Ohm

Aufgebaut wird ein 1:1 Strombalun ($50\ \Omega$ zu $50\ \Omega$) nach einer Erklärung von Wolfgang DG0SA (+). Die Wickelanleitung findet ihr hier: <http://www.wolfgang-wippermann.de/balun1zu1kleinptfe.pdf>

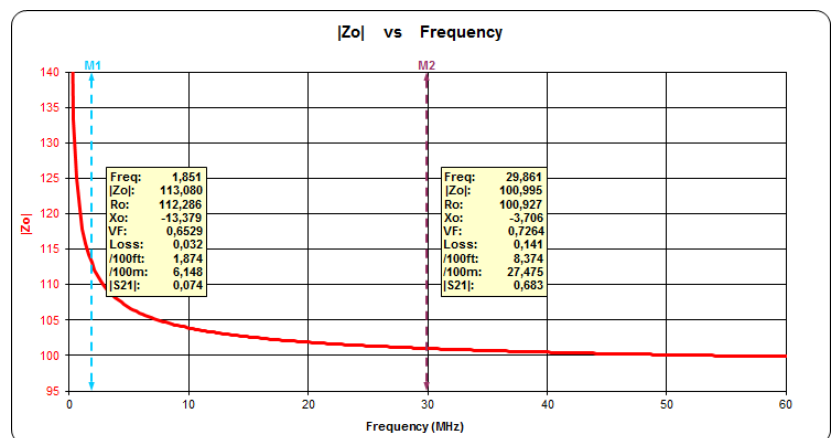
Da ich die empfohlene Teflonlitze nicht vorrätig hatte, wurde ein vorhandener Volldraht verwendet, um das Prinzip zu demonstrieren.

Zuerst wird der verwendete Draht mit dem VNWA vermessen und mit dem Zusatzprogramm Zplots analysiert. Erklärt wird diese Messung in Kapitel 7.3. Daher gehe ich an dieser Stelle nicht weiter darauf ein.

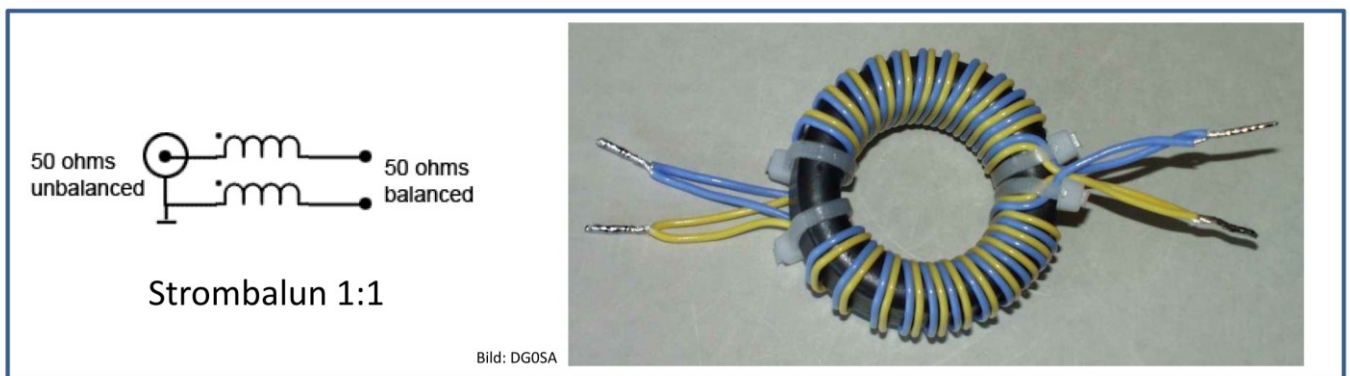
Als Kabel verwende ich einen vorhandenen Draht mit Teflonmantel (Drahtdurchmesser: 0,62 mm und Außendurchmesser 0,98 mm des Mantels:). Für die Messung besteht das DUT aus zwei 515mm langen Drähten.



Wenn ich zwei Drähte mit Zplots vermessen, erhalte ich die Ergebnisse aus dem nebenstehenden Bild. Im Bereich der Kurzweile sind deutliche Abweichungen von 100 Ohm zu beobachten.



Da es sich bei einem Balun um einen Leitungstransformator handelt, muss die verwendete Leitung entsprechend auch einen Wellenwiderstand von 50 Ohm aufweisen um ein gutes SWR zu erreichen.



Wicklung nach DG0SA (oben) Es werden einmal 12 Wdg 100 Ω Zweidraht-Leitung auf die eine Kernhälfte und 12 Wdg auf die andere Kernhälfte gewickelt. Das Parallelschalten der 100 Ω Leitungen ergibt 50 Ohm Wellenwiderstand. Wickelsinn beachten!

Balune sind Elemente mit 3 Ports. Der VNWA kann eine 3 Port-Messung durchführen, indem immer zwei Ports an den VNWA angeschlossen werden und der dritte Port jeweils mit einem guten 50 Ohm-Abschlussglied abgeschlossen wird. Anschließend werden alle Kombinationen vermessen. Der 3-Port-Analyser kann in der VNWA-Software aufgerufen werden unter: VNWA-Measure-sParameters-3Port. Nun muss nur noch den Anweisungen auf dem Bildschirm gefolgt werden.

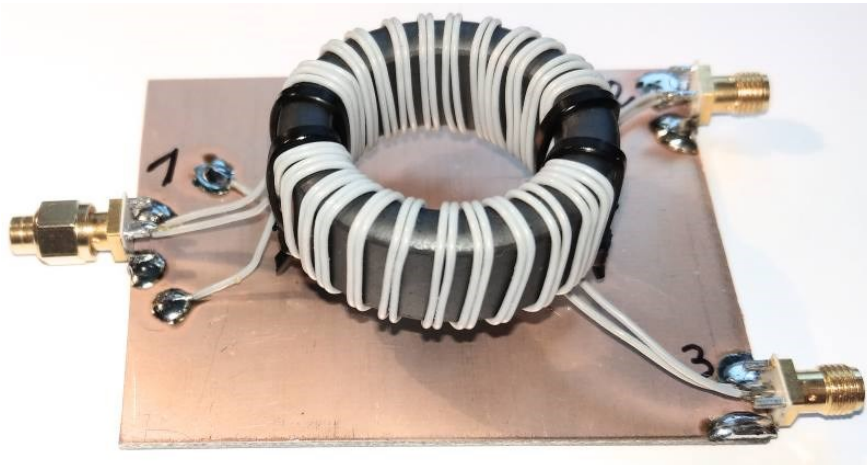
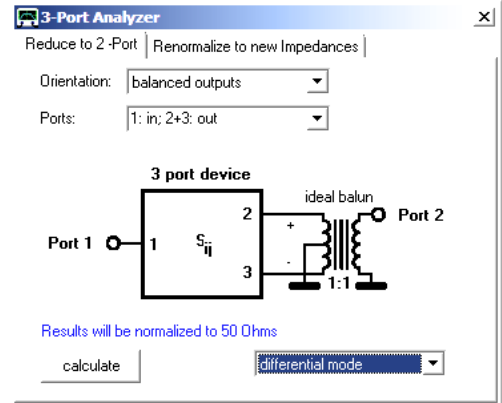
Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

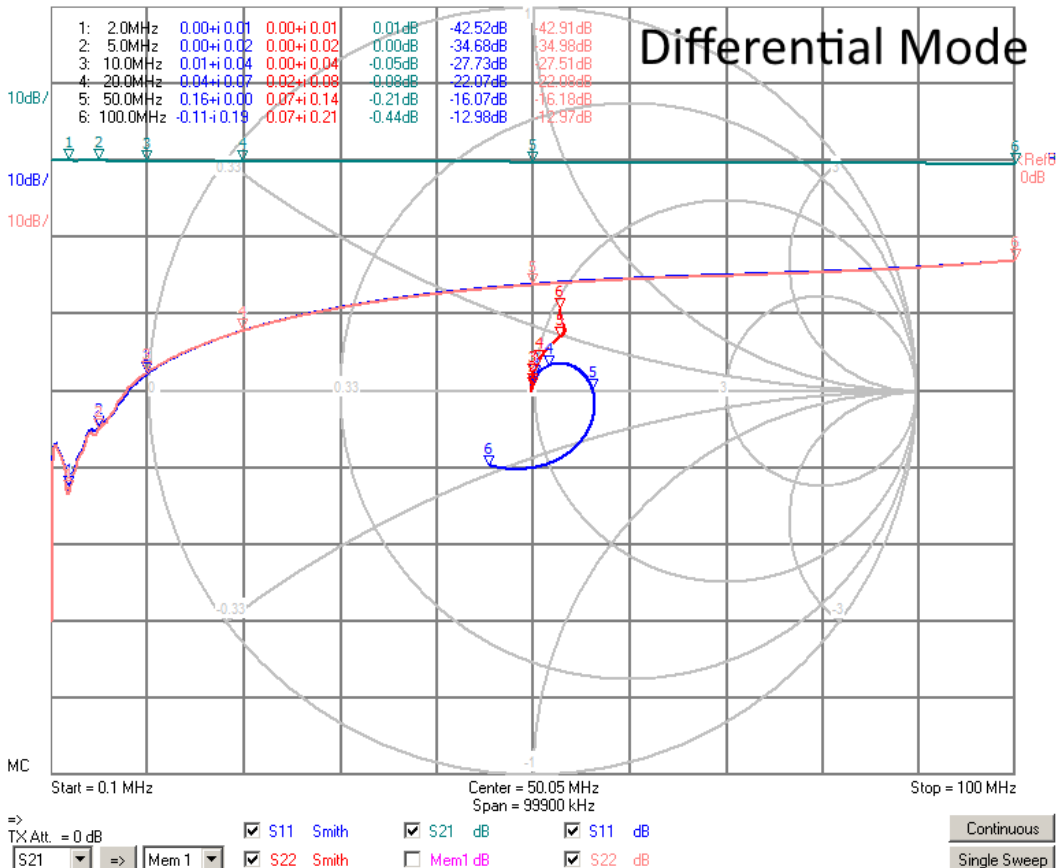
Mit den jetzt gemessenen 3-Port S-Parametern können wir nicht viel anfangen, da sie für eine Analyse zuerst in die bekannten 2-Port S-Parameter umgerechnet werden müssen. Diese Umrechnen wird von einem Tool, dem „3-Port Analyser“, übernommen. Zu finden unter: VNWA – Tools – 3 Port Analyser

Die Ergebnisse werden in S_{11} , S_{21} , S_{12} , S_{22} abgespeichert. Eine Gegentakt- oder Gleichtaktanalyse ist möglich, wenn im 3-Port Analyser entweder „differential mode“ oder „common mode“ angewählt werden.

Da wir in der 50 Ohm Umgebung bleiben ist keine Anpassung im Matching-Tool notwendig.



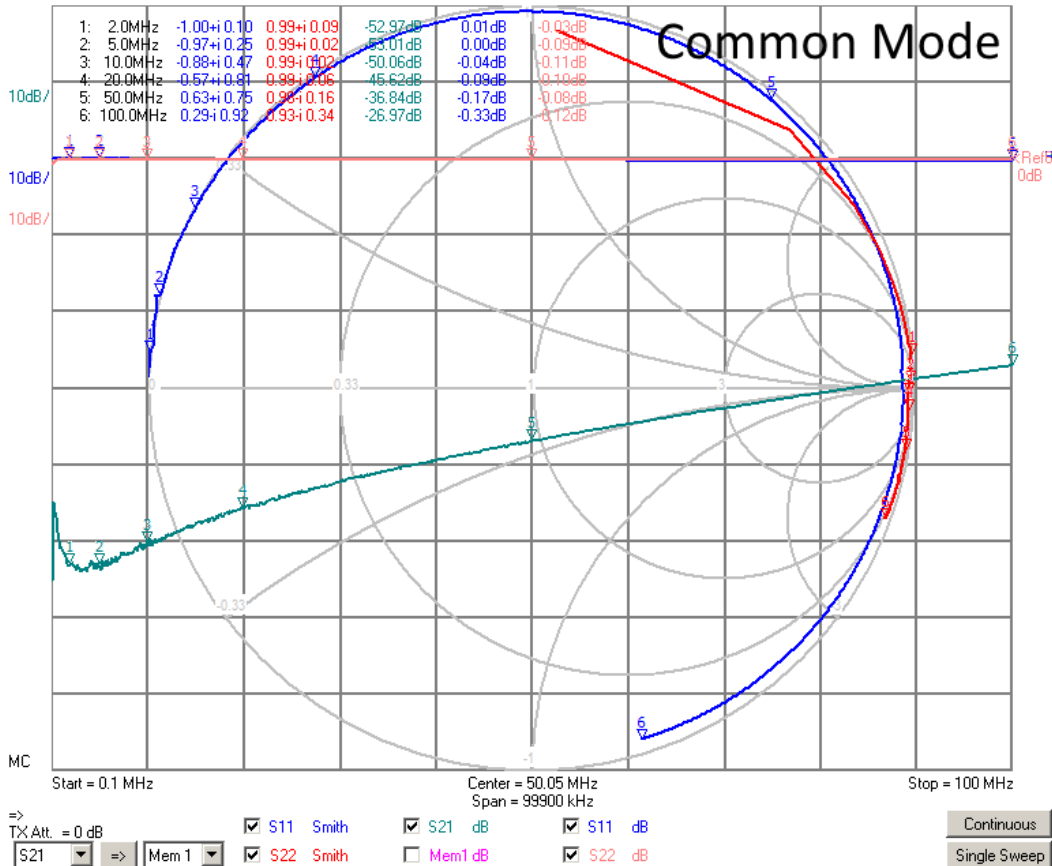
Die Analyse im Differential Mode zeigt, dass die S_{21} sehr gering ist und somit bis 30 Mhz vernachlässigbar ist. Auch die Anpassung S_{11} ist bis 30 MHz gut und wird dann bei höheren Frequenzen schlechter.



Workshop Notes – Volume 1

Messungen im Common Mode zeigen, dass die Sperrdämpfung wirklich gut ist, wenn wir uns in einer $50\ \Omega : 50\ \Omega$ Umgebung bewegen.

Der Leser kann nun selbst den Balun nachbauen und mit dem Matching-Tool untersuchen wie sich ein solcher Balun verhält, wenn die Anschlußimpedanzen verändert werden.



5.3.3 Spannungsbalun

Siehe Literatur, z.B. das Buch von Gerfried „Messen mit dem Vektor-Netzwerkanalysator VNWA2 / VNWA3 Band 2“ in Kapitel 10.

Siehe auch nächste Seite.

5.3.4 Unun

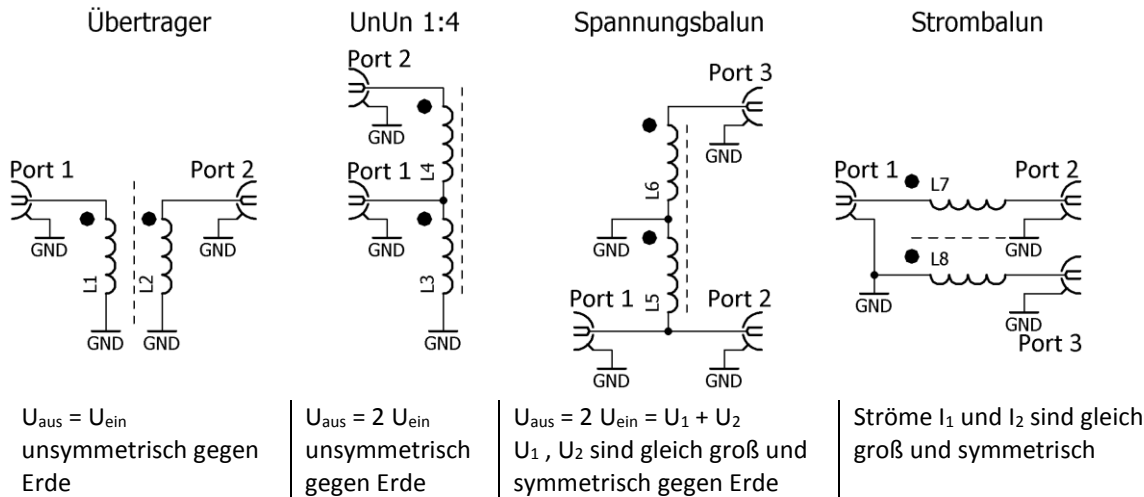
Siehe Literatur

Siehe auch nächste Seite.

5.3.5 Gleiche Wicklung – unterschiedliches Ergebnis

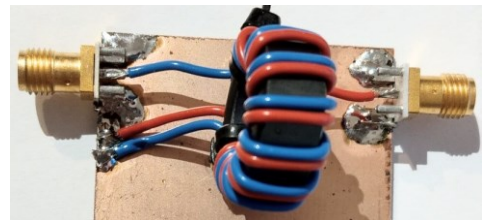
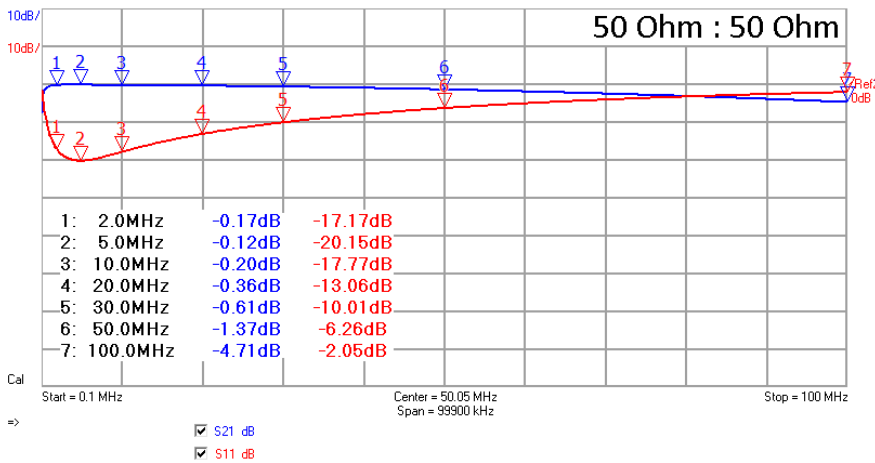
Zu Anfang von Kapitel 5.3.1 habe ich darauf hingewiesen, dass bei gleicher Bewicklung eines Ringkerns die Beschaltung darüber entscheidet, ob man einen Übertrager, UnUn, Spannungsbalun oder Strombalun hat. Zur Demonstration habe ich auf vier kleinen Ringkernen jeweils 8 Windungen aufgewickelt und sie dann, wie im Bild, unterschiedlich beschaltet. Anschließend sind sie vermessen worden. Hierbei geht es nicht um möglichst gute Balune – es sind und bleiben Demonstrationsobjekte für den Workshop.

Ich erkläre an dieser Stelle nicht wie die 3-Tor Messung durchgeführt wird. Das könnt ihr in dem Buch von Gerfried (Band 2; Kapitel 10) genauer nachlesen.



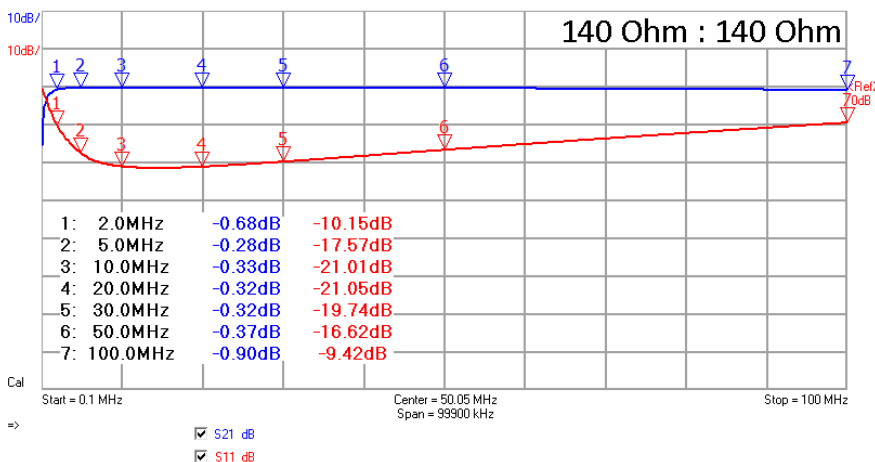
In den folgenden Unterkapiteln werde die vier Varianten aufgebaut, vermessen und die Messergebnisse interpretiert.

5.3.5.1 Übertrager



In einer 50 Ohm Umgebung ist die Anpassung nur bei 5 MHz gut genug (d.h. $S_{11} < -20$ dB).

Bessere Übertrager kann man z.B. mit Doppellochkernen wickeln. Für kleine Leistungen kann man sehr gut im Kurzwellenbereich den BN43-2402 nehmen.

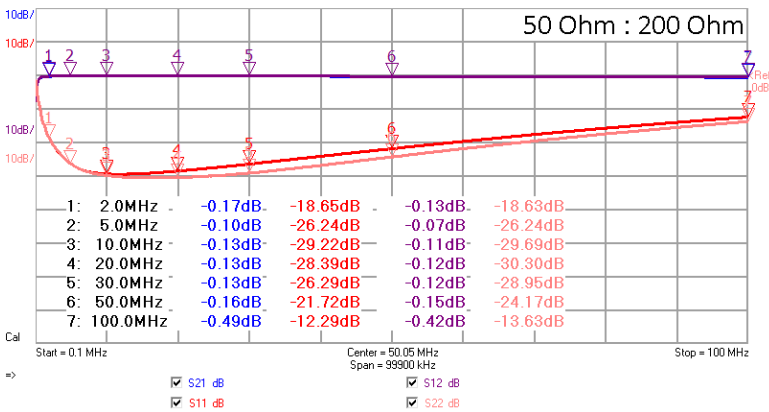


Die zweite Messung zeigt den Übertrager in einer 140 Ohm Umgebung mit einer deutlich breiteren Anpassung. Der Grund ist die Wickeltechnik. Die beiden parallelen Wicklungen haben einen Wellenwiderstand von etwas über 100 Ohm.

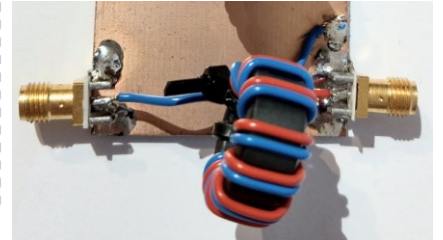
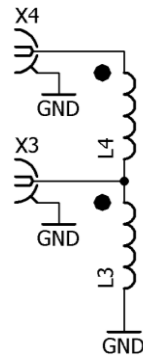
Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

5.3.5.2 UnUn

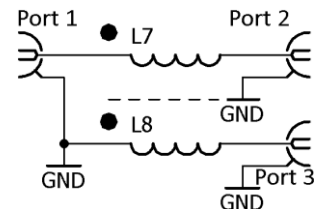
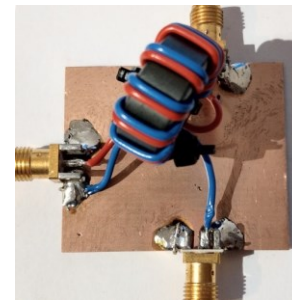
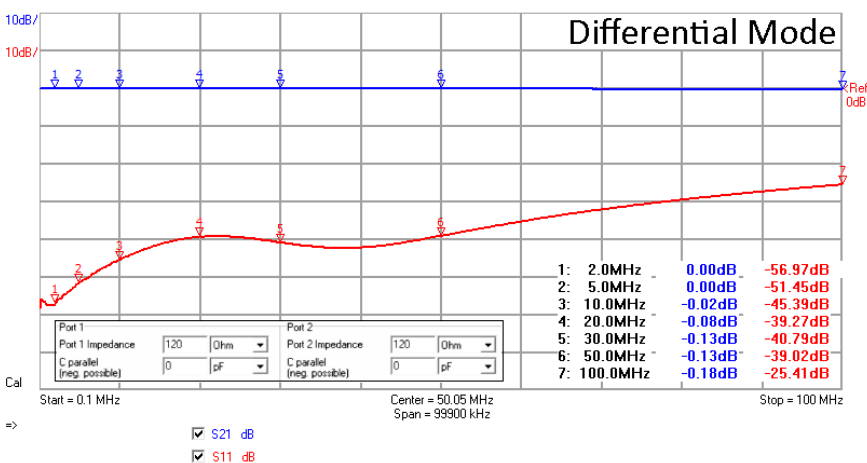


UnUn 1:4

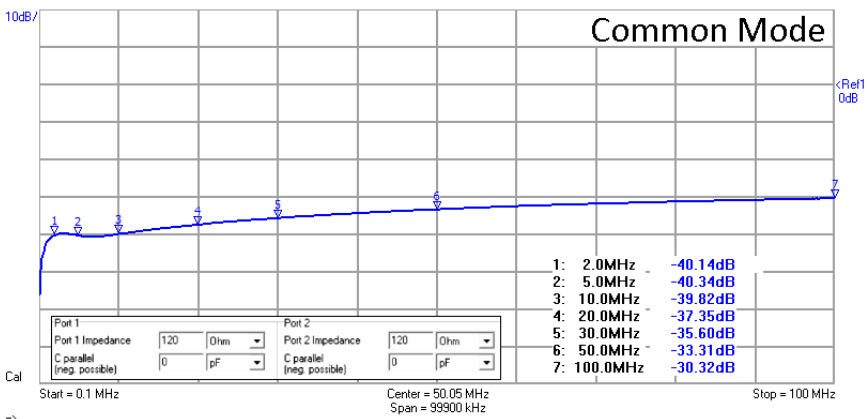


Ein UnUn ist eigentlich nichts anderes als ein normaler Übertrager. Diese Art der Wicklung wird auch Spartrafo genannt. Bei einer Übersetzung von 50 Ohm zu 200 Ohm ist im Bereich von rund 3 MHz bis 60 MHz die Durchgangsdämpfung S21 sehr klein und die Anpassung sehr gut bis gut.

5.3.5.3 Strombalun

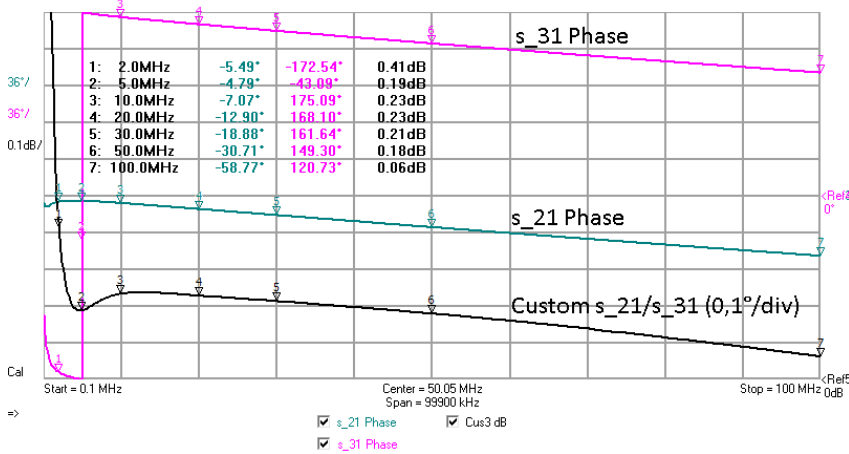


Der Strombalun wurde, wie beschrieben, mit einer 3-Port-Messung vermessen und dann mit dem VNWA-Tool „3-Port Analyser“ ausgewertet. Angezeigt wird in dem Bild die Durchgangsdämpfung und die Anpassung für das gewünschte Signal, welches ein Gegentaktsignal ist. Die beste Anpassung wird gefunden, wenn alles in der 120 Ohm Umgebung betrachtet wird. Im gesamten Frequenzbereich sind die Durchgangsdämpfung S21 und die Anpassung S11 sehr gut.



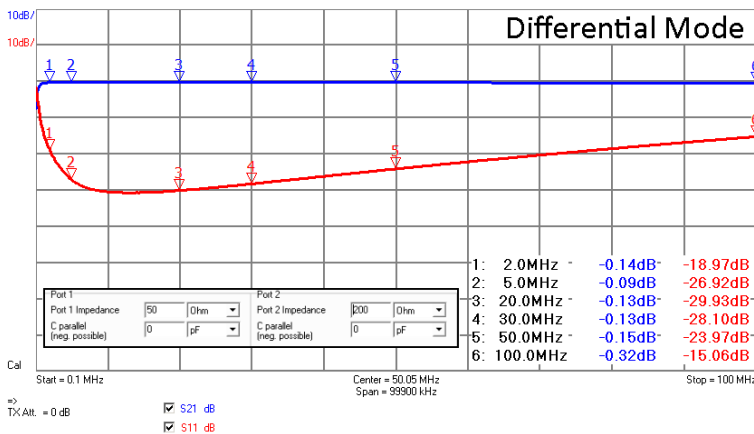
Um zu untersuchen wie Gleichtaktsignale unterdrückt werden, wird der „3-Port Analyser“ des VNWA auf „Common Mode“ gestellt. Die Unterdrückung der Gleichtaktsignale wird dann in S21 abgelegt.

Im gesamten Frequenzbereich werden Gleichtaktsignale um 30 dB bis 40 dB unterdrückt – in einer 120 Ω-Umgebung.

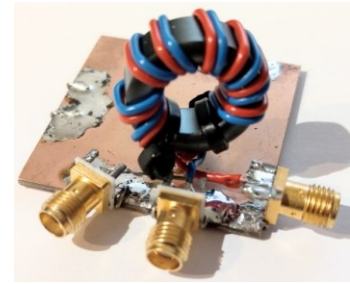
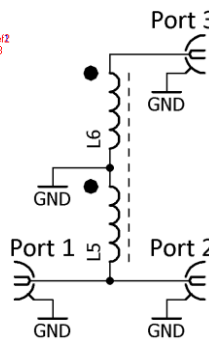


Dieses Bild zeigt die Phasenlage von S21 und S31 und die Custom-Messkurve die Unterschiede dieser beiden Signale. Fast im gesamten Frequenzbereich ist der Phasenunterschiede sehr klein.

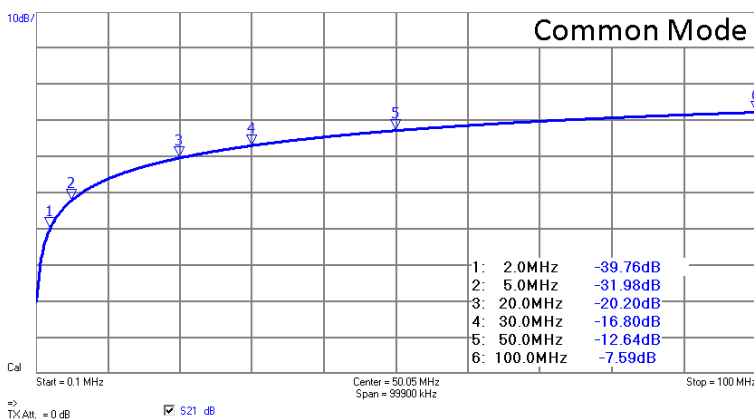
5.3.5.4 Spannungsbalun



Spannungsbalun



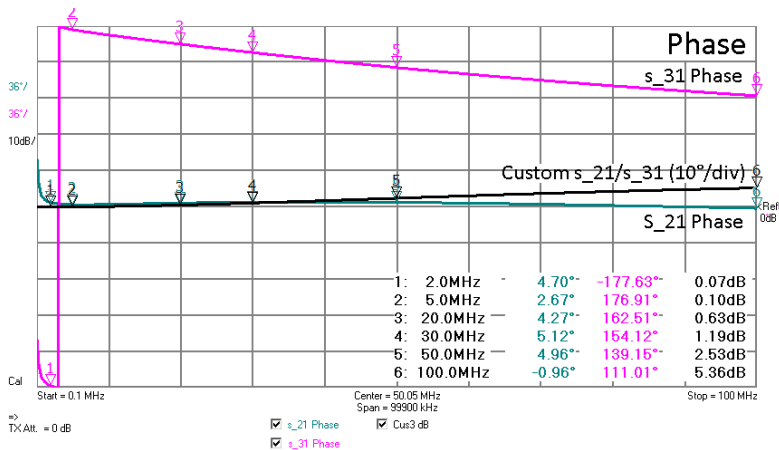
Auch der Spannungsbalun wurde, wie beschrieben, mit einer 3-Port-Messung vermessen und dann mit dem VNWA-Tool „3 Port Analyser“ ausgewertet. Angezeigt wird in dem Bild die Durchgangsdämpfung und die Anpassung für das gewünschte Signal, welches ein Gegentaktsignal ist. Die beste Anpassung wird gefunden, wenn von 50 Ohm nach 200 Ohm übersetzt wird. Im Frequenzbereich von rund 3 MHz bis 70 MHz sind die Durchgangsdämpfung S21 und die Anpassung S11 sehr gut bis gut.



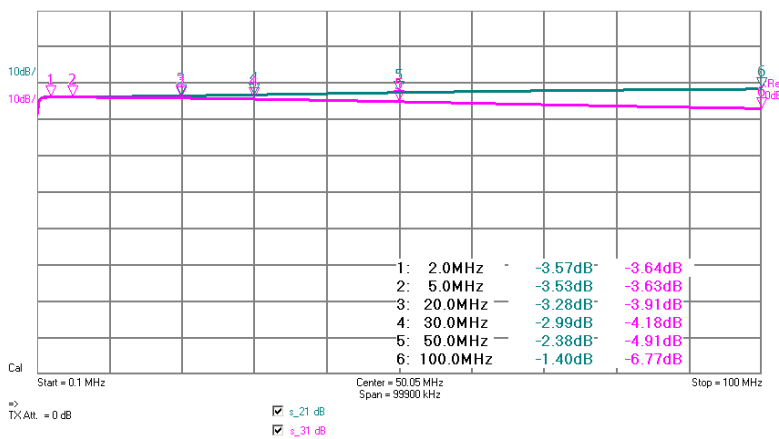
Um zu untersuchen wie Gleichtaktsignale unterdrückt werden, wird wieder der „3 Port Analyser“ des VNWA auf „Common Mode“ gestellt. Die Unterdrückung der Gleichtaktsignale wird dann in S21 abgelegt.

Deutlich zu sehen ist, dass mit zunehmender Frequenz die Gleichtaktsignale schlechter gedämpft werden, was auch nicht verwunderlich ist, da hier der Schwerpunkt auf der Symmetrierung der Spannung liegt.

Workshop Notes – Volume 1



Im Bereich der Kurzwelle sind die Phasenunterschiede zwischen Port 2 und Port 3 noch recht klein.



Dieses Diagramm zeigt die Gleichheit der Ausgangsamplituden (s_21 und s_31).

5.3.6 Andere Messverfahren

Wenn man sich tiefer mit Balunen beschäftigt, sollten auch Kontroll-Messungen durchgeführt werden. Der verstorbene Wolfgang Wippermann beschreibt auf seiner Homepage unter dem Link „Balune“ auch Messverfahren. In dem Vortrag von Günter DL4ZAO sind auch einige Seiten zum Vermessen von Balunen zu finden. In meinem VNWA-Basteltagebuch kann ich aus Platzgründen nicht mehr weiter alternative Messverfahren eingehen.

5.3.7 Links zu Balunen

https://dl4zao.de/downloads/Balun_dl4zao.pdf

<http://www.wolfgang-wippermann.de/>

<http://www.wolfgang-wippermann.de/balun1zu1kleinptfe.pdf>

<http://www.wolfgang-wippermann.de/balun1zu1undefklein.pdf>

<https://darcverlag.de/media/pdf/datenblattkerne.pdf>

<http://www.baekerei-heitmann.de/DF1BT/> „Mantelwellen“ anklicken

6 Messungen mit dem VNWA Testboard Kit

Thomas DG8SAQ und Jan haben eine kleine Testplattform entwickelt, um schnell kleine Schaltungen ausprobieren zu können.

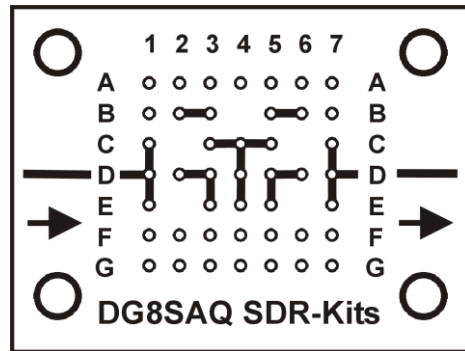
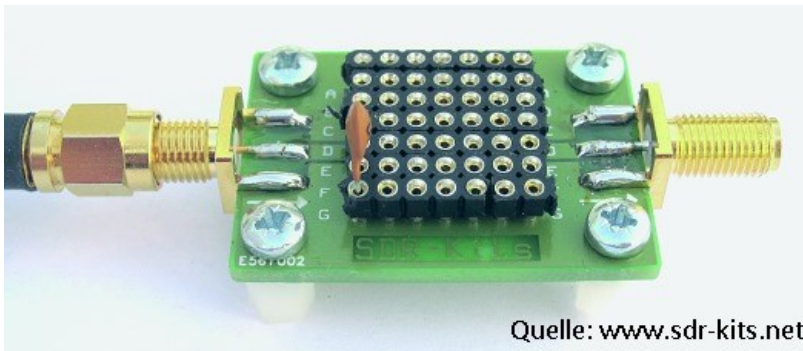
Hinweise und kleine und große Versuche findet ihr hier:

<https://www.sdr-kits.net/DG8SAQ-VNWA-Testboard-kit>

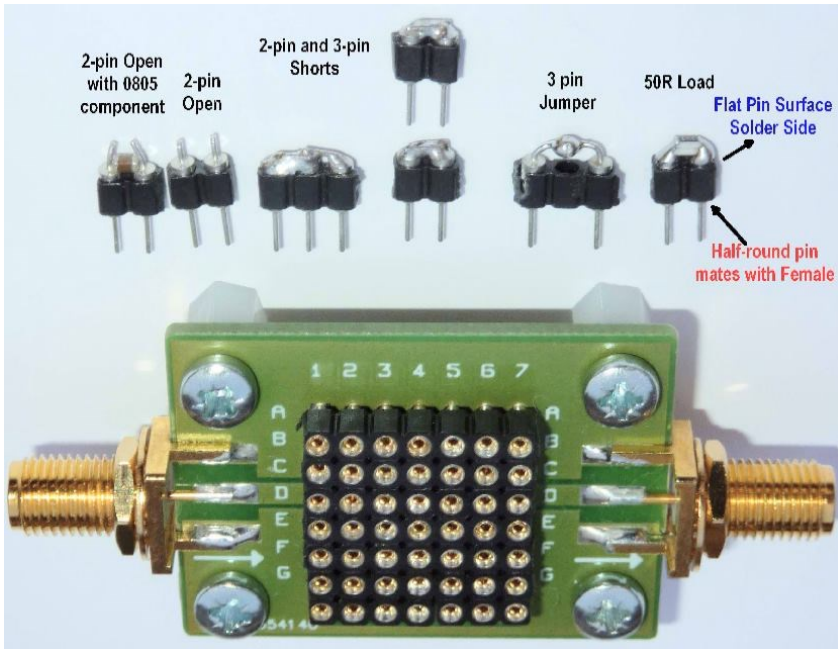
http://sdr-kits.net/documents/Testboard_kit.pdf

http://hamcom.dk/VNWA/DG8SAQ_Testadaptor%20Multi%20Label.zip

www.sdr-kits.net/DG8SAQ/VNWA/VNWA_Experiments.pdf



Im Herbst werde ich dieses Kapitel mit weiteren Beispielen füllen 😊.



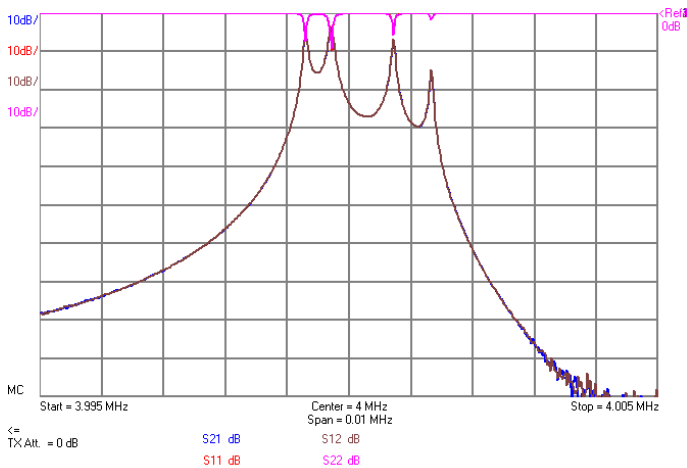
Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

7 Messungen für Fortgeschrittene

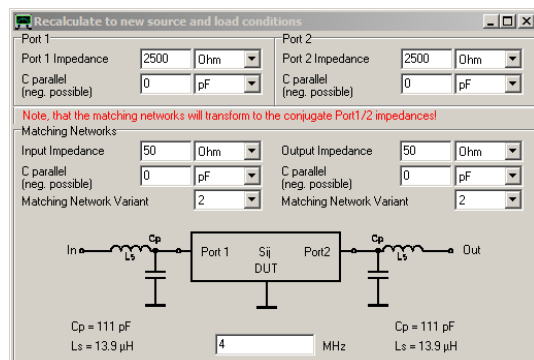
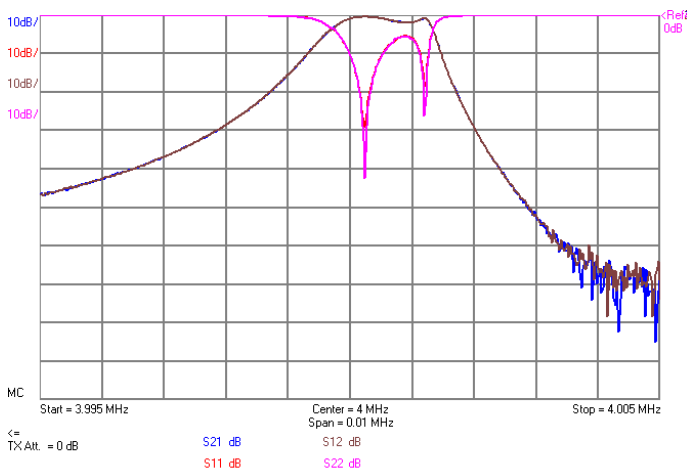
7.1 4 MHz Quarzfilter vermessen mit Matching-Tool

Hier wird nun gezeigt wie man frisch aufgebaute Quarzfilter vermessen kann, die noch nicht angepasst worden sind. Die erste Messung zeigt eine S-Parametermessung ohne Anpassung (S21, S11, S12, S22).

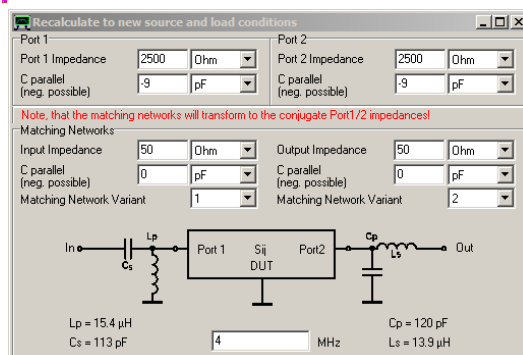
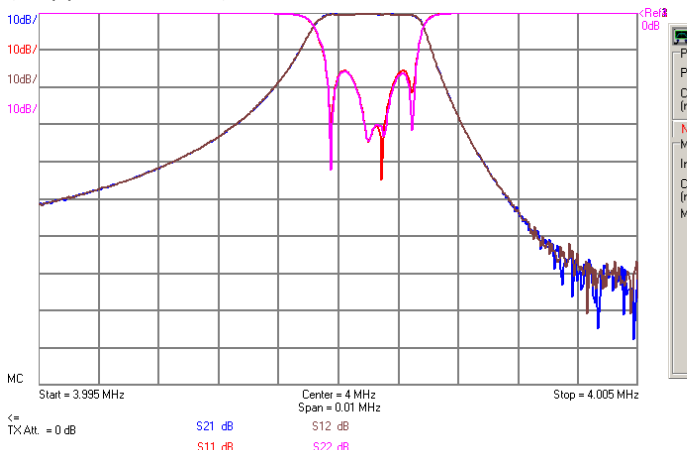


Sehr deutlich ist zu erkennen, dass in einer 50 Ohm Umgebung die Filterkurve sehr schlecht ist. Der VNWA bietet uns aber die Möglichkeit die Impedanz virtuell anzupassen, was sehr bequem ist und schnell geht. Es müssen vorher nur alle vier S-Parameter gemessen werden.

Wählt man unter Tools das Matching-Tool führt die folgende Anpassung mit 1800-2500 Ohm zu einer recht guten Filterkurve.



Eine noch verbesserte Kurve erzielt man, wenn man noch mit dem C spielt und ein negative Impedanz parallel legt (entspricht einer Induktivität). In der unteren Hälfte des Fensters können unterschiedliche Anpassschaltungen und ihre Werte ausgewählt bzw. Abgelesen werden. Ich persönlich passe Quarzfilter fast immer mit Übertragern (Doppellockerne) an.



7.2 Stecker und Adapter herauskalibrieren

In diesem Kapitel zeige ich wie Laufzeiteffekte eines Steckers herauskalibriert werden können.

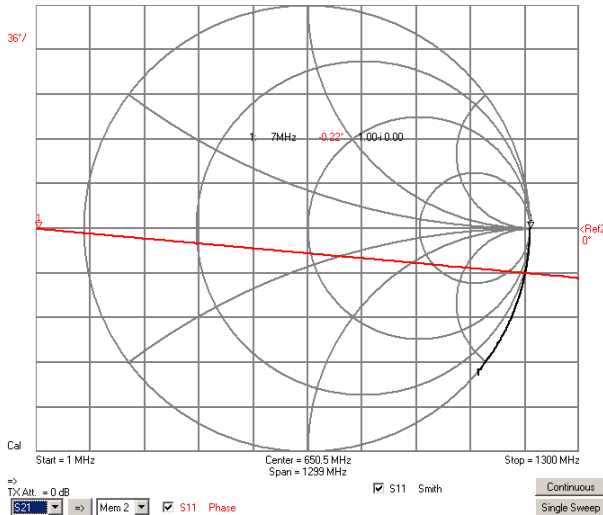
Der VNWA ist bei mir mit guten SMA Kabeln versehen um die Stecker des VNWA zu schützen.

VNWA-Einstellungen:

1-1300 MHz; 200 Datenpunkte; 20s Time per sweep

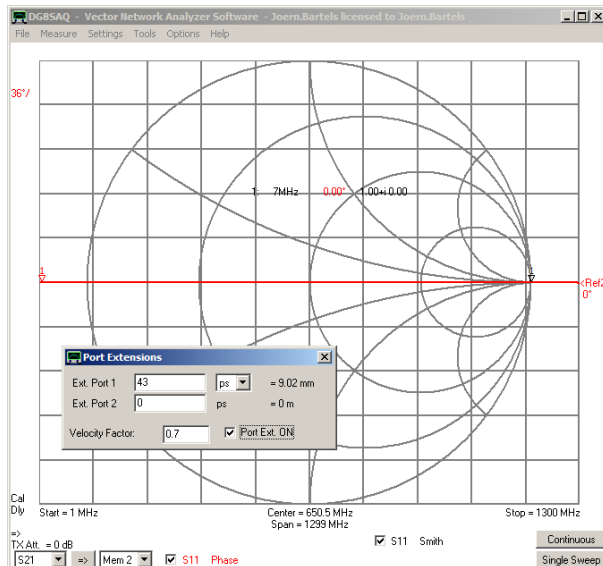
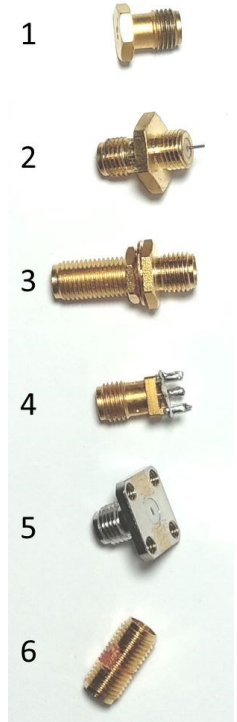
Gemessen wird „S11 Phase“ und „S11 Smith“

Es wird eine normale „Reflect Calibration“ durchgeführt.



Beispielhaft wird der Verbinder Nr. 6 aus meinem Kalibrierset vermessen:

Es ergibt sich dann die nebenstehende Kurve



Unter „Measure – Port Extensions“ kann dann durch Eingabe der Signallaufzeit die Kalibrierebene verschoben werden. Ich sage hierzu den Stecker herauskalibrieren.

Mit dem Mausrad kann dann die Phasenlage auf 0° eingestellt werden. Bei Verbinder Nr. 6 ergeben sich 43ps.

Stecker	Verzögerung durch Laufzeit
1 (short)	24 ps
2	61 ps
3	89 ps
4	50 ps
5	39 ps
6	43 ps

Für die fortgeschrittenen Leser:

Im ersten Satz auf dieser Seite habe ich geschrieben: „In diesem Kapitel zeige ich wie Laufzeiteffekte aus Verbindern o.ä. herauskalibriert werden können.“

Wenn man es genau nimmt, muss man auch noch zwischen Kalibrier- und Messbezugsebene unterschieden werden. Gerfried beschreibt dies ausführlich in seinen Büchern.

Korrekt wäre es an dieser Stelle zu schreiben: ... wie die Messbezugsebene verschoben wird. Bitte verzeiht mir an dieser Stelle die kleine Ungenauigkeit – ich lege in diesem Dokument den Schwerpunkt auf das „erste Verstehen“.

Workshop Notes – Volume 1

7.3 Vermessen eins Kabels

In diesem Kapitel wird gezeigt wie ein 39cm langes Kabel mit SMA-Buchsen mit dem VNWA vermessen wird. Verwendet wird das Programm ZPlots. Die Installation erfolgt wie im VNWA-Helpfile. Am TX-Port und RX-Port sind dauerhaft gute SMA-Kabel befestigt um SMA-Verbinder des VNWA zu schonen.

Bei diesem Kapitel hat mir Eric sehr geholfen.

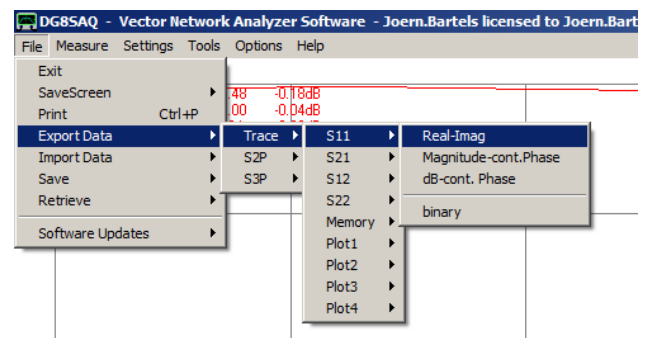
Dieses Kapitel wird bei einer späteren Überarbeitung noch leichter zu lesen: Die grünen Linien können teilweise aus den Bildern entfernt werden.

VNWA-Einstellungen: 0,1-1300MHz 801 Punkte Time per sweep 10,15s

Ohne das zu vermessene Kabel wird eine Reflect Calibration mit Short, Open und Load durchgeführt.

Messung:

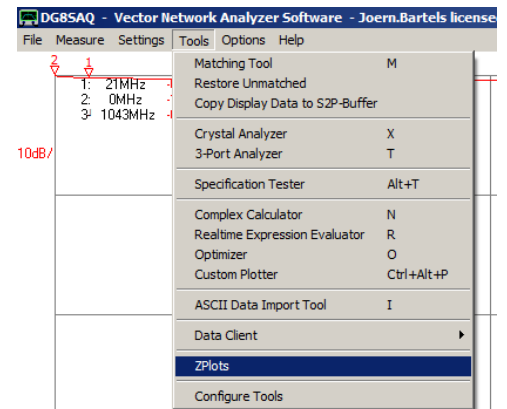
- Das zu vermessene Kabel wird mit einem SMA-SMA Adapter mit dem TX-Port (der Kalibrationsebene) verbunden und eine S11-Open-Messung durchgeführt
- Die Daten werden gespeichert. Die Datei bekommt in meinem Fall den Namen „S11 open 39cm.s1p“ (siehe Bild)
- Das zu vermessene Kabel wird wir am freien Ende mit einem Short abgeschlossen und dann und dann wird wieder eine S11-Messung durchgeführt.



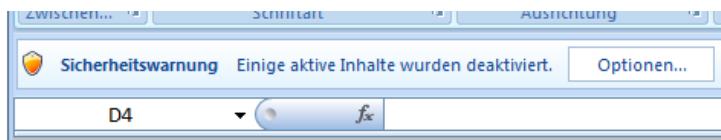
Die Messung wird dann unter dem Namen „S11 short 39cm.s1p“ abgespeichert.

Der Frequenzbereich sollte so gewählt worden sein, dass mindestens eine „Umdrehung“ im Smith-Chart gezeichnet wurde

- Da Programm ZPlots wird über VNWA-Tool-ZPlots gestartet. Alternativ kann es natürlich auch direkt geöffnet werden.
- Je nach Windowsversion muss noch die Bearbeitung des Excel-Dokuments gestattet werden (Makros zulassen). Siehe hierzu auch das VNWA-Helpfile

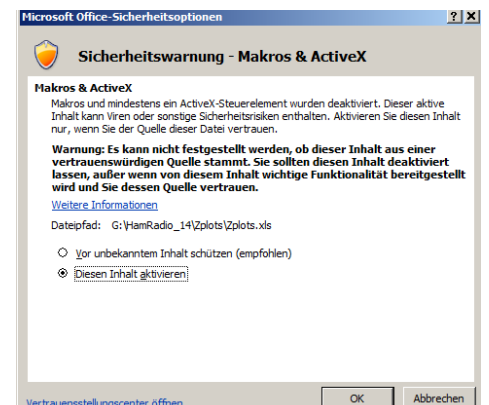


Bei Eric sieht dies dann so aus:



Inhalt aktivieren, den entsprechenden Punkt (Diesen Inhalt aktivieren) anwählen, OK drücken

Ab hier kann ZPlots wie gewünscht verwendet werden.

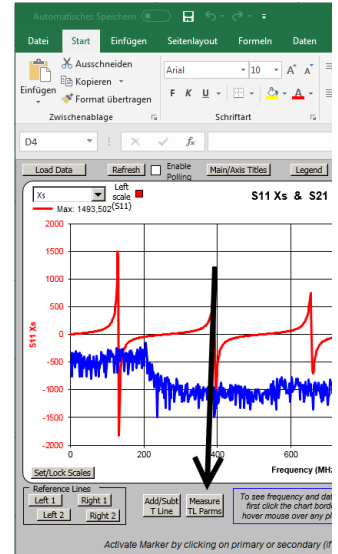


Workshop Notes – Volume 1

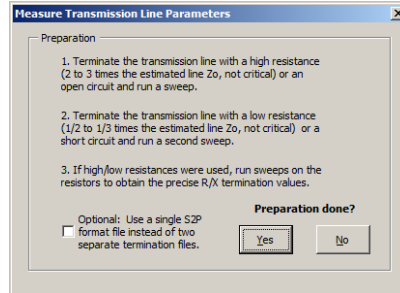
Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

Das Einlesen der Messdaten wird mit den folgenden Einstellungen vorbereitet:

- Button „Measure TL Params“ anklicken. (siehe Bild)

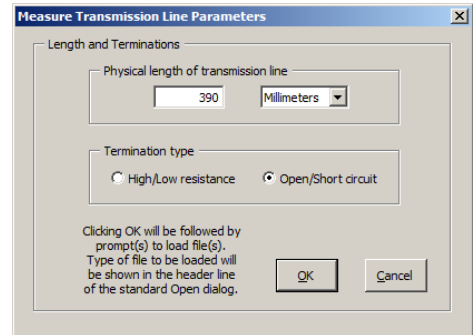


- Das folgende Fenster mit “Yes” bestätigen.



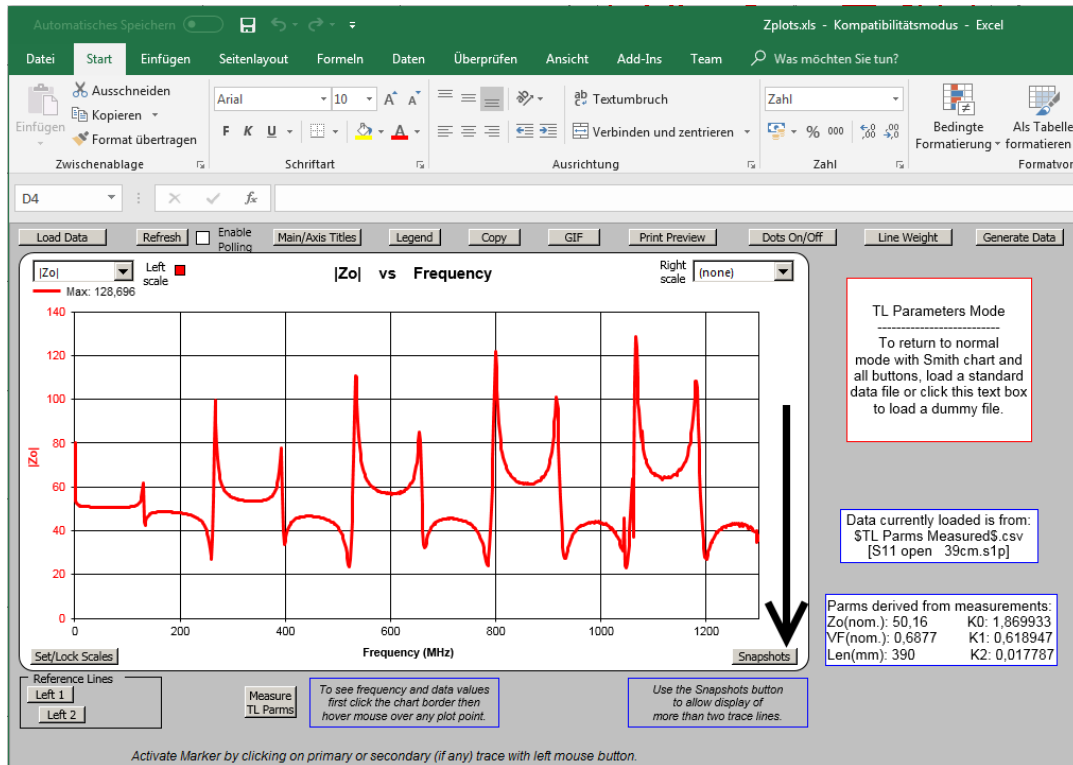
- In dem nun folgenden Fenster müssen die mechanische Länge (die elektrische Länge wird vom Programm anhand der $\lambda/2$ Resonanzen ermittelt) und die Art der Kalibrierung angegeben werden. In unserem Fall sind das 390 mm und die Open/Shot-Kalibrierung.

Beachte alle Eingaben ggf. mit Komma, nicht mit Punkt !



- Nun werden die Messdaten (Open und Short Messung) mit „Load Daten“ nacheinander eingelesen. Die sich öffnenden Fenster geben eindeutig die Reihenfolge vor.

Das Fenster sieht dann wie folgt aus.



Man sieht sehr schön die $\lambda/2$ Resonanzen und erkennt auch, warum es gar nicht so einfach ist $|Z_0|$ genau zu bestimmen, die Resonanzen stören das Bild (aber grob kann man Z_0 natürlich abschätzen).

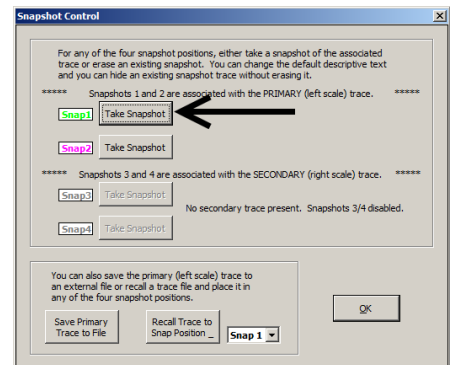
Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

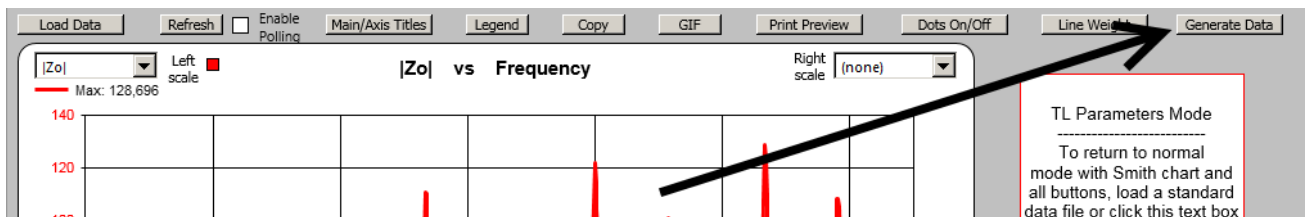
- Der nächste Schritt ist nun ZPlots die Leitungsparameter genau bestimmen zu lassen (dazu wird im Programm hohe Mathematik mit Besselfunktionen angewendet, um die Leitungsdifferentialgleichungen exakt zu lösen).

Man rettet sich zunächst das Originalbild mit Snapshots und drückt dann Generate Data

Nun wird eine zusätzliche Linie eingeblendet. Wie im vorhergehenden Bild angezeigt wird nun der Button Snapshots angeklickt. Es folgt dann das links abgebildete Fenster in dem der angezeigte Button gedrückt wird und die Abfrage mit OK bestätigt.

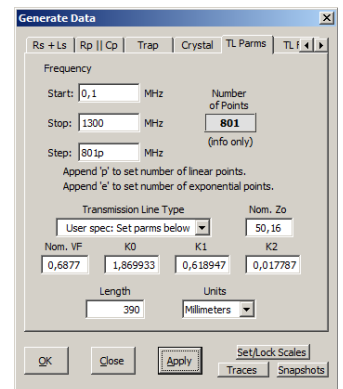


- Nun wird die grüne Kurve mit den Daten der Kabelimpedanz gefüllt. Hierzu wird der Button „Generate Data“ gedrückt und der Reiter „TL Parm“ ausgewählt. In diesem Fenster die Buttons „Apply“ und „OK“ drücken. Dies Fenster zeigt alle Kabelparameter.

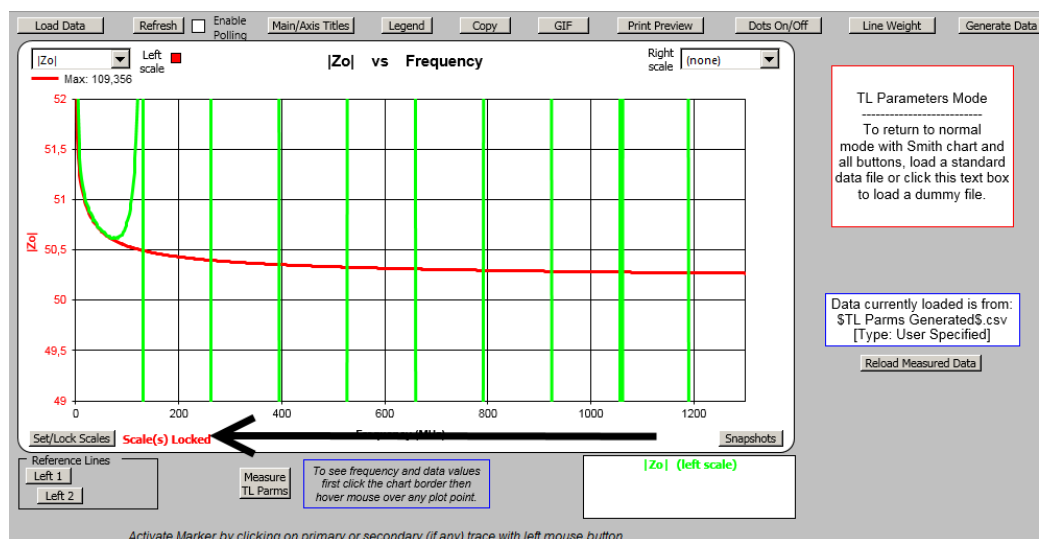


Man kann nun bereits die Nominalwerte für Z0, VF usw. ablesen. Drückt man auf Apply wird die um die Resonanzen befreite Leitung dargestellt, zum Abschluss drückt man OK.

Für Analysezwecke arbeitet man nun im Diagramm weiter, man wählt dazu auch eine rechte Skala. Durch links-click auf eine Kurve wird ein Marker bei einer bestimmten Frequenz gesetzt (dort wo der Mauszeiger war) und ein Markerfenster hinzugefügt.



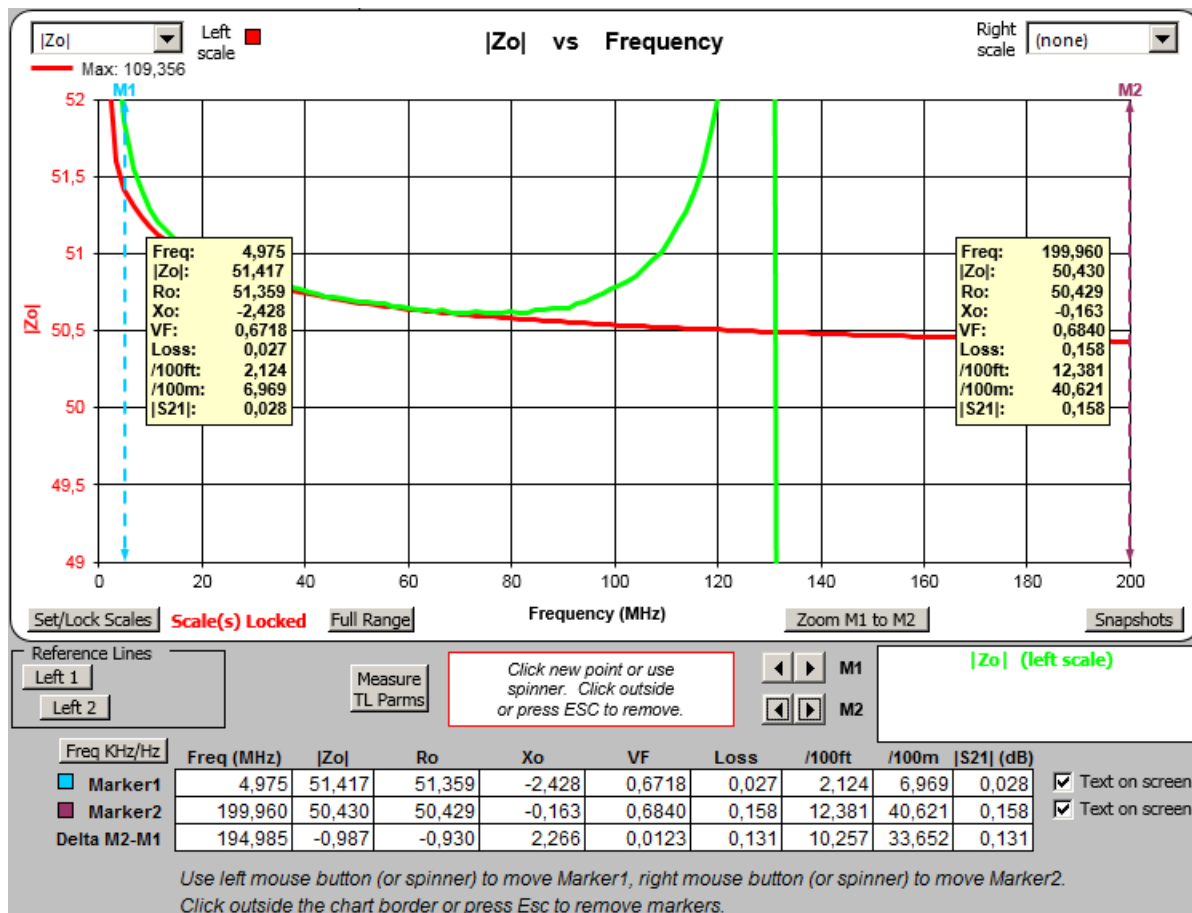
Zur besseren Darstellung kann mit „Set/Lock Scales“ die Einteilung der X- oder Y-Achse verändert werden.



Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

Marker können gesetzt werden, wenn man mit der linken oder mit der rechten Maustaste auf die rote Kurve klickt:



Diese Marker-Information kann dann zur weiteren Auswertung anzeigen lassen. Den gewünschten Parameter kann man sich dann auch jeweils bei left oder right scale aussuchen. Der Marker wird übrigens mit den Pfeil-Tasten bei M1 bewegt!

Wenn man Platinenmaterial vermisst, kann man sich aus dem Velocity Factor VF durch die Gleichung $\epsilon_{ps-r} = 1/(VF)^2$ das Eps-r errechnen.

Man sieht übrigens sehr schön dass alle Parameter eine Frequenzabhängigkeit besitzen, bei machen Koax-Leitungen ist dieser Effekt noch sehr viel ausgeprägter als bei der hier gewählten Leitung.

Beim Schließen des Excel-Programms nicht speichern wählen, das macht den Wiederstart einfacher.

Ich hoffe dieses Beispiel macht jetzt den Vorgang nachvollziehbar.

Generate Data

Rs + Ls | Rp || Cp | Trap | Crystal | TL Params | TL f

Frequency

Start: 0,1 MHz

Stop: 1300 MHz

Step: 80lp MHz

Number of Points: 801 (info only)

Append 'p' to set number of linear points.
Append 'e' to set number of exponential points.

Transmission Line Type: User spec: Set parms below

Nom. VF: 0,6877

K0: 1,869933

K1: 0,618947

K2: 0,017787

Nom. Zo: 50,16

Length: 390

Units: Millimeters

Buttons: OK, Close, Apply, Set/Lock Scales, Traces, Snapshots

Workshop Notes – Volume 1

7.4 Powersweep - Der 1 dB Kompressionspunkt eines Verstärkers

Mit dem VNWA kann auch der 1 dB Kompressionspunkt eines Verstärkers gemessen werden, indem bei einer festen Frequenz der Pegel langsam verändert wird während S21 Messungen durchgeführt werden.

Der TX-Pegel des VNWA ist mit -17 dBm zu klein um einen zu vermessenden DUT-Verstärker in die Kompression zu treiben. Daher ist ein Vorverstärker (Booster-Verstärker) notwendig, der den VNWA-TX-Level anhebt. Um Spurs und andere Störsignale zu unterdrücken muss hinter den Vorverstärker ein Bandpass geschaltet werden.

In diesem Beispiel wird am Mini Circuits Verstärker ZFL-500 der 1-dB Kompressionspnt für 7,1 MHz gemessen. Der Verstärker wird mit 12V betrieben.

7.4.1 Vermessung der Vorverstärkers

Als Vorverstärker verwende ich den Verstärker Kubik #06⁴

Beim Vermessen muss darauf geachtet werden dass der TX-Level um 10dB abgesenkt wird um den VNWA nicht zu übersteuern. Weiterhin kann man so auch Kompressionseffekten aus dem Weg gehen.

Bei 7,1 MHz liegt die Verstärkung S21 bei 9,8 dB.

7.4.2 Vermessung des Bandpasses

Hier die Messergebnisse des verwendeten Bandpasses um sich einen ersten Überblick verschaffen zu können.

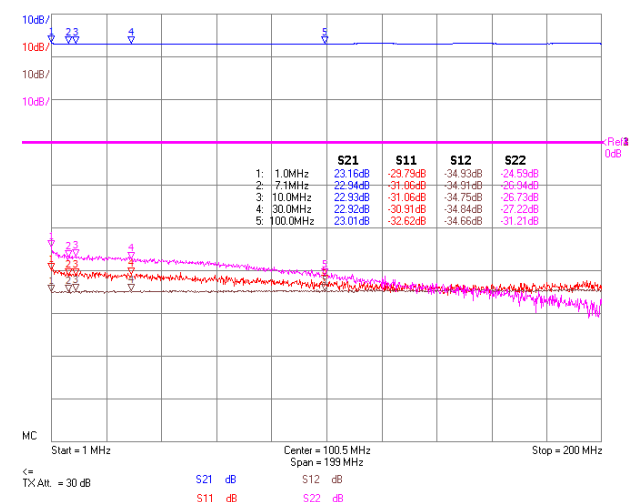
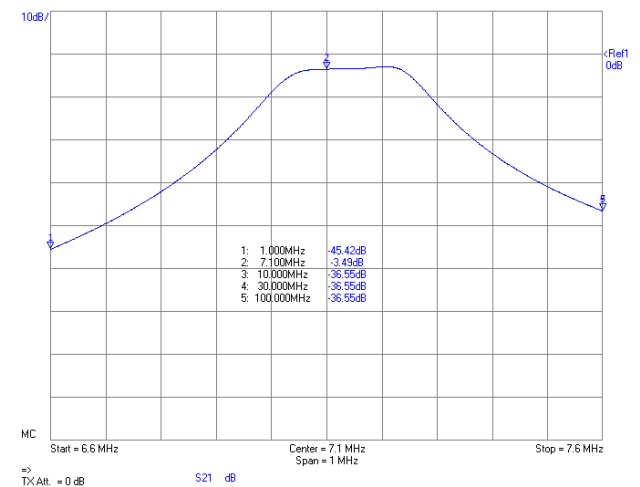
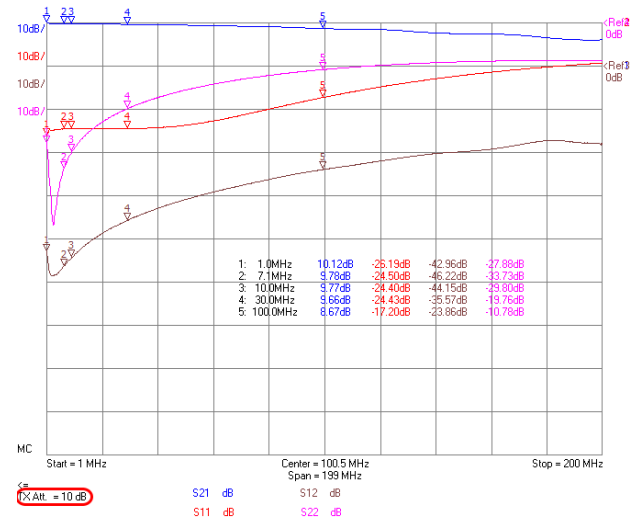
Der Bandpass hat eine Dämpfung bei 7,1 MHz von 3,5dB.

Hinweis: Bei diesen niedrigen Frequenzen hätte auch ein Tiefpass gereicht. Vielleicht hätte ich auch ganz auf einen Filter verzichten können. Ich war nur zu faul mir das Ausgangsspektrum auf dem Spektrum Analysator anzeigen lassen.

7.4.3 Das Messobjekt - ein erster Überblick

Um einen ersten Überblick zu erhalten werden alle vier S-Parameter des Verstärkers vermessen. Um den VNWA nicht zu übersteuern wird der TX-Pegel um 30dB abgesenkt. Achtung: Nicht vergessen diese Pegelabsenkung hinterher wieder rückgängig zu machen.

Hier nun das Messobjekt (DUT – device under test) Mini Circuits ZFL-500.



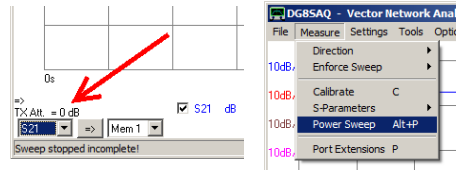
⁴ <https://www.bartelsos.de/dk7jb.php/der-kubik-verstaerker>

Workshop Notes – Volume 1

Jörn DK7JB mail@dk7jb.de

7.4.4 Power Sweep Utility

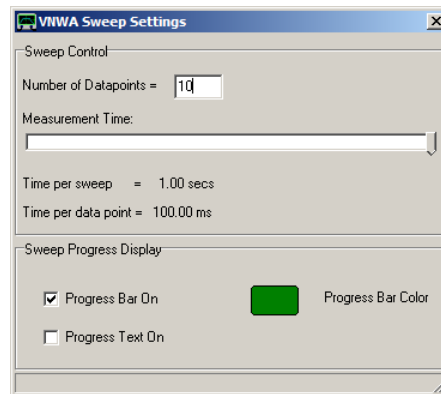
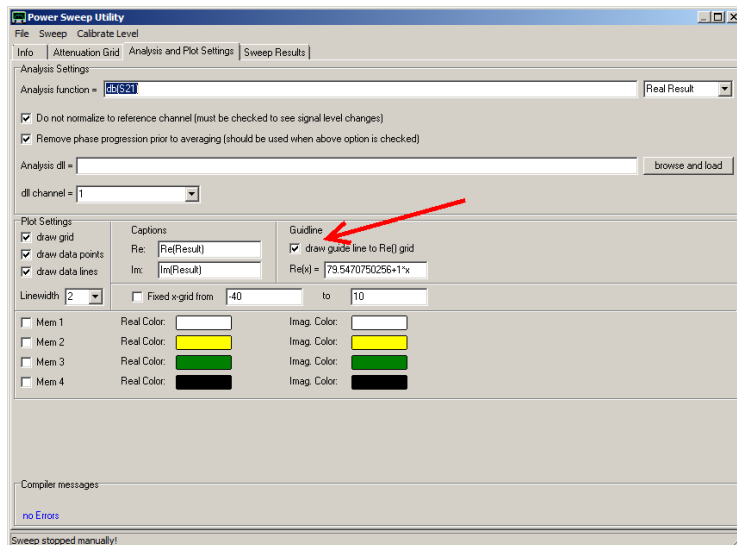
Vor dem Starten des Power Sweep Utility überprüft werden ob der TX-Pegel für irgendwelche Verstärkermessungen abgesenkt worden ist. Bitte auf 0dB stellen. Es sollte auch ein Instrumentstate gesichert werden, da sonst einige Einstellungen nach der Messung nicht mehr stimmen.



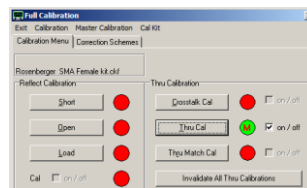
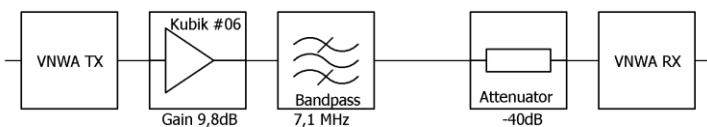
Nachdem das Power Sweep Utility aufgerufen worden ist müssen noch Einstellungen zu den Messpegeln getroffen werden.

#	Target Attenuation/dB	Actual Attenuation/dB
1	0	0
2	1	1
3	2	2
4	3	3
5	4	4
6	5	5
7	6	6
8	7	7
9	8	8
10	9	9
11	10	10
12	15	15.001
13	20	20.002
14	25	25.003
15	30	30.001

Weitere Einstellungen

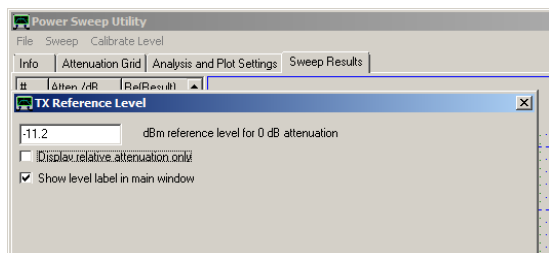


Thru-Kalibrierung = Durchgangs-Kalibrierung

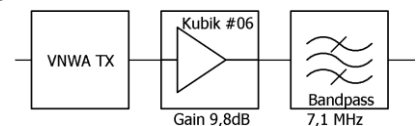


Anschließend muss noch ein normale Thru-Kalibrierung durchgeführt werden.

Pegel messen

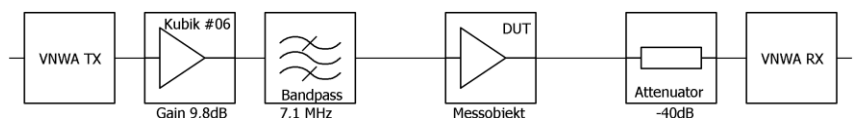


Unter „Calibrate Level“ muss nun der reale Pegel hinter dem Vorverstärker und Bandpass angegeben werden. Mit einem Powermeter HP436A (mit HP8482A Messkopf) wurden - 11,20 dBm gemessen.



Die Messung

Nun kann endlich der Verstärker vermessen werden.



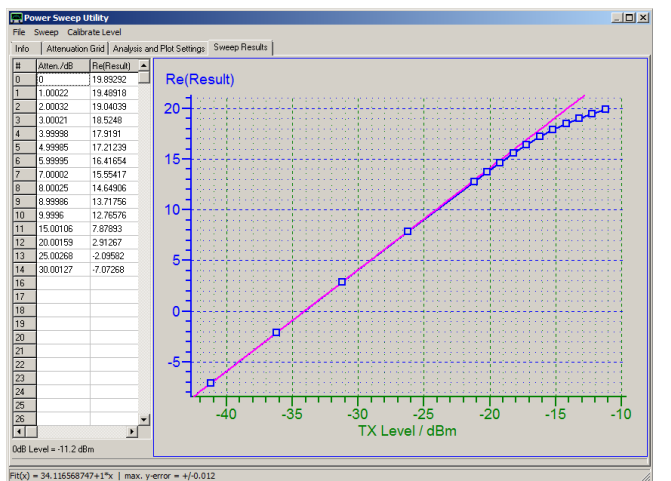
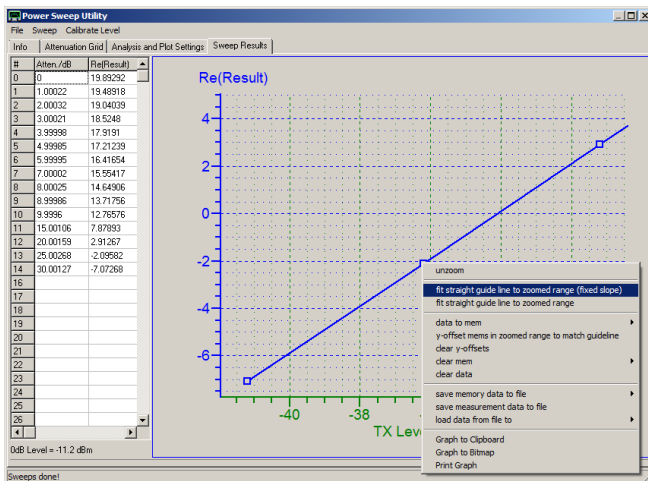
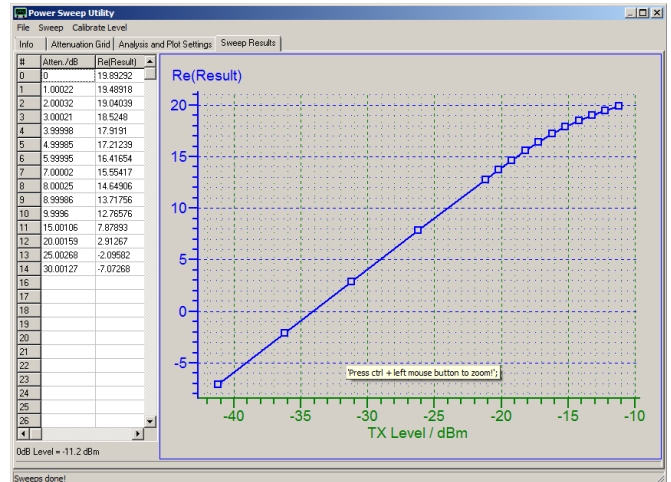
Workshop Notes – Volume 1

#	Target Attenuation/dB	Actual Attenuation/dB
1	0	0
2	1	0
3	2	2

Mit „Sweep“ wird die Messung gestartet, die einige Sekunden dauert.

Es sollte sich dann das folgende Bild ergeben. Sehr schön ist zu sehen, dass bei steigenden Pegel irgendwann eine Kompression deutlich zu erkennen ist.

Die folgenden Bilder zeigen wie man ein Gerade einblenden kann die aus dem linearem Abschnitt der Messkurve generiert wird. Mit der STRG-Taste (Ctrl) und der linken Maustaste kann in die ersten drei Messwerte gezoomt werden. Anschließend kann mit der linken Maustaste die Gerade erzeugt werden (siehe Bild). Mit unzoom kann dann wieder der ursprüngliche Bildausschnitt erreicht werden.



Nun muss nur Zoom der Punkt der 1 dB Kompression gefunden werden. Bei diesem Verstärker ist bei einem TX-Pegel von -15,2 dBm eine Kompression von 1 dB zu erkennen. Hier weicht das reale Messergebnis von der linearen Gerade um 1 dB ab.

Bezogen auf den Eingang des Verstärkers liegt der 1 dB Kompressionspunkt bei -15,2 dBm.

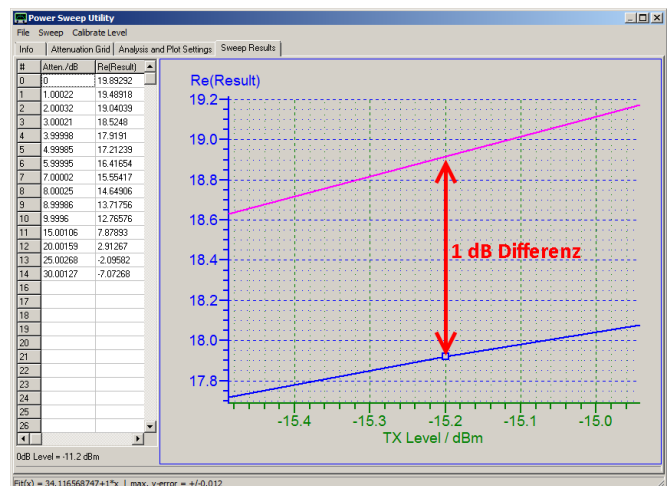
Da der 1 dB-Kompressionspunkt normalerweise immer auf den Ausgangspegel des Verstärkers bezogen wird, müssen wir noch die Verstärkung von 22,9 dB – 1dB = 21,9 dB hinzuaddieren.

Somit ergibt sich auf den Ausgang des Verstärkers ein 1 dB Kompressionspunkt von -15,2 dBm+21,9 dB = 6,8dB.

Das Datenblatt gibt für eine Versorgungsspannung von 15V einen 1 dB-Kompressionspunkt von +8dBm an. Da wir hier die Versorgungsspannung auf 12V abgesenkt haben und einen etwas kleinen Wert gemessen haben ist das Ergebnis plausibel.

Eine sehr gute Zusammenfassung mit vielen weiteren Hinweisen findet ihr hier:

http://www.hamcom.dk/VNWA/How to use the new VNWA Power Sweep Utility_rev1.pdf



7.5 Messungen an Kabeln

7.5.1 Das Messverfahren - Time Domain Reflectometry und Frequency Domain Reflectometry

Kabel lassen sich mit Hilfe der Time Domain Reflectometry (TDR) oder Frequency Domain Reflectometry (FDR).

Bei der Time Domain Reflectometry (TDR) wird ein kurzer Spannungsimpuls an ein Kabel abgegeben. Störstellen reflektieren einen Teil des Signals. Diese Reflexion wird ausgewertet. Da der VNWA keine Impulse aussenden kann wird beim VNWA das zweite Verfahren angewendet.

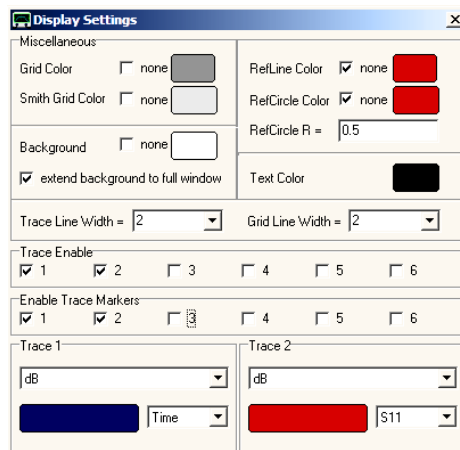
Bei der Frequency Domain Reflectometry (FDR) werden Sinusschwingungen in einem weiten Frequenzbereich ausgesendet und die Reflexion der Signale an Störstellen ausgewertet. Der VNWA ist in der Lage eine Frequency Domain Reflectometry durchzuführen. Mathematisch lassen sich beide Verfahren ineinander umrechnen und sind somit weitestgehend gleichwertig.

Mit Hilfe der Time Domain Reflectometry bzw. der Frequency Domain Reflectometry lassen sich die Längen von Kabeln bestimmen, Stoßstellen oder Verkürzungsfaktoren können vermessen werden

Tiefergehende Erklärungen findet ihr in der VNWA-Hilfe-Datei⁵ unter „TDR“ oder im Buch von Gerfried (Band 1; Kapitel 12 bis 15).

In diesem Kapitel werden die Untersuchungen an Kabeln nur kurz angedeutet – quasi als „Apetitthappen“.

7.5.1.1 Verkürzungsfaktor eines Koaxialkabels bestimmen

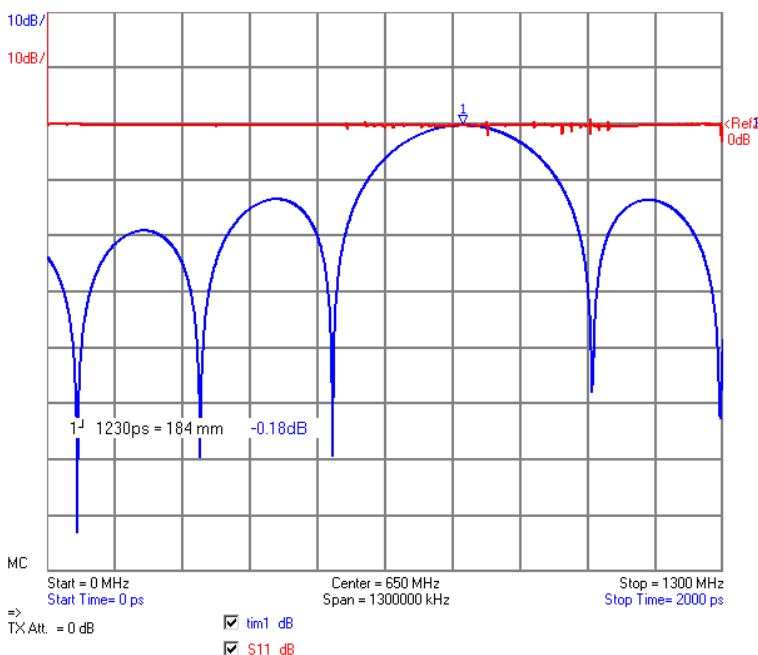
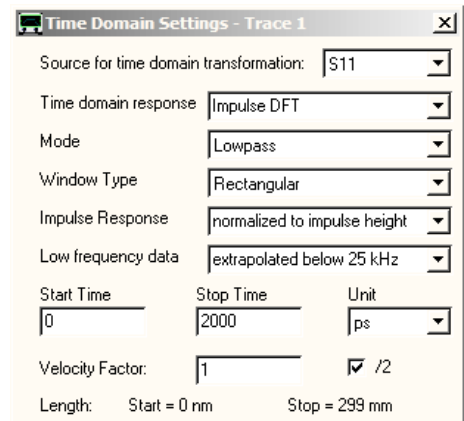


Hier nur eine sehr kurze Anleitung:

Sweep Settings: 2000 Punkte; Time per sweep 20 secs

Display Settings: Trace 1 Time

Im Hauptfenster dann unter „tim1“ (unten bei der Trace-Auswahl) dann mit einem Doppelklick ein weiteres Auswahlfenster öffnen.



Da wir den Velocity Factor berechnen wollen, muss er zunächst auf 1 gestellt werden. Nun kann eine Messung gestartet werden. Der Marker „Add Maximum Time Marker“ ergibt dann die Länge. Die Messung ergibt 184mm für ein ideales Kabel. Das reale Kabel hat aber nur eine Länge von 130mm (mit der Schieblehre gemessen). Die Rechnung $130 \text{ mm} / 184 \text{ mm} = 0,71$ ergibt dann den Verkürzungsfaktor.

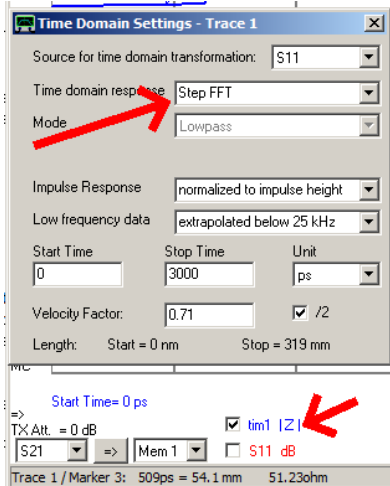
⁵ http://sdr-kits.net/documents/VNWA_HELP_36-7-6_%20deutsch.pdf

Workshop Notes – Volume 1

7.5.1.2 Länge eines Koaxialkabels bestimmen

Nachdem die Messungen aus dem vorhergehenden Unterkapitel durchgeführt worden sind, kann nun die Länge eines Kabels mit unbekannter Länge gemessen werden. Mit dem gemessenen und berechneten Verkürzungsfaktor kann nun die Länge eines längeren Kabels der gleichen Bauart bestimmt werden. Genauer werden die Messungen, wenn das zu messende Kabel mit einem Short abgeschlossen wird.

7.5.1.3 Messen des Wellenwiderstandes

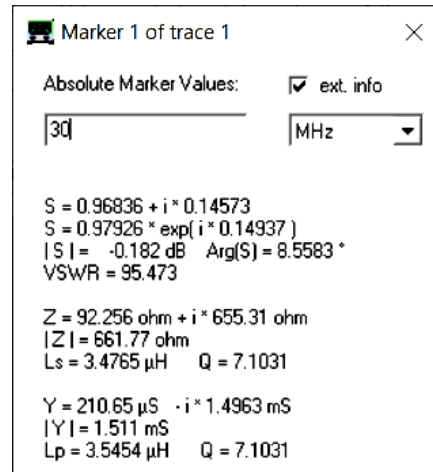
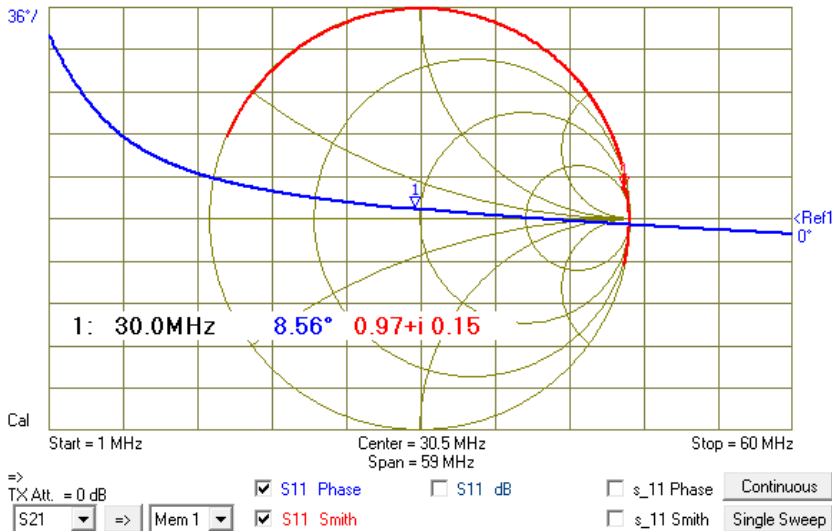


Hier die Einstellungen für die Messung des Wellenwiderstandes.

7.6 Der Optimizer am Beispiel einer Vermessung einer Schleifenantenne

In der deutschen Übersetzung der VNWA Hilfedatei⁶ (Version 36.7.6 deutsche Übersetzung) findet ihr auf Seite 237 ausführlich beschrieben, wie eine kleine Schleifen Antenne vermessen und dann mit dem Optimizer das Ersatzschaltbild gebildet wird.

Dieses Kapitel verstehe ich als „Appetitmacher“ und nicht als Anleitung. Alle notwendigen zusätzlichen Erklärungen findet ihr in der Hilfe-Datei.



Es wird eine S11 Messung aufgenommen. Das Bild zeigt S11 im Smith-Diagramm und die Phase. Die Markerinformationen für 30 MHz findet ihr im rechten Bild.

Unter Tools wird der „Optimizer“ aufgerufen und die Eingaben wie im Bild übernommen. Eine Spule, und die Antenne ist nichts anderes, lässt sich sehr gut durch das abgebildete Ersatzschaltbild beschreiben. Nachdem die Formeln und sonstigen Eingaben übernommen worden sind, muss „Optimize“ angeklickt werden um den Optimiervorgang zu starten. Die Daten des optimierten Ersatzschaltbildes werden nach s_11 geschrieben (Der Speicher für S11 der 3-Port-Messung, der hier nicht benötigt wird und nur als Platzhalter dient).

Sollte der Fall auftreten, dass der Optimizer keine vernünftigen Werte finden sollte, können Startwerte für die Suche vorgegeben werden.

Optimizer - Model Fitting Tool

File Load Save Model Settings Optimize

Optimizer | Splines | Distance |

Expression to be globally fitted to Simulation stored to

in restricted frequency range MHz to MHz

$y2s(1/ZL+YC)$

Name	Alias	Subexpression (available in main expression, subexpressions may use other subexpressions from below)
Sub1	ZL	$i\omega L + R$
Sub2	YC	$i\omega C$

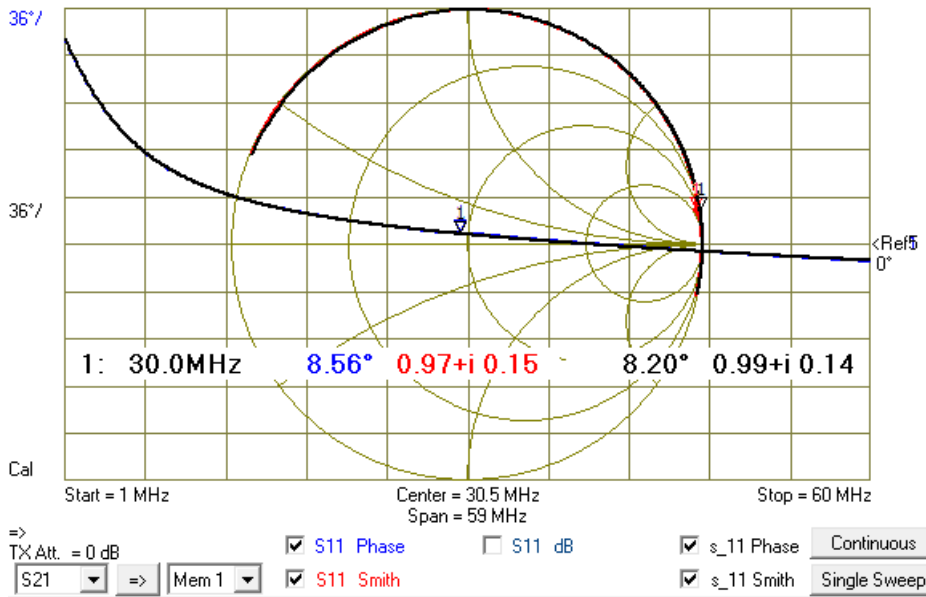
Variable	Alias	Real Value	Delta	Optimize
x1	R	2.938628803164E-001	1.0E-001	<input checked="" type="checkbox"/>
x2	L	1.595587573559E-006	1.0E-007	<input checked="" type="checkbox"/>
x3	C	1.003348332380E-011	1.0E-013	<input checked="" type="checkbox"/>
x4		1.000000000000E+000	0.0E+000	<input type="checkbox"/>
x5		1.000000000000E+000	0.0E+000	<input type="checkbox"/>
x6		1.000000000000E+000	0.0E+000	<input type="checkbox"/>
x7		1.000000000000E+000	0.0E+000	<input type="checkbox"/>

Figure of Merit = 0.0278 (should be as small as possible)

Inductor Model

⁶ http://sdr-kits.net/documents/VNWA_HELP_36-7-6_%20deutsch.pdf

Workshop Notes – Volume 1



Die optimierte Kurve des Ersatzschaltbildes beschreibt perfekt die reale Messung,

Die Daten sind im obigen Bild zu finden:

$L = 1,596 \mu\text{H}$

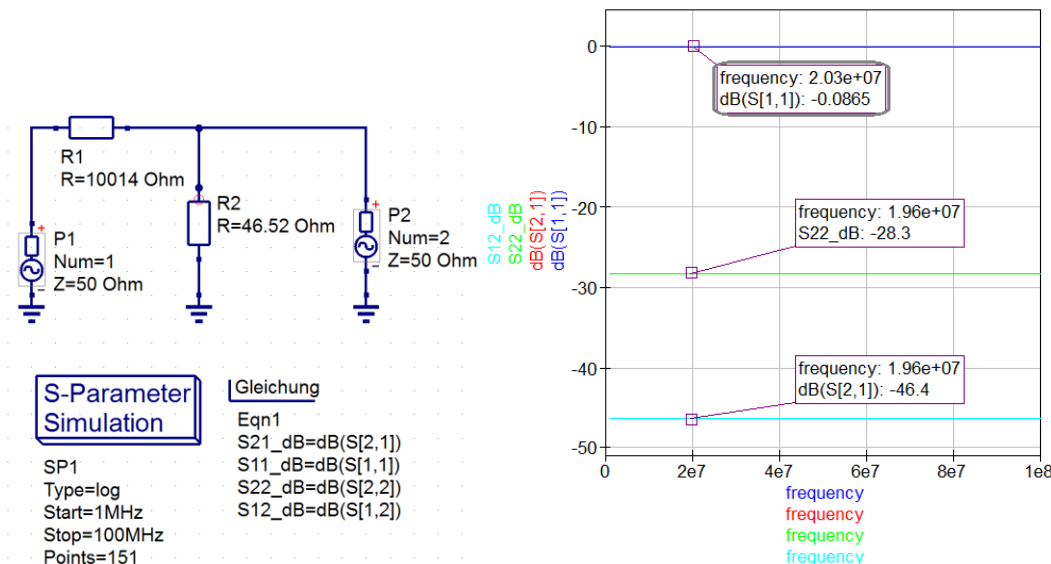
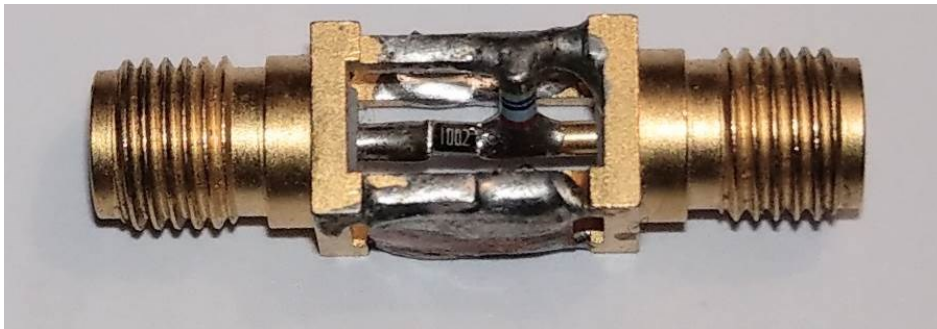
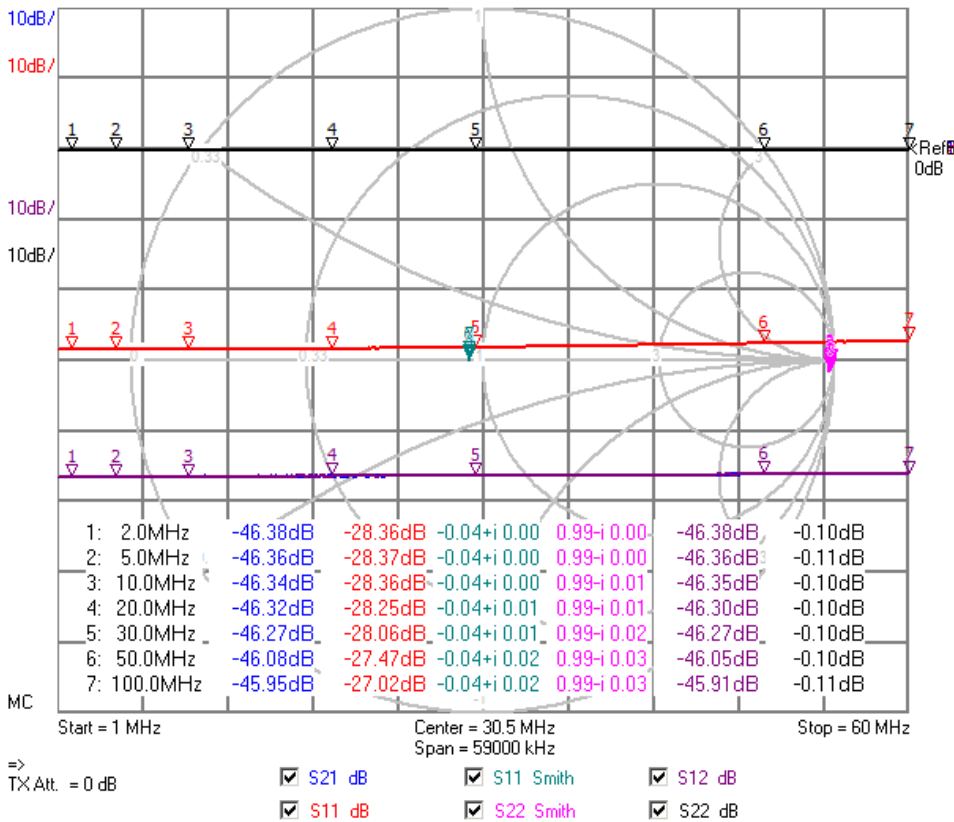
$C = 10,03 \text{ pF}$

$R = 0,294 \text{ Ohm}$

Diese mithilfe des Optimizers gewonnenen Daten des Ersatzschaltbildes können in einer Simulation weiterverwendet werden.

7.7 Check der Kalibrierung

Zum schnellen Check einer Kalibrierung habe ich mir aus zwei Widerständen ein Test-DUT gebaut (als L-Glied geschaltet). Durch schnellen Vergleich der aktuellen Messwerte mit einer alten Messung kann schnell überprüft werden, ob alles in Ordnung ist. So können schnell grobe Fehler gefunden werden.



8 Sonstiges

8.1 dB-Maßstab

Immer wenn mit Größen gearbeitet wird, die sich über einen Maßstab von vielen Zehnerpotenzen erstrecken, ist die Wahl eines logarithmischen Maßstabes sinnvoll.

Die Leistungsverhältnis und Ausgangsverhältnisse vom Ausgangssignal zum Eingangssignal sind in der nebenstehenden Abbildung abgebildet (Zahlen gerundet).

	Leistungsverhältnis	Spannungsverhältnis
40 dB	10000	100
20 dB	100	10
10 dB	10	3,16
6 dB	4	2
3 dB	2	1,41
1 dB	1,26	1,12
0 dB	1	1
-1 dB	0,79	0,89
-3 dB	0,5	0,71
-6 dB	0,25	0,5
-10 dB	0,1	0,32
-20 dB	0,01	0,1
-40 dB	0,0001	0,01
-100 dB	0,0000000001	

Für tiefergehende Informationen empfehle ich die folgende Quelle:

https://dokumente.unibw.de/pub/bscw.cgi/d351120/dB1_new.pdf

Hier noch eine sehr gute Quelle:

https://www.rohde-schwarz.com/de/applikationen/db-oder-nicht-db-educational-note_230850-15534.html