

DL1JWD-HamVNAS 1.6

Bedienanleitung

HamVNAS (Vektorielle Netzwerkanalyse und -synthese) ist ein einfach zu bedienendes Windows-Programm, welches als Novum gleichzeitig zur Analyse und Synthese passiver elektrischer Schaltungen im Wechselstrombereich einsetzbar ist.

Besondere theoretische Vorkenntnisse, die über das zur Lizenzprüfung erforderliche Allgemeinwissen von Funkamateuren hinausgehen, sind nicht erforderlich.

Hinweis: Die Datenbanken *CircuitsDB.dat* und *SynthesisDB.dat* müssen sich im gleichen Verzeichnis wie *HamVNAS.exe* befinden (das Anfertigen einer Sicherheitskopie wird empfohlen).

In der Basisversion umfasst die Modellbibliothek die Bauelemente *Ohm'scher Widerstand*, *Kapazität*, *Induktivität (ohne, mit einer und mit zwei Anzapfungen)*, *Zwei- und Dreiwicklungsübertrager*, *Koaxialkabel* und *Bandkabel*.

Ergebnis einer Schaltungssimulation mit *HamVNAS* sind folgende für den Funkamateur wichtigen Parameter:

Eingangsimpedanz, **Übertragungsdämpfung** (Transmission, S21), **Stehwellenverhältnis** (SWR), **Rückflußdämpfung** (Return Loss, S11).

Die grafische Darstellung erfolgt als **Wobbelkurve** (Frequenzgang) und als **Smith-Diagramm**. Weiterhin können für jeden Frequenzpunkt die **S- oder Y-Vierpolparameter** angezeigt werden.

Im Synthesemodus von *HamVNAS* lassen sich die wichtigsten Antennen-Anpassungen (**L/C-Anpassungen** mit zwei Blindwiderständen, **Collinsfilter**, **T-Koppler**, **LDG- und SG-Koppler**, **Transformations- und Stichleitung**) unter Verwendung beliebiger Koax- und Bandkabel bzw. Hühnerleitern berechnen. Eingabewerte sind zum Beispiel die mit einem vektoriellen Antennenanalysator (VNA) gemessenen Impedanzen.

Die *HamVNAS*-Version 1.0 stammt aus dem Jahr 2015, inzwischen habe ich meine Programmsammlung um zahlreiche kleinere Tools ergänzt, die in den **JWD-Tools** zusammengefasst sind und von meiner Homepage dl1jwd.darc.de heruntergeladen werden können. Dazu gehören z.B. der *Doppelzepprechner* (DZR), der *MultiresonanzFinder* (MRF) und auch der "kleine Bruder" von *HamVNAS*, der *Kleine Netzwerkanalysator* (KNWA). Dieser ist z.B. zur Aufnahme von Frequenzdiagrammen bei Antennenanpassungen sogar noch besser geeignet ist, da er u.a. auch die direkte Modellierung von Dipol- und Groundplane-Antennen ermöglicht.

Neu gegenüber älteren Versionen ist die Einbindung von *HamVNAS 1.6* in die *JWD-Tools*, wodurch sich eine spezielle Registrierung erübrigt. Auch die Bedienung wurde vereinfacht und das Handbuch gekürzt. Weitere kleinere Verbesserungen sind die Zuweisung beliebiger Bezugsfrequenzen für die Kabeldämpfung (vorher nur 10MHz) und die Korrektur des antennenseitigen SWV (Anzeige jetzt im Betriebsparameter-Tablett).

Viel Spaß und Erfolg beim Experimentieren

und 73 de

Walter dl1jwd.darc.de

Wintersdorf im Januar 2021

Inhaltsverzeichnis

Teil 1: Schaltungssimulation.....	4
Bedienoberfläche.....	4
Erläuterung der Bedienelemente.....	5
Einstellen der Fenstergröße.....	6
Übungsbeispiele.....	7
Übung 1: Experimente mit der Schaltungsbibliothek.....	7
Zwischen den Seiten navigieren.....	7
Schaltung analysieren.....	7
Übung 2: Frequenzeingaben variieren.....	9
Änderungen rückgängig machen oder dauerhaft übernehmen.....	10
Übung 3: Elektrische Parameter editieren.....	10
Parameter ändern.....	10
Übung 4: Schaltung im Designer bearbeiten.....	10
Schaltung, Bauelement oder Verbindung verschieben.....	10
Schaltung, Schaltungsausschnitt oder Bauelement kopieren.....	11
Bauelement, Verbindung oder Schaltungsausschnitt löschen.....	11
Übung 5: Editieren im Datengitter und Einstellungen ändern.....	12
Übung 6: Entwurf einer eigenen Schaltung.....	13
Schaltung zeichnen.....	13
Elektrische Parameter zuweisen.....	14
Schaltung testen.....	15
Übung 7: Zwei Diagramme vergleichen.....	15
Übung 8: Spannungen messen.....	16
Weitere Beispiele zur Schaltungsanalyse.....	17
HamVNAS vs NanoVNA.....	17
Transformator vs angezapfte Spule (HyEndFed-Antenne).....	19
Teil 2: Synthese und Verlustanalyse von Antennenanpassungen.....	21
Bedienoberfläche.....	21
Erläuterung der Synthese-Bedienelemente.....	21
Synthesegitter.....	23
Einstellungen zur Antennenanpassung.....	23
Übungsbeispiele.....	25
Übung 9: Durchführung einer Schaltungssynthese.....	25
Synthese vorbereiten.....	25
Anpass-Glied einfügen.....	26
Anpassung analysieren.....	27
Übung 10: Durchführung einer Verlustanalyse.....	27
Antennen-Ersatzschaltbild generieren.....	28
Verlustanalyse auswerten.....	28
Übung 11: Verlustanalyse bei Anpassung eines verkürzten Vertikalstrahlers.....	30
Übung 12: Anpassung eines endgespeisten Dipols mittels T-Koppler.....	31
Übung 13: Kamikaze eines Automatikkopplers.....	33
Weitere Beispiele zu Schaltungssynthese und Verlustanalyse.....	35
HamVNAS vs Smith-Diagramm.....	35

Experimente mit Lautsprecherkabel-Dipol.....	36
Teil 3: Technische Grundlagen.....	37
Modellbibliothek.....	37
Generator- und Lastwiderstand.....	37
Ohm'scher Widerstand, Kapazität, Induktivität.....	38
Übertrager, angezapfte Spulen.....	39
Koaxkabel, Bandkabel.....	40
Basisalgorithmen.....	40
Aufstellen der Netzwerkgleichungen.....	40
Lösen der Netzwerkgleichungen.....	41
Betriebsparameter.....	41
Spannungsverstärkung V_u	41
Leistungsübertragung V_p	41
Eingangsimpedanz Z_E	42
Eingangsreflexionsfaktor RF_E	42
Stehwellenverhältnis SWR.....	42
Rückflussdämpfung R_{Loss}	42
Problemlösungen.....	43
Literatur.....	44

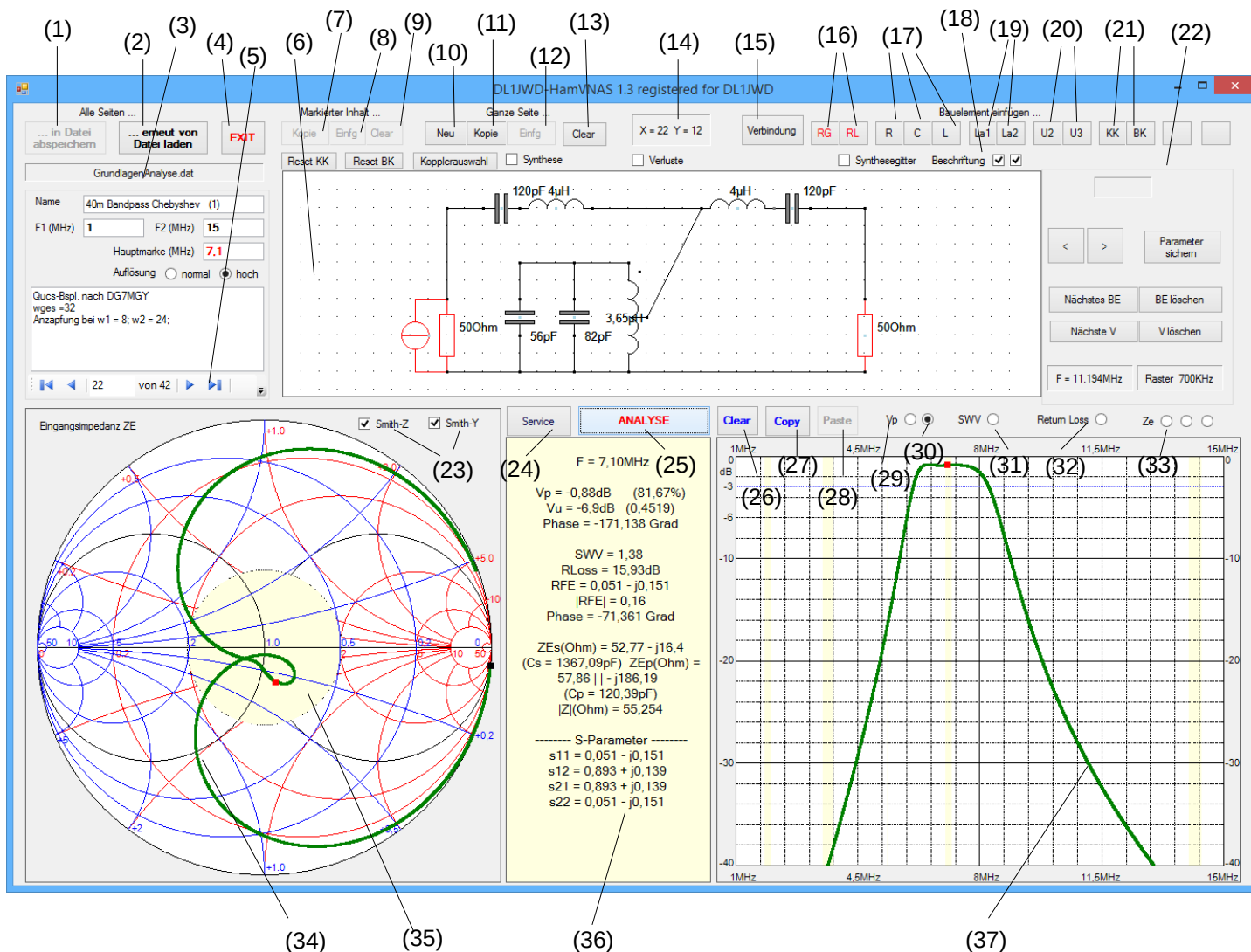
Teil 1: Schaltungssimulation

Den Begriff "Schaltungssimulation" verwende ich gleichbedeutend mit "Schaltungsanalyse". Ziel ist ganz allgemein die Berechnung und Darstellung des Verhaltens eines **gegebenen** linearen elektrischen Netzwerks im Frequenzbereich (eingeschwungener Zustand).

Bedienoberfläche

Die Abbildung zeigt das Hauptfenster von *HamVNAS*, wobei zunächst nur die für die Schaltungssimulation relevanten Bedienelemente referenziert sind:

- In der oberen Hälfte erfolgt der Datenbankzugriff, die Eingabe der Eckfrequenzen, der Schaltungsentwurf und die Zuweisung der elektrischen Parameter.
- Das frequenzabhängige Verhalten wird in der unteren Hälfte dargestellt, sowohl als Smith-Diagramm (links) als auch als Wobbelkurve (rechts).
- Für eine bestimmte Frequenz (Hauptfrequenzmarke) erfolgt die detaillierte Auflistung aller Betriebsparameter und weiterer Kenngrößen (Mitte untere Hälfte).



Erläuterung der Bedienelemente

Nr	Bedienelement	Bedeutung
1	Button "... in Datei abspeichern"	... überschreibt die Datei <i>CircuitsDB.dat</i> mit dem Inhalt des Arbeitsspeichers und sichert somit alle Schaltungen dauerhaft. Der alte Inhalt von <i>CircuitsDB.dat</i> wird somit ersetzt.
2	Button "... erneut von Datei laden"	... füllt den Arbeitsspeicher mit dem Inhalt der Datei <i>CircuitsDB.dat</i> .
3	Tablett "Allgemeine Eingaben"	... der Bereich für die Eingabe allgemeiner Schaltungsparameter (Name, Anfangs- und Endfrequenz, Hauptfrequenzmarke, Anzahl Messpunkte, Schrittweite, Kommentar)
4	Button "EXIT"	... beendet das Programm. Falls nicht vorher abgespeichert wurde (1), gehen alle Änderungen verloren!
5	Navigator	... ermöglicht das Durchblättern aller Seiten des Arbeitsspeichers. Weiterhin sind die direkte Eingabe einer Schaltungsnummer sowie das Löschen einer bestimmten Seite möglich.
6	Designer	... die Zeichenfläche zum Entwurf und zur Darstellung der Schaltung.
7	Button "Kopie" (unter "Markierter Inhalt")	... kopiert einen bestimmter Schaltungsbereich, den Sie vorher mit der rechten Maustaste umrahmt haben, in die Zwischenablage.
8	Button "Einfüg" (unter "Markierter Inhalt")	... fügt den Inhalt der Zwischenablage zur aktuellen Schaltung hinzu.
9	Button "Clear" (unter "Markierter Inhalt")	... löscht den Der Inhalt der Zwischenablage.
10	Button "Neu"	... fügt eine neue leere Seite im Anschluss an die aktuelle Seite hinzu.
11	Button "Kopie" (unter "Ganze Seite")	... kopiert den kompletten Inhalt einer Seite in die Zwischenablage (dadurch entfällt das Einrahmen).
12	Button "Einfüg" (unter "Ganze Seite")	... fügt den Inhalt einer gesamten Seite aus der Zwischenablage in eine leere Seite ein.
13	Button "Clear" (unter "Ganze Seite")	... löscht den Inhalt des Designers (6).
14	Koordinatenanzeige	... zeigt die aktuelle Mausposition im Raster des Designers (6).
15	Button "Verbindung"	... schaltet den Designer in den Verbindungsmodus und ermöglicht so das Ziehen einer oder mehrerer Verbindungen.
16	Buttons "RG" und "RL"	... öffnet das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" um dort einen Generator- oder einen Lastwiderstand zu erzeugen, zu drehen und zu spiegeln.
17	Buttons "R", "C" und "L"	... öffnet das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" um dort einen ohm'schen Widerstand, eine Kapazität oder Induktivität zu erzeugen, zu drehen und zu spiegeln.
18	Kontrollkästchen "Beschriftung"	... ermöglichen vier unterschiedliche Arten, um die Bauelemente im Designer zu bezeichnen (erstes Häkchen = große oder kleine Schrift, zweites Häkchen = Bauelementetyp + Index oder Wert).
19	Buttons "La1" und "La2"	... öffnet das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" um dort eine Induktivität mit zwei oder mit drei Anzapfungen zu erzeugen, zu drehen und zu spiegeln.
20	Buttons "U2" und "U3"	... öffnet das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" um dort einen Übertrager mit zwei oder mit drei Wicklungen zu erzeugen, zu drehen und zu spiegeln.
21	Buttons "KK" oder "BK"	... öffnet das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" um dort ein Koaxial- oder ein Bandkabel zu erzeugen, zu drehen und zu spiegeln..

22	Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen"	... der Bereich, in welchem Sie die Liste der Bauelemente durchfahren und deren elektrische Parameter anzeigen und editieren können. Ebenso können Sie die Verbindungsliste durchfahren. Das Tablett verdeckt das Tablett "Bauelemente-Erzeuger".
23	Kontrollkästchen "Smith-Z" und "Smith-Y"	... ermöglichen die Anzeige des Smith-Diagramm (34) in Impedanz- und/oder Admittanz-Ansicht. Fehlen beide Häkchen, so erscheint der Verlauf des Eingangs-Reflexionsfaktors.
24	Button "Service" / "Smith-Chart"	... öffnet den Service-Bereich bzw. kehrt zum Smith-Diagramm zurück..
25	Button "ANALYSE"	... startet die Schaltungsanalyse.
26	Button "Clear"	... löscht den Messwertspeicher.
27	Button "Copy"	... überträgt die aktuellen Analyseergebnisse in den Messwertspeicher.
28	Button "Paste"	... fügt die zwischengespeicherten Analyseergebnisse (blau) zu Vergleichszwecken in die aktuellen Smith- und Wobbelgramme (grün) ein.
29	Umschalter "Vp" (links)	... zeigt den Frequenzgang der Betriebsleistungsverstärkung (Transmission) im Bereich geringer Übertragungsverluste (0...-4dB) an.
30	Umschalter "Vp" (rechts)	... zeigt den Frequenzgang der Betriebsleistungsverstärkung (Transmission) im Bereich von 0...-40dB an.
31	Umschalter "SWV"	... zeigt den Frequenzgang des Stehwellenverhältnisses an.
32	Umschalter "Return Loss"	... zeigt den Frequenzgang der Rückflußdämpfung an.
33	<i>entfällt ab Version 1.5</i>	
34	Smith-Diagramm	... die Art des Diagramms kann mit den Kontrollkästchen (23) umgeschaltet werden.
35	SWV = 2	... im Inneren dieses Kreises ist das eingangsseitige Stehwellenverhältnis kleiner als 2,0
36	Tablett "Betriebsparameter"	... listet alle Betriebsparameter, Y- und S-Parameter für einen Frequenzpunkt auf.
37	Wobbelgramme	... die Art des Diagramms kann mit den Umschaltern (29) ... (33) geändert werden.

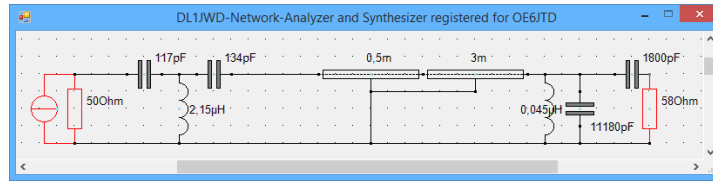
HINWEIS: Alle Bedienelemente zeigen in der Regel auch kurze Erklärungen (Hints) an, wenn Du mit der Maus länger als 5 Sekunden darauf verweilst. Nach einer gewissen Zeit nerven diese Hinweise und Du kannst diese im "Service"-Bereich (24) abschalten.

Einstellen der Fenstergröße

Zoomen nach Programmstart das Fenster auf eine bequeme Größe, so wie es die Bildschirmauflösung des Computers erlaubt. Fasse das Fenster mit der Maus am rechten oder unteren Rand an oder benutze die vertikale oder horizontale Bildlaufleiste zum Verschieben des Inhalts.

HINWEIS: Sollte das Hauptfenster von *HamVNAS* trotz genügend hoher Bildschirmauflösung nicht auf den kompletten Bildschirm passen, so gehe in die *Windows-Systemsteuerung / Darstellung und Anpassung / Anzeige* um dort unter *Lesbarkeit auf Bildschirm erleichtern* den Wert *100% (Standard)* einzustellen.

HINWEIS: Wenn das Fenster nur einen bestimmten Ausschnitt des Bildschirms zeigen soll, so verkleinere es durch Ziehen an den Rändern und verschiebe dann den Inhalt mittels der Bildlaufleisten, bis der gewünschte Ausschnitt erscheint:

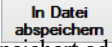
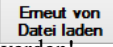


Übungsbeispiele

Ein Beispiel sagt mehr als 1000 Worte! Bitte verzichte deshalb auf planloses Herumprobieren und nimm Dir etwas Zeit für die folgenden kleinen Übungen, um dich schrittweise in *HamVNAS* einzuarbeiten¹ ().

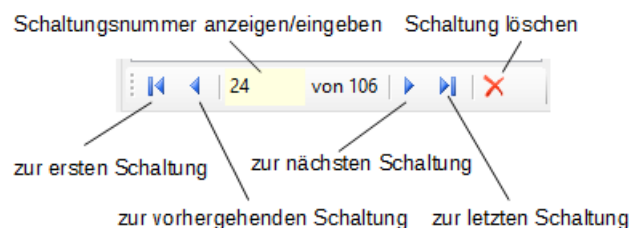
Übung 1: Experimente mit der Schaltungsbibliothek


Die in der Datei *CircuitsDB.dat* gespeicherte Standard-Schaltungsbibliothek wird bei jedem Programmstart automatisch geladen und kann von Dir beliebig ergänzt werden.

HINWEIS: Beachte, dass mit den Buttons  (1) und  (2) immer nur die komplette Bibliothek, also keine einzelnen Schaltungen, gespeichert oder geladen werden!

Zwischen den Seiten navigieren

- Blättere mit den kleinen blauen Pfeiltasten des Navigators (5) in der Schaltungsbibliothek.



- **ACHTUNG: Wenn Du die gewünschte Seitennummer in das mittlere Feld eingibst und mit der ENTER-Taste bestätigst kommst Du schneller zum Ziel.**
- Durch Klick auf das kleine rote Kreuz löschst Du die aktuelle Seite, allerdings wird diese Änderung zunächst nur im Arbeitsspeicher wirksam, in die Datenbank gelangt sie erst nach Klick auf  (1).
- Setze die gewünschten Häkchen (18) in der rechten oberen Ecke des Designers (6), so werden entweder die indizierten Bauelemente-Bezeichner oder aber die wichtigsten elektrischen Parameter in zwei möglichen Größen angezeigt.

Schaltung analysieren

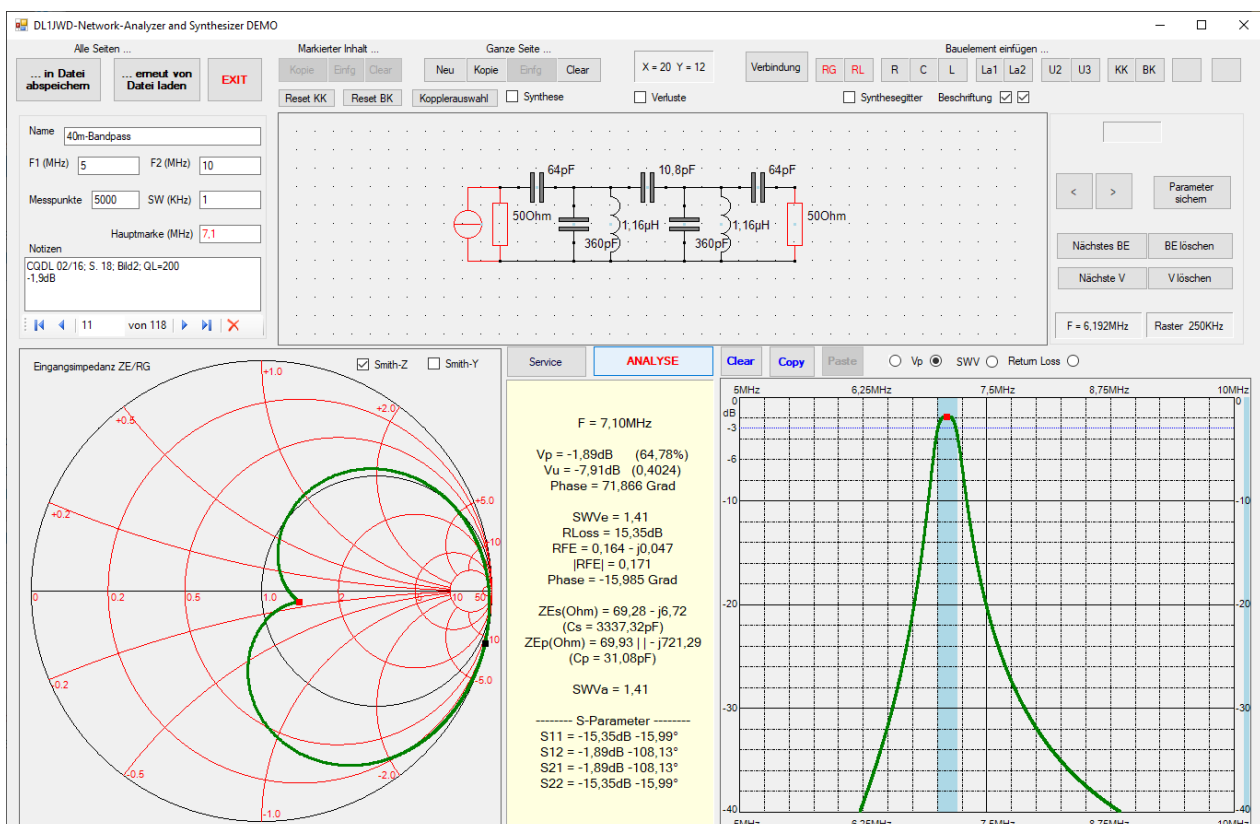
- Navigiere zur Schaltung Nr. 11² um den 40m-Bandpass aufzurufen.

¹ Die wichtigsten Übungen sind am Ende der mitgelieferten Datenbank abgespeichert.

² Die Nummer 11 bezieht sich auf den Anfangszustand der Datenbank. Später kann sich die Position ändern.

- Klicke auf **ANALYSE** (25) und erfreue Dich an den Wobbelkurven für Transmission (V_p), SWV und $Return Loss$ (**die Bereiche der Afu-Bänder sind blau hinterlegt**). Um zwischen den Diagrammen zu wechseln, klicke auf die kleinen runden Buttons (29)... (33) am oberen Rand des Wobbeldiagramms (37).
 - Im Tablett "Betriebsparameter" (36) sieht man die Ergebnisse für die Frequenz 7,1MHz, das ist die im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) eingestellte rote Hauptmarke.
 - Im Smith-Diagramm (34) ist die im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) eingetragene Anfangsfrequenz F1 mit einem kleinen schwarzen Viereck markiert. Die Hauptmarke erscheint hingegen, ebenso wie im Wobbeldiagramm (37), als kleines rotes Quadrat.
 - Parallel zur horizontalen Bewegung der Maus im Wobbeldiagramm markiert eine senkrechte rote Linie die aktuelle Frequenz. Synchron dazu fährt ein schwarzes Kreuz im Smith-Diagramm durch die Ortskurve der Eingangsimpedanz und zeigt auf den dazugehörigen Frequenzpunkt.
- Das funktioniert auch umgekehrt, wenn Du also mit der Maus auf einen bestimmten Punkt der Ortskurve im Smith-Diagramm zeigst, erscheint dort ein schwarzes Kreuz und Du kannst rechts im Wobbeldiagramm die entsprechende Frequenz anhand der senkrechten roten Markierungslinie ablesen.

HINWEIS: Beachte dabei auch die sich synchron dazu ändernden Anzeigen im Tablett "Betriebsparameter" (36).



- Lass Dir das Smith-Diagramm in Z- oder in Y-Form anzeigen, indem Du die beiden Häkchen (23) entsprechend setzt. Fehlen beide Häkchen, so erscheint nur die Ortskurve des

Eingangsreflexionsfaktors RFE.

- Im obigen Bild erkennst Du bei 7,1MHz eine Leistungsübertragung (Transmission) V_p von -1,89dB, was einer Übertragungsdämpfung von 1,89dB entspricht, rechts daneben in Klammern steht der Wert 64,78%, d.h., nur dieser Teil der maximal verfügbaren Generator bzw. PA-Leistung wird im Abschlusswiderstand R_L in Nutzenergie umgesetzt.
- Wer sich mit S-Parametern ein wenig auskennt der sieht, dass wir es hier mit einem 50Ohm-System zu tun haben in welchem die Eingangsreflexion S_{11} (-15,35dB) der Rückflussdämpfung R_{Loss} (mit negativem Vorzeichen) und die Vorwärtstransmission $S_{21}=-1,89dB$ der Leistungsübertragung V_p entspricht.

Übung 2: Frequenzeingaben variieren

Das Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) besteht aus insgesamt sieben Textfeldern, in welche Du Namen, Anfangs- und Endfrequenz (MHz), Anzahl Messpunkte oder Schrittweite (KHz) und eine Hauptfrequenzmarke (MHz) eingibst. Außerdem ist Platz für einen mehrzeiligen Kommentar.

Name: 40m-Bandpass

F1 (MHz): 5 F2 (MHz): 10

Messpunkte: 500 SW (KHz): 10

Hauptmarke (MHz): 7,1

Notizen: CQDL 02/16; S. 18; Bild2; QL=200
-1,9dB

11 von 118

HINWEIS: Die Hauptmarke dient zur Orientierung, meist legt man sie in die Mitte eines Amateurfunkbands.

Bitte beachten:

- Dezimaltrenner ist immer das **Komma** (deutsche Tastatur einstellen!)
- Du kannst entweder die Anzahl der Messpunkte oder aber die Schrittweite (KHz) eingeben, das jeweils andere Feld wird (nach der Analyse) automatisch aktualisiert.
- Eine hohe Anzahl von Messpunkten ist z.B. beim Wobbeln steilflankiger Filter oder scharfer SWV-Verläufe erforderlich, sie kann aber bei umfangreicheren Schaltungen und langsamen PCs die Rechenzeit deutlich verlängern und die Reaktion der Anzeige auf Mausbewegungen im Wobbeldiagramm deutlich verlängern.

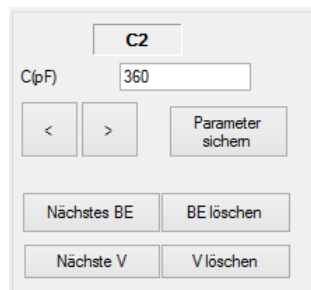
Änderungen rückgängig machen oder dauerhaft übernehmen

Die Auswirkungen der vorgenommenen Änderungen an den Frequenzeinstellungen siehst Du erst **nach** dem Klick auf **ANALYSE** !

Klicke den Button **... erneut von Datei laden** (2) und es erscheinen wieder die ursprünglichen Einstellungen. Sollen aber die Änderungen endgültig auf die Festplatte geschrieben werden, so klicke auf **... in Datei abspeichern** (1).

Übung 3: Elektrische Parameter editieren

- Klicke im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) auf **Nächstes BE**, um nacheinander alle Bauelemente der Schaltung zu durchwandern. Im darüber liegenden Textfeld erscheint der aktuelle Wert des ersten Parameters:



- Hat das Bauelement mehrere Parameter, wie in unserem Beispiel L1 und L2, die neben dem Wert in μH auch noch die Güte QL enthalten, so durchläuft man die Parameterliste mit den Buttons **<** und **>**.
- Um die Parameter eines bestimmten Bauelements sofort anzuzeigen, klicke im Designer mit der linken Maustaste in die Nähe des sensiblen Punkts im Zentrum des Bauelements. Das so markierte Bauelement erscheint rot umrandet.

Parameter ändern

- Verringere z.B. die Spulengüten L1 und L2 von 200 auf 60, indem Du zuerst auf das Bauelement klickst (blauer Punkt). Danach stellst Du mittels des Buttons **>** den Parameter QL ein und änderst dessen Wert.
- Die Eingaben beendest Du mit dem Button **Parameter sichern** oder mittels ENTER-Taste.
- Analysiere die Auswirkungen von Parameteränderungen auf V_p , SWR und RLoss!

Übung 4: Schaltung im Designer bearbeiten

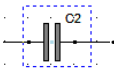
Diese Übung zeigt, wie Du im Designer (6) Änderungen am Schaltbild vornehmen kannst.


Schaltung, Bauelement oder Verbindung verschieben

- Eine komplette Schaltung (oder auch einen Teil davon) kannst Du verschieben, indem Du bei gedrückt gehaltener **rechter** Maustaste einen Rahmen um die Schaltung aufziehst.

Lasse dann die rechte Maustaste los und klicke mit der **linken** Maustaste in den Rahmen und verschiebe diesen bei gedrückt gehaltener Maustaste an seine neue Position.

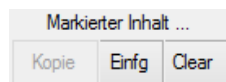
- Die gleiche Technik verwendest Du auch, um ein einzelnes Bauelement oder eine Verbindung zu verschieben. Probiere dies aus, indem Du z.B. C2 um ein Raster nach rechts

verschiebst .

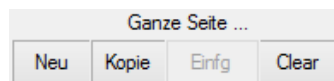
- Ziehe den Rahmen um C2 einmal mit und einmal ohne Einschluss der zwei Bauelemente-Pins und beobachte den Unterschied beim Verschieben!
- Dasselbe versuche beim Verschieben einer Verbindung, indem Du einen sehr kleinen Rahmen einmal nur um den Anfangs- oder nur um den Endpunkt  und ein anderes mal um beide Punkte aufziehst.

Schaltung, Schaltungsausschnitt oder Bauelement kopieren

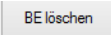
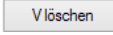

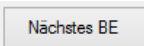
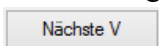
- Ziehe mittels **rechter** Maustaste einen Rahmen um die Induktivität L1, klicke unter "Markierter Inhalt..." auf den Button "Kopie" (7) und anschließend auf "Einfg" (8).



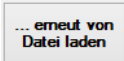
- Die kopierte Induktivität erscheint als L3 am linken Rand des Designers. Verschiebe L3 an die neue Position (mit rechter Maustaste einrahmen, mit linker Maustaste hineinklicken und ziehen).
- Um die komplette Schaltung auf eine neue Seite zu kopieren klicke unter "Ganze Seite..." den Button "Kopie" (11). Wähle nun den Button "Neu" (10) und schließlich "Einfg" (12).




Bauelement, Verbindung oder Schaltungsausschnitt löschen

- Lösche ein Bauelement, indem Du zunächst im Designer (6) mit der linken Maustaste auf dessen blauen sensiblen Punkt klickst, sodass das Bauelement rot umrandet erscheint. Anschließend klicke im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) auf den Button  oder nimm die Entf-Taste der PC-Tastatur.
- Lösche eine Verbindung, indem Du diese im Designer (6) mit der linken Maustaste anklickst, sodass sie rot markiert ist. Anschließend klicke im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) auf  oder nimm die Entf-Taste der PC-Tastatur.
- Löschen kannst Du auch, indem Du mittels rechter Maustaste einen Rahmen um eine Verbindung, ein Bauelement oder einen Schaltungsausschnitt aufziehst und dann im Bereich "Markierter Inhalt..." den Button  (9) klickst.
- Falls sich ein Bauelement oder eine Verbindung durch Anklicken nicht markieren lässt, so klicke den Button  oder  so lange, bis die Markierung zum

entsprechenden Bauelement bzw. zur Verbindung gewandert ist.

- Mach mit dem Button  (2) die Änderungen wieder rückgängig.

Übung 5: Editieren im Datengitter und Einstellungen ändern

Den kompletten Zugriff auf die aktuelle Schaltung und eine übersichtliche Auflistung aller Bauelementeparameter erhältst Du nach Öffnen des Service-Bereichs über den -Button (24). Die elektrischen und topologischen Parameter sind in drei Datengittern enthalten:

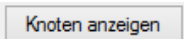
- Bauelementliste,
- Verbindungsliste,
- Parameterliste.

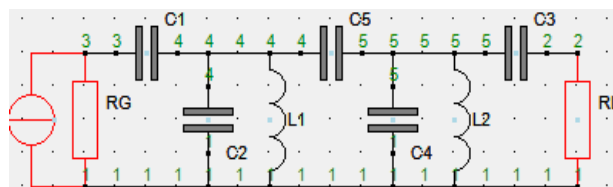
HINWEIS: Editieren kannst Du nur die Parameterliste!

Bauelementliste											
	Typ	Index	X0	Y0	Dir	SF	J	K	L	M	N
	C	1	240	80	E	1	3	4	-1	-1	-1
	C	2	280	120	S	1	4	1	-1	-1	-1
	L	1	320	120	S	1	4	1	-1	-1	-1
	C	3	480	80	E	1	5	2	-1	-1	-1
	RL	0	520	120	E	1	2	1	-1	-1	-1
▶	L	2	440	120	S	1	5	1	-1	-1	-1
	C	4	280	80	E	1	4	1	-1	-1	-1


Parameterliste			Verbindungsliste				
	PName	PValue		X1	Y1	X2	Y2
	L(μH)	1,16					
▶	QL	100					
*							

	X1	Y1	X2	Y2
▶	200	160	520	160
	500	80	520	80
	400	100	400	80

- Verändere den Wert des Parameters QL , indem Du in die Spalte *PValue* den neuen Wert einträgst und mit *Enter*-Taste bestätigst.
- Der Button  ermöglicht eine Kontrolle darüber, ob die integrierte Topologieanalyse zu einem regulären Netzwerk geführt hat (jeder Anschluss eines Bauelements muss eine eindeutige fortlaufende Knotennummer haben, sind mehrere Bauelementeanschlüsse miteinander verbunden, so bilden sie einen gemeinsamen Knoten). Diese Schaltung hat z.B. 5 Knoten:

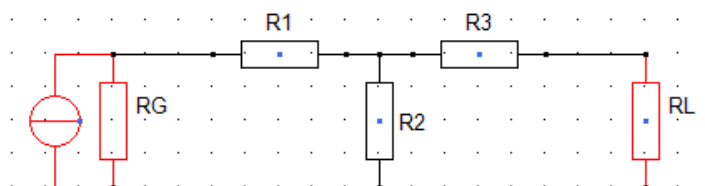


- Hier bietet sich auch die Möglichkeit, verschiedene Einstellungen vorzunehmen, z.B. die lästigen Hinweise (Hints) auszublenden, die immer dann erscheinen, wenn Du mit der Maus etwas länger auf ein bestimmtes Bedienelement des Hauptfensters zeigst. Auch kann man entscheiden, ob die Y- und/oder S-Parameter im Tablett "Betriebsparameter" (36) erscheinen sollen.

- Die Änderung der Anzeige von Raster- oder Klickpunkten oder der Markierung der Afu-Frequenzen wird erst dann sichtbar, nachdem Du auf die Oberfläche des Designers bzw. auf  geklickt hast.

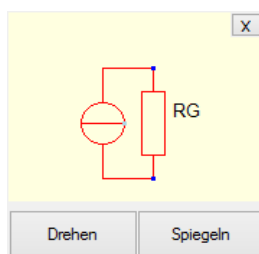
Übung 6: Entwurf einer eigenen Schaltung


Der Designer (6) bietet eine in 40 x 12 Rasterpunkte aufgeteilte Fläche, auf welcher Du die Schaltung ähnlich wie mit jedem anderen Zeichenprogramm entwerfen kannst. Das soll am Beispiel eines 3dB-Dämpfungsglieds demonstriert werden:



Schaltung zeichnen



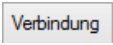
- Blättere mit dem Navigator (5) zu einer leeren Seite oder füge mit dem Button "Neu" (10) eine leere Seite ein.
- Trage im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) als Namen z.B. "3dB-Dämpfungsglied" ein. Die übrigen Felder mit den Frequenzangaben können auf ihren Standardwerten verbleiben.



- Klicke im Bauelemente-Menü auf den Button  (16), und das entsprechende Symbol wird Dir auf dem Tablett "Bauelemente-Erzeuger" serviert. Das Tablett "Bauelemente-Erzeuger" verdeckt jetzt das Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen"(22).
- Drehe und spiegele das Bauelement auf dem Tablett, um es in die gewünschte Lage zu bringen, später (nach Absetzen im Designer) gibt es diese Möglichkeit nicht mehr!

HINWEIS: Achte auch auf die veränderbare Position der **Beschriftung** des Bauelements!

- **Ziehe das Bauelement nicht direkt vom Tablett in den Designer, sondern klicke erst mit der linken Maustaste auf den Designer und ziehe dann das Bauelement (bei gedrückt gehaltener Maustaste) an seine endgültige Position.**
- Setze das Bauelement ab, indem Du die Maustaste wieder loslässt.

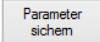
- Klicke im Bauelemente-Menü auf den Button  (17), und setze auf analoge Weise den Widerstand R1 im Designer ab. Wiederhole diese Prozedur mit R2 und R3.
- Klicke auf den Button  (16), um den Lastwiderstand RL hinzuzufügen.
- Klicke auf den Button  (15) und danach im Designer mit der linken Maustaste auf den Startpunkt der Verbindung (das untere Pin von RG).
- Bei gedrückt gehaltener **linker** Maustaste ziehe die Verbindung bis zum unteren Pin von RL.
- Stelle auf gleiche Weise die übrigen zwei Verbindungen her (zwischen oberem Pin von RG und dem linken Pin von R2, zwischen rechtem Pin von R2 und oberem Pin von RL).

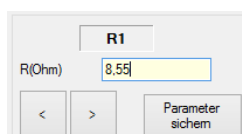
HINWEIS: Willst Du Drehrichtung oder Spiegelung eines Bauelements korrigieren, so must Du das Bauelement erst löschen und dann neu erzeugen und einfügen (siehe oben).

Auch schräge Verbindungen sind möglich. Allerdings ist dann das Anklicken bzw. Löschen etwas schwieriger als bei waagerechten oder senkrechten Verbindungen, es funktioniert nur in unmittelbarer Nähe von Anfangs- bzw. Endpunkt.

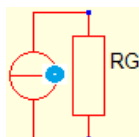
Wenn Du mit der linken Maustaste auf eine freie Stelle im Designer klickst wird die gesamte Schaltung neu aus dem Speicher aufgebaut (empfohlen als Ausweg aus "verfahrenen" Situationen).

Elektrische Parameter zuweisen

- Klicke mit der linken Maustaste in die Nähe des sensiblen (blauen) Punkts von R1. Ist das Bauelement markiert, so erscheint es rot umrandet.
- Im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) gib für „R(Ohm)“ den Wert 8,55 ein (Dezimaltrenner ist das **Komma!**). Bestätige die Eingabe durch Klick auf den Button  oder mit der ENTER-Taste der PC-Tastatur.




- Wiederhole die gleiche Prozedur für R2 und R3, denen Du die Ohm-Werte 141,93 und 8,55 zuweist.



- RG und RL haben standardmäßig bereits den Wert 50Ω , sodass Du hier nichts einzugeben brauchst.
Der sensitive Punkt von RG liegt nicht direkt auf RG, sondern auf dem inneren Rand des Stromquellen-Symbols!

Schaltung testen





Da die Schaltung unseres Beispiels nur ohm'sche Widerstände enthält, sind die Frequenzeingaben im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) ohne Bedeutung.



- Klicke auf den Button  (25) und betrachte das Smith-Diagramm (34). Der einzelne Punkt exakt im Zentrum bedeutet eine reelle Eingangsimpedanz von 50Ohm (Eingangsreflexionsfaktor $RF = 0$).
- Das Wobbeldiagramm (37) für V_p ist in zwei unterschiedlichen Auflösungen verfügbar: 0 ... -40dB (30) und 0...-4dB (29). Die 3dB-Linie markiert den Wert, bei dem nur noch die Hälfte der maximal verfügbaren Generatorleistung am Lastwiderstand RL umgesetzt wird.
- Betrachte das SWR-Diagramm (31). Ideal ist der Wert 1, d.h., keine reflektierte Welle am Eingang.
- Bewege die Maus (ohne zu klicken!) horizontal im Wobbeldiagramm, es erscheinen im Tablett "Betriebsparameter" (36) die zur angezeigten Frequenz gehörenden Parameter.

Übung 7: Zwei Diagramme vergleichen

Um die Auswirkungen von Parameteränderungen anschaulich darzustellen, kann man mit Hilfe des Messwertspeichers das aktuelle mit dem gespeicherten Diagramm überlagern.

Am Beispiel unseres 40m-Bandpasses wollen wir feststellen, wie sich die Übertragungseigenschaften ändern, wenn wir schlechtere Spulen einsetzen ($QL = 100$ anstatt $QL = 200$).

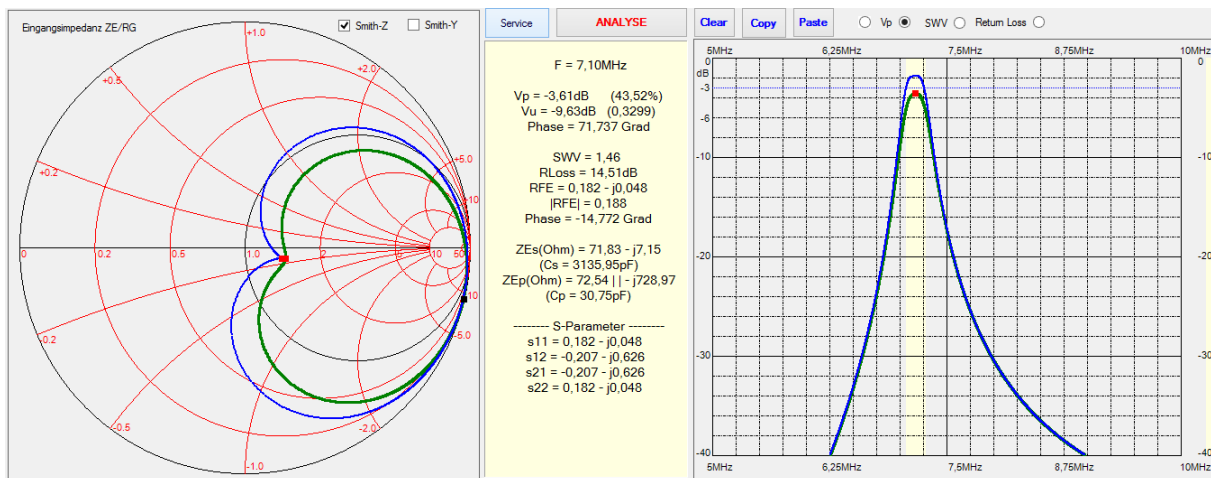
- Klicke den Button  (25) um die Wobbelkurve der Leistungsverstärkung V_p für $QL = 200$ anzuzeigen.
- Klicke den Button  (27) um die Kurve in die Zwischenablage zu kopieren.
- Klicke auf L1 und ändere die Spulengüte QL auf den Wert 100 (siehe Ü3). Gleiches wiederholst Du für L2.
- Klicke erneut den Button  .
- Mit Klick auf  (28) fügst Du die zwischengespeicherte Kurve hinzu.
- Zwecks Unterscheidung von der originalen Kurve (grün) ist die eingefügte Kurve blau.
- Der Vergleich beider Orts- und Wobbelkurven zeigt bei höherwertigen Spulen nur 1,89dB Durchgangsdämpfung (64,78% der maximal verfügbaren Generatorleistung werden in RL umgesetzt), während es sonst 3,61dB (43,52%) sind.
Der Einfluss der Spulengüte auf die Weitabselektion bleibt hingegen vernachlässigbar.

HINWEIS: Das Einfügen mittels  funktioniert nur **nach** dem Navigieren zu einer anderen Schaltung und deren anschließender  !

Du kannst durch Start mehrerer *HamVNAS*-Instanzen auch mehrere Programmfenster gleichzeitig öffnen und die Ergebnisse direkt vergleichen. Da alle Instanzen auf die gleiche Schaltungsbibliothek *CircuitsDB.dat* zugreifen,

sind die in einer beliebigen Programminstanz vorgenommenen Änderungen nach Klick auf den Button (2) auch in der anderen Programminstanz sichtbar.

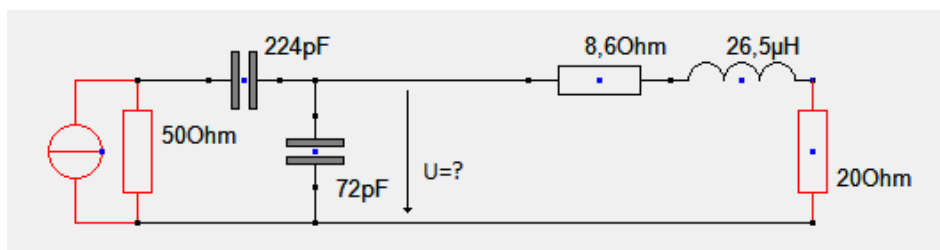
...erneut von
Datei laden



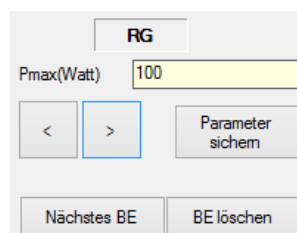
Übung 8: Spannungen messen

Obwohl *HamVNAS* auf direktem Weg nur die Betriebsparameter berechnet, lassen sich indirekt auch Spannungen bestimmen. Ermöglicht wird dies dadurch, dass dem Generatorwiderstand R_G ein zweiter Parameter zugewiesen werden kann: die maximale mögliche PA-Ausgangsleistung P_{max} .

Für folgende Schaltung soll z.B. bei 1,8MHz und 100W PA-Leistung die Spannung über der 72pF-Kapazität "gemessen" werden:



- Navigiere zu obiger Schaltung oder erstelle diese selbst.
- Klicke den sensiblen Punkt des Generatorwiderstands R_G . Dieser Punkt befindet sich immer auf dem inneren Halbkreis des Stromquellensymbols!
- Im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) trage für P_{max} eine Leistung von 100Watt ein und vergiss nicht zum Abschluss auf "Parameter sichern" zu klicken:

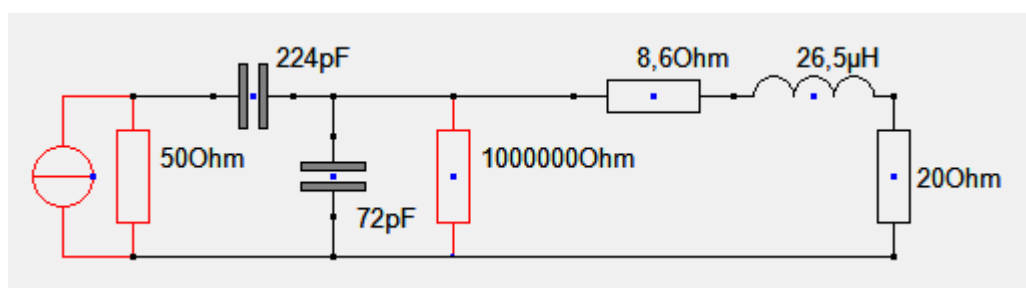


- Klicke den Button **ANALYSE** (25) und im unteren Teil des Tablett "Betriebsparameter" (36) ist

zu sehen, dass am 20Ohm-Lastwiderstand RL eine Effektivspannung von 35,54V (Effektivwert) anliegt, weiterhin werden die in RL umgesetzte Leistung und die Leerlaufspannung U_0 des Generators (PA) angezeigt:

$P_{out} = 63,14\text{Watt}$
 $U_0 = 141,42\text{V}$
 $U_{out} = 35,54\text{V}$

- Um die Spannung über der 72pF-Kapazität zu "messen" ist ein kleiner Umweg erforderlich: Weise dem Lastwiderstand RL vorübergehend einen sehr hochohmigen Wert zu, vergleichbar mit dem Innenwiderstand eines fiktiven "Voltmeters" (z.B. 1MOhm) und verschiebe RL an seine Messposition parallel zur 72pF-Kapazität.
- An die ehemalige Stelle von RL setze vorübergehend einen normalen ohm'schen Widerstand gleicher Größe:



- Klicke den Button **ANALYSE** und im Parameter-Tablett wird jetzt die Spannung $U_{out} = 534,67\text{V}$ angezeigt, die über der 72pF-Kapazität anliegt:

$P_{out} = 0,29\text{Watt}$
 $U_0 = 141,42\text{V}$
 $U_{out} = 534,67\text{V}$

- Nach Abschluss der "Messung" sind mit **... erneut von Datei laden** die vorgenommenen Änderungen an der Schaltung wieder rückgängig zu machen.

Weitere Beispiele zur Schaltungsanalyse

Im Folgenden möchte ich zwei interessante Anwendungsfälle diskutieren, die von *HamVNAS*-Nutzern an mich herangetragen wurden.

HamVNAS vs NanoVNA

Ein OM wies mich darauf hin, dass die von mir in der Zeitschrift CQ DL 3/2017 mit *HamVNAS* ermittelte Dämpfung 13,5dB/100m bei 10MHz für Lautsprecherkabel FL 2x0,75 nicht korrekt sei, die Dämpfung sei in Wahrheit das drei- bis vierfache höher, das Kabel demnach für Kurzwelle völlig unbrauchbar!

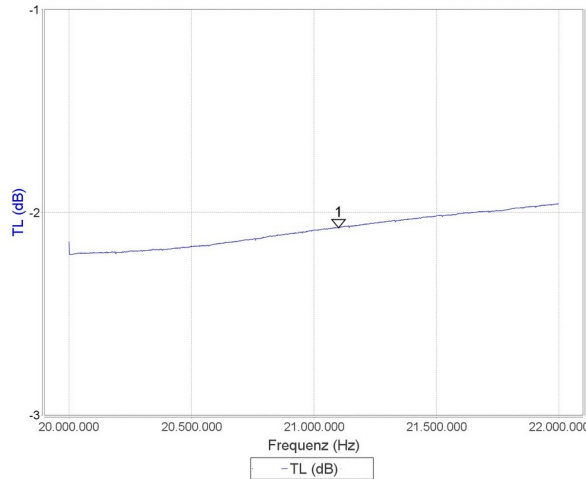
Der OM bezog sich auf Messungen der Transmission mit einem *NanoVNA*, Messobjekt war ein 3,3m langes Kabelstück.

Das vom OM beigefügte Protokoll belegte tatsächlich bei 21,1MHz eine Dämpfung von -2,08dB

anstatt der für das kurze Stück zu erwartenden nur -0,62dB:

1,46dB schlechter als erwartet, wo liegt der Fehler?

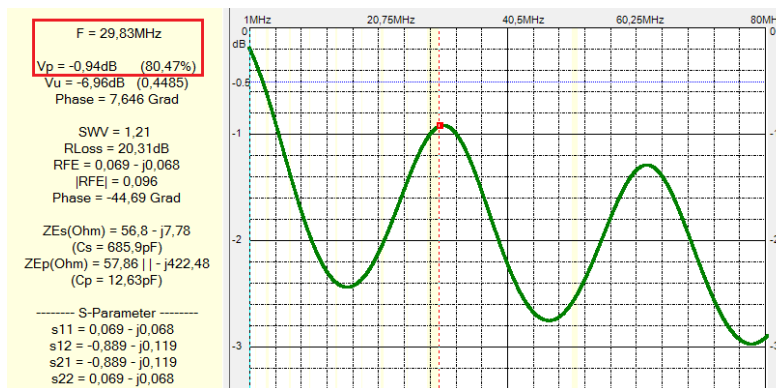
Ich habe die Messung mit meinem eigenen *NanoVNA-F* an einem Kabelstück gleicher Länge (3,3m) wiederholt.



Um die Grunddämpfung möglichst genau zu ermitteln, erfolgte aber die Messung nicht bei einer beliebigen Frequenz, sondern bei der ersten $\lambda/2$ -Resonanz (29,44MHz), als Resultat erhielt ich die Transmission TL (dB) = 0,94.

Nun habe ich die Messanordnung mit *HamVNAS* simuliert und (ebenfalls auf der $\lambda/2$ -Resonanz) den Parameter $a(\text{dB})/100\text{m}$ schrittweise solange variiert, bis sich etwa die gleiche Transmission wie beim *miniVNA* ergab ($v_p=0,94$).

Das Ergebnis $a = 13\text{dB}/100\text{m}$ bei 10MHz bestätigte den von mir propagierten Wert.



Zur Umrechnung auf die Frequenz 21,1MHz und eine Länge von 3,3m kann ich meinen [Kabelrechner](#) empfehlen:



Fazit:

Es handelte sich weder um einen Mess- noch Rechenfehler, sondern um einen Denkfehler des OMs, denn alle Transmissionsmessungen mit dem *NanoVNA* basieren auf dessen 50Ω-System und Messungen der Kabeldämpfung entsprechen deshalb nur für 50Ω-Kabel exakt der Grunddämpfung, wie sie z.B. für handelsübliche Kabel im Katalog ausgewiesen ist.

Das gemessene Lautsprecherkabel hat aber einen Wellenwiderstand von 102Ω, aufgrund dieser Fehlanpassung bilden sich stehende Wellen, die für die 1,46dB-Zusatzdämpfung verantwortlich sind.

Der *NanoVNA* ist deshalb für die direkte Ermittlung der Grunddämpfung von Bandkabeln völlig ungeeignet, da die SWV-bedingten Zusatzverluste das Resultat erheblich verfälschen.

Allerdings kann man das Ergebnis mit dem Programm *HamVNAS* iterativ korrigieren.

HINWEIS: Der *NanoVNA* bietet auch die Möglichkeit, die Kabelverluste anstatt einer Transmissions- auf Basis einer Reflexionsmessung zu ermitteln, was aber ebenfalls nur für 50Ω-Kabel zu brauchbaren Ergebnissen führt.

Transformator vs angezapfte Spule (HyEndFed-Antenne)

Die bekannte HyEndFed-Antenne ist nichts weiter als ein endgespeister horizontaler Halbwellenstrahler, dessen Resonanzwiderstand (ca. 2500Ω) mittels Trafo auf 50Ω heruntertransformiert wird. Wie ist dieser zu dimensionieren, damit eine möglichst verlustarme Anpassung im Bereich von 3...30MHz gewährleistet ist?

Im Unterschied zum Leitungstransformator lassen sich mit einem normalen Trafo beliebige Übersetzungsverhältnisse realisieren.

Je tiefer die niedrigste Arbeitsfrequenz, desto höher muss die Primärinduktivität sein.

Wicklungskapazität und Streuinduktivitäten beeinflussen die obere Grenzfrequenz erheblich, sodass die Bandbreite gegenüber einem Leitungstransformator deutlich eingeschränkt ist.

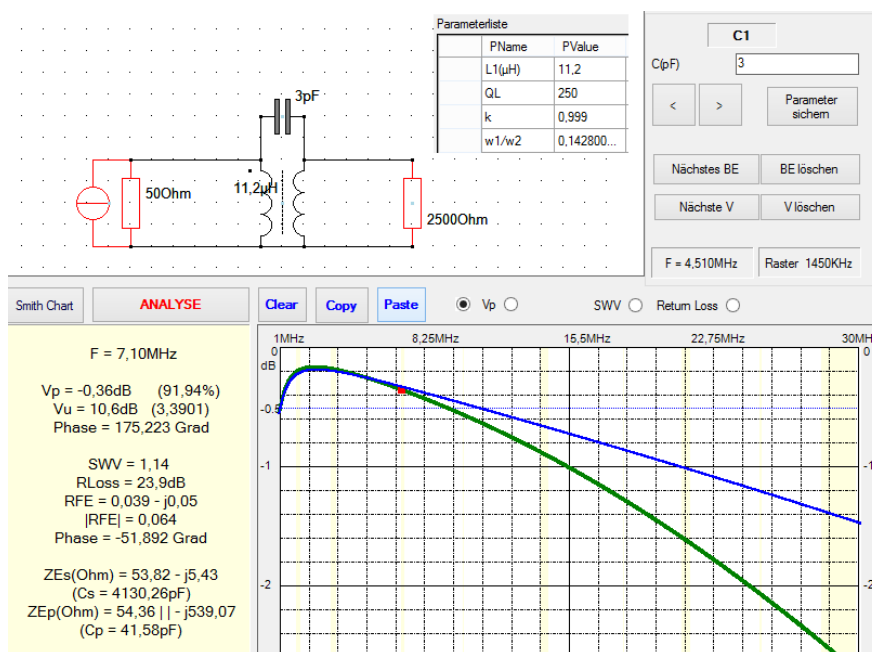
Die erforderliche Streuarmut, wie sie das Trafomodell von *HamVNAS* mit dem Koppelfaktor k nachbildet, erreicht man in der Praxis durch den Einsatz eines Ringkerns.

Das erforderliche Übersetzungsverhältnis:

$$w_1 : w_2 = \sqrt{\frac{R_G}{R_A}} = \sqrt{\frac{50}{2500}} = 1 : 7 = 0,1428$$

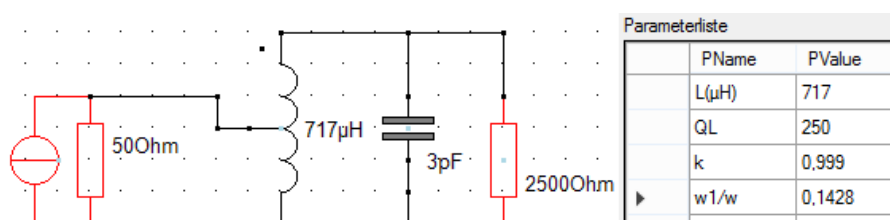
Nach /9/ gilt für die Mindestinduktivität der Primärwicklung für ein SWR < 1,1 :

$$L1[\mu\text{H}] \geq 1,59 * R_G[\Omega] / f_{\text{min}}[\text{MHz}] = 1,59 * 50 / 7,1 = 11,2\mu\text{H}$$



Das Bild zeigt die Simulation mit $QL=250$, $k=0,999$ und einer angenommenen Wicklungskapazität $C=3\text{pF}$ (die blaue Kurve aus der Zwischenablage gilt für $C=1\text{pF}$):

Alternativ lässt sich der Trafo auch als Spartrafo realisieren, der nichts weiter als eine angezapfte Spule ist:



Wie die Simulation bestätigt, ist das Übertragungsverhalten identisch zum normalen Trafo.

Fazit:

Durch „Spielen“ mit den Parametern von Primärinduktivität, Güte des Kerns, Wicklungskapazität und Streuverlusten lässt sich die beste Kompromisslösung für den Anpassungstrafo finden. Grundsätzlich sollten Ringkerne hoher Güte eingesetzt werden und Anfang und Ende einer Wicklung so weit wie möglich voneinander entfernt liegen.

Teil 2: Synthese und Verlustanalyse von Antennenanpassungen

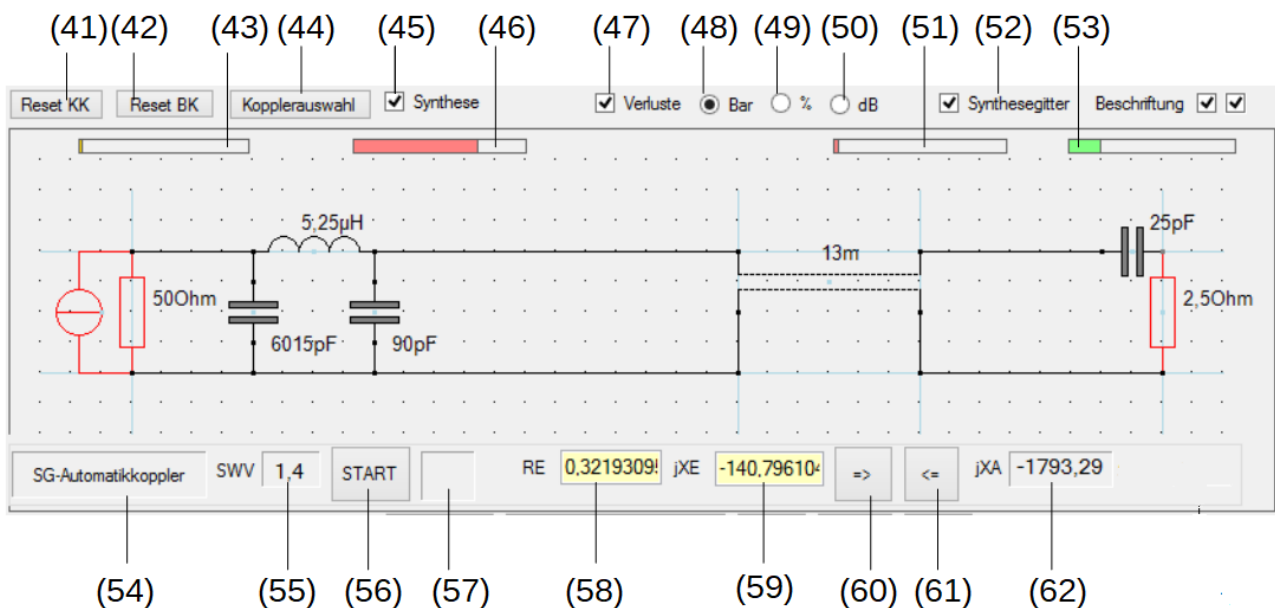
Im Unterschied zur Schaltungs-Analyse, die mit beliebig angeordneten Schaltelementen funktioniert, beschränken sich Synthese und Verlustanalyse auf Schaltungen, deren Struktur gewissen zusätzlichen Regeln unterliegt (Schaltung muss in das Synthesegitter passen, s.u.).

HINWEIS: Auch im Synthesemodus sind parallel alle Analysefunktionen verfügbar. Da aber das Breitbandverhalten wegen des festen Antennen-Ersatzschaltbilds nur ungenau simuliert werden kann, sollte insbesondere bei schmalbandigen Antennen der Wobbelbereich mit F1 und F2 stark eingeeengt werden³.

Um eigene Antennenanpassungen zu berechnen und in der Praxis zu überprüfen solltest Du über einen Antennenanalysator verfügen, der nicht nur das SWV anzeigt, sondern der neben dem Realteil der Impedanz auch noch den Blindanteil vorzeichenrichtig(!) messen kann (zum Beispiel AA-54 von *Rig Expert* oder *NanoVNA*).

Bedienoberfläche

Die Abbildung zeigt alle für den Synthese und Verlustanalyse relevanten Bedienelemente, wie sie oberhalb des Designers sichtbar sind bzw. in der Syntheseleiste (am unteren Rand) bedarfsweise eingblendet werden können:



Erläuterung der Synthese-Bedienelemente

Nr	Bedienelement	Bedeutung
41	Button "Reset KK"	... löscht den Designer und erzeugt eine Grundschiung zur Antennenanpassung unter Verwendung von Koaxkabel. Den Typ des Koaxkabels must Du vorher im Formular "Einstellungen zur Antennenanpassung" (44) einstellen.

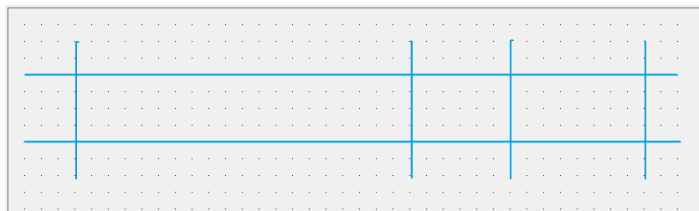
³ Für Wobbeldiagramme von Antennenanpassungen und auch für andere Aufgaben (z.B. direkte Spannungsmessungen) ist das Programm "Kleiner Netzwerkanalysator" besser geeignet (siehe dl1jwd.darc.de).

42	Button "Reset BK"	... löscht den Designer und erzeugt eine Grundschialtung zur Antennenanpassung unter Verwendung von Bandkabel. Den Typ des Bandkabels musst Du vorher im Formular "Einstellungen zur Antennenanpassung" (44) einstellen.
43	Balkendiagramm "Anpassungsverluste"	... der orangene Balken zeigt die Verluste, wie sie durch Fehlanpassung des Generators (der PA) an die Eingangsimpedanz des Kopplers entstehen.
44	Button "Kopplerauswahl"	... öffnet das Formular "Einstellungen zur Antennenanpassung", in welchem Du den Typ der Anpassung und das zu verwendende Kabel festlegst.
45	Kontrollbox "Synthese"	... blendet die Syntheseleiste am unteren Rand des Designers ein und ermöglicht damit das vollautomatische Erzeugen des Antennen-Ersatzschaltbilds und der Anpass-Schaltung.
46	Balkendiagramm "Verluste im Koppler"	... der rote Balken zeigt die Verluste, wie sie in der Anpass-Schaltung (der Bereich zwischen Generatorausgang und Eingang des Speisekabels) auftreten.
47	Kontrollbox "Verluste"	... berechnet die einzelnen Verlustanteile sowie die am Lastwiderstand umgesetzte Leistung (Transmission) und zeigt diese als Balkendiagramm, in Prozenten oder in dB an (alles bezogen auf die maximal verfügbare Generator- bzw. PA-Leistung).
48	Optionsknopf "Bar"	... aktiviert die Verlustanzeige als Balkendiagramme.
49	Optionsknopf "%"	... aktiviert die Verlustanzeige in Prozenten.
50	Optionsknopf "dB"	... aktiviert die Verlustanzeige in Dezibel(dB).
51	Balkendiagramm "Verluste im Kabel" der rote Balken zeigt die Verluste, wie sie zwischen Eingang des Speisekabels und Antenne auftreten.
52	Kontrollbox "Synthesegitter"	... blendet das Synthesegitter ein oder aus. Dieses Gitter dient der Orientierung über die exakte Platzierung von RG, RL und Speisekabel im Synthesemodus.
53	Balkendiagramm "Abgegebene Nutzleistung"	... der grüne Balken zeigt das Verhältnis von in RL abgegebener zu maximal verfügbarer Generator- bzw. PA-Leistung (Transmission).
54	Anzeigefeld "Aktuelle Kopplerschaltung"	... zeigt den im Formular "Einstellungen zur Antennenanpassung" festgelegten Typ der Anpass-Schaltung.
55	Anzeigefeld "SWV"	... zeigt nach Klick auf "ANALYSE"-Button (25) das Stehwellenverhältnis zwischen RG und Koppler an.
56	Button "START"	... startet das automatische Erzeugen der Anpass-Schaltung (bei mehreren Varianten muss mehrmals hintereinander geklickt werden).
57	Anzeigefeld "Variante"	... zeigt die Nummer der Variante, wenn Anpass-Schaltungen mehrere Varianten ermöglichen.
58	Editierfeld "RE"	... für Eingabe / Anzeige des Realteils der Eingangsimpedanz des Speisekabels (Ohm).
59	Editierfeld "jXE"	... für Eingabe / Anzeige des Blindanteils der Eingangsimpedanz des Speisekabels (Ohm).
60	Button "Vorwärts"	... startet Berechnung und Neuzeichnen des Antennen-Ersatzschaltbildes auf Basis von RE und XE sowie der Kabelparameter.
61	Button "Rückwärts"	... startet Berechnung von RE und XE auf Basis des Antennen-Ersatzschaltbilds sowie der Kabelparameter.
62	Anzeigefeld "jXA"	... zeigt den Blindanteil der Antennen-Fußpunktimpedanz (Ohm).

Synthesegitter

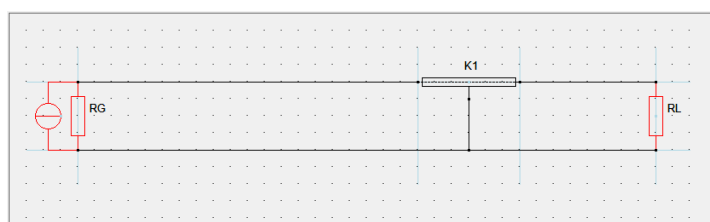
Im Unterschied zur normalen Schaltungsanalyse bzw. -simulation mit *HamVNAS* müssen für Synthese und Verlustanalyse die Schaltelemente im Designer in einem vorgegebenem „Synthesegitter“ positioniert werden, anderenfalls erscheint eine Fehlermeldung.

Die blauen Linien markieren die Lage von Generator-, Lastwiderstand und Speisekabel:

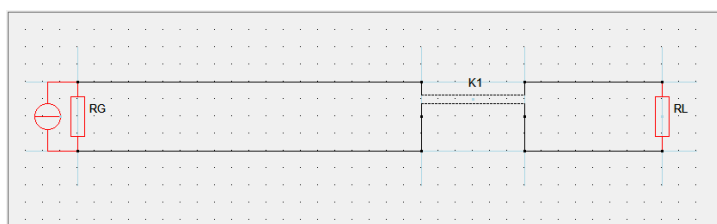


HINWEIS: Das Synthesegitter kannst Du mit Synthesegitter (52) ein- und ausblenden.

Mit Klick auf den Button **Reset KK** (41) kannst Du nun eine in das Synthesegitter passende Basisschaltung unter Verwendung von Koaxkabel automatisch erzeugen:



Soll es eine symmetrische Leitung sein, so erzeuge die entsprechende Basisschaltung mit dem Button **Reset BK** (42):



Einstellungen zur Antennenanpassung

Mit **Kopplerauswahl** (44) öffnest Du das Formular "Einstellungen zur Antennenanpassung", in welchem Du zunächst den für die Speiseleitung verwendeten Koax- oder Bandkabeltyp markierst.

HINWEIS: Bei allen in den Datengittern eingetragenen Kabeltypen bezieht sich der Parameter **dB** auf die Grunddämpfung pro **100m** bei der Frequenz **10MHz!**

(1) Koaxkabel					
	Typ	Zw	VF	dB	Comment
	RG 58	50	0,66	5	
▶	RG 213	50	0,66	2,2	
	Aircorn Plus	50	0,85	1,9	
	Aircorn 10	50	0,87	1,2	
	Aircell 5	50	0,82	2,95	Abmessungen wie RG58
	RG-316U	50	0,7	8,5	AD = 2,5mm!, zur Bewicklung von Ringkernen für Strombal
*					

(2) Bandkabel					
	Typ	Zw	VF	dB	Comment
	Ltspr.-Kabel einfach	102	0,68	13	FL 2 x 0,75, gemessen nach Methode von DL1JWD
	Ltspr.-Kabel doppelt	58	0,67	17,5	2xFL 2 x 0,75, gemessen nach Methode von DL1JW
	Bogner-Kabel	290	0,8	1,08	gemessen nach Methode von DL4AAE
	Wireman CQ552 flex	285	0,813	1,09	gemessen nach Methode von DL4AAE
▶	Wireman CQ553 flex	392	0,891	0,74	gemessen nach Methode von DL4AAE
	Hühnerleiter	600	0,95	0,01	nach DG0SA
*					

Im Datengitter „Typ der Anpass-Schaltung“ legst Du die Schaltung bzw. den Kopplertyp fest, mit welcher Du den PA-Ausgang an den Eingang der Speiseleitung anpassen willst:

Einstellungen zur Antennenanpassung

Typ der Anpass-Schaltung			
Nr	Name	Comment	
▶ 0	Kein Koppler ausgewählt	ohne Anpassung	
1	LC-Halbglied	maximal 4 mögliche Varianten	
2	Collinsfilter	Peuker-Formeln	
3	Handabgestimmte T-Koppler	siehe Liste rechts	
4	CF-Automatikkoppler	siehe Liste rechts	
5	HG-Automatikkoppler	siehe Liste rechts	
6	Transf.-u. Stichtg. m. Koaxkabel	siehe Liste unten	
7	Transf.-u. Stichtg. m. Bandkabel	siehe Liste unten	

Koaxkabel					
Typ	Zw	VF	dB	Comment	
▶ RG58	50	0,66	5		
RG213	50	0,66	2,2		
Airborne 10	50	0,87	1,2	Kabel-Kusch	
Aircorn Plus	50	0,85	1,9	WiMo	
*					

Bandkabel					
Typ	Zw	VF	dB	Comment	
Bogner	300	0,8	2		
▶ Wireman	392	0,89	1,07	CQ553 flex, gem	
Twincom	250	0,85	0,3		
Ltspr. Kabel	102	0,68	13	einfach	
Ltspr. Kabel	58	0,67	17,5	doppelt	
*					

Handabgestimmte T-Koppler											
Typ	QL	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
▶ MFJ-941E	100	32	20	15,65	12,27	9,14	6,44	4,1	3,1	2,15	1,1
MFJ-971	100	0,7	0,8	1	1,5	2	2,5	4	5,5	7,5	9
*											

CF-Automatikkoppler									
Typ	QL	C1min	dC1	C1max	dL	Lmax	C2min	dC2	
▶ SG-230	250	15	100	6320	0,25	64	15	25	
*									

HG-Automatikkoppler								
Typ	QL	C1min	C2min	dC	Cmax	dL	Lmax	Com
▶ LDG11MP	200	15	15	15	1920	0,1	12,8	
MFJ-993B	200	15	15	15,5	3922,5	0,084	25,87	
*								

Markiere links den Grundtyp der Anpass-Schaltung und das dabei evtl. zu verwendende Koax- bzw. Bandkabel. Füge bei Bedarf weitere Kabeltypen und Kopplerspezifikationen hinzu.

Alle dB-Angaben der Kabeldämpfung beziehen sich auf dB/100m bei 10MHz!

Folgende Grundtypen sind in der momentanen Ausbaustufe von *HamVNAS* verfügbar:

- LC-Halbglied (Berechnung mit **verlustfreien** Bauelementen)
- Collinsfilter (Berechnung mit **verlustfreien** Bauelementen)
- Handabgestimmter T-Koppler (z.B. MFJ-941E, MFJ-971)

- CF-Automatikkoppler mit Pi-Glied bzw. Collinsfilter (z.B. SG-230)
- HG-Automatikkoppler mit L-Halbglied bzw. "unechtes Collinsfilter (z.B. LDG11MP , MFJ993)
- Transformations- und Stichleitung mit Koaxkabel
- Transformations- und Stichleitung mit Bandkabel

HINWEIS: Außer den ersten beiden Schaltungstypen (LC-Halbglied, Collinsfilter), deren Berechnung auf idealisierten, verlustfreien Bauelementen beruht, werden bei allen anderen die Verluste in den Induktivitäten (QL) berücksichtigt! Du kannst eigene Kopplertypen mit anderen L- und C-Abstufungen, Anfangs- und Endkapazitäten sowie Spulengüten hinzufügen.

Übungsbeispiele

Jede Schaltungs-Synthese oder Verlustanalyse läuft nach dem gleichen Muster ab. Die folgenden Übungsbeispiele stehen deshalb exemplarisch für alle weiteren Referenzbeispiele, die in der mitgelieferten Schaltungsbibliothek *CircuitsDB.dat* zu finden sind.

Übung 9: Durchführung einer Schaltungssynthese

In diesem einführenden Beispiel spielen Länge und Typ des Speisekabels sowie die konkrete Antenne keine Rolle. Alles was Du wissen musst ist die Impedanz am Eingang des Speisekabels $Z_E(\Omega) = 1,35 + j12,6$, die Du vorher mit Deinem VNA bei **3,65MHz** gemessen hast.

Für die Anpassung zwischen PA-Ausgang und Eingang des Speisekabels stehen Dir alle acht Schaltungstypen zur Verfügung, wie sie im Formular „Einstellungen zur Antennenanpassung“ aufgelistet sind. Wir entscheiden uns für den Typ **LC-Halbglied**.

Synthese vorbereiten

- Erzeuge im Designer mit Klick auf (10) eine leere Seite oder navigiere zu einer leeren Seite.
- Blende das Synthesegitter ein.
- Gebe im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) die Hauptfrequenzmarke 3,65MHz ein.
- Klicke auf (44) um das Formular „Einstellungen zur Antennenanpassung“ zu öffnen und markiere links oben das **LC-Halbglied** (um zu markieren klicke auf die äußerste linke Spalte):

Typ der Anpass-Schaltung			
	Nr	Name	Comment
	0	Kein Koppler ausgewählt	ohne Anpassung
▶	1	LC-Halbglied	maximal 4 mögliche Varianten
	2	Collinsfilter	Peucker-Formeln
	3	Handabgestimmter MFJ-Koppler	siehe Liste rechts
	4	CF-Automatikkoppler	siehe Liste rechts
	5	HG-Automatikkoppler	siehe Liste rechts
	6	Transf.- u. Stichtg. m. Koaxkabel	siehe Liste unten
	7	Transf.-u. Stichtg. m. Bandkabel	siehe Liste unten

- Speichere die Einstellungen beim Schließen des Formulars:

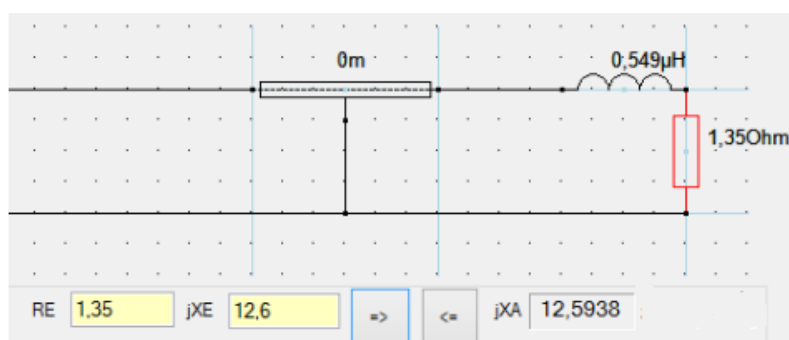


Anpass-Glied einfügen

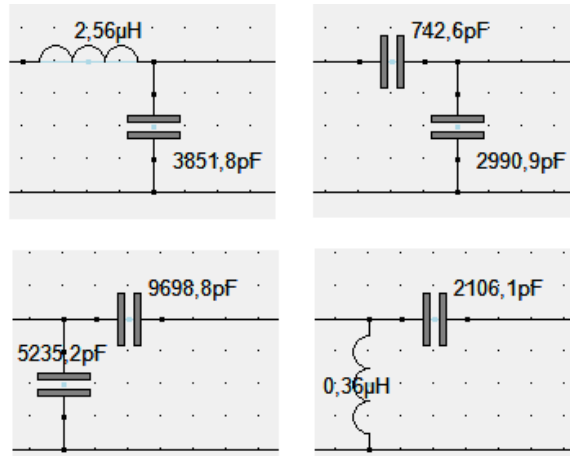
- Klicke auf (41). Das Speisekabel bleibt bei der Länge 0m und entspricht somit einer durchgehenden Verbindung zur Antenne (es ist quasi überbrückt also nicht vorhanden).
- Setzen das Häkchen **Synthese** (45), damit am unteren Rand des Designers die Syntheseleiste (die Leiste für die Bedienelemente des Synthese-Modus) erscheint.
- Trage in die Felder (58) und (59) der Syntheseleiste die mit dem VNA gemessene Eingangsimpedanz ZE(Ohm) des Speisekabels ein.

RE jXE

- Klickst Du den Button (60), so erscheint rechts das Ersatzschaltbild für $RA+jXA$:



- Wenn Du nun in der Syntheseleiste wiederholt den Button (56) klickst, so erscheinen nacheinander alle vier mögliche Varianten von LC-Halbgliedern, mit denen eine Anpassung prinzipiell möglich wäre:

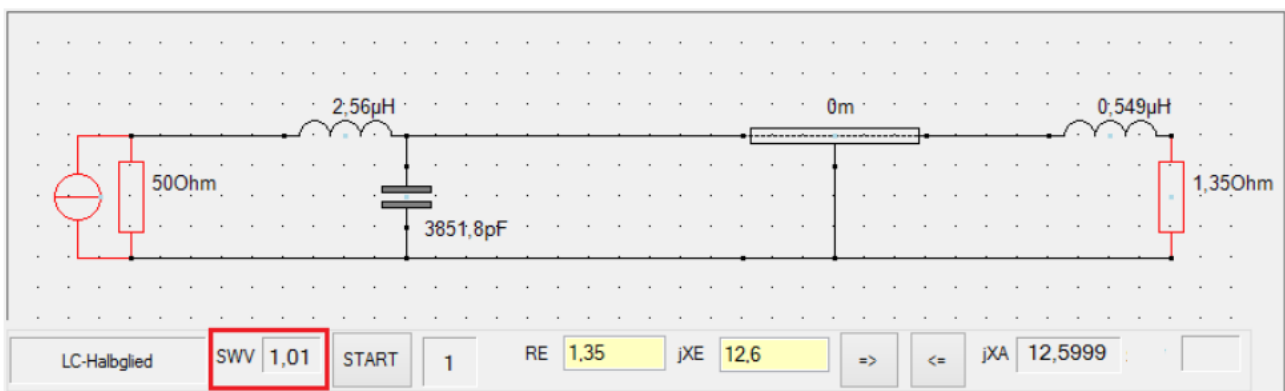


- Obwohl alle Varianten nahezu gleichwertig sind, entscheiden wir uns für die Variante 1 (oben links), da es sich um die gebräuchlichste Grundschaltung handelt.

HINWEIS: Nicht für alle Anpass-Situationen mit LC-Halbgliedern gibt es, wie in diesem Beispiel, vier Lösungen, oftmals sind es nur zwei. Bei extremen Transformationsverhältnissen gibt es mitunter überhaupt keine Lösung.

Anpassung analysieren

- Klicke auf die Induktivität des LC-Halbglieds und weise im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) der Spulengüte QL den realistischen Wert 100 zu, danach den Klick auf nicht vergessen!
- Nach Klick auf (25) werden im Tablett "Betriebsparameter" (36) die Analyseergebnisse angezeigt.
- Das eingangsseitige SWV ist dann zusätzlich auch in der Syntheseleiste sichtbar:



Übung 10: Durchführung einer Verlustanalyse

Das im Vorgängerbeispiel erzielte $SWV = 1,01$ ist noch lange kein Grund um sich zufrieden zurückzulehnen, denn die Anpassung erfolgte an das „Gesamtpaket“ aus Speisekabel und Antenne. Wie viel Sendeenergie letztendlich in der Antenne ankommt und wie viel unterwegs im Speisekabel verlorengegangen ist wollen wir im Folgenden erkunden.


Die Speiseleitung soll aus **15m** Koaxkabel des Typs **RG213** bestehen.

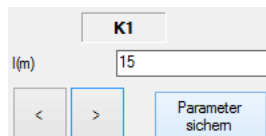
Antennen-Ersatzschaltbild generieren

- Klicke auf (44) um dem Speisekabel den Typ RG213 zuzuweisen:

(1) Koaxkabel					
	Typ	Zw	VF	dB	Comment
	RG 58	50	0,66	5	gilt für alle Kabel: db = Dämpfung pro 100m bei 10MHz!
▶	RG 213	50	0,66	2,2	
	Aircom Plus	50	0,85	1,9	

- Klicke .

- Klicke im Designer (6) auf das Kabelsymbol  und trage im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) die Länge 15m ein und vergiss nicht das Sichern dieses Parameters:



Parameter-Tablett für Kabel **K1**. Eingabefeld für Länge $l(m)$ enthält den Wert 15. Ein Button "Parameter sichern" ist ebenfalls sichtbar.

- Klicke den Button (60) um das Antennenersatzschaltbild für die Frequenz 3,65MHz zu generieren.
- Klicke den Button (61) um das Antennenersatzschaltbild wieder zurück in die Eingangsimpedanz ZE zu transformieren.
- Zur Kontrolle klicke mehrfach hintereinander die Buttons (61) und (62), die in den Feldern (58) und (59) angezeigte Eingangsimpedanz wird sich dabei nur geringfügig ändern, was an den Rundungsfehlern liegt, die trotz doppelt genauer Gleitkomma-Arithmetik nicht zu vermeiden sind.

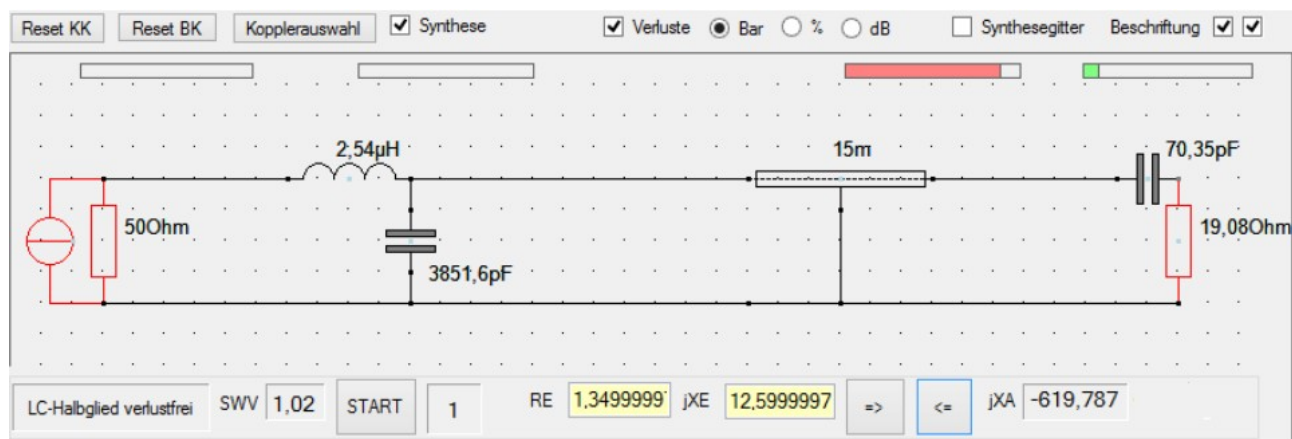


Zustand der Eingangsparameter nach mehreren Klicks auf die Transformationsbuttons:

RE	1,3499999	jXE	12,5999997	=>	<=	jXA	-619,787
----	-----------	-----	------------	----	----	-----	----------

Verlustanalyse auswerten

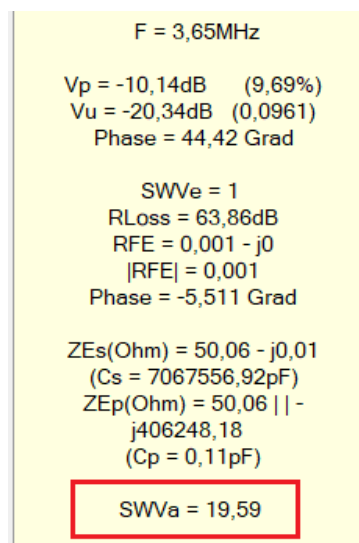
- Starte mit Klick auf Verluste (47) die Verlustanalyse.



- Die ersten drei kleinen Balkendiagramme ((43), (46), (51)) am oberen Rand des Designers zeigen von links nach rechts
 - die Verluste durch Fehlanpassung (entstehen durch $SWV > 1$),
 - die Verluste in der Anpass-Schaltung (entstehen durch die endliche Spulengüte),
 - die Verluste im Speisekabel setzen sich zusammen aus Grunddämpfung und SWV-bedingter Zusatzdämpfung.
- Der grüne Balken (53) ganz rechts zeigt die im Strahlungswiderstand der Antenne umgesetzte Leistung (Transmission bzw. Wirkungsgrad).
- Mit den Schaltknöpfen (48), (49) und (50) kannst Du zwischen der Darstellung als Balkendiagramm, der Angabe in Prozent und in dB wechseln.

SWR-bedingte Verluste durch Fehlanpassung	Verluste zwischen PA-Ausgang und Eingang des Speisekabels	Verluste im Speisekabel bis zum Antenneneingang	In der Antenne umgesetzte Leistung
0%	0.2%	90.1%	9.7%
0dB	0.01dB	10.13dB	10.14dB

- Das Ergebnis ist eine Enttäuschung, denn trotz idealem eingangsseitigen $SWV_e = 1$ kommen nur 9,69% der maximal verfügbaren PA-Leistung hinten an.
- Satt 89,2% (10,12dB) gehen im nur 15m langen RG-213 verloren, obwohl dessen Grunddämpfung bei 3,65MHz lediglich ca. 0,2dB beträgt. Schuld daran sind die extremen SWV-bedingten Zusatzverluste von ca. 90%, die sich aus dem hohen antennenseitigen $SWV_a = 19,59$ ergeben:



Fazit: Auch relativ hochwertiges Kabel ist kein Garant für niedrige Verluste /10/!

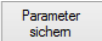



Übung 11: Verlustanalyse bei Anpassung eines verkürzten Vertikalstrahlers

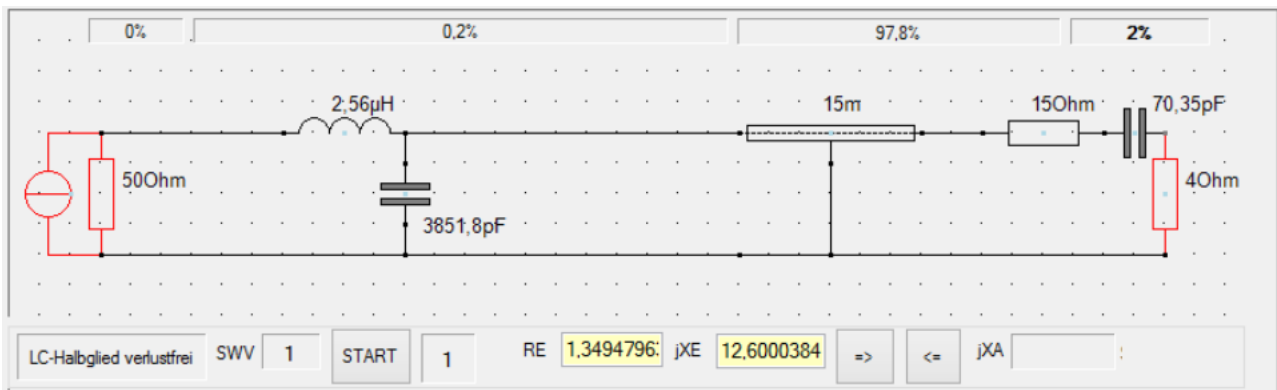
Als Vorbild der Vorgängerübungen diente ein 8m hohen Vertikalstrahler, der auf das 80m-Band angepasst wurde.

Weil sich aber hier der Lastwiderstand $R_L=19\Omega$ aus der Summe von Erdverlustwiderstand R_v und Strahlungswiderstand R_s zusammensetzt, kann der sehr schlechte Wirkungsgrad von 9,7% leider nur noch schlechter werden.

In der vorhergehenden Übung hatten wir ermittelt, dass der Ausgang des Speisekabels eine Impedanz $Z_A(\Omega) \sim 19 - j620$ „sieht“.

Gehen wir von $R_s = 4\Omega$ aus, so gilt $R_v = 15\Omega$ (kann je nach Anzahl der Radials auch abweichen).

- Klicke auf R_L und korrigiere im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) Parameter R auf den Wert 4Ω und vergiss nicht .
- Klicke auf die Verbindung zwischen Ende des Speisekabels und Antennenkapazität und lösche sie.
- Klicke den Button  (17) und füge einen ohm'schen Widerstand R ein, dem Du im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) den Wert 15Ω zuweist.
- Klicke den Button  (15) und verbinde den Widerstand R1 mit dem Ausgang des Speisekabels.
- Klicke  (1) um die Schaltung dauerhaft zu sichern.



- Klicke **ANALYSE** (25) und anschließend % (49) um Verluste und Transmission in Prozenten anzuzeigen.
Der Wert 97,8% bezieht sich jetzt auf die Summe der Verluste im Speisekabel **und** im 15Ohm-Erdwiderstand:

HINWEIS: Bitte **nicht** den Button **=>** (60) klicken, da dann das Antennen-Ersatzschaltbild mit $RL = 19\Omega$ erzeugt wird!

Fazit:

Trotz des idealen $SWV = 1,0$ ist auch diese Antennenanlage unbrauchbar, denn nur 2% der maximal verfügbaren PA-Leistung (das sind ca. 3 S-Stufen Einbuße gegenüber 100%) gelangen zur Abstrahlung, der Rest geht im Kabel (90,2%) und im Erdwiderstand (7,6%) verloren. Hingegen sind die Verluste in der Anpass-Schaltung vernachlässigbar (0,2%).

Übung 12: Anpassung eines endgespeisten Dipols mittels T-Koppler

In diesem Beispiel geht es um die Anpassung eines endgespeisten Halbwellenstrahlers (3-Band-HyEndFed) an das 40m-Band. Die Resonanz der Antenne ist hier so schmal, dass ein Antennenkoppler zum Einsatz kommen muss.

Am Eingang des nur **3,5m** langen **RG-58**-Speisekabels misst Du mit einem Antennenanalysator bei $F = 7,1\text{MHz}$ die Eingangsimpedanz $ZE(\text{Ohm}) = 39,8 - j4,8$, die es an 50Ω anzupassen gilt.

- Öffne im Designer mit Klick auf **Neu** (10) eine leere Seite oder navigiere zu einer leeren Seite und nimm im Tablett "Allgemeine Eingaben" (3) die erforderlichen Einträge vor:
- Klicke auf **Kopplerauswahl** (44), um das Formular „Einstellungen zur Antennenanpassung“ zu öffnen und wähle in der Liste links oben den Schaltungstyp "Handabgestimmte T-Koppler" und darunter den Kabeltyp „RG-58“.
- Markiere rechts in der Liste für "Handabgestimmte T-Koppler" den Typ "MFJ-941E". Im Datengitter sind bereits die Werte der 12 schaltbaren Induktivitäten eingetragen.

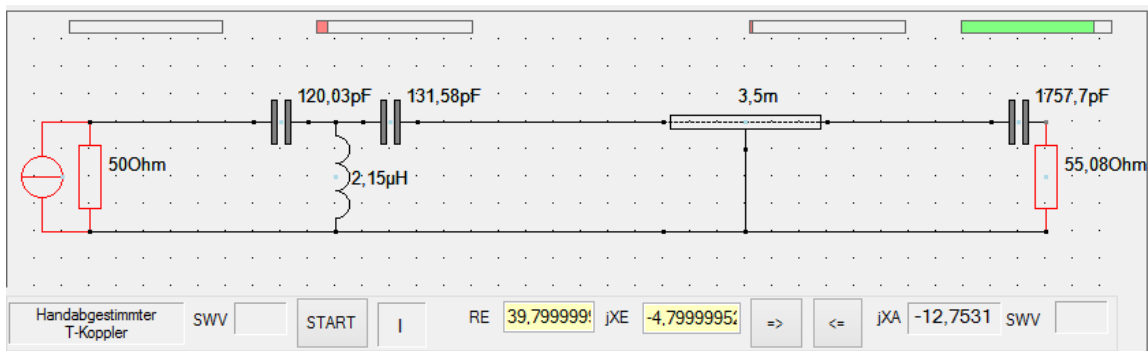
- Klicke auf **Speichern und schließen**.
- Nun lasse Dir mit **Reset KK** (42) eine synthesesgerechte Basiskonfiguration erzeugen ...

- ... klicke auf das Kabel und weise ihm im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) die Länge 1,5m zu.
- Setze das Häkchen **Synthese** (45) und trage in die Felder (58) und (59) der Syntheseleiste die Eingangsimpedanz $Z_E(\text{Ohm}) = 39,8 - j4,8$ des Speisekabels ein.
- Per Klick auf (60) generiere das Antennen-Ersatzschaltbild und kontrolliere anschließend mit (61) die Rücktransformation.
- Wenn Du jetzt wiederholt (56) klickst, erscheinen nacheinander alle möglichen Einstellungen des MFJ-941E, mit denen sich ein SWV von 1,0 erzielen lässt.
- Da beide Drehkos nur den Bereich von etwa 12pF bis 208pF überstreichen, musst Du alle außerhalb dieses Bereichs angebotenen Varianten ignorieren. Entscheide Dich aus gutem Grund für die Variante mit der kleinsten Induktivität (Schalterstellung I).

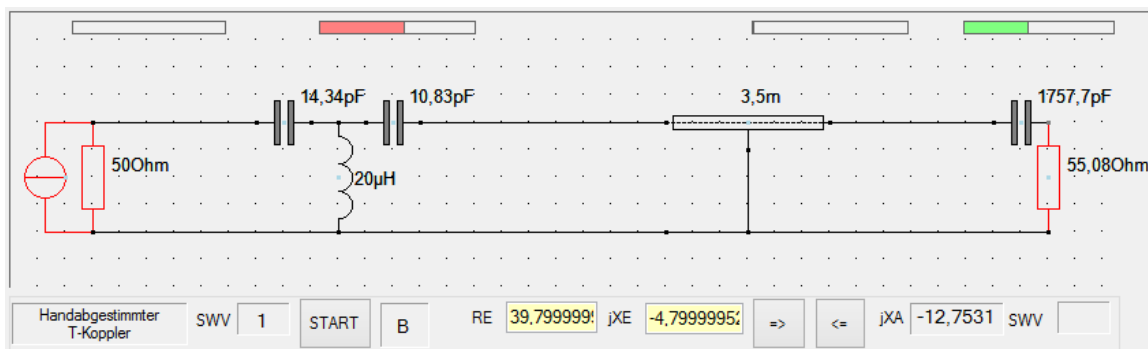
HINWEIS: Das Programm berechnet für jeden Anpassung die exakten Werte der Schaltelemente unter Einbeziehung der Spulenleerlaufgüte QL!

- Nun analysiere die verschiedenen Varianten () und führe dazu eine Verlustanalyse (**Verluste**) durch.
- Wie Du auf den ersten Blick siehst, sind die Unterschiede erheblich:

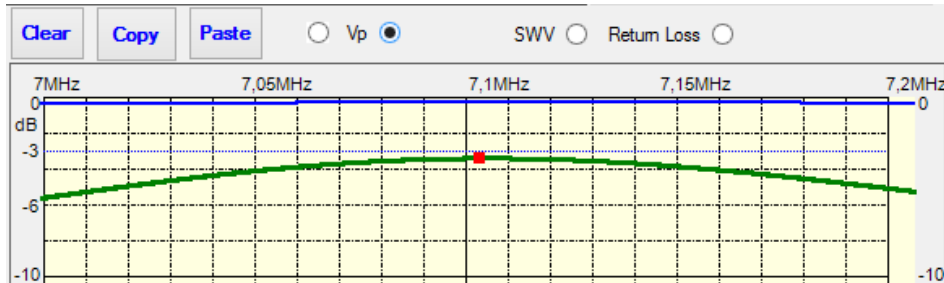
Die Schalterstellung "I" ($2,15\mu\text{H}$):



Die Schalterstellung "B" ($20\mu\text{H}$), der hier viel längere rote Balken verheißt nichts Gutes:



- Nimm auch noch die Transmission (V_p) über das gesamte Band auf und vergleiche mittels "Copy" und "Paste" beide Varianten (in der Abbildung blau: $L=2,15\mu\text{H}$ und grün: $L=20\mu\text{H}$):



Fazit:

Zwar liefert auch die Variante mit dem größtmöglichem L ($20\mu\text{H}$ = Schalterstellung B) eine perfekte Anpassung, hat aber höhere Übertragungsverluste und ist schmalbandiger (das erschwert die Einstellung!).

Übung 13: Kamikaze eines Automatikkopplers

Aufgrund seiner Pi-Struktur und den damit verbundenen über 500000 verschiedenen Einstellmöglichkeiten genießt der bekannte Automatikkoppler SG-230 den Ruf, so gut wie "alles" anpassen zu können (vom Maschendrahtzaun bis zum ...).

Diese beeindruckenden Fähigkeiten werden aber mit einem hohen Risiko erkaufte, wie folgendes Beispiel aus der Praxis beweist: der OM hatte schlicht vergessen das Antennenkabel anzuschließen, sodass dem Koppler nichts anderes übrigblieb als sich an "sich selbst" anzupassen, was auf tragische Weise als sogenanntes "Kamikaze" ("Selbstmord" auf japanisch) endete.

Der OM hatte zunächst nichts davon gemerkt, es wurde ja ein perfektes SWV vorgegaukelt. Als die Rauchzeichen aus dem Koppler quollen war es schon zu spät.

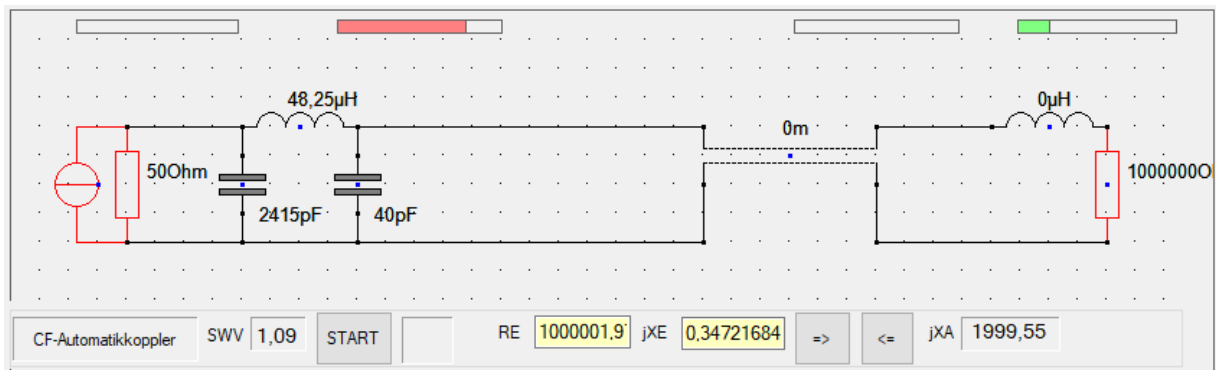
- Nach (44) öffnet sich das Formular „Einstellungen zur Antennenanpassung“. Wähle den Schaltungstyp "CF-Automatikkoppler". Der Kabeltyp ist in unserem konkreten Fall egal, da die Länge des Speisekabels null ist.
- Im Datengitter sind die Werte für den SG-230 bereits eingetragen (in pF bzw. μH):

(4) Pi-Automatikkoppler											
	Typ	QL	C1min	dC1	C1max	dL	Lmax	C2min	dC2	C2max	Comment
▶	SG-230	250	15	100	6320	0,25	64	15	25	775	
*											

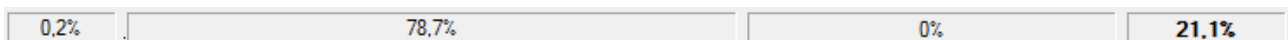
QL	mittlere Leerlaufgüte der L-Dekade
C1min	minimale senderseitige Schaltungskapazität
dC1	kleinste Abstufung der senderseitigen C-Dekade
C1max	größter Wert der senderseitigen C-Dekade (Summe aller 6 schaltbaren C's, ohne C1min!)
dL	kleinste Abstufung der L-Dekade
Lmax	größter Wert der L-Dekade (Summe aller 8 schaltbaren L's)
C2min	minimale antennenseitige Schaltungskapazität
dC2	kleinste Abstufung der antennenseitigen C-Dekade
C2max	größter Wert der antennenseitigen C-Dekade (Summe aller 5 schaltbaren C's, ohne C2min!)

Du kannst diese Werte editieren oder auch neue Pi-Kopplertypen hinzufügen.

- Auf einer leeren Seite erzeuge mit **Reset BK** (42) die Grundstruktur einer synthesesfähigen Anpass-Schaltung unter Verwendung von Bandkabel.
- Die Länge des Bandkabels setze auf 0m, d.h., die Speiseleitung ist quasi nicht vorhanden.
- Die nicht angeschlossene Speiseleitung lässt sich durch einen sehr hochohmigen Lastwiderstand RL simulieren. Klicke auf RL und weise im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) den Wert **1000000** ($1M\Omega$) zu.
- Klicke **<=** (61) um die Ausgangsimpedanz ($1M\Omega$) automatisch in die Felder RE+jXE zu übernehmen (das Auftreten von Rundungsfehlern bei diesen extremen Werten ist trotz doppelt genauer Zahlenarithmetik normal).
- Klicke **START** (56) um den SG-230 mit den Werten für niedrigstes SWV einzufügen.
- Nach **ANALYSE** (25) erkennst Du ein SWV von 1,09. Die Überraschung folgt aber, wenn Du das Häkchen **Verluste** (47) setzt:



- Die Prozentanzeige verdeutlicht, dass völlig inakzeptable **78,7%** der PA-Leistung in der Spule des Kopplers in Wärme umgesetzt werden:



- Eine noch schlimmere Sache, die den Koppler sofort außer Gefecht setzen kann, entdeckst Du im unteren Teil des Parameter-Tablets (36): Am Ausgang liegt eine Spannung von ca. **4,6kV** an!

```

Pout = 21,12Watt
Uo = 141,42V
Uout = 4596,17V
----- S-Parameter -----
s11 = -0,762 - j0,647
s12 = -0,029 - j0,011
s21 = -0,029 - j0,011
s22 = 0,999 - j0
  
```

- Wiederhole die Anpassung mit L-Automatikkoppler oder dem symmetrischen FA-Koppler so wirst Du feststellen, dass hier keine Kamikaze-Gefahr besteht, da keinerlei brauchbare Abstimmung zustande kommt (SWV >> 1)!

Fazit:

Beim Einsatz von echten Pi-Automatikkopplern mit sehr hochohmiger Last besteht die Gefahr der Selbstzerstörung des Kopplers (entweder durch Überhitzung der Spulen oder durch Überspannung an den Kondensatoren)!

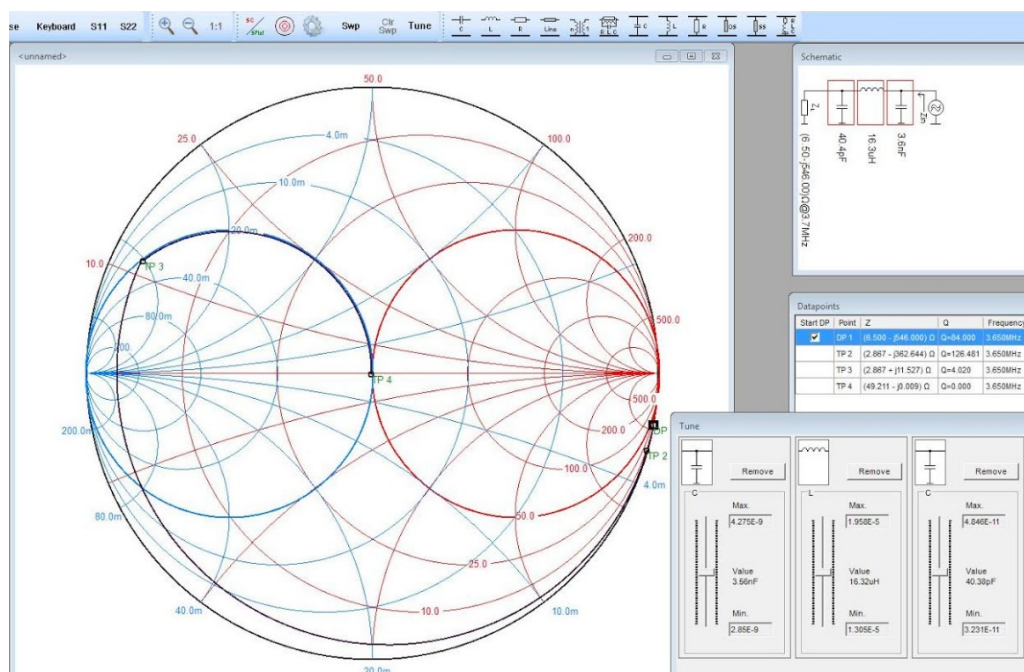
Weitere Beispiele zu Schaltungssynthese und Verlustanalyse

Hier möchte ich noch zwei interessante Anwendungen zur Synthese und Verlustanalyse vorstellen, ohne dabei auf Details der Bedienung von *HamVNAS* einzugehen.

HamVNAS vs Smith-Diagramm

Ein OM, der mit dem bekannten *Smith-Diagramm* von OM Dellsperger arbeitet, teilte mir mit, dass er damit häufig zu völlig anderen Ergebnissen als mit *HamVNAS* kommt.

Als Beispiel schickte er mir folgenden *Smith-Diagramm*-Screenshot vom Entwurf eines Pi-Glieds (Collinsfilter), mit dem bei **3,65MHz** der PA-Ausgang an die Impedanz $Z_e(\Omega) = 6,5 - j546$ angepasst werden soll.

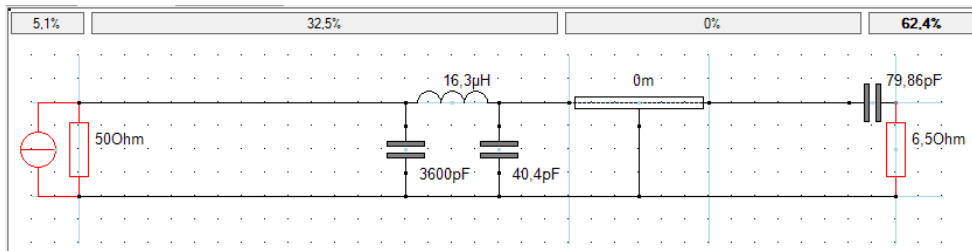


Wie die Abbildung zeigt, liefert *Smith-Diagramm* folgende Lösung:
 $C1=3600\text{pF}$, $L=16,3\mu\text{H}$ und $C2=40,4\text{pF}$

Die per Schieberegler exakt ins Zentrum verschobene Frequenzmarke täuschte dabei ein ideales SWV von 1,0 vor.

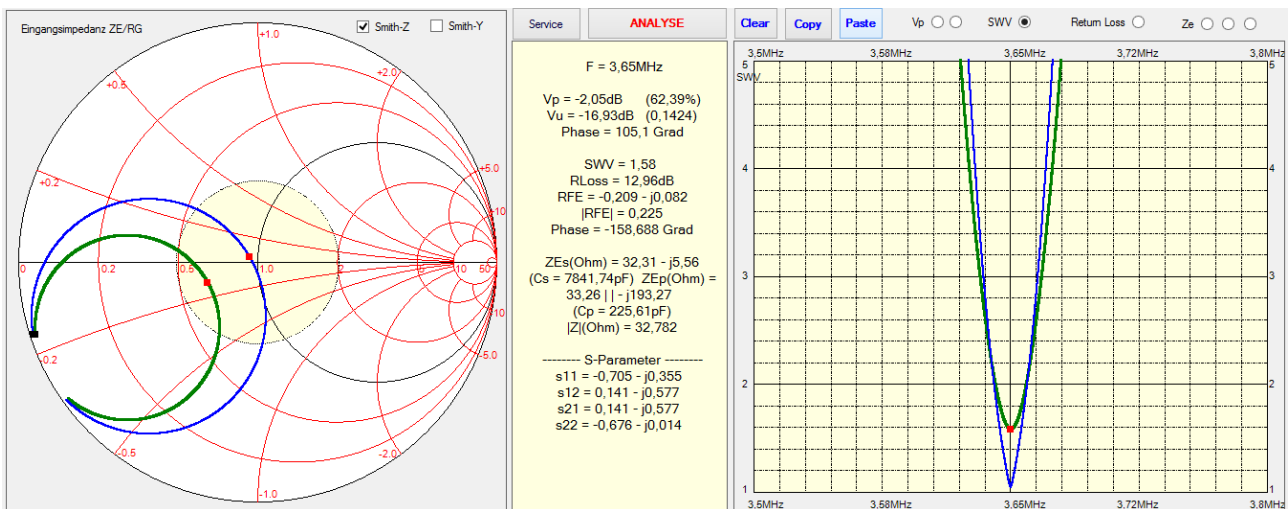
Die Analyse dieser Konfiguration mit *HamVNAS*:

HINWEIS: Jede Verlustanalyse mit *HamVNAS* erfordert das Vorhandensein eines Kabels an der dafür vorgesehenen Position im Synthesegitter, das Kabel hat aber hier die Länge 0m und ist de facto ohne Einfluss.



Es zeigt sich, dass in der Praxis höchstens ein SWV=1,6 erreichbar ist, dafür müsste die Spule eine Güte von mindestens $QL=250$ haben.

Erst wenn die Induktivität als völlig verlustfrei angenommen wird (unendlich große Spulengüte = blaue Kurven in der Abbildung), führt die mit *Smith-Diagramm* ermittelte Dimensionierung zu einem SWV=1,0!



Fazit:

Eine Synthese mit idealisierten Induktivitäten führt in der Praxis häufig zu größeren Abweichungen, d.h., das angestrebte $SWV = 1$ wird deutlich verfehlt.

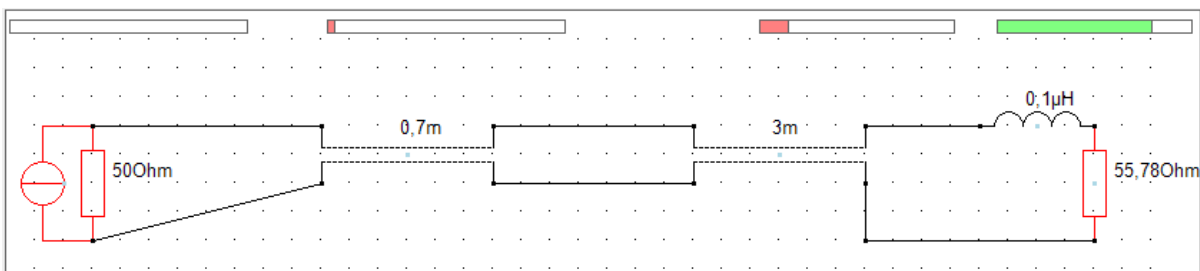
Experimente mit Lautsprecherkabel-Dipol

In der CQ DL 3/2017 habe ich die Dimensionierung eines Unterdach-Dipols für das 15m-Band beschrieben, der komplett aus Lautsprecherkabel FL 2x0,75 gefertigt ist.

Speiseleitung (3m) und Luftbalun (0,7m) werden aus zwei parallel geschalteten Kabeln hergestellt.

Die gemessenen Daten sind im Formular „Einstellungen zur Antennenanpassung“ enthalten, welches Du über den Button [Kopplerauswahl](#) erreichst.

Die Transmission (Wirkungsgrad) erreicht vertretbare 80%:

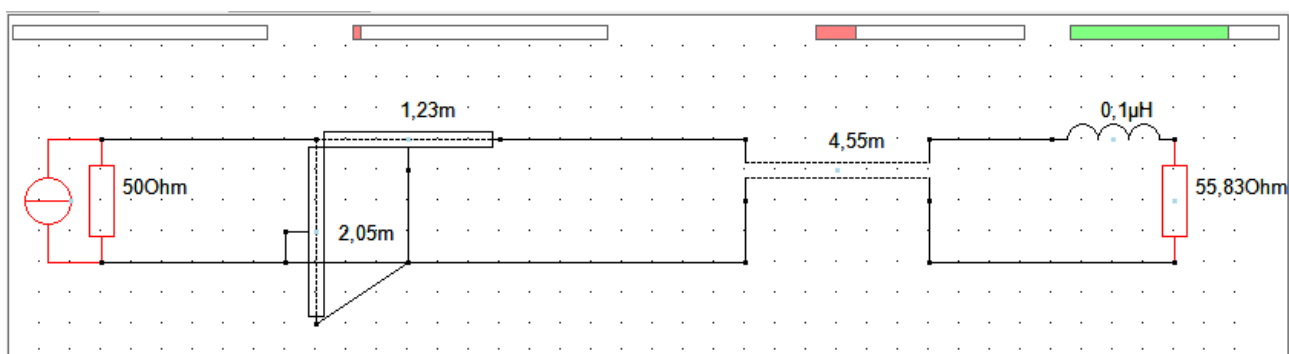


Da aus der Parallelschaltung ein Wellenwiderstand von $Z_w = 58\Omega$ resultiert, bleibt die (unabgestimmte) Speiseleitung nahezu stehwellenfrei ($SWR = 1,05$).

Verzichtet man auf die Parallelschaltung und nimmt als Feeder nur ein einfaches 4,55m ($\lambda/2$) langes Lautspecherkabel ($Z_w = 102\Omega$), so erreicht man trotz eines $SWR = 1,23$ noch eine Transmission die kaum schlechter ist (79%), allerdings ist jetzt die genaue Länge der Speiseleitung sehr kritisch.

Es liegt nahe, zur Anpassung eine ebenfalls aus Lautsprecherkabel gefertigte „Transformations- und Stichleitung mit Bandkabel“ zu verwenden, wie sie über als Schaltungstyp zur Verfügung steht.

Du wirst aber feststellen, dass dafür im Synthesemodus keine Lösung gefunden wird, wohl aber z.B. mit RG-58 Koaxkabel:



Wir haben jetzt ein ideales $SWR = 1,02$, aber die Transmission (76,5%) hat sich geringfügig verschlechtert, was allerdings in der Praxis völlig unbedeutend ist.

Fazit:

Soweit das möglich ist, solltest Du eine unabgestimmte (stehwellenfreie) Speiseleitung bevorzugen, nur bei sorgfältiger Dimensionierung wird auch eine abgestimmte Speiseleitung zu guten Ergebnissen führen.

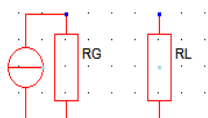
Teil 3: Technische Grundlagen

Hier findest Du nach dem Prinzip "soviel wie nötig" eine knappe Erklärung der in *HamVNAS* verwendeten Bauelementemodelle und die Herleitung der Betriebsparameter.

Modellbibliothek

Die Bauelemente-Ersatzschaltbilder habe ich für den KW- und UKW-Bereich optimiert. Die Einbeziehung der ohm'schen- und Streuverluste bei Induktivitäten, Trafos und Leitungen gewährleistet eine praxisnahe Modellierung.

Generator- und Lastwiderstand



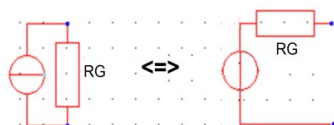
HINWEIS: Jede Schaltung muss genau einen Generatorwiderstand R_G und genau einen Lastwiderstand R_L haben!

Beispiel:

Bei der Anpassung einer Sendeantenne ist R_G in der Regel identisch mit dem Innenwiderstand der PA (50 Ohm) und R_L mit der reellen Komponente der Eingangsimpedanz der Antennenzuleitung (die genauen Werte lassen sich mit einem Antennenanalysator ermitteln).

HINWEIS: Sie können R_G und R_L an jede beliebige Stelle der Schaltung setzen, es wird immer das Übertragungsverhalten zwischen dem dadurch definierten Input- und Output-Tor ermittelt.

Das in *HamVNAS* aus Platzgründen verwendete Generatorersatzschaltbild (Stromquelle mit parallel geschaltetem R_G) ist austauschbar mit einer Spannungsquelle und R_G in Reihe:



HINWEIS: Falls nur die Eingangsimpedanz Z_e einer Schaltung ermittelt werden soll, ist die Größe von R_G bedeutungslos (R_G muss aber vorhanden sein, sonst erfolgt wegen fehlender Tordefinition eine Fehlermeldung!).

Ohm'scher Widerstand, Kapazität, Induktivität



Während die Zweipole R und C nur jeweils einen elektrischen Parameter brauchen (Maßeinheit Ohm bzw. pF), ist bei L (Maßeinheit μH) zusätzlich die Spulenleerlaufgüte Q_L als dimensionslose Zahl einzugeben.

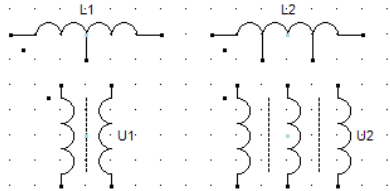
Q_L ist das Verhältnis des induktiven Blindwiderstandes X_L zum Reihenverlustwiderstand R_L der Spule:

$$Q_L = X_L / R_L$$

Fügst Du eine neue Induktivität ein, so wird für Q_L standardmäßig der Wert 1000 zugewiesen, was einer nahezu verlustfreien Spule entspricht. Praktische Größen für Q_L schwanken zwischen 10 (minderwertiger Pulvereisenkern) und 200 (versilberte Luftspule).

Kapazitäten sind in der Regel so verlustarm, dass (zumindest für Amateurbelange) die Einführung eines Gütefaktors meist ohne praktische Relevanz ist. Falls dennoch notwendig, kann man aber auch entsprechende ohm'sche Verlustwiderstände in Reihe oder parallel schalten.

Übertrager, angezapfte Spulen



Das verwendete Übertragermodell hat den Vorteil, dass sowohl ohm'sche als auch Streuverluste Berücksichtigung finden.

Elektrische Parameter für den Zwei- bzw. Dreiwicklungsübertrager:

- **L1(μH)**: Induktivität der Primärwicklung (im Symbol des Übertragers ist die Primärwicklung mit einem fetten schwarzen Punkt gekennzeichnet).
- **QL**: einheitliche Leerlaufgüte aller Wicklungen (diese Vereinfachung ist in den meisten Fällen zulässig)
- **k**: Koppelfaktor (kennzeichnet die Streuverluste, ist idealerweise 1, praktische Werte zwischen 0,5... 0,99)
- **w1 / w2**: Verhältnis der Windungszahlen von Primär- zur zweiten Wicklung (Sekundärwicklung beim Zweiwicklungsübertrager)
- **w1 / w3**: Verhältnis der Windungszahlen von Primärwicklung zur dritten Wicklung (Dreiwicklungsübertrager)

Wichtig:

Sind beide Wicklungen gegensinnig, so ist w1 / w2 bzw. w1 / w3 mit negativem Vorzeichen einzugeben!

Der Beginn der Primärwicklung w1 ist mit einem fetten schwarzen Punkt markiert.

HINWEIS: Der Anfang der Sekundärwicklung hat keine Markierung, ob sie gleich- oder gegensinnig gewickelt ist, erkennt man am **Vorzeichen** von w1/w2!

Die elektrischen Parameter für angezapfte Induktivitäten:

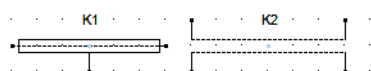
- **L(μH)**, **QL**: wie bei normaler Induktivität
- **k**: Koppelfaktor (≤ 1 , wie bei Übertrager)
- **w1 / w**: Windungszahl w1 vom „kalten“ Ende der Spule (das ist das ohne schwarzen Punkt) bis zur ersten Anzapfung im Verhältnis zur Gesamtwindungszahl w
- **w2 / w**: Windungszahl w2 vom „kalten“ Ende der Spule bis zur zweiten Anzapfung im Verhältnis zur Gesamtwindungszahl w

Die Ersatzschaltbilder angezapfter Spulen werden intern auf einen Zwei- bzw. Dreiwicklungsübertrager zurückgeführt.

Das „kalte“ Ende ist das Wicklungsende, der Wicklungsanfang ist (wie beim Übertrager) mit einem fetten Punkt markiert. Es gilt immer: $w > w_2 > w_1$.

Koaxkabel, Bandkabel

Koaxialkabel und Bandkabel haben identische elektrische Modelle und unterscheiden sich nur dadurch, dass es sich einmal um einen Dreipol (unechter Vierpol), ein anderes mal um einen echten Vierpol handelt:



- **Zw(Ohm):** Wellenwiderstand
- **l(m):** Länge
- **v:** Verkürzungsfaktor (kleiner oder idealerweise gleich Eins)
- **a(dB/100m):** Kabeldämpfung pro 100m
- **@f(MHz):** Bezugsfrequenz der Kabeldämpfung = fb

Verkürzungsfaktor und Kabeldämpfung sind dem Herstellerkatalog zu entnehmen. Die Umrechnung für andere Frequenzen erfolgt durch das Programm automatisch, wobei die Frequenzabhängigkeit der dB-Dämpfungskurve aus der Quadratwurzel des Frequenzverhältnisses interpoliert wird:

$$a[dB] \approx a[dB]_{fb} \sqrt{\frac{f}{fb}}$$

HINWEIS: Im Synthesemodus ist die Bezugsfrequenz der Kabeldämpfung auf 10MHz festgelegt.

Basisalgorithmen

Jede Schaltungsanalyse, auch die mit Papier und Bleistift, geschieht in zwei Etappen:

1. Aufstellen der Netzwerkgleichungen
2. Lösen der Netzwerkgleichungen

Aufstellen der Netzwerkgleichungen

Am Anfang steht die Analyse der Schaltungstopologie. Da die klassische Vierpoltheorie in eine Sackgasse führt, hatte ich vor vielen Jahren in /3/ die "Methode der Unbestimmten Knotenleitwertmatrizen" entwickelt.

Dabei werden die Anschlüsse (Knoten) aller Bauelemente zunächst fortlaufend durchnummeriert, sind Anschlüsse miteinander verbunden, so werden sie zu einem gemeinsamen Knoten zusammengefasst.

HINWEIS: Um das Ergebnis der Topologieanalyse zu sehen, klicke im -Bereich den Button

Lösen der Netzwerkgleichungen

Rechenzeitintensiver Kern der Schaltungsanalyse mit *HamVNAS* ist die Ermittlung der zwischen Ein- und Ausgangstor liegenden komplexen Y -Vierpolmatrix, was durch schrittweise Elimination der inneren Schaltungsknoten mittels eines modifizierten vektoriiellen Gauss-Algorithmus realisiert wird.

Ergebnis sind die Real- und Imaginärteile der vier Elemente der Y -Vierpolmatrix, die bei Bedarf auch im unteren Teil des Tablett "Betriebsparameter" (36) aufgelistet werden können:

$$\begin{aligned} Y_{11} &= g_{11} + j b_{11} & Y_{12} &= g_{12} + j b_{12} \\ Y_{21} &= g_{21} + j b_{21} & Y_{22} &= g_{22} + j b_{22} \end{aligned}$$

Zusätzlich ist aber auch eine Ausgabe der S-Parameter möglich. Diese beziehen sich i.d.R. auf eine Systemimpedanz von 50Ohm, lassen sich also gut mit den Messergebnissen gängiger VNAs vergleichen.

Betriebsparameter

Nach Beschaltung von Ein- und Ausgangstor mit R_G bzw. R_L lassen sich die verschiedenen Betriebsparameter nach den aus der klassischen Vierpoltheorie bekannten Formeln leicht ermitteln:



HINWEIS: Beachte folgenden „feinen Unterschied“ zu anderen vergleichbaren Programmen:

Die Matrix Y ist in *HamVNAS* ein so genannter „echter“ Vierpol, eine durchgehende Masseverbindung zwischen R_G und R_L ist also nicht zwingend erforderlich! Das erweitert den Einsatzbereich.

Spannungsverstärkung V_u

Diese vektorielle Größe gibt das Verhältnis der Ausgangsspannung zur Generatorurspannung an:

$$V_u = U_2 / U_0 = - Y_{21} * G_G / ((Y_{11} + G_G) * (Y_{22} + G_L) - Y_{12} * Y_{21})$$

oder

$$V_u[\text{dB}] = 20 * \log|V_u|$$

mit $G_G = 1 / R_G$ und $G_L = 1 / R_L$

Leistungsübertragung V_p

Dieser wichtige, manchmal auch als Leistungsverstärkung oder Transmission bezeichnete Parameter steht für das Verhältnis der am Lastwiderstand R_L umgesetzten Leistung zur maximal verfügbaren Generator- bzw. PA-Leistung (Wirkungsgrad). Im Unterschied zur Spannungsverstärkung V_u handelt es sich um eine reelle (also keine vektorielle) Größe.

Der Frequenzgang von V_p entspricht der experimentellen Situation bei der Aufnahme von

Wobbelkurven:

$$V_p = |V_u|^2 * 4 * R_G / R_L$$

und in Dezibel:

$$V_p[\text{dB}] = 10 * \log(V_p)$$

HINWEIS: Die so genannte Übertragungsdämpfung (a[dB]) – gewissermaßen die negative Leistungsverstärkung – unterscheidet sich von V_p nur durch das Vorzeichen.

In 50Ohm-Systemen ist V_p gleichzusetzen mit dem S-Parameter S_{21} (Vorwärtstransmission).

Eingangsimpedanz Z_E

Der vektorielle Eingangswiderstand ist der Kehrwert des vektoriellen Eingangsleitwerts:

$$Z_E = 1 / Y_E$$

$$\text{mit } Y_E = Y_{11} - Y_{12} * Y_{21} / (Y_{22} + 1 / R_L)$$

Z_E wird sowohl als Serienschaltung

$$Z_{Es} = R_s + jX_s$$

als auch als Parallelschaltung angegeben:

$$Z_{Ep} = R_p \parallel jX_p$$

Diese zweifache Anzeige einer Impedanz als Serien- und als Parallelschaltung eines ohmschen und eines Blindwiderstands ist auch bei Antennenanalysatoren üblich (z.B. bei den Antennenanalysatoren der Firma *RigExpert*):

$$R_p = (R_s^2 + X_s^2) / R_s \quad X_p = (R_s^2 + X_s^2) / X_s$$

bzw.

$$R_s = R_p / (1 + R_p^2 / X_p^2) \quad X_s = X_p / (1 + X_p^2 / R_p^2)$$

Eingangsreflexionsfaktor RF_E

RF_E leitet sich aus dem Eingangsleitwert Y_E und dem Generatorwiderstand R_G her:

$$RF_E = (Y_E - 1 / R_G) / (Y_E + 1 / R_G)$$

Stehwellenverhältnis SWR

VSWR errechnet sich aus dem Betrag von RF_E :

$$VSWR = (1 + RF) / (1 - RF) \quad \text{mit } RF = |RF_E|$$

Rückflusdämpfung R_{Loss}





R_{Loss} ist das logarithmische Maß des Reflexionsfaktors RF :

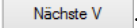



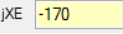
$$R_{Loss} = -20 * \log(RF)$$

Problemlösungen

Die in *HamVNAS* eingesetzten Algorithmen für Aufstellen und Lösen der Netzwerkgleichungen und die implementierten mathematischen Modelle der verwendeten Bauelemente haben sich bereits seit vielen Jahren in anderen von mir entwickelten Programmen in Lehre, Forschung und Industrie bewährt. Meist sind falsch gezeichnete Schaltungen, falsch zugewiesene Parameter und Bedienfehler die Fehlerursache.

HamVNAS wurde von mir und anderen OMs, bei denen ich mich hier nochmals herzlich bedanke, ausgiebig getestet. Dabei traten folgende Probleme auf:

Problem	Lösung
Beim Klick auf  kommt eine Fehlermeldung "Der Zugriff auf den Pfad "C:\Program\Files...\CircuitsDB.dat wurde verweigert".	Beende das Programm und klicke mit der rechten Maustaste auf <i>HamVNAS.exe</i> und wähle im Popup-Menü " <i>Als Administrator ausführen</i> ". Empfohlen wird aber, den Ordner <i>HamVNAS</i> nicht im <i>\Programme</i> -Verzeichnis des PC, sondern im <i>\Benutzer</i> - Verzeichnis anzulegen, also dort, wo Du neben Lese- auch über Schreibrechte verfügst.
Mein PC hat zwar eine Grafikauflösung von größer als 1400x900, das Hauptfenster passt trotzdem nicht auf den Bildschirm.	Gehe in die <i>Windows-Systemsteuerung / Darstellung und Anpassung / Anzeige</i> um dort unter <i>Lesbarkeit auf Bildschirm erleichtern</i> die Einstellung <i>100% (Standard)</i> o.ä. vorzunehmen.
Mein Laptop hat zwar eine Grafikauflösung von 1600x900, der untere Rand des Hauptfensters wird aber durch die Taskleiste verdeckt.	Verkleinere durch Ziehen am oberen oder unteren Rand die Höhe des Hauptfensters etwas und benutze dann die vertikalen Bildlaufleisten. Optional auch Taskleiste vorübergehend ausblenden.
In der Schweiz verwendet man anstatt des Kommas den Punkt als Dezimaltrennzeichen.	Belasse die <i>Region- und Spracheinstellung</i> auf „Schweiz (Deutsch)“ und wähle die schweizerdeutsche Tastatur.
Es erscheint die Fehlermeldung "Die Eingabezeichenfolge hat das falsche Format"	Rechtsklick auf den Windows-Start-Button: <i>Systemsteuerung / Region / Weitere Einstellungen / Zahlen / Dezimaltrennzeichen</i> => muss Komma sein, nicht Punkt!
Ich emuliere Windows unter LINUX und erhalte Fehlermeldungen.	Es fehlen die Bibliotheken des .NET-Frameworks (ab 4.5), wie sie unter Windows Vista, 7, 8, 10 standardmäßig vorhanden sind.
Sofort nach Programmstart erscheint eine Fehlermeldung.	Möglicherweise ist die Standard-Datenbankdatei (<i>CircuitsDB.dat</i>) beschädigt, ersetze diese durch eine vorher angefertigte Kopie.
Nach Klick auf  erscheint eine Fehlermeldung oder es passiert überhaupt nichts.	<ul style="list-style-type: none"> - Überprüfe, ob <u>allen</u> Bauelementen (auch RG und RL) <u>alle</u> elektrischen Parameter richtig (Maßeinheit!) zugewiesen wurden. - Ist das <u>Dezimaltrennzeichen</u> korrekt? Es wird wie üblich aus den <u>Regions- und Spracheinstellungen</u> des Betriebssystems übernommen (in Deutschland in der Regel das Komma, der Dezimalpunkt wird überlesen). - Klicke im <i>Service</i>-Bereich auf  um auszuschließen, dass Bauelemente falsch verbunden oder außerhalb des Designers „fallengelassen“ wurden. - Hat die Schaltung <u>einen</u> Generator- <u>und</u> <u>einen</u> Lastwiderstand? <p>Wurde RG richtig an seinen beiden Pins angeschlossen? Überprüfe die elektrischen Parameter, vermeide Nullwerte bei R und L und nimm stattdessen sehr kleine Werte.</p>
Nach Änderung der Schaltungsstruktur (Hinzufügen oder Entfernen von Bauelementen oder Verbindungen) verweist eine Meldung auf Fehler im Datengitter.	Klicke nach jeder Änderung der Schaltungsstruktur auf  , damit die Knotennummern neu zugewiesen werden (nicht zugewiesene Knotennummern haben die Nummer 0).

<p>Eine Verbindung oder ein Bauelement lässt sich nicht markieren, ziehen oder löschen.</p>	<p>- Vergleiche im <i>Service</i>-Bereich die <u>kompletten</u> Bauelemente- und Verbindungslisten anhand ihrer Pin-Koordinaten mit dem Schaltbild. Evtl. sind Bauelemente oder Verbindungen außerhalb des Designers gelandet, durch andere verdeckt oder es gibt unbemerkte <u>isolierte Knoten</u>.</p> <p>- Klicke im Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) mehrfach .</p> <p>Die Markierung durchwandert <u>alle</u> Verbindungen.</p> <p>- Eine <u>schräge Verbindung</u> kann nur dann markiert werden, wenn man in die unmittelbare Nähe ihres Anfangs- oder Endpunktes klickt.</p> <p>- Ursache kann auch eine <u>prellende Maus</u> sein, teste versuchsweise eine andere Maus!</p>
<p>Im Parameter-Tablett (36) werden keine Betriebsparameter angezeigt.</p>	<p>- Klicke den Button .</p> <p>- Zeige mit der Maus auf die Ortskurve im Smith-Diagramm (34) oder bewege die Maus im Wobbeldiagramm (37).</p>
<p>Die elektrischen Parameter des Bauelements werden nicht angezeigt.</p>	<p>- Klicke im Designer auf das Bauelement (blauer Punkt).</p> <p>- Im Eingabefeld des Tablett "Elektrische Parameter und Verbindungen" (22) kannst Du den Wert ablesen und editieren, z.B.</p> <p></p> <p>- Alternativ den -Bereich (24) öffnen und dort die Bauelementeliste editieren.</p>
<p>Das Antennen-Ersatzschaltbild wird fehlerhaft generiert.</p>	<p>In das Feld  (59) darf das "j" nicht mit eingetragen werden!</p>

Literatur

- /1/ Doberenz, W., DL1JWD: Schaltungen zur Antennenanpassung rechnergestützt entwerfen. FUNKAMATEUR 65 (2016) H2, S.127-129; H3, S.228-231
- /2/ Doberenz, W., DL1JWD: Netzwerkanalyse für Funkamateure. CQ DL 2-2016, S.17-19
- /3/ Doberenz, W., DL1JWD: SWR gut - ales gut? CQ DL 4-2019, S.28-29
- /4/ Neibig, U., DL4AAE: Dämpfung und Verkürzungsfaktor von Zweidrahtleitungen. FUNKAMATEUR 65 (2016) H.11, S. 1034-1039
- /5/ Wippermann, W., DG0SA: Hühnerleiter an Antennentuner. www.dg0sa.de/balunatuhl.pdf
- /6/ Graubner, N., DL1SNG: Ferngesteuerter symmetrischer Antennenkoppler für 200 W FUNKAMATEUR 64 (2015) H.7,8,9
- /7/ Graubner, N., DL1SNG: Messung von Antennenimpedanzen und deren Anpassung an 50 Ω, Vortrag zur HamRadio Friedrichshafen 2012
- /8/ Janzen, G. DF6SJ „Kurze Antennen“, DARC-Verlag, 1989
- /9/ Borucky, L., DL8EAW: Leistungsanpassung in der Funktechnik, Verlag für Technik und Handwerk Baden-Baden 2005
- /10/ Doberenz, W., DL1JWD: Dipol und Feed aus Lautsprecherkabel. CQ DL 3-2017, S.40-43