

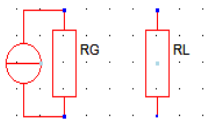
# Technische Grundlagen

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 RG und genau einen Lastwiderstand RL haben!

---

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

---

**HINWEIS:** Du kannst RG und RL 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 RG) ist austauschbar mit einer Spannungsquelle und RG in Reihe:

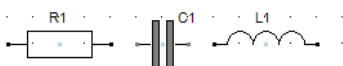


---

**HINWEIS:** Falls nur die Eingangsimpedanz  $Z_e$  einer Schaltung ermittelt werden soll, ist die Größe von RG bedeutungslos (RG 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  $\mu\text{H}$ ) zusätzlich die Spulenleerlaufgüte QL als dimensionslose einzugeben.

QL ist das Verhältnis des induktiven Blindwiderstandes XL zum Reihenverlustwiderstand RL der Spule:

$$QL = XL / RL$$

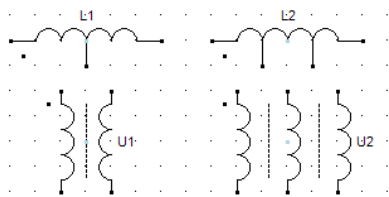
Fügst Du eine neue Induktivität ein, so wird für QL standardmäßig der Wert 250 zugewiesen, was einer verlustarmen Spule entspricht. Praktische Größen für QL schwanken zwischen 50 (minderwertiger Pulvereisenkern) und 300 (versilberte Luftspule).

Für die Güte von Kapazitäten gilt:

$$QC = BC / GC$$

Dabei sind BC der Blindleitwert der Kapazität und GC der parallel zum C liegende Verlustleitwert. Einer Kapazität wird der unveränderliche Gütefaktor 1000 zugewiesen.

## 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 gegenseitig, 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 gegenseitig gewickelt ist, erkennt man am **Vorzeichen** von w1/w2!

---

Die elektrischen Parameter für angezapfte Induktivitäten:

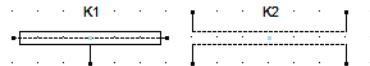
- **L(μH), QL:** wie bei normaler Induktivität
- **k:** Koppelfaktor ( ≤ 1, wie bei Übertrager)
- **w1 / w:** Windungszahl w1 vom „kalten“ Ende der Spule (das ist das ohne schwarzen Punkt) bis zur ersten Anzapfung im Verhältnis zur Gesamtwindungszahl w
- **w2 / w:** Windungszahl w2 vom „kalten“ Ende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



- **$Z_w(\text{Ohm})$** : Wellenwiderstand
- **$l(\text{m})$** : Länge
- **$v$** : Verkürzungsfaktor (kleiner oder idealerweise gleich Eins)
- **$a(\text{dB}/100\text{m})$** : Kabeldämpfung pro 100m
- **$@f(\text{MHz})$** : Bezugsfrequenz der Kabeldämpfung =  $f_b$

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:

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

---

**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 Service-Bereich den Button Knoten anzeigen

---

## 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 vektoriellen Gauss-Algorithmus realisiert wird.

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

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

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:

$$\mathbf{V}_u = \mathbf{U}_2 / \mathbf{U}_0 = - \mathbf{Y}_{21} * G_G / ((\mathbf{Y}_{11} + G_G) * (\mathbf{Y}_{22} + G_L) - \mathbf{Y}_{12} * \mathbf{Y}_{21})$$

oder

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

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:

$$V_p = |\mathbf{V}_u|^2 * 4 * R_G / R_L$$

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*):

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

bzw.

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

### 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  $RF_E$ :

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

### Rückflussdämpfung $R_{Loss}$

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

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

---





**HINWEIS:** In 50Ohm-Systemen ist  $R_{Loss}$  gleichzusetzen mit dem S-Parameter  $S_{11}$  (Eingangsreflexionsfaktor).

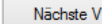

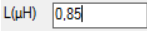

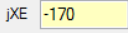
---

# 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 <b>rechten</b> 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"> <li>- Überprüfe, ob <u>allen</u> Bauelementen (auch RG und RL) <u>alle</u> elektrischen Parameter richtig (Maßeinheit!) zugewiesen wurden.</li> <li>- 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).</li> <li>- Klicke im <i>Service</i>-Bereich auf  um auszuschließen, dass Bauelemente falsch verbunden oder außerhalb des Designers „fallengelassen“ wurden.</li> <li>- Hat die Schaltung <u>einen</u> Generator- <u>und</u> <u>einen</u> Lastwiderstand?</li> <li><b>Wurde RG richtig an seinen beiden Pins angeschlossen?</b></li> </ul> <p>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).
Eine Verbindung oder ein Bauelement lässt sich nicht markieren, ziehen oder löschen.	- Vergleiche im <i>Service</i> -Bereich die <u>kompletten</u> Bauelemente- und Verbindungslisten anhand ihrer Pin-Koordinaten mit dem Schaltbild.

	<p>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>
Im Parameter-Tablett (36) werden keine Betriebsparameter angezeigt.	<p>- Klicke den Button .</p> <p>- Zeige mit der Maus auf die Ortskurve im Smith-Diagramm (34) oder bewege die Maus im Wobbelndiagramm (37).</p>
Die elektrischen Parameter des Bauelements werden nicht angezeigt.	<p>- Klicke im Designer auf das Bauelement (blauer Punkt).</p> <p>- Im Eingabefeld des Tablets "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 Bauelementliste editieren.</p>
Das Antennen-Ersatzschaltbild wird fehlerhaft generiert.	<p>In das Feld  (59) darf das "j" <b>nicht</b> 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](http://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