

Vergleichen der Effizienz von Magnetic Loop Antennen

Neben Grösse, Gewicht und Abstimmbarkeit ist die Effizienz einer Magnetic-Loop-Antenne eine wichtige Kenngrösse. Dieser Artikel zeigt, wie sich die Effizienz mittels VNA-Messungen abschätzen lässt — selbst wenn ein Zuleitungskabel vorhanden ist und die Anpassung nicht optimal ist.

Kabel

Es gibt Fälle, in denen eine Antenne nur zusammen mit dem Kabel gemessen werden kann, z. B. wenn die Antenne auf dem Dach ist und der Zugang mühsam ist.

Das Zuleitungskabel hat eine Verzögerung τ und eine Einweg-Kabeldämpfung α .

Kein optimales SWR

Es gibt Antennen, bei denen sich die Einkopplung nicht einstellen lässt, beispielsweise Antennen von Ciro Mazzoni. Der Gamma-Match ist aus Aluminium geschweisst, und der Kontakt zum Kabel liegt an einer festen Position.

Diese Antennen lassen sich dadurch nicht auf ein SWR von 1:1 abgleichen. Die Methode, bei der die Bandbreite B bei $\text{SWR} = 2.62$ gemessen wird, ist daher nicht anwendbar.

Antenne und Ersatzschaltbild

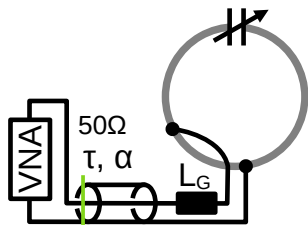


Figure 1: Gemessen wird eine Antenne mit Anschlusskabel und der parasitären Induktivität der Einkopplung L_G .

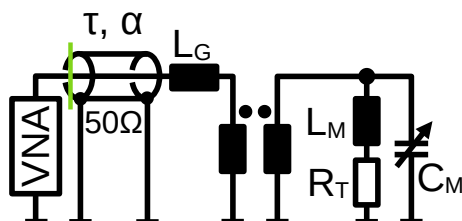


Figure 2: Das Ersatzschaltbild zeigt die Kopplung der Einkoppelschleife als Transformator. Bei einer Messung mit dem VNA ist diese Kopplung nicht direkt messbar und bleibt daher unbekannt.

Modell

Die Antennenimpedanz wird mit möglichst wenigen Bauteilen nachgebildet.

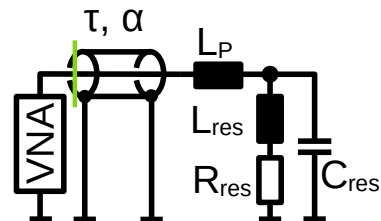


Figure 3: Das Modell ohne Transformator.

Beachte: Durch das Weglassen des Transformators ändern sich die Werte der Bauteile. Zum Beispiel entspricht die Induktivität L_{res} nicht der Induktivität, die sich aus der Geometrie des Hauptloops berechnen lässt.

Mit $\omega = 2\pi f$.

Serienimpedanz des RL-Zweigs

$$Z_s(\omega) = R_{\text{res}} + j\omega L_{\text{res}}$$

Admittanz des RLC-Resonators

$$Y_{\text{res}}(\omega) = \frac{1}{Z_s} + j\omega C_{\text{res}}$$

Impedanz des RLC-Resonators

$$Z_{\text{res}}(\omega) = \frac{1}{Y_{\text{res}}}$$

Antennenimpedanz inklusive parasitärer Induktivität

$$Z_{\text{ant}}(\omega) = j\omega L_P + Z_{\text{res}}$$

Reflexionskoeffizient am VNA-Port (mit $Z_0 = 50\Omega$)

$$\Gamma(\omega) = \frac{Z_{\text{ant}} - Z_0}{Z_{\text{ant}} + Z_0}$$

Modelliertes Streumass mit Kabeldämpfung und Verzögerung

$$S_{11}(\omega) = \Gamma(\omega) * 10^{-\frac{\alpha}{10}} * e^{-j2\omega\tau}$$

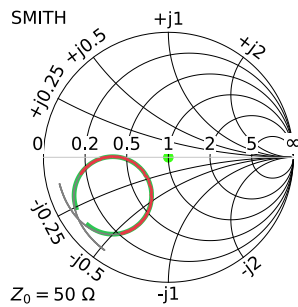


Figure 4: Beispielmessung: Die Punkte zeigen die gemessenen Werte, die grüne Kurve zeigt das Modell mit den gefitteten Parametern.

Die gemessenen Werte gehen nicht bis an den Umkreis vom Smith-Chart: es ist Kabeldämpfung vorhanden. Der Kreis geht nicht durchs Zentrum vom Smith-Chart: die Antenne ist nicht abgeglichen auf SWR 1.0.

Schätzen der Bandbreite anhand vom Modell

Aus den Modellparametern wird die Güte des modellierten Resonators berechnet:

$$Q_{0\text{modell}} = \frac{2\pi f_0 L_{\text{res}}}{R_{\text{res}}}$$

Damit kann auch die Bandbreite der Antenne abgeschätzt werden:

$$B_{\text{SWR}2.62} \approx \frac{f_0}{Q_{0\text{modell}}}$$

$B_{\text{SWR}2.62}$ ist die Bandbreite bei SWR = 2.62 einer ideal angepassten Antenne – bei Fehlanpassung lässt sie sich nicht direkt ablesen, sondern wird wie hier gezeigt aus dem Modell berechnet.

Schätzen der Fehlanpassung anhand vom Modell

Falls das minimale SWR nicht bei 1.0 liegt, geht durch Fehlanpassung ein Teil der Leistung verloren. Mit dem gemessenen Wert swr_{min} und der Kabeldämpfung model_alpha_db gilt:

$$r = \frac{\text{swr}_{\text{min}} - 1}{\text{swr}_{\text{min}} + 1} \cdot 10^{\frac{\text{model_alpha_db}}{10}}$$

$$\eta_{\text{SWR}} = 1 - r^2$$

Berechnen der Effizienz der Antenne

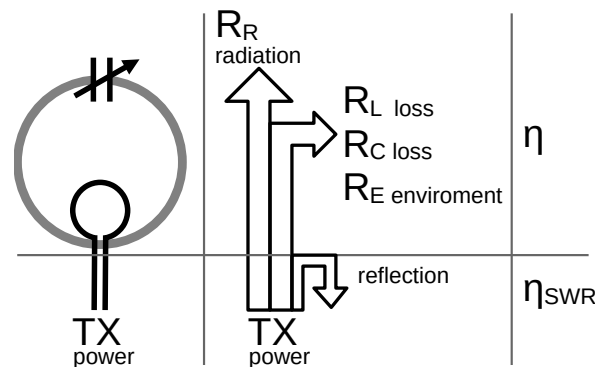


Figure 5: Links: Antenne. Mitte: Die Senderleistung verteilt sich auf Abstrahlung, Verluste und bei nicht optimaler Anpassung auch auf Reflexion.

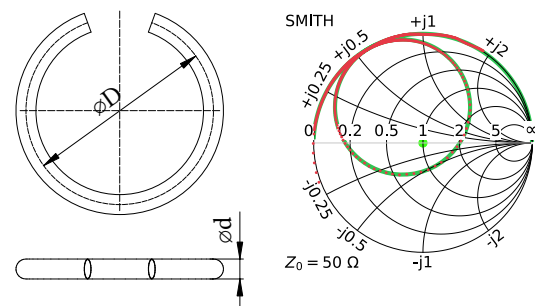
Die Effizienz η der Antenne ohne Fehlanpassung berechnen wir nach [1] und [2].

Der Wirkungsgrad der Antenne mit Fehlanpassung ergibt sich durch:

$$\eta_{\text{total}} = \eta \cdot \eta_{\text{SWR}}$$

η_{total} beschreibt den Wirkungsgrad der Antenne einschliesslich Fehlanpassungsverlusten, jedoch ohne Kabelverluste, und eignet sich daher als Vergleichsgrösse zwischen verschiedenen Antennen.

Überblick: Was hängt wovon ab?



Aus Geometrie:
Induktivität L
Fläche A

η aus L , A , $B_{\text{SWR}2.62}$ und Frequenz

η_{SWR} aus swr_{min}

$$\eta_{\text{total}} = \eta \cdot \eta_{\text{SWR}}$$

Figure 6: Überblick über die Herleitung von η_{total} aus Geometrie- und VNA-Messgrössen.

Liefert das Modell brauchbare Werte?

In den folgenden Beispielen wird dieselbe Antenne bei der gleichen Resonanzfrequenz gemessen, jedoch mit unterschiedlicher Einkopplung und VNA-Kalibrierung. Da es dieselbe Antenne ist, erwarten wir, dass das Modell stets den gleichen Wert für $B_{\text{SWR}2.62}$ liefert.

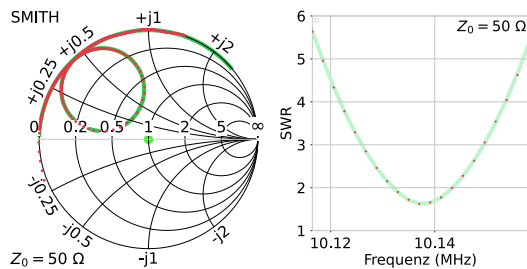


Figure 7: Beispiel: Kopplung Antenne zu klein: 30 Ohm, VNA kalibriert am Fusspunkt der Antenne.

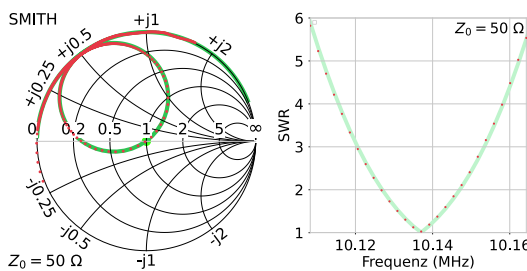


Figure 8: Kopplung angepasst: 50 Ohm, VNA kalibriert am Fusspunkt der Antenne. Im SWR-Diagramm lässt sich die Bandbreite $B_{\text{SWR}2.62} \approx 28$ kHz direkt ablesen.

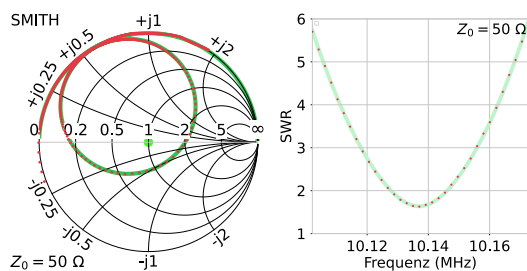


Figure 9: Beispiel: Kopplung Antenne zu gross: 80 Ohm, VNA kalibriert am Fusspunkt der Antenne.

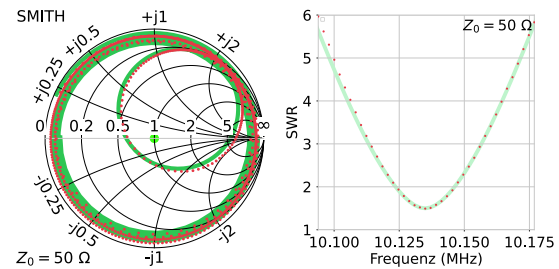


Figure 10: Beispiel: Kopplung Antenne zu gross: 80 Ohm, VNA kalibriert beim VNA (mit Kabel). Gleiche Antenne wie in Figure 9, diesmal mit Kabel gemessen. Im Smith-Chart sind viele Windungen sichtbar: Das mitgemessene Kabel erzeugt starke Phasendrehung. Der Resonanzkreis ist wegen der Kabeldämpfung etwas kleiner.

Die folgenden Werte stammen aus dem Modell, das an die Messwerte gefittet wurde.

Kopp- lung	VNA cal	f (MHz)	$B_{\text{SWR}2.62}$ (Hz)	SWR min	Att. (dB)	Delay (ns)
zu wenig	Fuss- punkt	10.137	28482	1.62	0.005	5.2
50 Ω	Fuss- punkt	10.137	28512	1.03	0.002	7.4
zu viel	Fuss- punkt	10.137	28364	1.63	0.007	8.3
zu wenig	beim VNA	10.137	28259	1.66	0.354	62.6
50 Ω	beim VNA	10.135	28367	1.08	0.357	65.5
zu viel	beim VNA	10.135	28339	1.49	0.383	67.1

Table 1: Verschiedene Konfigurationen derselben Antenne mit der gleichen Resonanzfrequenz.

Die in Table 1 aufgeführten Bandbreiten $B_{\text{SWR}2.62}$ stimmen sehr gut überein und bestätigen den Wert, der in Figure 8 direkt aus dem SWR-Diagramm abgelesen werden kann.

Die Messungen, bei denen der VNA am Antennenfusspunkt kalibriert wurde, zeigen erwartungsgemäss nahezu keine Kabeldämpfung und eine kleine Laufzeit.

Die Messungen mit VNA-Kalibrierung am Kabelende weisen eine Kabeldämpfung und Laufzeit auf, die gut zu den eingesetzten Kabeln passen: M&P Hyperflex 10 (7.50 m), M&P Hyperflex 5 (5.50 m) und M&P Ultraflex 7 (2.00 m) – Total 14.50 m.

Schlussfolgerung

Das einfache Modell bildet die reale Antenne hinreichend genau ab und liefert die Bandbreite $B_{\text{SWR}2.62}$ zuverlässig — unabhängig von Fehlanpassung und Zuleitungskabel.

Wie messen

Als VNA verwende ich einen NanoVNA V2 Plus4; der genaue Typ ist nicht entscheidend. Als Software setze ich NanoVNA-Saver ein.

Zu beachten:

- Für einen guten Modell-Fit ist ein grosser Frequenzbereich entscheidend: Ich sweepe stets von 0.5 bis 30 MHz, unabhängig vom zu messenden Band. In NanoVNA-Saver wähle ich logarithmic sweep mit 200 segments — das ergibt rund 20'000 Messpunkte, womit alle Bänder genügend fein aufgelöst sind.
- Den VNA über denselben Bereich kalibrieren, bevorzugt am Antennenfusspunkt; falls das nicht möglich ist, so nahe wie möglich an der Antenne.

Weiterführende Links

[1] Ein ausführliches Paper in Englisch, das alle Themen dieser Serie umfasst: arxiv.org/pdf/2607.10828

[2] Online Rechner für die Magnetloop: petermaerki.github.io/magloop_field