

Spulenrechner SR 1.1 und NanoVNA

Schaltungsberechnungen oder mathematische Simulationen geraten schnell in Widerspruch zur Realität, wenn Verluste und parasitäre Effekte der Bauelemente unberücksichtigt bleiben. Besonders augenfällig wird dies bei Induktivitäten, weil hier Wicklungskapazitäten, Skineffekt und Spulengüte mit zunehmender Frequenz an Einfluss gewinnen.

Im Zusammenspiel des Spulenrechners mit einem Vektoriellen Netzwerkanalysator (NanoVNA) kann man diese wichtigen Kenngrößen aber vorab ziemlich genau ermitteln und sich so vor manch unangenehmen Überraschungen schützen.

Dem SR müssen vier Werte von L vorab bekannt sein:

- Induktivität bei niedriger Frequenz (μH)
- Gleichstromwiderstand (Ω)
- Frequenz (MHz) der ersten Parallelresonanz (mit NVNA messen)
- Durchgangsdämpfung (dB) bei der ersten Parallelresonanz (mit NVNA messen)

Die Frequenzskala ist logarithmisch geteilt, wobei zwei Bereiche zur Auswahl stehen:

- Während der erste Bereich (1MHz ... 100MHz) vorwiegend für KW-Drosseln gedacht ist,
- kann man im zweiten Bereich (1MHz ... 1GHz) auch kleinere Induktivitäten, wie z.B. Luftspulen, untersuchen, deren Parallelresonanz i.d.R. bei einigen hundert MHz liegt.

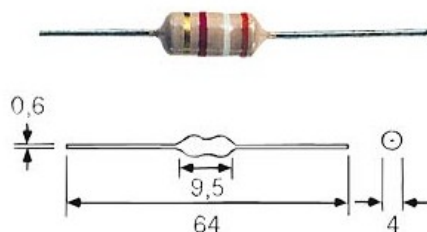
Der wesentlichste Unterschied der aktuellen V1.1 des Spulenrechners zum Vorgänger ist die erweiterte Info-Datei. Diese enthält jetzt auch Beispiele zur Gütebestimmung in Zusammenarbeit mit dem NanoVNA (Software *nanovna-saver*).

Für das folgende Einführungsbeispiel ist noch kein VNA erforderlich, sodass Du Dich zunächst voll auf die Bedienung des Spulenrechners konzentrieren kannst:

Beispiel 1 - Fastron-SMCC-Drossel $47\mu\text{H}$

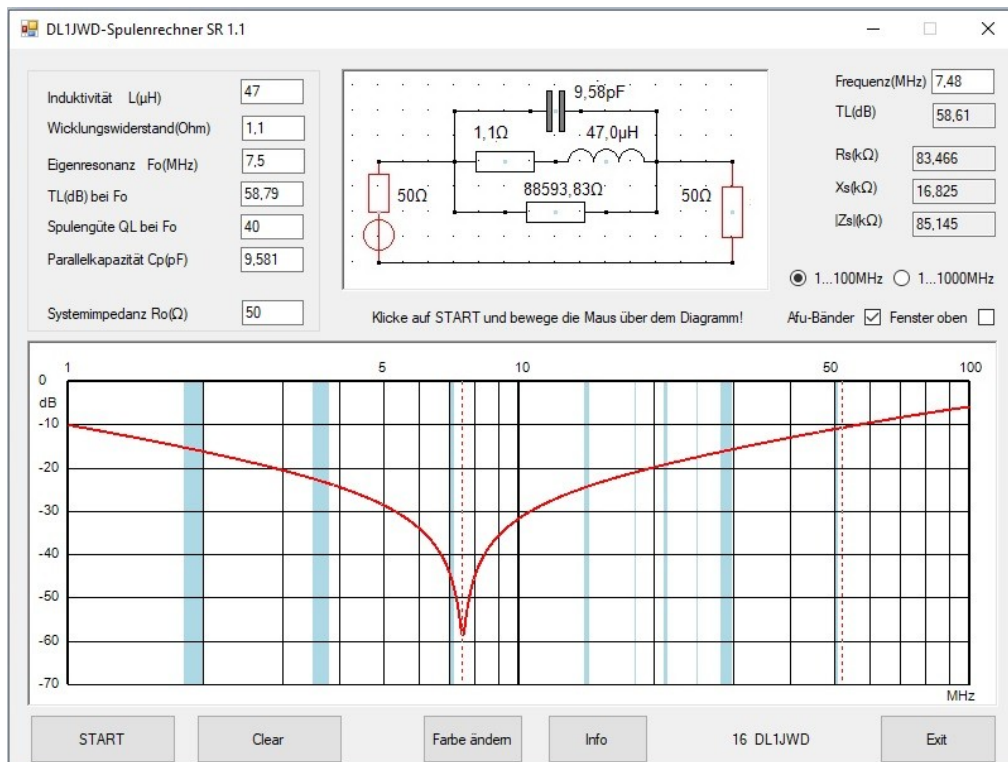
Für Breitbandverstärker benötigt man HF-Drosseln. Diese müssen i.d.R. eine gegenüber 50Ω deutlich erhöhte Sperrimpedanz haben.

Wie groß sind Scheinwiderstand und Sperrdämpfung der Fastron $47\mu\text{H}$ -Drossel auf den klassischen Amateurfunkbändern?



- Gib die Werte für die Induktivität L ($47\mu\text{H}$) und für die Resonanzfrequenz F_0 (7,5MHz) lt. Datenblatt ein.

- Der Wert für die Parallelkapazität (9,6pF) wird automatisch ergänzt. Genau so gut könnte man aber auch zuerst C_p eingeben (falls bekannt) und sich dann F_o anzeigen lassen.
- Der Gleichstromwiderstand der Wicklung beträgt lt. Datenblatt 1,1Ohm, die genaue Größe ist aber i.d.R. vernachlässigbar gering und deshalb für unsere Szenarien bedeutungslos.
- Für den Gütefaktor gibt der Hersteller den Wert 40 an.
- Alle Eingaben sind mit der ENTER-Taste abzuschließen (die gelb gefärbten Felder sollen daran erinnern).
- Für die Sperrdämpfung TL(dB) bei Resonanz hat der SR bereits automatisch den von QL abhängigen Wert (58,8dB) berechnet und eingetragen.
- Nach Klick auf den "START"-Button erscheint der Übertragungsfrequenzgang, wobei sofort das Dämpfungsmaximum bei 7,5MHz ins Auge springt.
- Mittels Maus kannst Du jetzt das Frequenzlineal bewegen, wobei die laufenden Werte für Frequenz, Sperrdämpfung und Impedanz angezeigt werden:



Oberhalb der Resonanzfrequenz wechselt das Vorzeichen von X_s , denn die Spule wirkt dann nur noch als verlustbehaftete Kapazität und die Sperrdämpfung geht mit weiter wachsender Frequenz immer mehr verloren.

f (MHz)	1,8	3,65	7,1	14,1	21,5	28,5	50
Z (Ohm)	563	1400	20000	1600	878	625	340
TL (dB)	15	23	46	25	19	16	11

Hinweise:

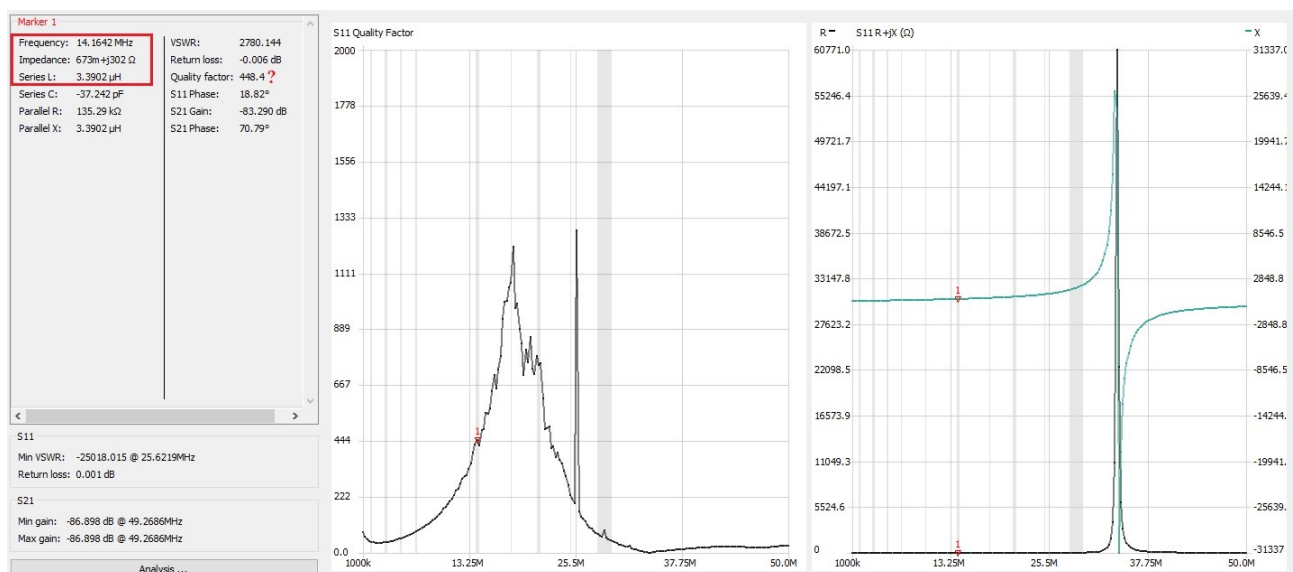
- Eine präzisere Einstellung als mit der Maus gelingt, wenn Du die Frequenz direkt eingibst (Abschluss mit ENTER nicht vergessen!). Dann rückt das Frequenzlineal automatisch an die entsprechende Stelle im Diagramm und alle Daten können sofort abgelesen werden.
- Die Lage der AFU-Bänder lässt sich durch hellblaue senkrechte Streifen hervorheben.

Beispiel 2 - Gütemessung einer Induktivität

Die Güte einer Spule, d.h. das Verhältnis Blind- zu Verlustwiderstand ist vor allem bei Schwingkreisberechnungen von Bedeutung. Besonders gilt dies für Filter die auch im Sendebetrieb genutzt werden, denn hier muss man mit jedem Zehntel-DB geizen (Zerstörung durch Überhitzung).

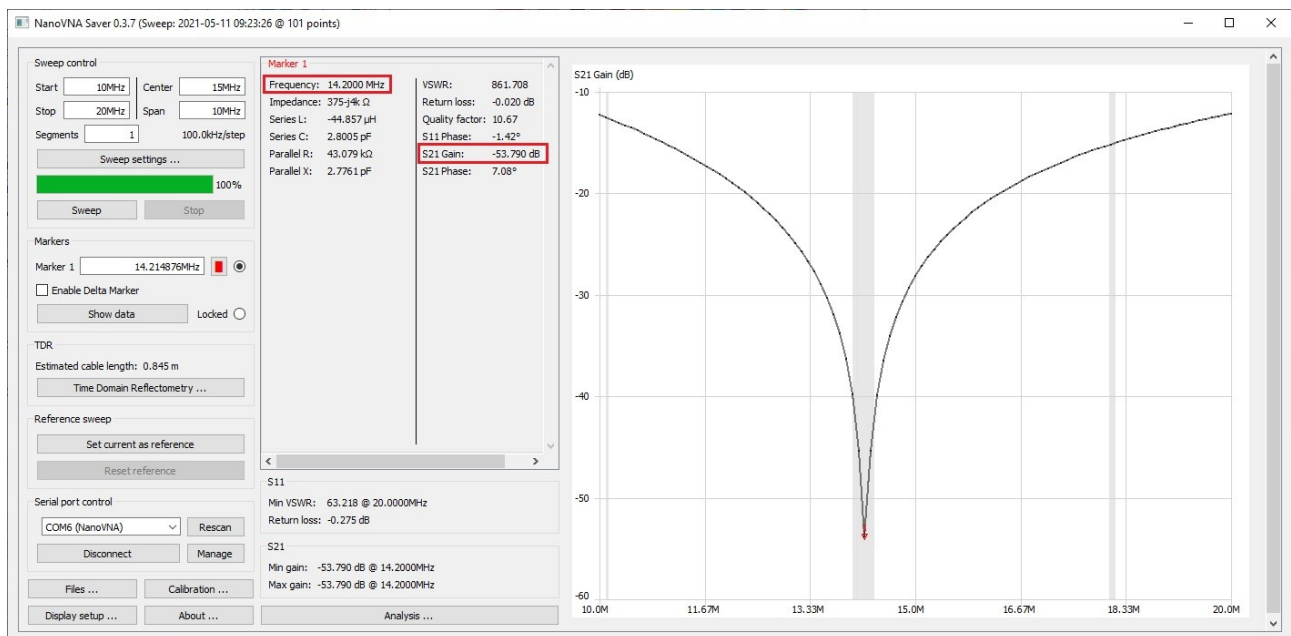
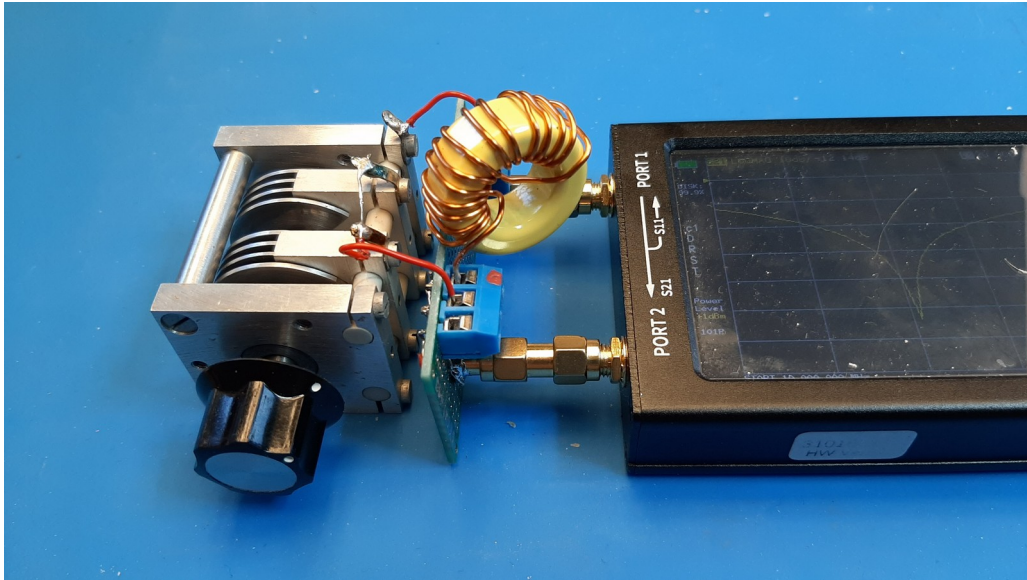
Wie groß ist die Güte einer mit 15 Wdg CuL ($d=1\text{mm}$) auf einen Pulvereisenringkern T 106-6 gewickelten $3,4\mu\text{H}$ -Induktivität bei $14,2\text{MHz}$?

Versuche es zunächst mit einer Messung der Reflexion (Port1):



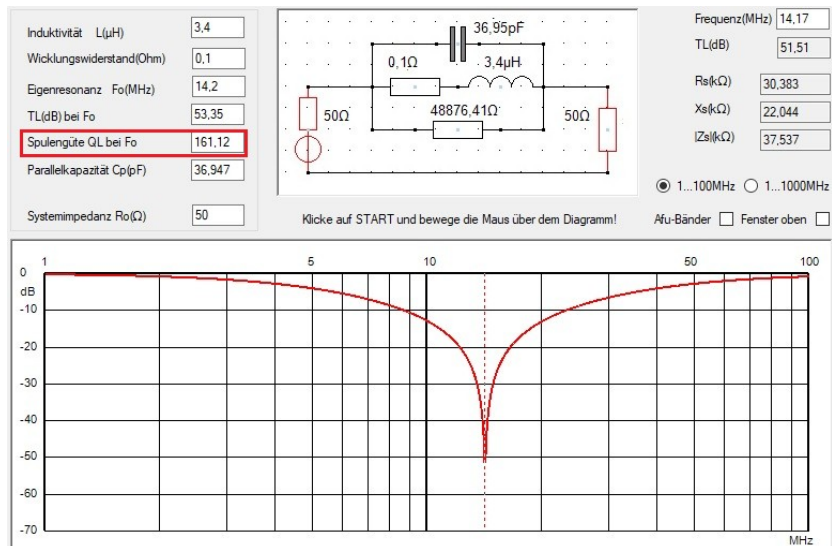
Zwar wird die Impedanz $R+jX$ ($L = 3,4\mu\text{H}$) richtig angezeigt, der frequenzabhängige Verlauf der Spulengüte (Quality Factor) trägt allerdings nicht zur Erleuchtung bei, da die Kapazität der kurzen Messleitung das Ergebnis total verfälscht. Ein Wert größer 400 für einen Pulvereisenringkern bei 14MHz? Absolut utopisch! Parallelresonanz bei ca. 35MHz? Viel zu niedrig!

Mehr Erfolg als die Gütebestimmung über eine Reflexionsmessung (S11) verspricht die Messung der Transmission (S21) bzw. Durchgangsdämpfung. Dazu wird der Spule ein 100pF-Luftdrehko parallel geschaltet und auf Resonanz abgestimmt.



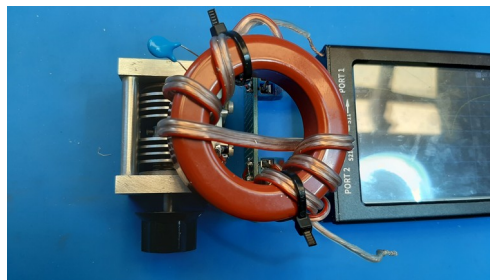
Die nachfolgende Gütebestimmung übernimmt der Spulenrechner, dieser braucht dafür die Messwerte des NanoVNA für Resonanzfrequenz (14,2MHz) und Durchgangsdämpfung (53,4dB).

Als Ergebnis wird ein realer Gütefaktor von ca. 160 angezeigt:



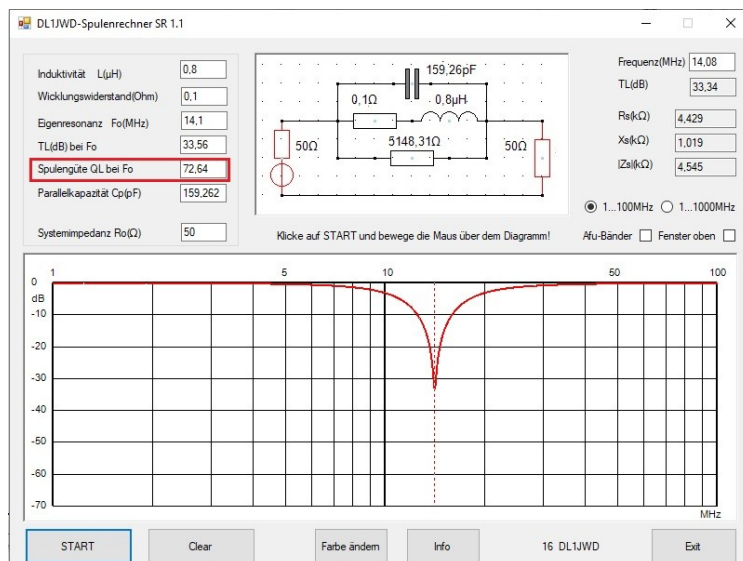
Beispiel 3 - Potter-Balun als Mantelwellensperre

Um den Wirkungsgrad des Mantelwellendipols nach HB9XBG zu beurteilen muss die Güte des auf Pulvereisenkern T 225-2 mit Lautsprecherkabel gewickelten so genannten Potter-Baluns bekannt sein ($6 \text{ Wdg.} = 0,8\mu\text{H}$).



Mittels Transmissionsmessung (S21 Gain) wird mit dem Drehko Resonanz auf 14,1MHz eingestellt und dazu die Durchgangsdämpfung (33,6dB) abgelesen.

Nach Eingabe dieser Werte in den Spulenrechner zeigt dieser die Güte $QL = 72,64$ an:



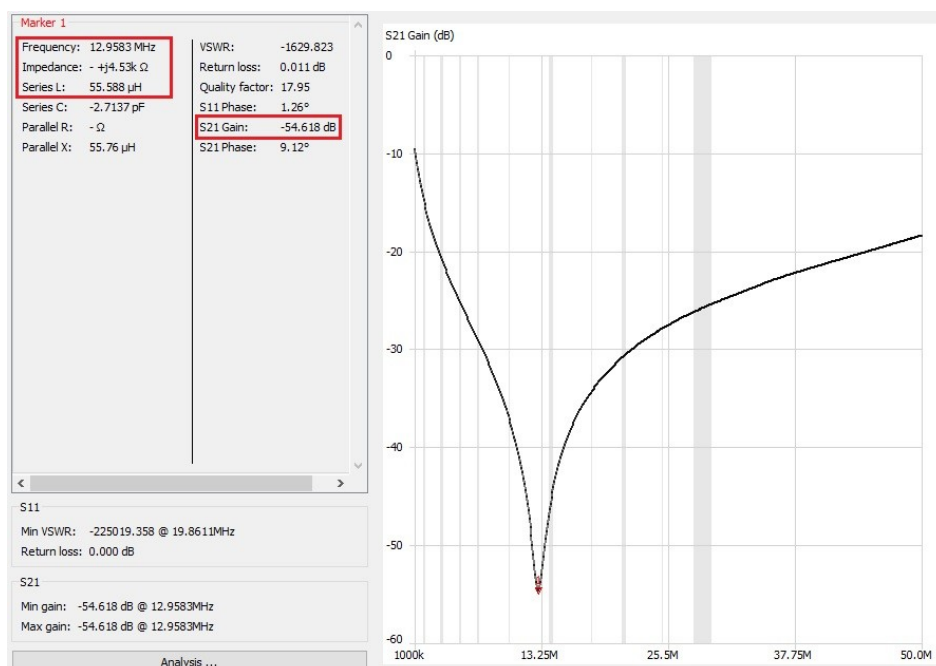
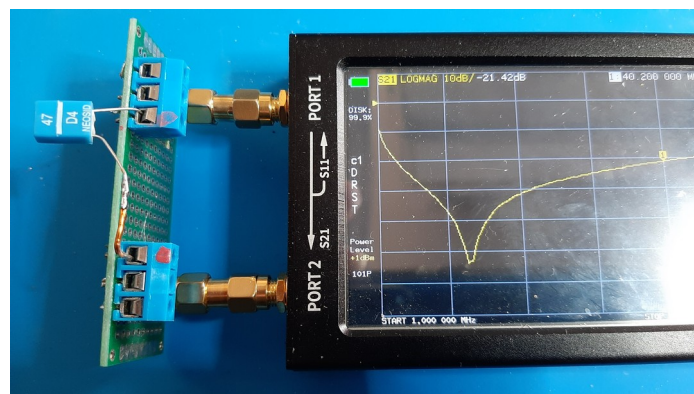
Beispiel 4 - 47µH-Neosid SDS-Drossel

Bei Ebay stieß ich auf diese Drossel mit einer garantierten Parallelresonanz von mindestens 12MHz und einem Stückpreis von nur 10Cent. Um festzustellen, dass dies eine preisgünstige Alternative zur Fastron-Drossel (Beispiel 1) sein könnte, war folgende Frage zu beantworten:

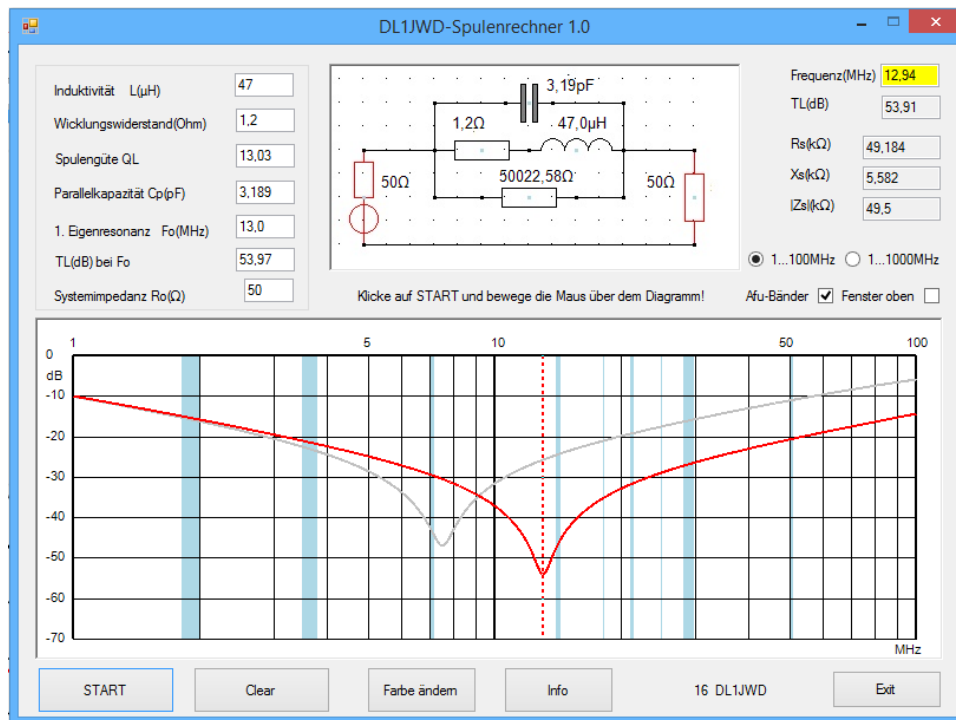
Wie groß sind Scheinwiderstand und Sperrdämpfung der 47 μ H-Neosid SDS-Drossel auf den klassischen Amateurfunkbändern?



Die Drossel wird auf kürzestem Weg zwischen den Mittelanschlüssen der beiden SMA-Buchsen des *NanoVNA* angeschlossen und der Dämpfungsverlauf (S21 Gain) über den gesamten KW-Bereich gewobbelt:



Aus dem Dämpfungsverlauf lässt sich die Resonanzfrequenz 13MHz ablesen, an dieser Stelle beträgt die Durchgangsdämpfung (S21 Gain) ca. 55dB.
Beide Werte gebe ich in den Spulenrechner ein, die Spulengüte QL=13 wird automatisch ergänzt.



Zu Vergleichszwecken ist die Kurve der Fastron-Drossel, wie sie z.B. auch im NORTON-Verstärker der QRP-AG zum Einsatz kommt, in grauer Farbe hinterlegt.
Man erkennt, die deutliche Überlegenheit der Neosid-Drossel.

Hinweise:

- Der SR ermöglicht das Überlagern von Diagrammen, wenn man auf "Clear" verzichtet. Zwecks besserer Unterscheidbarkeit kann man vor Aufnahme einer weiteren Kurve den Button "Farbe ändern" klicken.
- Für Frequenzen weit oberhalb der ersten Parallelresonanz kann das Tool in vielen Fällen nur ungenaue bzw. unbrauchbare Werte liefern, da weitere Spulenresonanzen unberücksichtigt bleiben.

Messtechnische Überprüfung der Simulation

Die Durchgangsdämpfung der Neosid-Drossel habe ich mit dem *NanoVNA* für einige wichtige Frequenzen gemessen und mit den vom Spulenrechner ermittelten Werten verglichen.

F(MHz)	1,8	3,65	7,1	14,1	21,5	28,5	50
NVNA-Messung	14dB	20dB	27,5dB	45dB	32dB	27,5dB	21dB
Spulenrechner	14,9dB	21,4dB	29,1dB	46,5dB	33,3dB	28,5dB	21,5dB

Beispiel 5 - Mantelwellensperre

Zur Unterdrückung von Mantelwellen und Störeinstrahlungen ist es üblich, in das 50Ohm-Antennenkabel des Trx einen 1:1-Strombalun einzuschleifen.

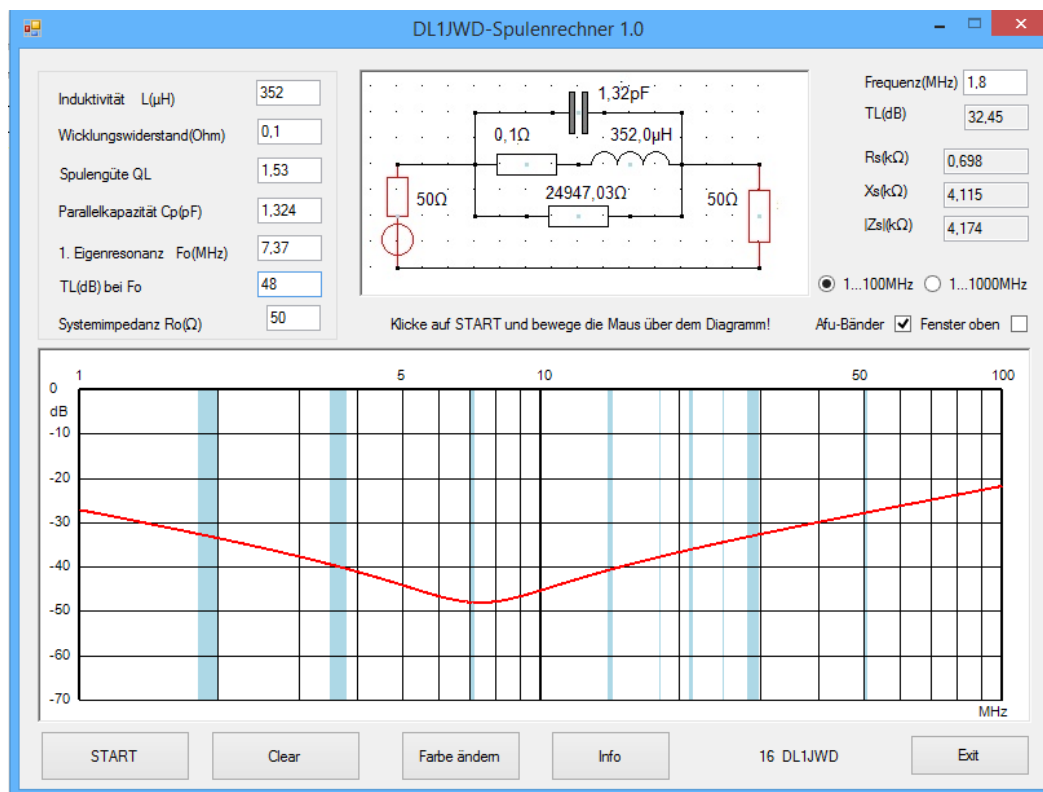
Meiner besteht aus 24Wdg dünnem Koaxkabel RG316U, die ich auf den größten in der Bastelkiste auffindbaren Ferrit-Ringkern (AD=56mm, ID=35mm, H=12mm) gewickelt habe.

Die niederfrequente Induktivitätsmessung ergibt $352\mu\text{H}$, der Gleichstromwiderstand ist geringer als $0,1\text{Ohm}$.



Mit dem *NanoVNA* messe ich die erste Parallelresonanz bereits bei 7,37MHz, die entsprechende Durchgangsdämpfung beträgt 48dB.

Der SR bestätigt den gemessenen Dämpfungsverlauf (Abweichungen kleiner 10%) und zeigt, dass im KW-Bereich (1,8...30MHz) ein akzeptabler Wert von besser 30dB erreicht wird:



Messwerte einiger handelsüblicher Drosseln

Die folgenden Daten, gemessen mit einem *NanoVNA*, kannst Du direkt in den SR eingeben und als Ausgangsbasis für die Berechnung der Übertragungsdämpfung bei den verschiedensten KW-Frequenzen nutzen.

Typ / Beschreibung	L(μ H)	1. Eigenresonanz	
		Fo(MHz)	TL(dB)
100μH-Drossel L-11PHC (kleiner schw. Topf) sauberer Verlauf, 2. Resonanz nicht in Sicht	100	4,5	57
100μH-SMD-Drossel LQH3C (winziger schw. Kern m. schwierigen Lötflächen) Cp=2pF; 100mA; 17Cent Reichelt	100	11	56
TLC 0,1A Ringkern 100μH AD=1cm, ca. 70Wdg; Cp=0,78pF	100	18	34
Fastron-SMCC-Drossel 47μH (NORTON-V.) ab 28MHz unbrauchbar, 2.Eigenresonanz 31MHz!	47	7,2	49
Stabkern-Entstördrossel L-5RCC 10μH (D=5mm, L=20mm, n=28 m. 0,6CuL) für UKW geeignet, Cp=0,08pF? 2,6€ Conrad	10	180	66
Neosid SDS-Drossel 10μH (blau, RM5; 0,7A; 12 Cent)	10	43	47
2 Neosid SDS-Drosseln 10μH in Serie	20	43	66
Neosid SDS-Drossel 47μH (0,48A) ebay 100Stck. 9,90€	47	12 (13)	54
Neosid 10μH + 47μH in Serie (lohnt nicht!)	57	13	54

Eigenresonanzen im S21-Modus des VNA bestimmen, S11-Mode ist total ungeeignet, da Zuleitungen große Rolle spielen!

Favorit für NORTON im KW-Bereich ist 47 μ H -Festinduktivität (SMD oder Neosid), Fo allerdings 15MHz; ansonsten Neosid 10 μ H in Serie (Fo=43MHz!)

Ferrit-Stabkern-Drosseln habe mit Abstand höchste Eigenresonanzen (teuer), zweilagige Wicklung senkt Eigenresonanz dramatisch

Daten von Neosid-Drosseln

NEOSID

Sd75 Nenninduktivität

Kennzeichnung

Die Drosseln sind bedruckt mit der Induktivität in μH bzw. oberhalb von 1000 μH mit dem Multiplikator "k" für mH.

Produktionsdaten nach EN 60062.

Induktivität bei $+23^\circ\text{C}$, 50 mV am Messobjekt und Frequenz wie angegeben.

Güte Q, Resonanzfrequenz f_{res} sind Richtwerte. Maximaler Strom I_{max} gilt für eine Umgebungstemperatur von $\vartheta_u = 40^\circ\text{C}$. Höhere Umgebungstemperaturen erfordern Reduzierung des Stromes entsprechend den Kurven auf Seite 2.06.

L $\pm 10\%$ [μH]	bei f [kHz]	Q \geq	bei f [MHz]	$f_{\text{res}} >$ [MHz]	$R \leq$ [Ω]	I_{max} [mA]	Art.-Nr. part number
0,1	1000	70	50	600	0,15	800	00 6122 86
0,12	1000	80	50	560	0,15	800	00 6122 87
0,15	1000	80	50	470	0,2	800	00 6122 88
0,18	1000	80	50	420	0,2	800	00 6122 89
0,22	1000	80	50	380	0,2	800	00 6122 90
0,27	1000	80	50	320	0,25	800	00 6122 91
0,33	1000	80	50	290	0,25	800	00 6122 92
0,39	1000	75	50	260	0,25	800	00 6122 93
0,47	1000	75	50	230	0,3	800	00 6122 94
0,56	300	45	20	210	0,35	800	00 6122 95
0,68	300	45	20	185	0,35	800	00 6122 96
0,82	300	45	20	165	0,4	800	00 6122 97
1	300	55	5	155	0,25	800	00 6122 60
1,2	300	60	5	135	0,3	800	00 6122 75
1,5	300	65	5	115	0,3	800	00 6122 76
1,8	300	65	5	100	0,3	800	00 6122 77
2,2	300	65	5	85	0,33	800	00 6122 78
2,7	300	70	5	75	0,33	800	00 6122 79
3,3	100	55	2	72	0,35	800	00 6122 80
3,9	100	60	2	64	0,4	800	00 6122 81
4,7	100	60	2	58	0,44	750	00 6122 82
5,6	100	65	2	51	0,46	750	00 6122 83
6,8	100	65	2	47	0,5	750	00 6122 84
8,2	100	70	2	41	0,55	750	00 6122 85

L $\pm 5\%$ [μH]	bei f [kHz]	Q \geq	bei f [MHz]	$f_{\text{res}} >$ [MHz]	$R \leq$ [Ω]	I_{max} [mA]	Art.-Nr. part number
10	100	55	1	38	0,55	700	00 6122 00
12	100	55	1	32	0,6	680	00 6122 01
15	100	60	1	27	0,7	620	00 6122 02
18	100	60	1	23	0,75	580	00 6122 03
22	100	60	1	20	0,85	560	00 6122 04
27	30	60	1	18	0,9	540	00 6122 05
33	30	60	1	16	0,95	520	00 6122 06
39	30	60	1	14	1,1	500	00 6122 07
47	30	60	1	12	1,2	480	00 6122 08
56	30	60	1	9	1,3	460	00 6122 09
68	30	60	0,5	8	1,4	440	00 6122 10
82	30	60	0,5	7	1,6	400	00 6122 11
100	30	60	0,5	6,5	1,8	380	00 6122 12
120	30	60	0,5	5,5	2	360	00 6122 13
150	30	60	0,5	4,5	2,2	340	00 6122 14
180	30	60	0,5	2,8	2,5	320	00 6122 15
220	30	60	0,5	2,5	2,8	300	00 6122 16
270	10	60	0,5	2,2	3,1	280	00 6122 17
330	10	60	0,5	2	3,4	270	00 6122 18
390	10	65	0,5	3,5	8	180	00 6122 19
470	10	70	0,5	3	9	180	00 6122 20
560	10	70	0,5	2,5	10	170	00 6122 21
680	10	70	0,5	1,5	11	150	00 6122 22
820	10	70	0,5	1,5	12	140	00 6122 23

Literatur: Für theoretische Studien zum [Gütefaktor](#) finden sich im Internet zahlreiche Quellen.