

Spulenrechner SR 2.0 und NanoVNA

Der neue SR entstand infolge eines freundschaftlichen Kontakts mit Ingo DL2AAA, der 2025 seine abenteuerliche Reise auf dem Lastenfahrrad quer durch Westeuropa unternommen hatte und dabei mit einer Antenne DP200 von Campingplätzen aus funkte.

Unmittelbares Ergebnis unseres Austauschs war das Tool "[Verkürzter Dipol](#)", welches Ingo in die Lage versetzte, für das 30m-Band optimale Verlängerungsspulen zu berechnen - deutlich verlustärmer als die vom Antennenhersteller mitgelieferten Exemplare.

Beim Vergleich der mit dem SR V1.5 ermittelten S21-Diagrammen der Verlängerungsspule mit einer entsprechenden NanoVNA-2 Port-Durchgangsmessung stellte sich aber heraus, dass die gemessenen Dämpfungswerte für Ingos Verlängerungsspule niedriger waren als die berechneten.

Mit der Version SR 2.0 wird dieser Widerspruch aufgelöst und es wird eine gute Übereinstimmung zwischen Theorie und Praxis erzielt, unabhängig davon, ob es sich um eine allein stehende Induktivität oder um einen Parallelschwingkreis handelt.

Dadurch aber ist die [Version 1.5](#) nicht obsolet geworden, sie kann weiter verwendet werden, wenn man sich auf HF-Drosseln beschränkt deren Bestimmung es ist, in einem weiten Frequenzbereich ein gutes Sperrverhalten aufzuweisen. Dazu finden sich in der Info-Datei von V1.5 mehrere gute Beispiele.

Änderungen der Version 2

- Das Programm ist speziell für den Einsatz eines NanoVNA in Verbindung mit der Software [nanovna-saver](#) konzipiert.
- Das Induktivitätsmodell hat einen neuen Parameter bekommen: **QCp**¹.
Nur durch die Einbeziehung von QCp lassen sich Theorie und Praxis in Übereinstimmung bringen, d.h., die vom Spulenrechner angezeigte Dämpfungskurve² entspricht dann in guter Näherung einer entsprechenden S21- 2 Port Messung mit dem VNA.

Man kann jetzt zwei Messmethoden einstellen:

- Im Modus "**Standalone**" wird allein die Spule gemessen, d.h., ohne zusätzliche Beschaltung mit einer Kapazität.
Damit reduziert sich die Kreiskapazität C auf die Eigenkapazität Cp der Spule, die ausschlaggebend für die Parallelresonanz Fo ist ($C = C_p$).
- Der Modus "**Parallelschwingkreis**" erfordert die zusätzliche Beschaltung der Spule mit einer verlustarmen Kapazität C, die wesentlich größer sein muss als die Eigenkapazität Cp, z.B. mit einem Luftdrehkondensator ($C \gg C_p$).
Cp muss also nahezu vollständig von C "geschluckt" werden um ein zuverlässiges Ergebnis für QL zu erhalten. Die Resonanzfrequenz des Schwingkreises wird damit deutlich unterhalb der Eigenresonanz der Spule liegen.

1 Der Parameter QCp wurde auch in das "L"-Modell des neuen KNWA 4.0 („Kleiner Netzwerkanalysator“) übernommen, sodass die S21-Diagramme beider Tools jetzt deckungsgleich sind.

2 Die Abkürzung "Dämpfungskurve" ist hier und im Folgenden die etwas saloppe Bezeichnung für den Frequenzgang der Vorwärtstransmission S21 mit umgekehrtem (positiven) Vorzeichen. In der Software *nanovna-saver* entspricht das dem Parameter *-S21 Gain*.

- Für eine ausreichend genaue Bestimmung der Leerlaufgüte QL wird empfohlen:
 $C \approx 100 * C_p$
- Die abzugleichende Resonanzfrequenz ergibt sich daraus zu:
 $F_1 \approx 0,1 * F_0$

Ein- und Ausgabe

- **L(μH)**
Hier wird, wie gehabt, die mit einem herkömmlichen LC-Messgerät bei niedrigen Frequenzen ermittelte Induktivität der Spule eingetragen.

Standalone

Beide Eingaben beziehen sich auf die Messergebnisse bei unbeschalteter Spule (Modus *Standalone*). Dabei gilt $C = C_p$. d.h., die Kreiskapazität entspricht der Eigenkapazität der Spule.

- **Fo(MHz)**
Eingabe der mit dem VNA gemessenen ersten Parallelresonanz der Spule.
- **dBo**
Eingabe der mit dem VNA gemessenen Sperrdämpfung der Spule bei Resonanz.

Der Standalone-Modus entspricht also vollständig der bereits bekannten Arbeitsweise mit der Version 1.5 des SR.

Parallelschwingkreis

Wenn das Kontrollkästchen ein Häkchen hat werden zwei weitere Eingabefelder sichtbar, die sich auf eine zusätzliche Messung beziehen, bei der eine hochwertige Kapazität (Luftdrehko) der Spule parallel geschaltet wird (Modus *Parallelschwingkreis*).

- **F1(MHz)**
Eingabe der Resonanzfrequenz des Parallelschwingkreises die mit dem Drehko so eingestellt wird, dass sie deutlich unterhalb der Eigenresonanz F_0 liegt.
- **dB1**
Eingabe der bei F1-Resonanz gemessenen Dämpfung.

Ergebnisanzeige

Wenn du nach Abschluss aller Eingaben auf "START" klickst wird die Dämpfungskurve angezeigt und es erscheinen die folgenden vom Programm berechneten Spulenparameter:

- **Cp**
Parallelkapazität
- **QL**
Gütefaktor von L
- **QCp**
Gütefaktor von Cp

Wenn du lediglich am frequenzabhängigen Dämpfungsverlauf, z.B. einer HF-Drossel, interessiert bist, genügt der Modus *Standalone*, du deaktivierst also das Kontrollkästchen und brauchst dann nur noch die Messergebnisse für F_0 und dBo einzutragen.

Nach Klick auf START wird Cp angezeigt.

Anstelle der Spulengüte QL erscheint jetzt nur die Kreisgüte Q, deren Aufteilung in QL und QCp unbekannt bleibt.

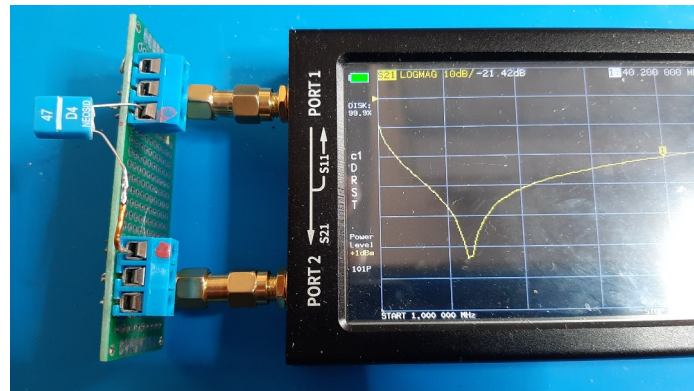
Beispiel 1 - 47 μ H-Neosid SDS-Drossel

Für diese in Amateurkreisen beliebte HF-Drossel wollen wir die Leerlaufgüte QL sowie die Parallelkapazität Cp und deren Gütefaktor ermitteln.

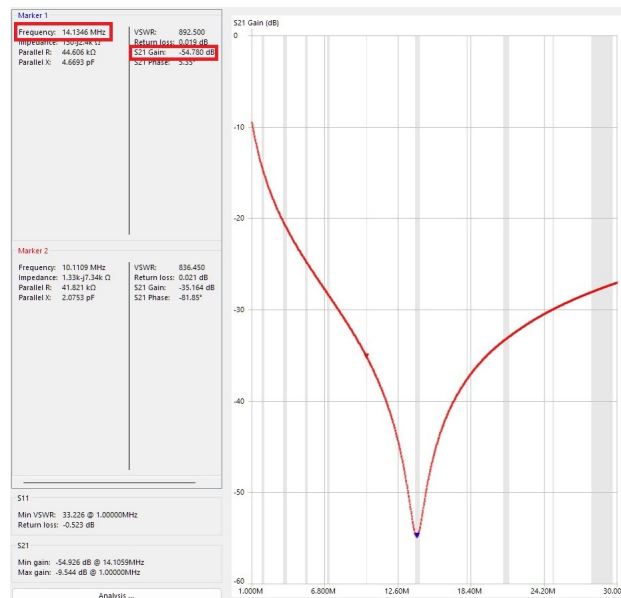
Die Überprüfung mit einem einfachen LC-Messgerät ergibt 47,2 μ H.

Standalone

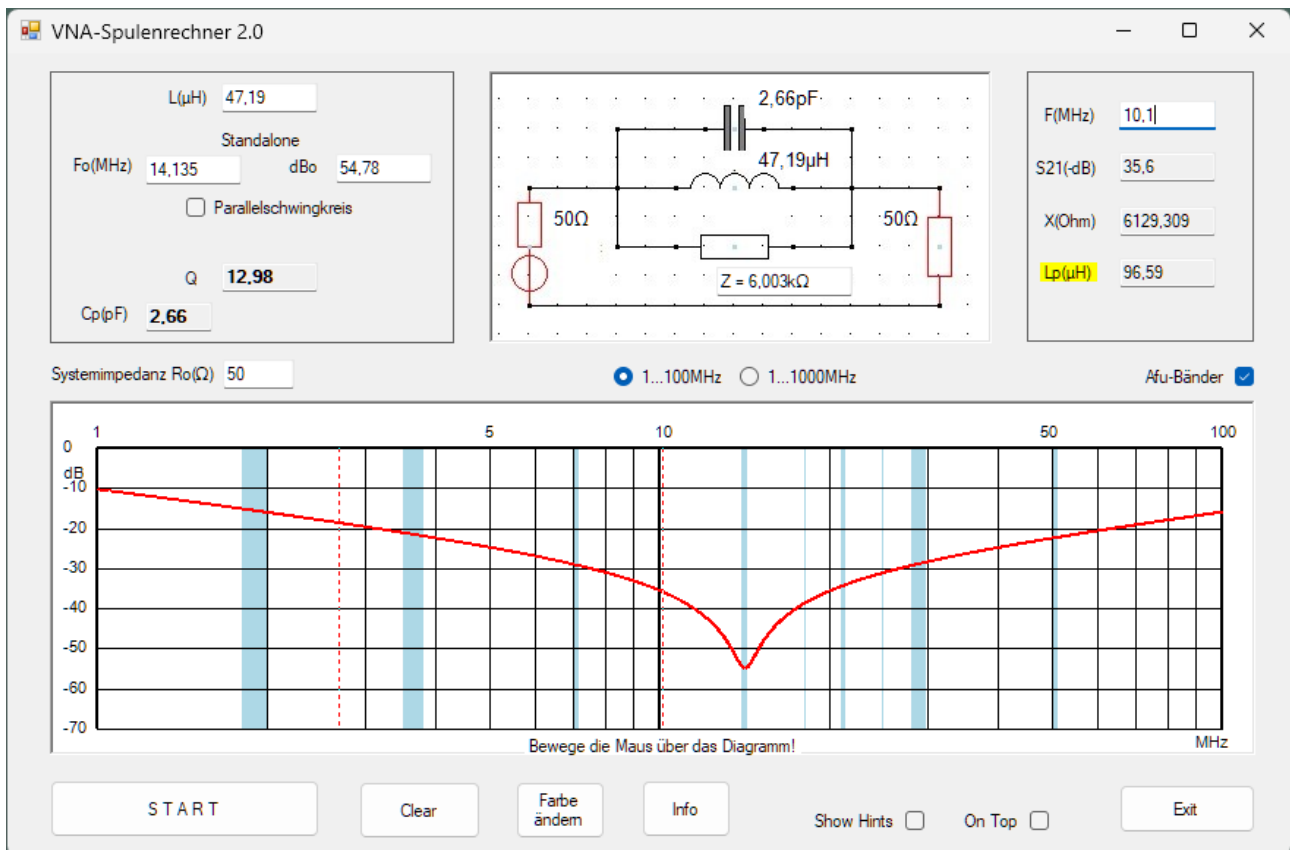
Die Drossel wird auf kürzestem Weg zwischen den Mittelanschlüssen der beiden SMA-Buchsen des NanoVNA angeschlossen und der Dämpfungsverlauf (S21 Gain) über den gesamten KW-Bereich gewobbelt:



Aus dem Dämpfungsverlauf lässt sich die Resonanzfrequenz 14,135MHz ablesen, an dieser Stelle beträgt die Durchgangsdämpfung (S21 Gain) 54,78dB:



Im *Standalone*-Modus (Kontrollkästchen deaktivieren), tragen wir die gemessenen Werte ein und klicken auf START:



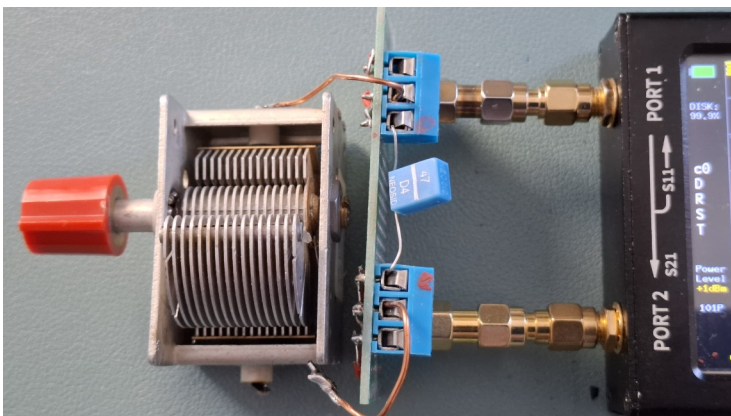
Der *Standalone*-Modus hat die Größe der Parallelkapazität $C_p = 2,66\text{pF}$ und den Wert der Kreisgüte Q ca. 13 geliefert³.

Um aber auch noch Q in seine Bestandteile Q_L und Q_{Cp} zu zerlegen muss eine zweite Messung vorgenommen werden, diesmal im Modus *Parallelschwingkreis*.

Parallelschwingkreis

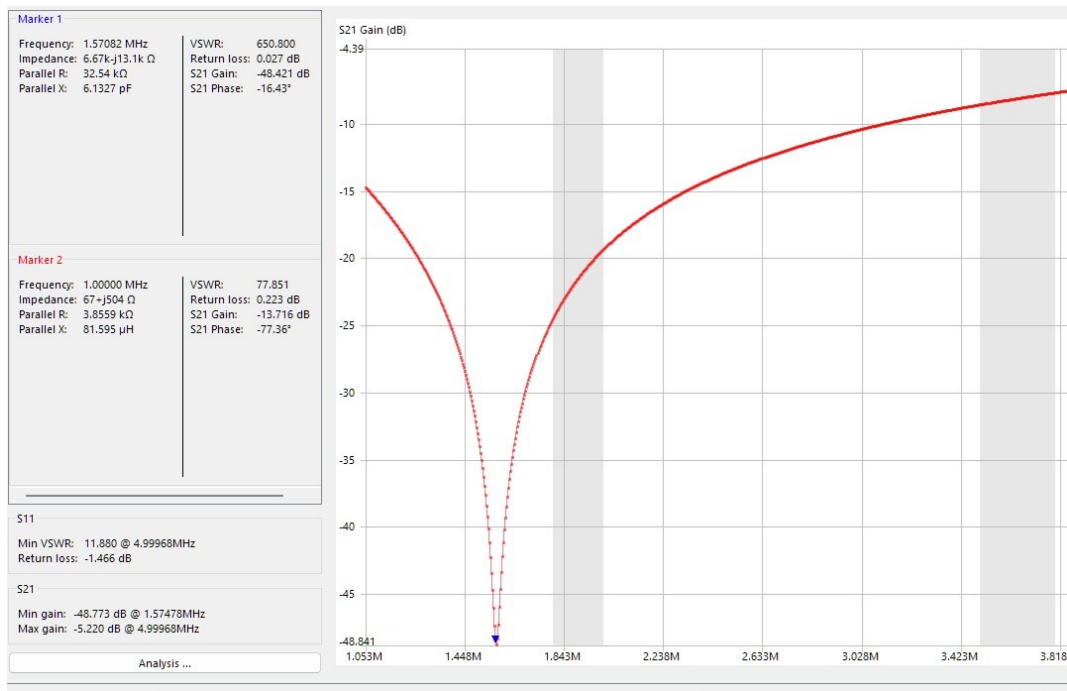
Wie bereits begründet, sollte in diesem Modus die Kreiskapazität C mindestens um den Faktor 100 größer sein als die Eigenkapazität C_p der Spule, d.h., $C \approx 2,66\text{pF} * 100 \approx 250\text{pF}$.

Zur Drossel wird ein 500pF-Luftdrehko parallel geschaltet:



³ Dasselbe Ergebnis liefert auch die Version V1.5 des Spulenrechners.

Während der laufenden S21-Messung stimmen wir mit dem Drehko die Resonanz auf die Frequenz $F1 \approx 0,1F_0$ ab (hier 1,57MHz) und notieren die zugehörige Dämpfung dB1:



Im Spulenrechner wird der Modus "Parallelschwingkreis" eingeschaltet und man trägt $F1$ und die dazu gemessene Durchgangsdämpfung $\text{dB1} = 48,85\text{dB}$ ein.

Nach Klick auf START werden die gesuchten Größen von $QL \approx 60$ und $QCp \approx 16,6$ angezeigt:

L (μH)	47,19
Standalone	
Fo (MHz)	14,135
dBo	54,78
<input checked="" type="checkbox"/> Parallelschwingkreis	
F1 (MHz)	1,57
dB1	48,85
QL	59,49
Cp (μF)	2,67
QCp	16,64

An der Dämpfungskurve hat sich nichts geändert, denn wie jeder selbst nachrechnen kann ergibt die quasi "Parallelschaltung" und QL und QCp ziemlich genau den Wert der im Standalone-Modus ermittelten Gesamtgüte $Q \approx 13$.

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.
- In das Anzeigefeld für die Frequenz (rechte obere Fensterecke) kann man auch direkt einen Wert eingeben (Feld wird gelb) und mit ENTER abschließen. Das Frequenzlineal rückt dann automatisch an die richtige Stelle und die Anzeige der lfd. Werte wird aktualisiert.

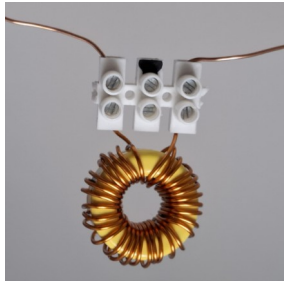
Beispiel 2 - Verlängerungsspule für Kurzdipol

Für das 30m-Band verwende ich einen verkürzten Unterdach-Dipol.

Jede Verlängerungsspule hat einen Wert von $13,84\mu\text{H}$, ermittelt mit dem Tool "28_Kurzdipol".

In der Bastelkiste fanden sich noch zwei gelbe Amidon-Ringkerne T106 - 6 ($AL = 11,6 \text{ nH/N}^2$). Zur Realisierung von $13,84\mu\text{H}$ wären also $\text{Sqrt}(13,84 / 0,0116) = 34,5$ Windungen erforderlich gewesen.

Auf jeden Ringkern passten allerdings nur 32 Wdg (1mm **CuL**), was lt. LC-Messgerät einen Wert von nur ca. $12\mu\text{H}$ ergibt.



Glücklicherweise ist hier die tatsächlich wirksame Induktivität etwas größer, um sie genau zu berechnen braucht man zunächst die Größe der ersten Parallelresonanz.

Erste Messung (Standalone)

Die Parallelresonanz der unbeschalteten Spule liegt bei F_0 ca. 30 MHz, was leicht über eine S21-Messung mit dem NanoVNA ermittelt werden kann, die entsprechende Durchlassdämpfung d_{Bo} liegt bei ca. 53,7dB.

Aus $F_0 = 30\text{MHz}$ folgt eine Parallelkapazität $C_p = 2,34\text{pF}$ und ein Gütefaktor $Q = 21,26$, der sich aus Q_L und Q_{Cp} zusammensetzt.

Zweite Messung (Parallelschwingkreis)

Um für die Q_L -Messung die Bedingung $C \gg C_p$ zu erfüllen, sollte die Kreiskapazität C ca. 100mal größer sein als die Eigenkapazität $C_p = 2,34\text{pF}$ der Spule. Es müssen also ca. 200pF parallel geschaltet werden.

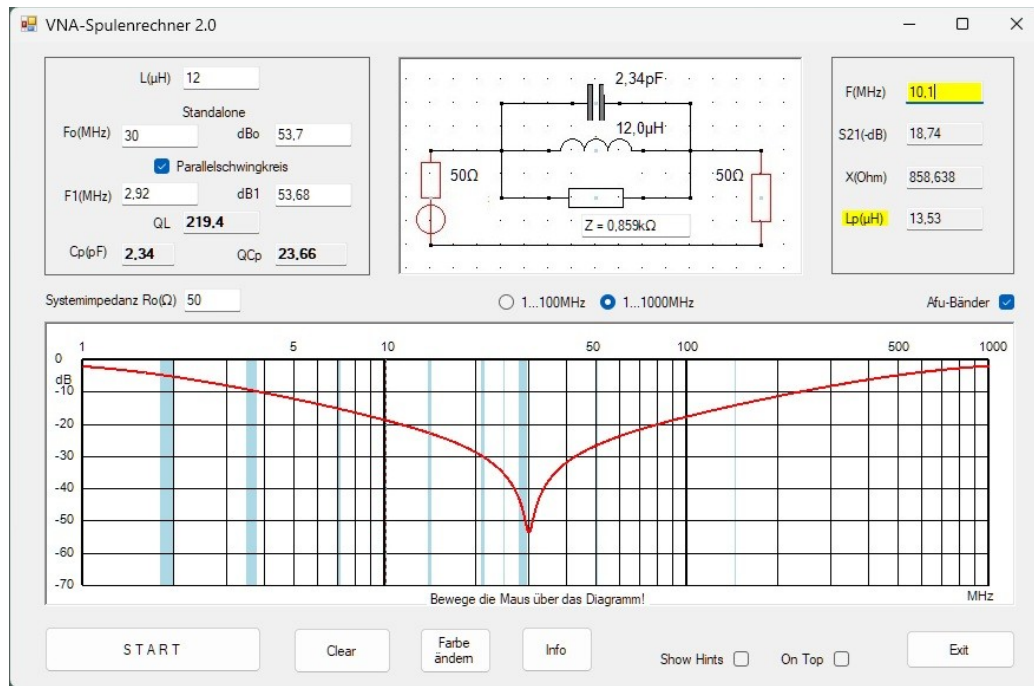
Wieder verwenden wir dazu unseren 500pF -Luftdrehko und starten eine erneute S21-Messung. Wir regeln die sehr spitze Resonanz vorsichtig auf etwa $F_1 \approx 1/10 * F_0 = 2,92\text{MHz}$ und lesen den zugehörigen Wert für S21 ab: $d_{B1} = 53,68\text{dB}$.

Spulenrechner

Die Ergebnisse beider NanoVNA-Messungen können nun in den SR eingetragen werden. Nach Klick auf START wird das Ergebnis präsentiert:

Die Leerlaufgüte erreicht den Wert von Q_L ca. 220, was etwa den Herstellerangaben entspricht. Der Gütefaktor der Parallelkapazität $C_p = 2,34\text{pF}$ wird mit Q_{Cp} ca. 23,66 ermittelt.

Rechts kann die bei $10,1\text{MHz}$ wirksame Induktivität $L_p = 13,53\mu\text{H}$ abgelesen werden. Diese liegt nahe an dem für die Verlängerungsspule benötigten Wert von $13,84\mu\text{H}$.



Bemerkungen

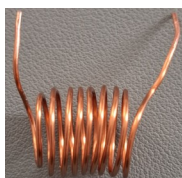
- Bewegst du mit der Maus das Frequenzlineal über das Diagramm wirst du feststellen, dass die wirksame Induktivität L_p unterhalb der Parallelresonanz rasant ansteigt und oberhalb der Resonanz ihren induktiven Charakter verliert und zur Kapazität wird.
- Je weiter F_1 an F_0 heranrückt desto stärker wird der Einfluss ihrer Parallelkapazität C_p und deren Güte Q_{Cp} auf die Leerlaufgüte Q_L . Um Q_L genau zu bestimmen muss F_1 deshalb möglichst weit unterhalb F_0 gewählt werden.
- Ohne Einbeziehung von Q_{Cp} in das Berechnungsmodell ergäbe sich in diesem Beispiel eine gegenüber der VNA-Messung viel zu hohe maximale Durchgangsdämpfung von ca. 71 dB.

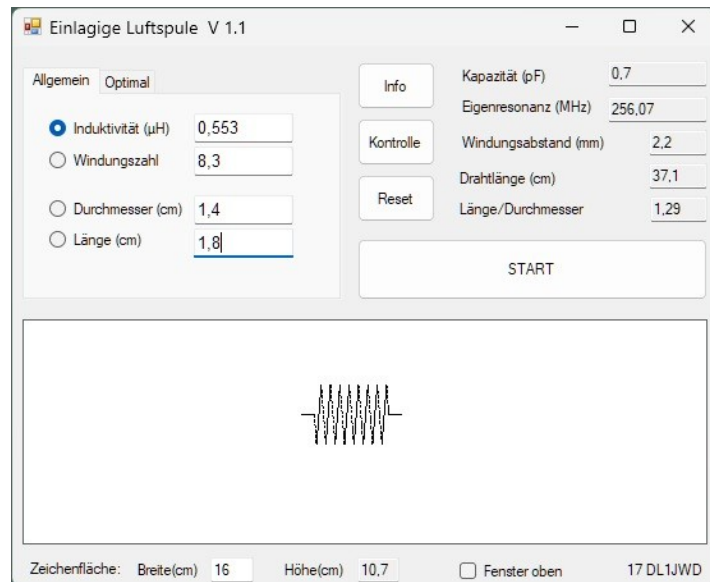
Beispiel 3 - Luftspule

Für eine Anpassglied im oberen KW-Bereich soll eine $0,55\mu\text{H}$ Luftspule aus 1mm dicken CuL-Draht hergestellt werden. Der Wickelkörper hat einen Durchmesser von 1,8cm.

Mit dem Tool "[17 Luftspule](#)" lassen sich Windungszahl und Wicklungslänge bequem ermitteln.

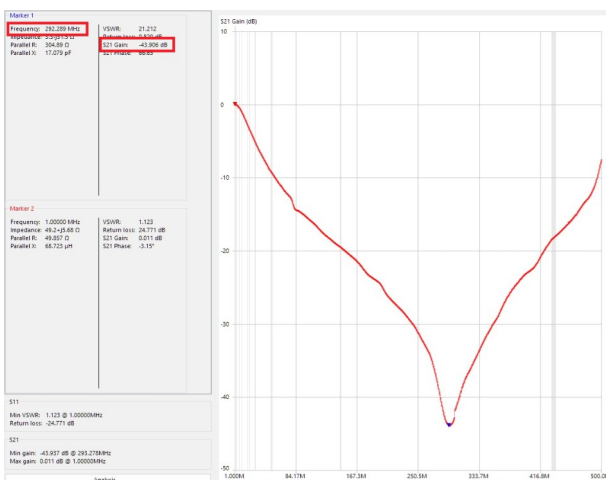
Nach Fertigstellung der Spule kann mit einem einfachen Induktivitätsmessgerät durch Auseinander- bzw. Zusammendrücken der Windungen der Wert auf $0,55\mu\text{H}$ abgeglichen werden.



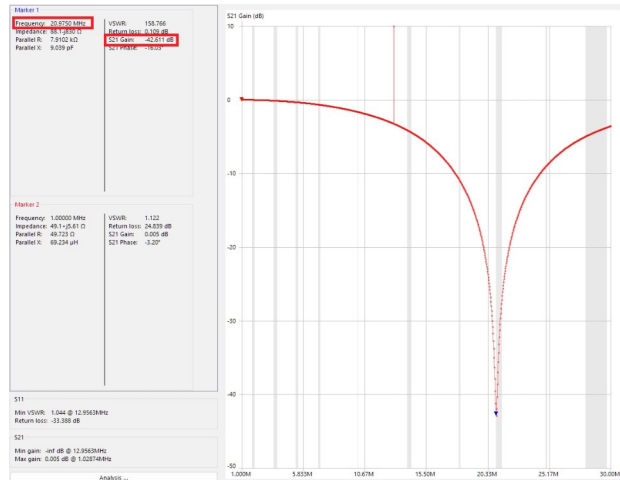


Um die weiteren Spulenparameter mit dem SR zu ermitteln zu können sind vorher mit dem NanoVNA die obligatorischen zwei Messungen durchzuführen.

Standalone



Parallelschwingkreis

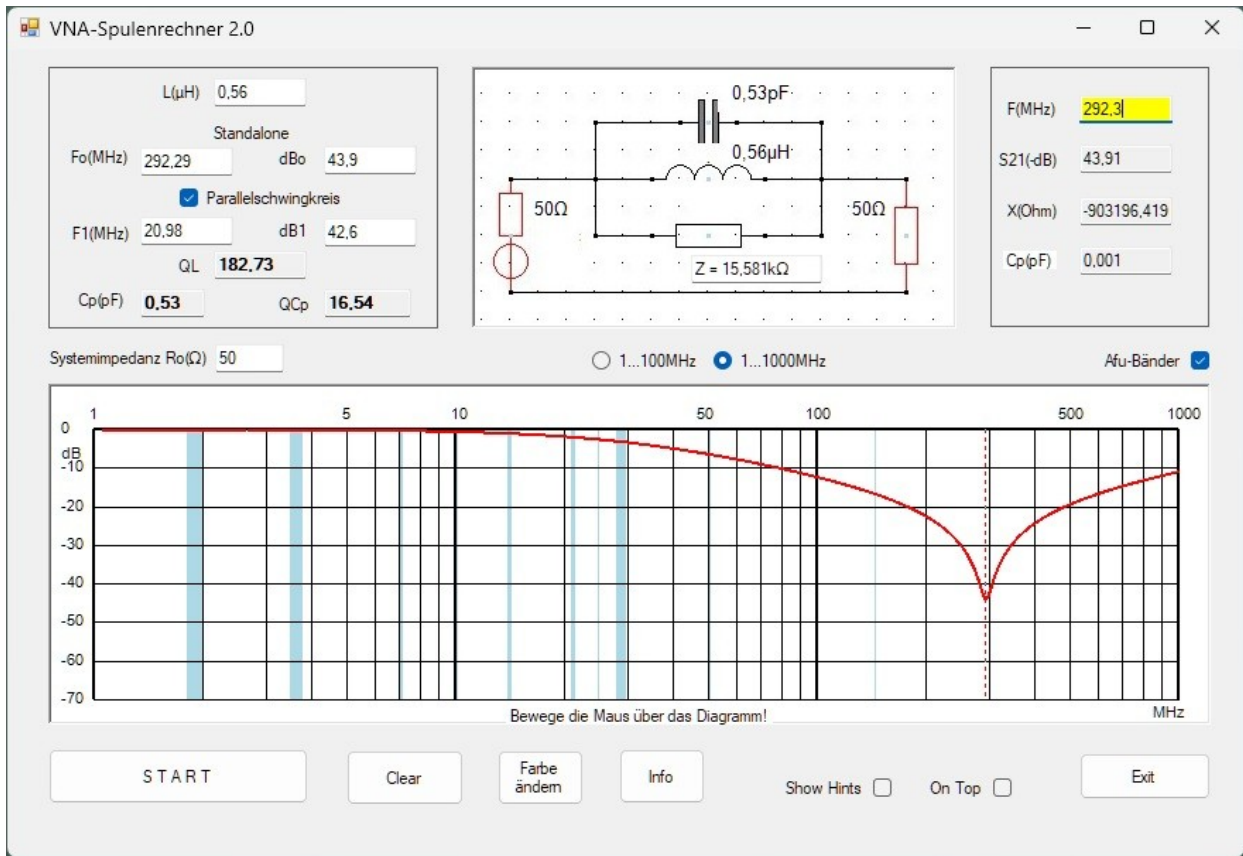


Die aus beiden Diagrammen abzulesenden Werte sind

$F_0 = 292,29\text{MHz}$, $\text{dBo} = 43,9\text{dB}$, $F1 = 20,98\text{MHz}$ und $\text{dB1} = 42,6\text{dB}$.

Alle vier werden in den SR eingegeben, der nach START den Dämpfungsverlauf und die Spulendaten präsentiert:

$QL = 182,73$, $C_p = 0,53\text{pF}$ und $QC_p = 16,54$



Zusammenfassung

Den Umgang mit dem Programm *Spulenrechner 2.0* in Verbindung mit einem NanoVNA und der Software *nanovna-saver* habe ich an drei Beispielen demonstriert, mit folgenden Ergebnissen:

	L(μH)	QL	Cp(pF)	QCp	Fo(MHz)	dBo	Q
Beispiel 1 Neosid Drossel	47	60	2,66	16,5	14,12	55	13
Beispiel 2 Verlängerungssp. (HF Ringkern)	12	219	2,34	23,7	30	53,7	21,3
Beispiel 3 Luftspule	0,55	183	0,53	16,5	292	43	15,2

Somit kann das Verhalten des Spulenmodells anhand der Parameter L, QL, Cp und QCp vollständig beschrieben werden.

Diese vier Parameter sind kompatibel zum "L"-Baulement in Tool 14 "[Kleiner Netzwerk-analysator](#)".

Lediglich informativen Charakter haben Eigenresonanz Fo, zugehörige Dämpfung dBo und die Kreisgüte Q.

Weitere Erkenntnisse:

- Eine für den Einsatz in Schwingkreisen bzw. Verlängerungsspulen bestimmte Induktivität wird oberhalb ihrer Eigenresonanz Fo unbrauchbar!
Für den Einsatz als HF-Drossel gilt diese Einschränkung nicht.

- Zur ausreichend genauen Bestimmung von QL sollte die Kreiskapazität C etwa 100mal größer sein als die Eigenkapazität Cp der Induktivität.
- Misst man F1 und dB1 bei verschiedenen Frequenzen kann der SR unterschiedliche und falsche Wertepaare von QL und QCp ermitteln je näher man sich - unter Missachtung der Bedingung $C \gg Cp$ - der Eigenresonanz Fo nähert.
Hat man richtig gemessen, so bleibt die resultierende Kreisgüte Q trotzdem unverändert.

Etwas graue Theorie

Der Parameter QCp bezeichnet den Gütefaktor der Parallelkapazität Cp.

Mit ω = Kreisfrequenz = $2 * \text{Pi} * F$ gilt:

$$QCp = R_{pc} * \omega * Cp$$

R_{pc} = Parallel-Verlustwiderstand von Cp
Cp = Parallel- bzw. Eigenkapazität der Spule

Analog dazu gilt für die so genannte "Leerlaufgüte" QL einer Induktivität:

$$QL = R_{pl} / (\omega * Lp)$$

R_{pl} = Parallel-Verlustwiderstand von L
Lp = Induktivität der Spule (paralleles Ersatzschaltbild)

Die Kreisgüte Q lässt sich auf die Parallelschaltung der Verlustwiderstände von Rpl und Rpc zurückführen:

$$Q = QL * QCp / (QL + QCp)$$

Der Wert von QL ist durch eine Messung von F1 und dB1 im Modus "Parallelschwingkreis" in Erfahrung zu bringen. Damit kann QCp "herausgerechnet" werden:

$$QCp = Q * QL / (QL - Q)$$

Es ist ersichtlich, dass QL immer größer als Q sein muss, andernfalls hast du mit dem VNA falsch gemessen!

Wenn die Kreiskapazität C um den Faktor 100 vergrößert wird liegt die abzugleichende Resonanzfrequenz F1 bei einem Zehntel der Parallelresonanz Fo, weil gemäß Thomsonscher Schwingungsformel gilt:

$$\omega_0 = 1 / \text{Sqrt}(Lp * Cp) \quad (1)$$

$$\text{Sqrt}(Lp * Cp) = 1 / \omega_0 \quad (2)$$

$$\omega_1 = 1 / \text{Sqrt}(Lp * 100 * Cp) = 1 / (10 * \text{Sqrt}(Lp * Cp)) \quad (3)$$

(2) in (3) eingesetzt:

$$\omega_1 = 1/(10 / \omega_0) = \omega_0 / 10 \quad (4)$$

Hinweis

Interessenten an weiterem mathematischen Zeug empfehle ich die Info-Datei zum Tool "[04 Serien-Parallel-Transformation](#)".