

## Gemeinschaftsarbeit von DG1KPN und DL6GL.

Ergänzung vom 12.04.2024 zur Wahl der "richtigen" Frequenz bei S11-Reflexionsmessungen am Ende von Abschnitt 3.

Mit einfach durchzuführenden Transmissions- bzw. Reflexionsmessungen ermöglicht der VNWA die Bestimmung von Induktivitäten, Kapazitäten, Impedanzen und Gütefaktoren bei bestimmten Frequenzen sowie der Eigenresonanzen von Spulen bzw. Kondensatoren. Wir wollten herausfinden, welche Randbedingungen für akzeptable Messergebnisse dabei zu beachten sind.

Naheliegender zur Bestimmung von Kapazität und Induktivität sind für uns Amateure die preiswerten LC-Meter mit LCD-Anzeige. Sie werten mit einem Microcontroller die Frequenzänderung eines LC-Resonanzkreises infolge Zufügens des zu messenden L oder C aus. Die Messfrequenzen liegen i.a. deutlich unter 1 MHz.

Neben L oder C können vektorielle Netzwerkanalysatoren wie der VNWA über die Impedanzen auch die Bauteilgüte und die Eigenresonanz bestimmen, und das über einen frei wählbaren Frequenzbereich weit jenseits von 1 MHz.

Eingesetzt haben wir für unsere Betrachtung

1. AADE LC-Meter IIB  
Messfrequenz:  
ca. 750kHz (10pF bzw. 0,1µH), ca. 700kHz (100pF bzw. 10µH),  
ca. 470kHz (1nF bzw. 100µH), ca. 200kHz (10nF bzw. 1mH)  
Genauigkeit < 1%.  
Angaben aus AADE LC-Meter IIB Review, Clifton Laboratories 2010.
2. VNWA 3e, Software V36.7.9  
S11 LCR-Meter bei mit dem AADE LC-Meter vergleichbaren Messfrequenzen.  
Gegenüberstellung der Ergebnisse aus (1) und (2).  
Diese Messmethode ist prinzipiell die gleiche (S11) wie in Punkt 3, allerdings für genau eine relativ niedrige Messfrequenz.
3. VNWA 3e, Software V36.7.9  
S11-Reflexionsmessung L + C, "kleine" L mit ZL in der Nähe von 50Ω
4. VNWA 3e, Software V36.7.9  
S21-Transmissionsmessung L, "große" L mit ZL >> 50Ω.  
Gegenüberstellung der Ergebnisse aus (3) und (4).

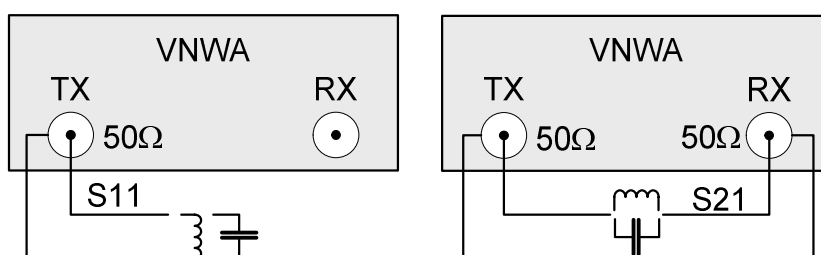


Abb. 0.1: Messmethoden S11 (Shunt) und S21 (Series).

In Bezug auf die Messmethoden (3, S11) und (4, S21) sind Einschränkungen zu beachten, auf die in [3] hingewiesen wird, VNWA Help.pdf, V 36.7.9 (How to measure impedances), Seite 383:

**Zu (3), Abb. 0.1 links**, frei übersetzt:

*Der VNWA misst den Reflexionskoeffizienten (S11) von Zx relativ zu seiner 50Ω-Umgebung.*

*Der Aufbau kann Short/Open/Load (SOL) kalibriert werden, um systematische Fehler zu beseitigen.*

*Aufgrund der verwendeten Reflexionsmessbrücke, die auf 50Ω abgestimmt ist,*

**ist diese Methode am genauesten, wenn Zx nahe bei 50Ω liegt.**

*Bei sehr viel kleineren oder größeren Impedanzen wird die Messanordnung sehr unempfindlich und die Ergebnisse sind daher ungenau.*

**Zu (4), Abb. 0.1 rechts**, frei übersetzt:

*Der VNWA RX-Port wird zur Messung des Stroms  $I$  durch  $Z_x$  verwendet.*

*Da  $S_{21}$  gemessen wird, ist in diesem Fall eine einfache Durchgangskalibrierung ausreichend.*

*Verwenden Sie die benutzerdefinierte Funktion (custom function)  $t2s(S_{21})$ , um die  $S_{21}$ -Transmissionsdaten in Reflexionsdaten umzurechnen.*

*Da der TX-Port keine ideale Spannungsquelle ist und der RX-Eingang eine endliche Impedanz hat, wird diese Methode **bei kleinen Impedanzen  $Z_x$  sehr unempfindlich und damit ungenau.***

*Diese Methode eignet sich gut zur Messung von Quarzen oder Verlusten in kleinen Kondensatoren.*

*Hinweis: Keiner der  $Z_x$ -Anschlüsse darf bei dieser Methode mit Masse verbunden sein.*

[4] zeigt dazu einen Vergleich der Messmethoden



Abb. 0.2: Messfehler aus den Methoden (3), Shunt, rot, und (4), Series, grün. Quelle: [4].

Abseits der teilweise recht akademischen Abhandlungen im Web über die "richtigen" Messmethoden und deren Wiederholbarkeit und Präzision wollen wir uns darauf beschränken, Anhaltspunkte aus dem Amateurralltag zu geben, als da sind

- tatsächlicher Wert und Verhalten von Kapazitäten und selbstgebauten oder industriell hergestellten Induktivitäten in den vorgesehenen Frequenzbereichen,
- Eigenresonanz und Güte dieser Bauteile in den vorgesehenen Frequenzbereichen.
- Die Kenntnis dieser Größen bestimmt maßgeblich Erfolg oder Scheitern beim Aufbau z.B. von LC-Hoch- und -Tiefpässen, LC-Bandpass- oder -Sperrfiltern. Auf ein paar Prozent Abweichung von L oder C kommt es dabei zumeist weniger an. Güte und Eigenresonanz sind aber entscheidende Faktoren.
- Wie weit wirken sich die o.g. Einschränkungen bzgl. Spulenimpedanzen für noch verlässliche Messungen mit den hier vorgeschlagenen einfachen Messmethoden aus?

Die Vorversuche, die uns zu der nachfolgenden Betrachtung geführt haben, erwiesen sich insbesondere an Spulen als ein wenig irritierend. Um die Sache nicht zu kompliziert zu machen, haben wir uns auf Amidon T-Ringkerne und, zur Ausweitung auf größere Induktivitäten, auf einige Drosseln beispielhaft beschränkt. Hier nicht betrachtete Ferrit Ring- und Doppellochkerne, wie sie für Übertrager und Balune verwendet werden, wären vermutlich eine abendfüllende Herausforderung geworden.

## 1 Spulen und Kondensatoren im wirklichen Leben

Wenn wir Kondensatoren und Spulen in Schwingkreisen oder Filtern einsetzen, reicht es nicht, alleine deren Kapazitäts- und Induktivitätswert zu betrachten. Reale Bauteile verhalten sich bei HF manchmal etwas unmanierlich. Neben frequenzunabhängigen Wirkwiderständen sind zusätzlich frequenzabhängige Scheinwiderstände wirksam. Beim Kondensator eine Induktivität, z.B. der Anschlussdrähte, bei einer Spule eine Kapazität zwischen den Spulendrähten und weitere frequenzabhängige Faktoren. Die Wirkwiderstände haben Verluste zur Folge, die Scheinwiderstände bisweilen unliebsam überraschende HF-Eigenschaften.

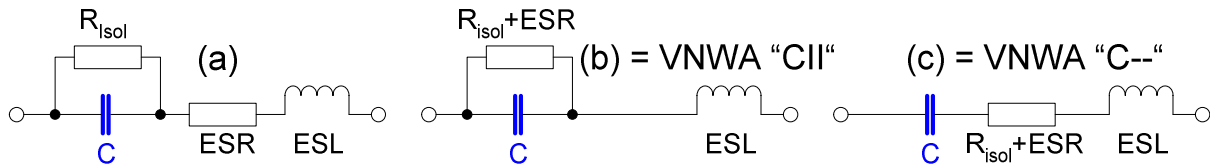


Abb. 1.1: Ersatzschaltbild einer Kapazität (a), vereinfacht (b), (c).

- C = Kapazität. Das sollte eigentlich alles sein. Ist es aber nicht.
- $R_{isol}$  = Isolationswiderstand des Dielektrikums, insbes. bei Elkos (Leckstrom).
- ESR=(Equivalent Series Resistance), der äquivalente Serienwiderstand. Zusammenfassung der ohmschen Leitungs- und der dielektrischen Umpolungsverluste des Kondensators. Der VNWA kann nur einen effektiven Wirkwiderstand messen, in (b) und (c) als Kombination aus  $R_{isol}$  und ESR zusammengefasst. Diesen Wert geben auch die Hersteller als ESR an. Der VNWA kann die Konfigurationen (b) = "C||" (parallel) oder (c) = "C--" (Serie) darstellen.
- ESL (Equivalent Series Inductivity L), die äquivalente Serieninduktivität. Zusammenfassung der parasitären Induktivität des Kondensators (z.B. Leitungsdrähte).
- C + ESL bilden einen Serienschwingkreis mit einer Eigenresonanzfrequenz. Unterhalb der Resonanzfrequenz Verhalten als Kapazität wie erwartet ( $Z=1/\omega \cdot C$ ), oberhalb als Induktivität als Störeffekt.
- Güte Q: In erster Näherung (nur C und ESR weit vor der Resonanz) ist  $Q = X_c / ESR = 1 / \omega \cdot C \cdot ESR$ . Diesen Wert geben auch die Hersteller an, zumeist als  $\tan(\delta)=1/Q$ .
- Für die einfache Reihenschaltung (c) ist die Impedanz die Summe aus den Einzelimpedanzen ( $R = R_{isol}+ESR$ ,  $C = C--$ ,  $L = ESL$ )

$$Z = R + j(\omega L - 1/\omega C) \quad |Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}$$

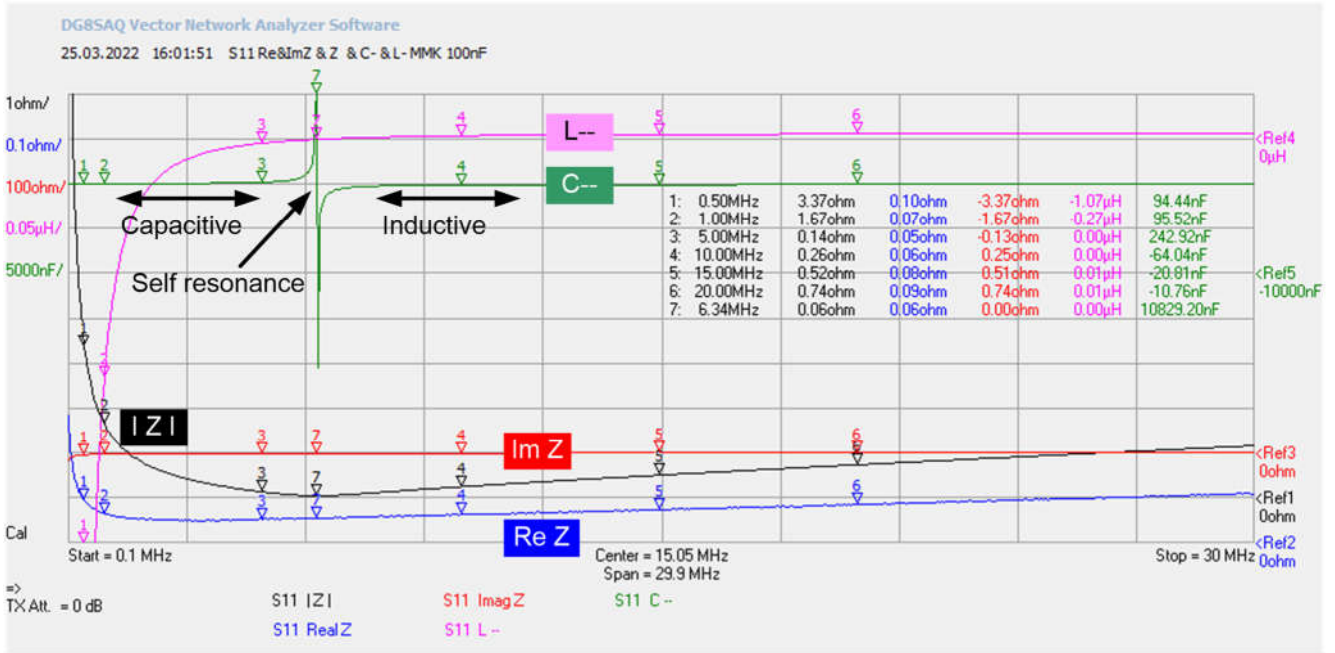


Abb. 1.2: Resonanzverhalten eines 100nF MMK-Kondensators (C-- & L--).

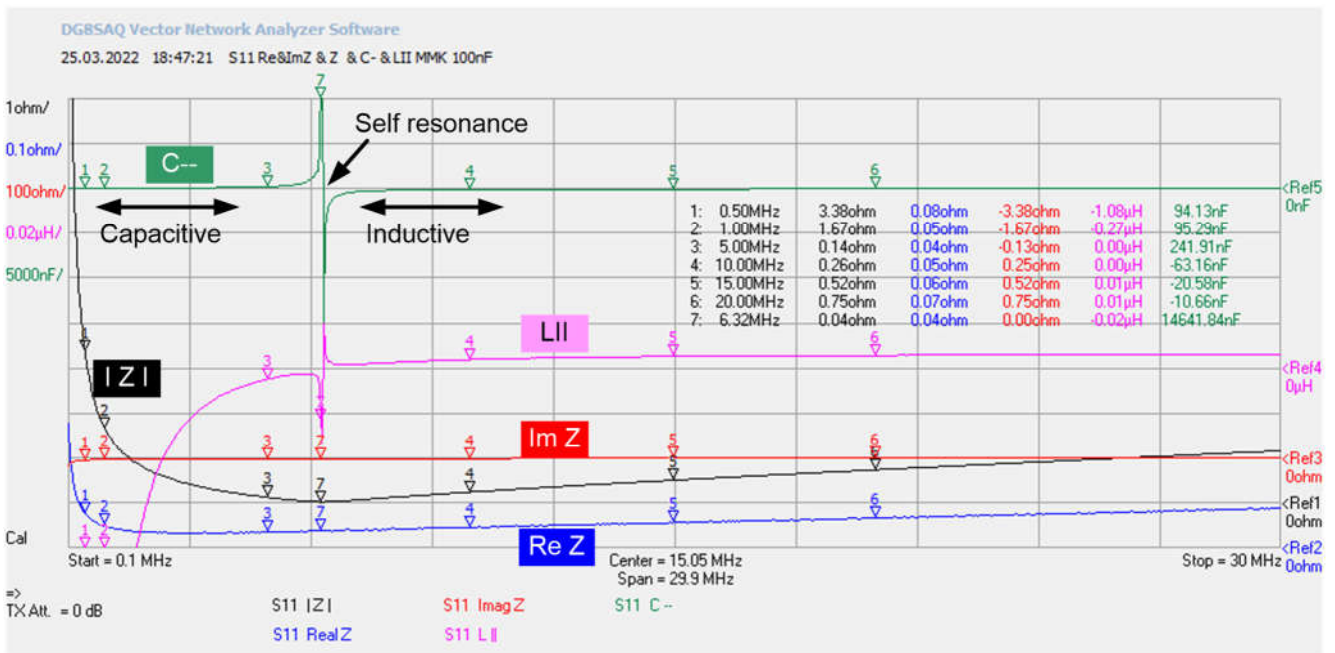


Abb. 1.3: Resonanzverhalten eines 100nF MMK-Kondensators (C-- & L||).

Das Resonanzverhalten (Marker 7) von  $|Z|$  (schwarz) ist bei Kondensatoren schwächer ausgeprägt als das der Kapazität C-- (grün). Im Gegensatz zu C-- zeigt das parasitäre L-- (pink) in Abb. 1.2 keine ausgeprägte Resonanz, das parasitäre L|| in Abb. 1.3 jedoch deutlich.

In der Praxis wird es für Kondensatoren ausreichen, die Resonanz-Polstelle von C-- zu suchen, um die Eignung für HF-Anwendungen festzustellen, wenn überhaupt. Der 100nF-Folienkondensator wurde hier untersucht, um im gleichen Frequenzbereich zu bleiben wie nachfolgend für die Drossel. Zum Abblocken von HF ist dieser Folienkondensator offensichtlich nicht geeignet. Die Eigenresonanz eines 1nF NP0-Kondensators mit ca. 5mm Drahtlänge lag weit oberhalb bei ca. 110MHz. Kluge Leute nehmen ohnehin SMD-C's für HF und VHF. Da erübrigen sich dann solche Überlegungen.

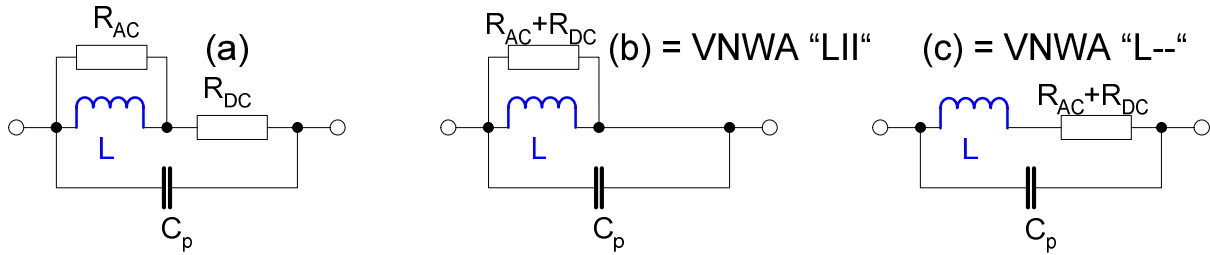


Abb. 1.4: Ersatzschaltbild einer Induktivität (a), vereinfacht (b), (c).

- L = Induktivität. Das sollte eigentlich alles sein. Ist es aber nicht.
- R<sub>AC</sub> = frequenzabhängiger Widerstand u.a. des Spulenkerns. Zusammenfassung der Verluste aus Wirbelstrom und Ummagnetisierung im Kern sowie aus Streufeld (magnetische Verluste).
- R<sub>DC</sub> = Frequenzunabhängiger ohmscher Widerstand des Spulendrahts. Der VNWA kann nur einen effektiven Wirkwiderstand messen, in (b) und (c) als Kombination aus R<sub>AC</sub> und R<sub>DC</sub> als R<sub>AC</sub> zusammengefasst. Der VNWA kann die Konfigurationen (b) = "LII" (parallel) oder (c) = "L--" (Serie) darstellen.
- C<sub>p</sub> = Zusammengefasste parasitäre Kapazitäten zwischen den Windungen.
- C<sub>p</sub> + L bilden einen Parallelschwingkreis mit einer Eigenresonanzfrequenz. Unterhalb der Resonanzfrequenz Verhalten als Induktivität wie erwartet (Z=ω\*L), oberhalb als Kapazität als Störeffekt.
- Güte Q: In erster Näherung (nur L und R<sub>DC</sub> weit vor der Resonanz) ist Q = XL / R<sub>DC</sub> = ω\*L / R<sub>DC</sub>. Diesen Wert geben auch die Hersteller von Drosseln an, meist mit Frequenzangabe.
- Für die einfache Parallelschaltung (b) ist die Impedanz der Kehrwert aus der Summe der Einzeladmittanzen (R = R<sub>AC</sub>+R<sub>DC</sub>, C = C<sub>p</sub>)

$$Z = \frac{1}{1/R + j(\omega C - 1/\omega L)} \quad |Z| = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + (\omega C - 1/\omega L)^2}}$$

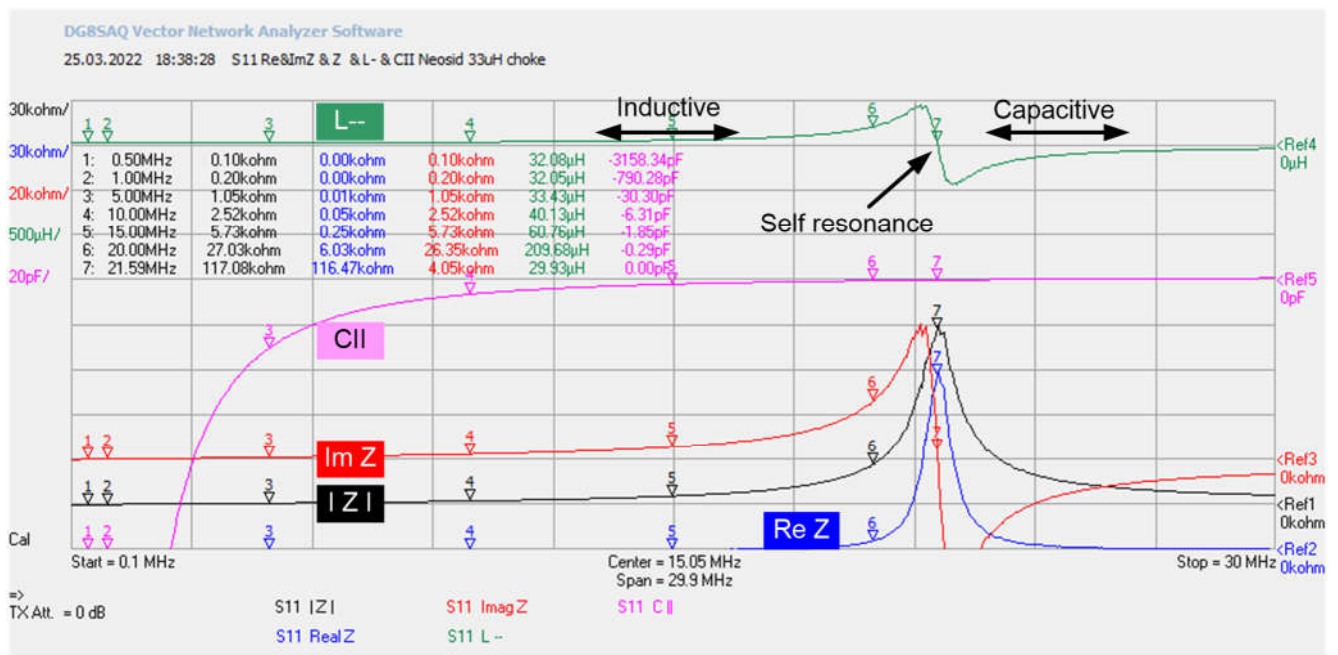


Abb. 1.5: Resonanzverhalten einer 32µH Neosid-Drossel (L-- & C||).

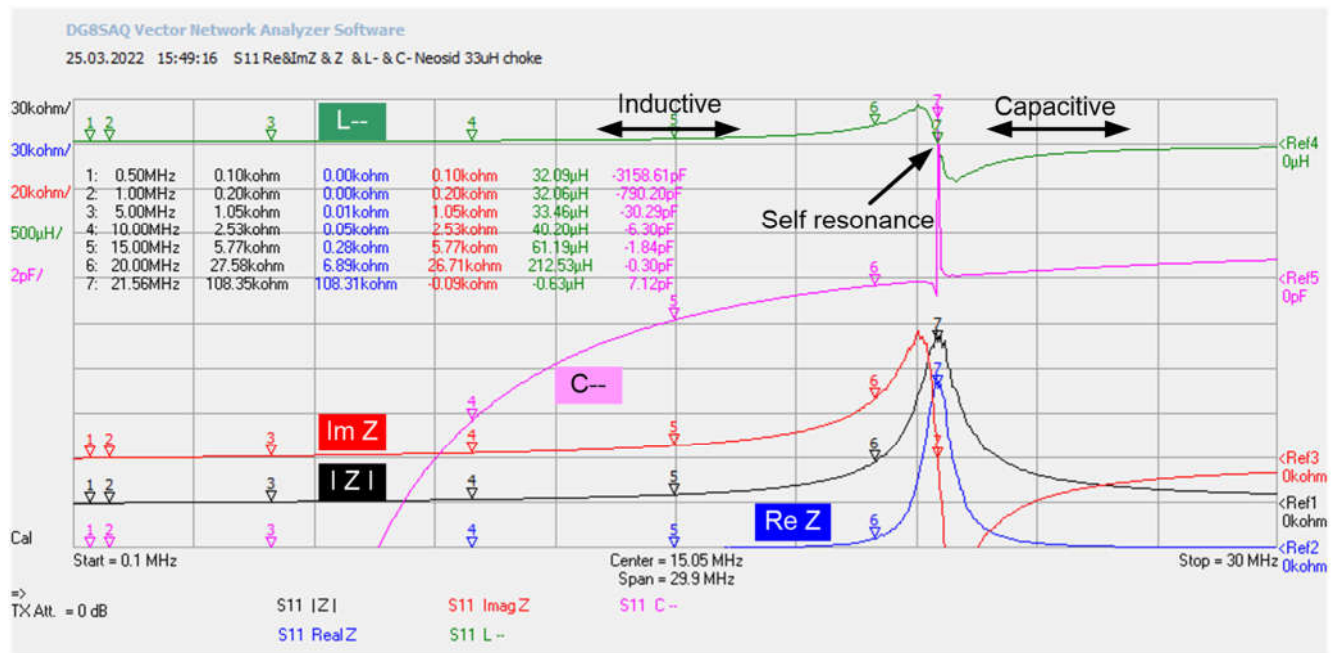


Abb. 1.6: Resonanzverhalten einer 32µH Neosid-Drossel (L-- & C--).

Das Resonanzverhalten von  $|Z|$  (schwarz) sowie  $\text{Im } Z$  und  $\text{Re } Z$  ist bei Induktivitäten deutlich ausgeprägt. Ebenso, anders als beim o.a. Kondensator, zeigt die parasitäre Kapazität C-- (pink) in Abb. 1.6 eine deutliche Resonanz, dagegen C|| in Abb. 1.5 nicht.

In der Praxis wird es für Induktivitäten zunächst ausreichen, die Resonanz-Polstelle von L-- oder  $|Z|$  zu suchen, um die Eignung für HF-Anwendungen festzustellen.

## 2 L/C-Messungen mit AADE LC Meter und VNWA LCR Meter

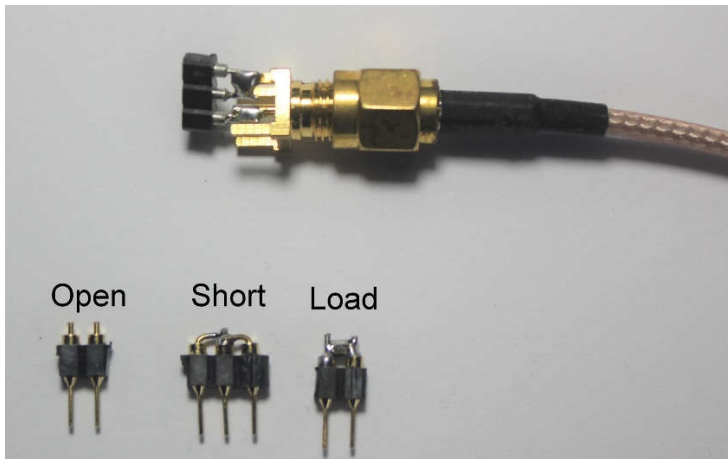


Abb. 2.1: Beispiel für eine S11-Test Fixture, Load = 2x100Ω 0,1% SMD 0805.

VNWA-Einstellungen:

- VNWA für mindestens eine Stunde vorglühen. In einem Zug messen.
- Settings – Frequency Range – Linear Sweep: Start 0,5, Stop 0,5 MHz.
- Settings – Diagrams – Display – Traces: Trace 1, LCR Meter, S11.
- Settings – Sweep: 600 Points, 20ms per Point
- Measure – Calibrate – Cal Kit – Cal Kit File Manager: Ideal calibration standards.
- Measure – Calibrate: SOL-Calibration an TX Out.

Alle Bauteile mit RM 2,5 oder 5mm wurden unmittelbar in die Buchsenleiste (Abb. 2.1 oben) eingesteckt. Beim AADE LC-Meter waren entsprechende Buchsenleisten direkt an den Messbuchsen angebracht. Alle anderen bedrahteten Spulen waren an Steckerleisten verlötet.

Tab. 2.1: Mit AADE LC Meter und VNWA LCR Meter ermittelte Kapazitäten

Wert	Typ	VNWA C--	VNWA CII	AADE	Einheit	Abw. %
68p	NP0	67,70	67,70	67,44	pF	0,39
100p	NP0	98,02	98,02	97,55	pF	0,48
1.000p	MKS2	959,18	959,18	957,3	pF	0,20
1n	NP0	1,00	1,00	1,001	nF	-0,10
10n	X7R	9,54	9,54	9,58	nF	-0,42
100n	X7R	85,89	85,80	86,40	nF	-0,64
					Mittel	0,45

Tab. 2.2: Mit AADE LC Meter und VNWA LCR Meter ermittelte Induktivitäten

Spule	VNWA L--	VNWA LII	AADE	Einheit	Abw. %
T37-2 14 Wdg.	896,86	897,00	892	nH	0,55
T68-2 20 Wdg.	2,43	2,43	2,42	μH	0,50
T68-6 20 Wdg.	2,11	2,11	2,10	μH	0,43
T68-10 20 Wdg.	1,49	1,49	1,49	μH	0,00
Toroid 22 μH	22,5	22,51	22,60	μH	-0,42

Spule	VNWA L--	VNWA LII	AADE	Einheit	Abw. %
SMCC 22 $\mu\text{H}$	22,18	22,18	22,10	$\mu\text{H}$	0,36
Neosid 32 $\mu\text{H}$	32,09	32,10	32,16	$\mu\text{H}$	-0,2
SMCC 100 $\mu\text{H}$	99,02	99,03	99,48	$\mu\text{H}$	-0,46
Geloso 100 $\mu\text{H}$	107,83	108,01	108,10	$\mu\text{H}$	-0,17
Geloso 2,5 mH	2,800	2,800	2,785	mH	0,54
				Mittel	0,41

Die gezeigte Abw. (%) ist die Abweichung der Mittelwerte aus den VNWA-Messungen vom AADE LC Meter-Wert.

Wenngleich bei den hohen C-/L-Werten das AADE LC Meter bei deutlich niedrigeren Frequenzen misst als der VNWA mit 500 kHz, bleiben die Abweichungen im Rahmen. Die mittleren absoluten Abweichungen aus beiden Messmethoden für L und C sind mit <0,5% erstaunlich gering.



## 3 S11-Reflexionsmessungen L und Q mit dem VNWA

Anders als mit dem in Abb. 1.2 gezeigten 100nF MMK-Kondensator werden in LC-Filtern im HF-Bereich Kondensatoren der Größenordnung von max. 1nF eingesetzt. Mit NP0/COG-C's werden wir in Bezug auf Güte und Eigenresonanz keine unliebsamen Überraschungen erleben, insbes. mit SMD-Ausführungen. Sparen wir uns also deren Untersuchung. Ein Ausmessen wie in Abschnitt 2 beschrieben sollte reichen.

Mit Spulen ist es nicht ganz so einfach, für LC-Filter zumeist selbst gewickelte Amidon Eisenpulver-Ringkerne oder Luftspulen, oder für Übertrager und Baluns Ferrit Ring- oder Doppellochkerne. Auch Drosseln zum Abblocken von HF verdienen unsere Beachtung. Eine Drosselwirkung ist nur unterhalb der Eigenresonanz gegeben, und die ist oft überraschend niedrig.

Test-Fixture wie Abb. 2.1.

VNWA-Einstellungen:

- VNWA für mindestens eine Stunde aufwärmen.
- Settings – Frequency Range – Linear Sweep: Start 0.1, Stop 200 MHz für Amidon Eisenpulver-Ringkerne, Stop 50MHz für Drosseln, ggf. niedriger.
- Settings – Diagrams – Display – Traces (Reihenfolge unerheblich):  
Trace 1, S11, |Z|,  
Trace 2: S11, Real Z  
Trace 3: S11, Imag Z  
Trace 4: S11, L--  
Trace 5: S11, QL  
Trace 6: S11, Phase (optional)
- Settings – Sweep: 600 Points, 50ms per Point.
- Settings – Average, Peak Hold,... - Smoothing, z.B. 10, ausprobieren, Optional zum Ausbügeln der etwas verrauschen Q-Kurven (Trace 5).
- Measure – Calibrate – Cal Kit – Cal Kit File Manager: Ideal calibration standards.
- Measure – Calibrate: SOL-Calibration an TX Out jeweils für die o.g. Frequenzbereiche.

Nachfolgend eine Auswahl von VNWA-Plots von Induktivitäten aus Tab. 2.2. Bei allen nachfolgenden Plots kennzeichnet Marker 7 die Resonanz-Polstelle.

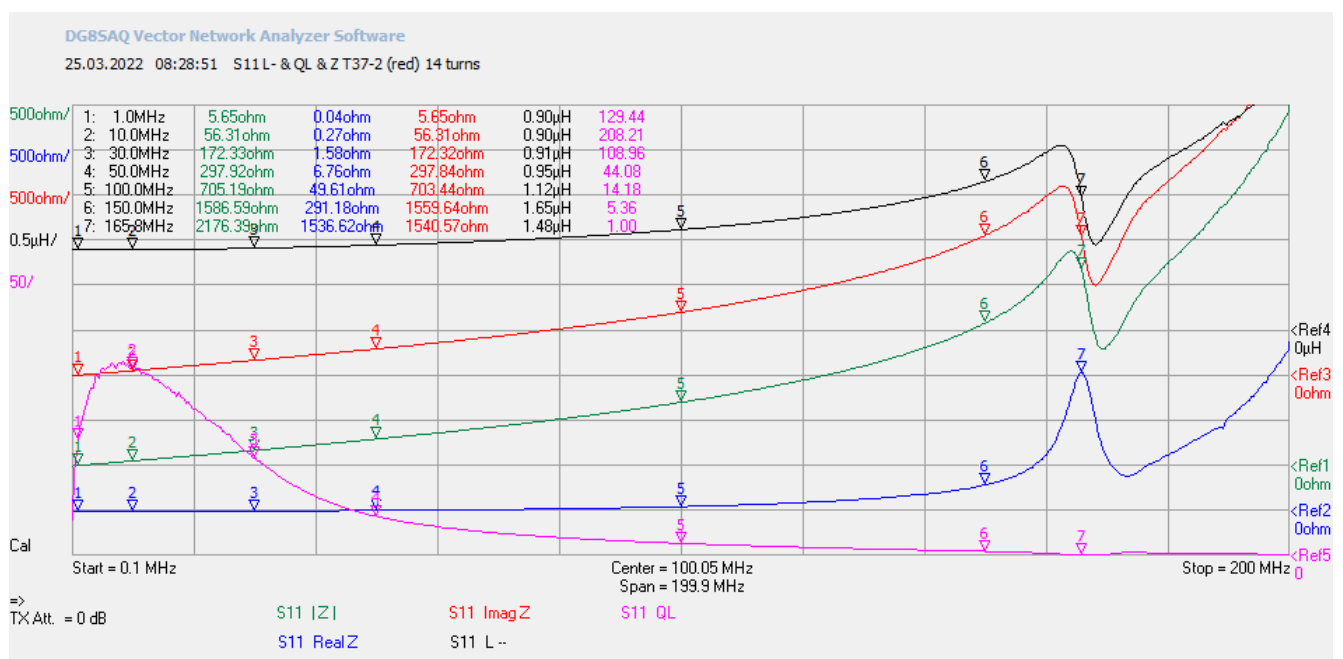


Abb. 3.1: VNWA-Plot  $|Z|$ , Re Z, Im Z, L-- und QL: T37-2 14 Wdg.

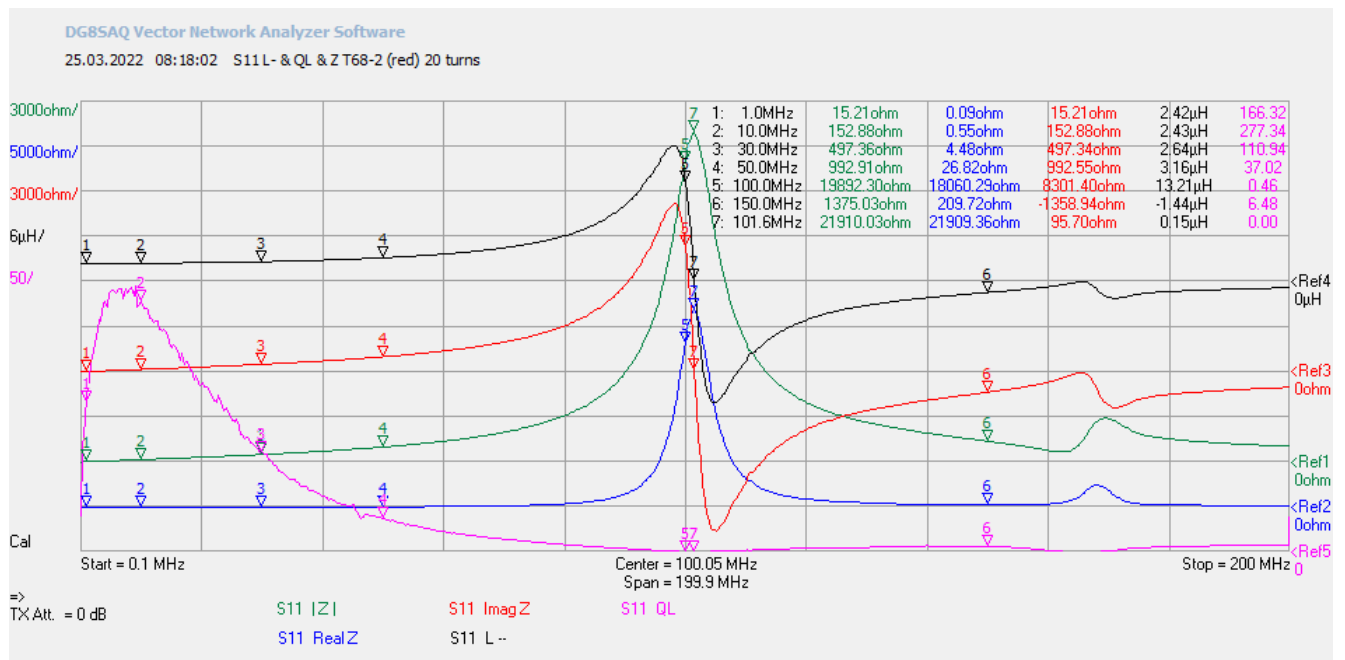


Abb. 3.2: VNWA-Plot  $|Z|$ , Re Z, Im Z, L-- und QL: T68-2 20 Wdg.

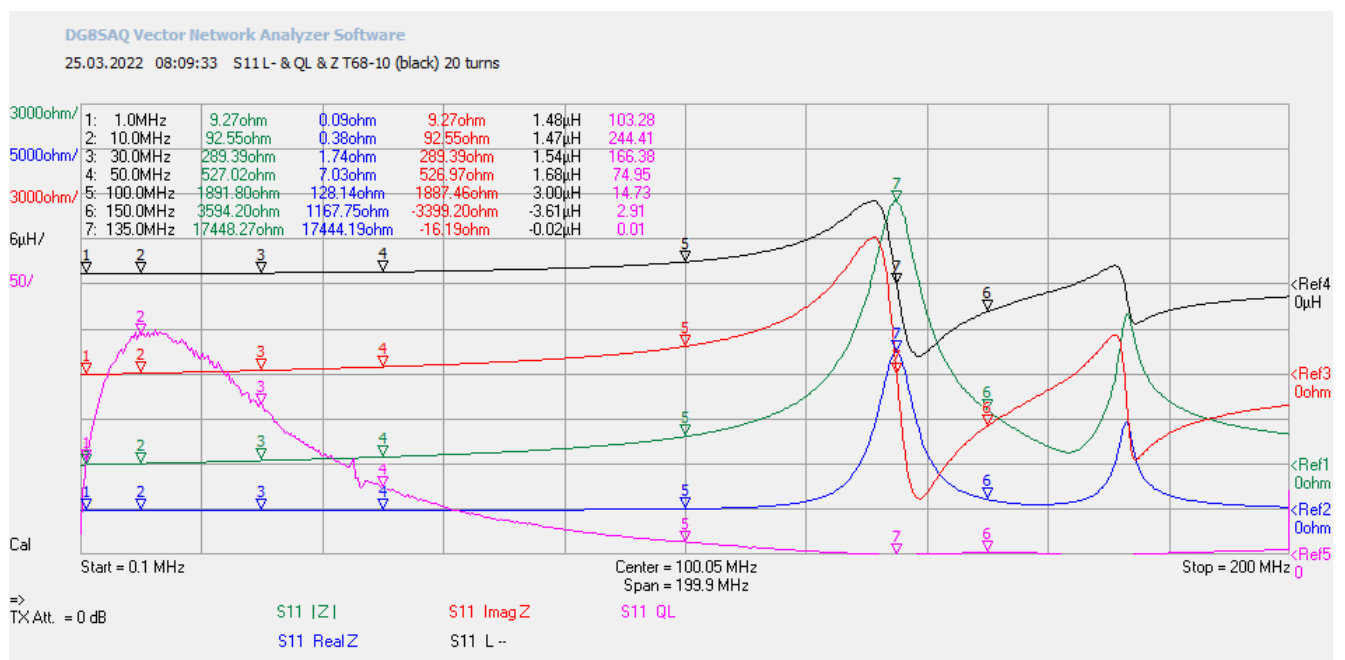


Abb. 3.3: VNWA-Plot  $|Z|$ , Re Z, Im Z, L-- und QL: T68-10 20 Wdg.

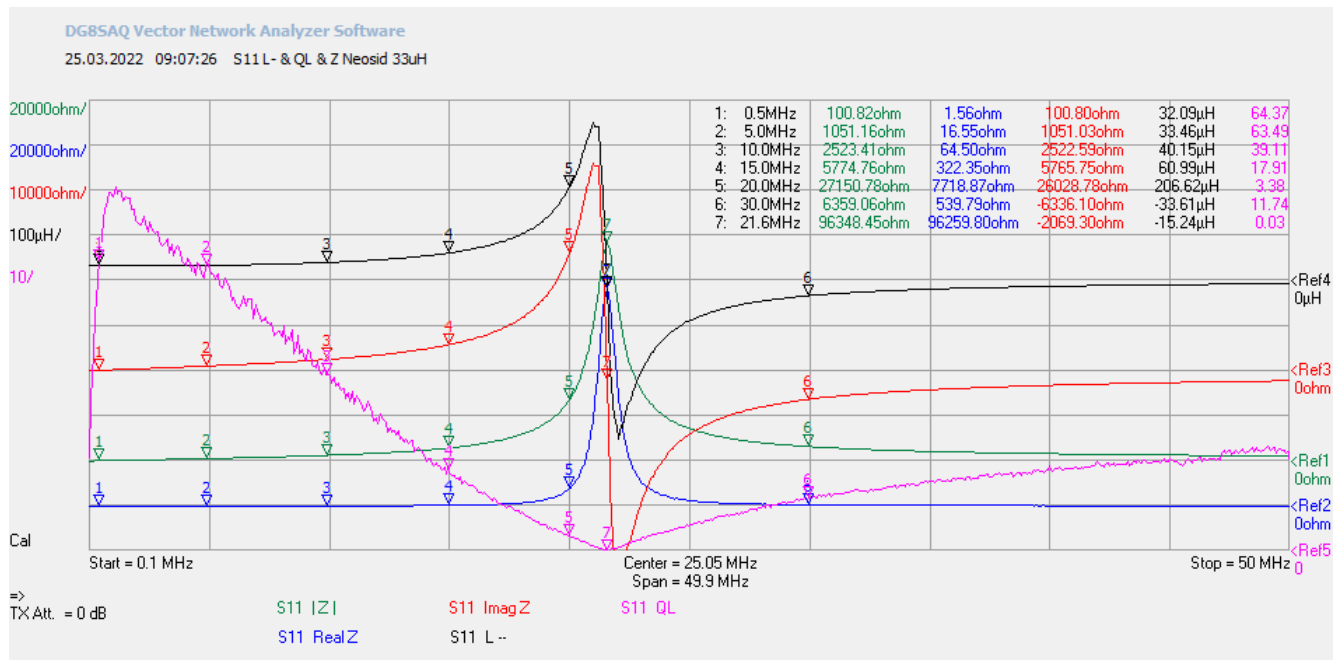


Abb. 3.4: VNWA-Plot |Z|, Re Z, Im Z, L-- und QL: Neosid 32µH Drossel.

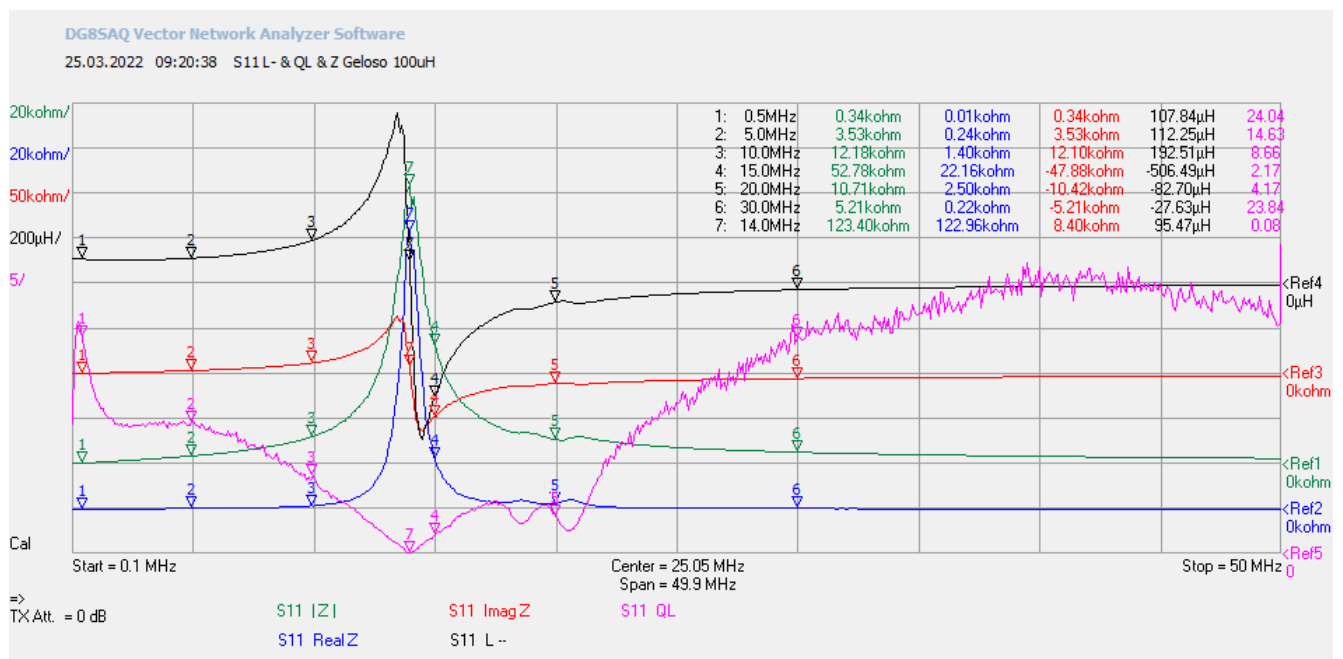


Abb. 3.5: VNWA-Plot |Z|, Re Z, Im Z, L-- und QL: Gelo 100µH Drossel.

Tab. 3.1: L, Q, Eigenresonanz: Eisenpulver Amidon T-Ringkerne

	L (µH)			Q			Res. MHz
	1 MHz	10 MHz	30 MHz	1 MHz	10 MHz	30 MHz	
Spule							
T37-2 14 Wdg.	0,90	0,90	0,91	129	208	108	165,8
T68-2 20 Wdg.	2,42	2,43	2,64	166	277	111	101,6
T68-6 20 Wdg.	2,11	2,12	2,27	145	281	117	109,6
T68-10 20 Wdg.	1,48	1,47	1,54	103	244	166	135,0

Drossel	L ( $\mu\text{H}$ )			Q			Res. MHz
	0,5 MHz	5 MHz	10 MHz	0,5 MHz	5 MHz	10 MHz	
Toroid 22 $\mu\text{H}$	22,49	19,22	11,83	71	1,8	1,1	???
SMCC 22 $\mu\text{H}$	22,38	23,91	32,66	64	76	32	16,7
Neosid 32 $\mu\text{H}$	32,09	33,46	40,15	64	63	39	21,6
SMCC 100 $\mu\text{H}$	99,32	327,19	-53,87	87	73	13	5,9
Geloso 100 $\mu\text{H}$	107,8	112,3	192,5	24	15	8,7	14,0
Geloso 2,5 mH	2.860	-812,20	-133,45	27	3,1	5,0	2,4

Grüne Markierungen: Spezifikation nach Datenblättern erfüllt, rot: jenseits der Eigenresonanz. Bemerkenswert ist die hohe Resonanzfrequenz der Geloso 100 $\mu\text{H}$ -Drossel im Vergleich zur SMCC 100 $\mu\text{H}$ -Drossel, ein Schätzchen aus der Röhrenzeit der 1960er. Sie besteht aus 3 getrennten (kapazitätsarmen) Kreuzwickeln, ist dafür aber 25mm lang. Sowas wirft man nicht weg.

Zur Absicherung der S11-Reflexionsmethode aus der zugegeben kleinen Stichprobe aus Tab. 2.2 und Tab. 3.1, 3.2 wurden noch die Messunsicherheiten in Abhängigkeit der jeweiligen Impedanzen  $|Z|$  untersucht. Vergleiche dazu den Ausschnitt aus dem VNWA Help zu Methode S11 (3) in der Einleitung.

Als Referenz wurden die Mittelwerte aus den mit AADE LC Meter und VNWA LCR Meter ermittelten Induktivitätswerten verwendet (Tab. 2.2). Abb. 3.6 zeigt die Abweichungen der bei 0,5, 1, 5, 10, 20 und 30 MHz gemessenen Induktivitäten der in Tab. 3.1 und 3.2 aufgeführten Induktivitäten von den zugehörigen Referenzwerten. Bei den Drosseln wurden nur Frequenzen kleiner als die halbe Resonanzfrequenz verwendet. Die Daten sind aus einem neuen Messzyklus (Anlage).

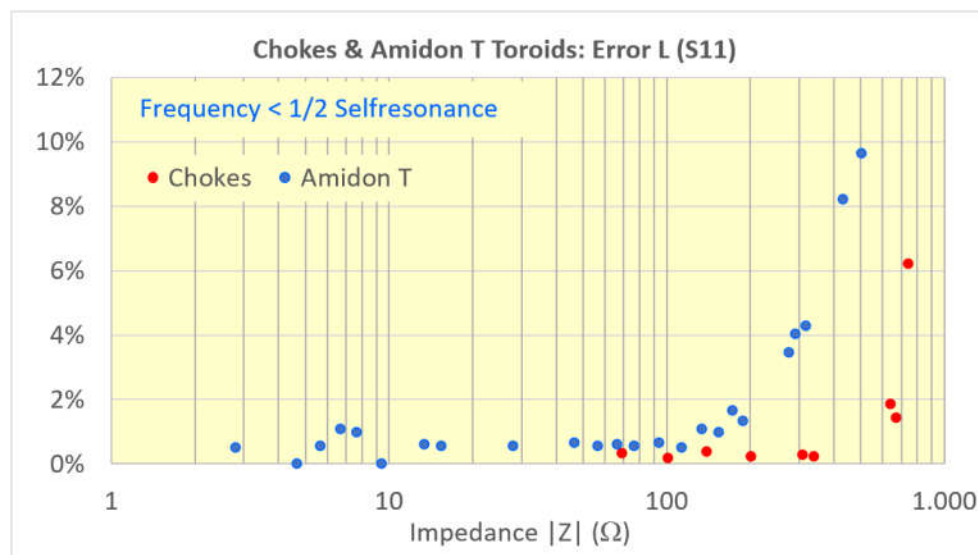


Abb. 3.6: Abweichungen (absolut) der gemessenen Induktivitäten aus S11 als Funktion von  $|Z|$ .

In dieser Stichprobe ergibt sich ein Messfehler  $< 2\%$  für

- Amidon T-Kerne (0,9 bis 2,4 $\mu\text{H}$ ) für einen  $|Z|$ -Bereich 3 bis 200 $\Omega$ ,
- Drosseln (22 $\mu\text{H}$  bis 2,8mH) für einen  $|Z|$ -Bereich 70 bis 700 $\Omega$ , jeweils weit vor der Eigenresonanz-Polstelle.

Das Ergebnis deckt sich nicht mit Abb. 0.2:

$< 5\%$  für  $|Z|$  zwischen 20 und 140 $\Omega$  bzw.  $< 10\%$  für  $|Z|$  zwischen 12 und 230 $\Omega$ .

Insbesondere konnte hier der parabelförmige Anstieg der Fehlerrate bei Impedanzen  $\ll 50\Omega$  nicht reproduziert werden, zumindest nicht bis  $|Z| \sim 3\Omega$ .

Der Anstieg der Abweichungen oberhalb von 200Ω für Amidon T-Ringkerne bzw. oberhalb von 700Ω für die Drosseln ist im Vergleich mit den bei niedrigen Frequenzen ermittelten o.g. Referenzwerten von AADE LC Meter und VNWA LCR Meter begründet. Mit zunehmender Frequenz macht sich die ansteigende Flanke der Eigenresonanzen bemerkbar (Abb. 3.1 bis 3.5). Das gilt auch sinngemäß für die Auswertungen in Abb. 4.7 und 4.8 im Folgeabschnitt.

## Fazit für die S11-Reflexionsmessungen zur Bestimmung der Induktivität:

- Der TX-Port wurde unter der Bedingung "Ideal calibration standards" (50Ω, keine Delays) mit SOL kalibriert.
- Die Messergebnisse für L waren im Bereich  $|Z| = 3$  bis 200Ω (Amidon T-Ringkerne), im Bereich  $|Z| = 70$  bis 700Ω (Drosseln) akzeptabel mit einer Messunsicherheit < 2%.
- Weitere Bedingung: Messfrequenz weit unterhalb der Eigenresonanzfrequenz.

## Ergänzung vom 12.04.2024

Diskussionen mit Werner, DC4KU, über seinen im März 2024 erschienenen [Artikel](#) [6] zu RLC-Messungen mit dem NanoVNA forderten eine kleine Nachuntersuchung regelrecht heraus. Das vorläufige Ergebnis aus den oben beschriebenen S11-Reflexionsmessungen war, im offenbar geradlinigen unteren Teil der L- oder C-Plots, "ganz weit" unterhalb der Eigenresonanz die Induktivität oder Kapazität zu bestimmen. Die Spanne um die 50Ω-Impedanz des VNWA erschien im Gegensatz zu der recht scharfen roten Parabel in Abb. 0.2 recht weit auslegbar. Wo aber messen wir den "richtigen" Wert einer Reaktanz, hier einer Induktivität? Aus Abb. 0.2, aus dem DG8SAQ VNWA-Help und aus Werner's Messungen liegt es auf der Hand: Bei der Frequenz, die den Betrag von Z,

$$|Z| = \sqrt{R_S^2 + X_S^2}, X_S = \omega L \text{ bzw. } X_S = 1/\omega C, R_S = \text{serieller ohmscher Verlustwiderstand}$$

möglichst nahe bei der VNWA-Systemimpedanz 50Ω ergibt. Hier ist die erreichbare Messgenauigkeit maximal.

Diese Formel, nach  $\omega$  bzw. der Frequenz  $f$  aufgelöst, die für eine Induktivität oder Kapazität die Sollimpedanz 50Ω ergibt, ist in einem kleinen Excel-Sheet im Download programmiert. Damit lässt sich vorab der Scan-Bereich für den Netzwerkanalysator ermitteln.

Um die Messpräzision in Abhängigkeit von der Messfrequenz abzuschätzen, wurde ein T50-2 Ringkern mit 18 Windungen mit der Messanordnung nach Abb. 2.1 im Bereich 0,5 bis 10MHz, weit unterhalb der Eigenresonanz untersucht. Das AADE-LC-Meter wies eine Induktivität von 1,721μH aus.

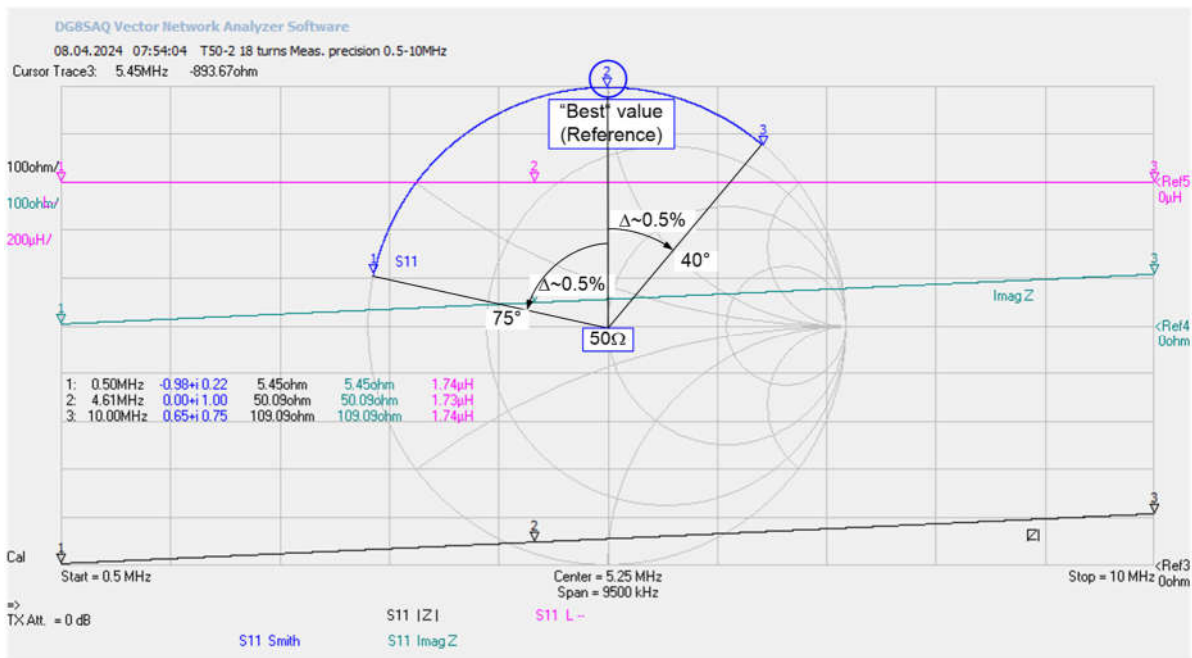


Abb. 3.7: VNWA-Messung T50-2, 18Wdg, von 0,5 bis 10MHz.

Die aus S11 berechnete Induktivität "L-" (violett) verläuft im gesamten Frequenzbereich offensichtlich schnurgerade und waagrecht. Es wäre demzufolge gleichgültig, bei welcher Frequenz ein Messwert genommen wird. Könnte man meinen. Die auf zwei Nachkommastellen gerundeten Werte unterscheiden sich aber schon auf der zweiten Nachkommastelle (1,74 – 1,73 – 1,74µH).

Mit Bedacht wurde zusätzlich die S11 Smith-Darstellung (blau) gewählt. Diese liefert mit dem Marker 2 den Bezugspunkt zur Smith Chart-Mitte (normiertes  $Z = 1$ , hier  $Z = 50\Omega$ , für einen Reflexionsfaktor  $\Gamma=0$ , exakte Anpassung). Ermitteltes  $|Z| = 50,09\Omega$ .

Zunächst gibt die Spanne der auf zwei Nachkommastellen gerundeten Induktivitätswerte im VNWA-Plot wenig her. Die "Extended Marker Info" liefert mehr und "genauere" Werte, wohingegen bei den vier Nachkommastellen schon Zweifel angebracht sind. Dennoch, diese "genauen" Werte wurden in den nachfolgenden Auswertungen verwendet.

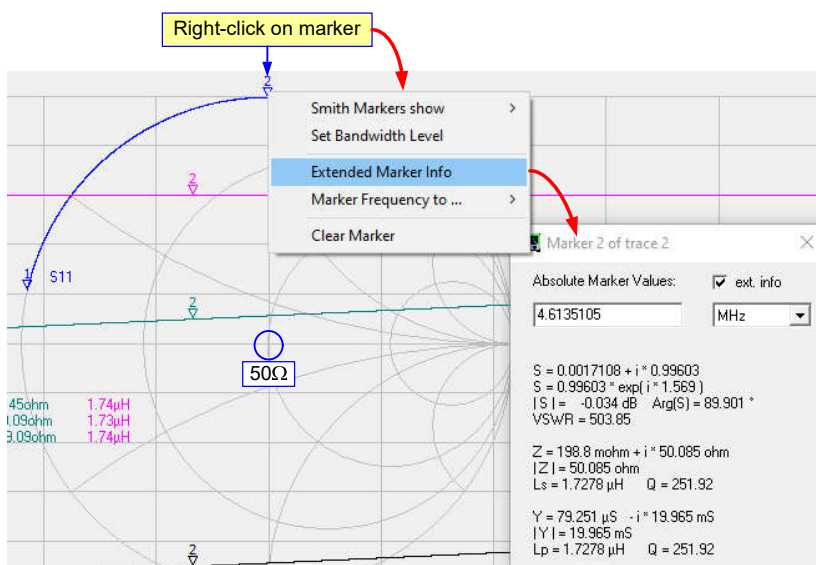


Abb. 3.8: VNWA Extended Marker Info.

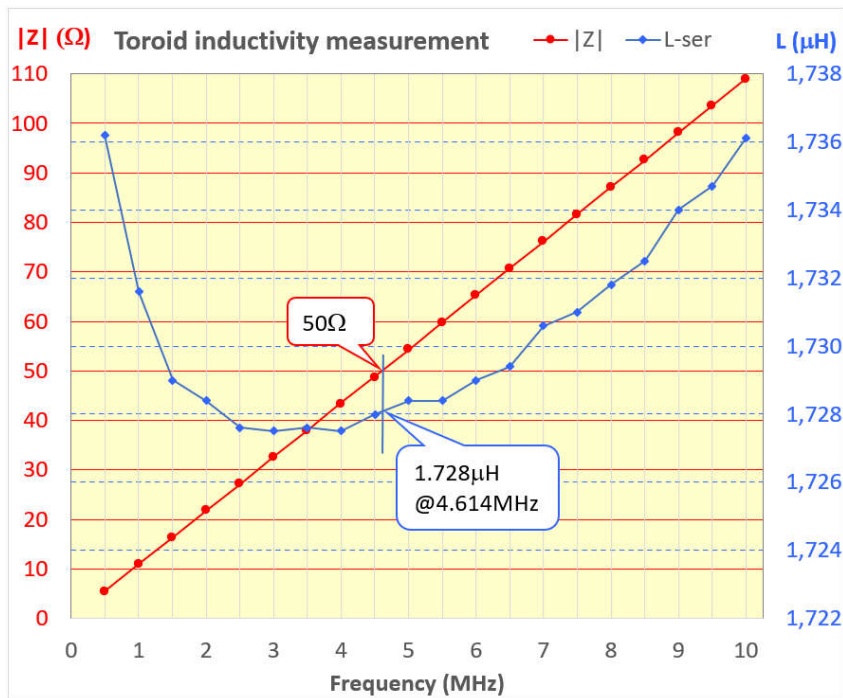


Abb. 3.9: Auswertung von  $|Z|$  (rot) und L-ser (L--, blau) in 0,5MHz-Schritten.

Der VNWA-Plot (Abb. 3.7) wurde mit 4.000 Messpunkten aufgenommen, so dass die in Abb. 3.9 gezeigten Frequenzen ohne rechnerische Interpolation hinreichend genau getroffen wurden.

Die  $|Z|$ -Funktion verläuft optimal geradlinig, während die L--Kurve kleinere Ausreißer infolge der eher unsicheren vierten Nachkommastelle zeigt. Der Wert der  $|Z|$ -Gerade bei  $50\Omega$  kennzeichnet den optimalen Messpunkt für L--, hier  $1,728\mu\text{H}$  bei  $4,614\text{MHz}$ , vgl. auch Abb. 3.7.

Die gleiche Auswertung als prozentuale Abweichung vom genannten optimalen Messpunkt:

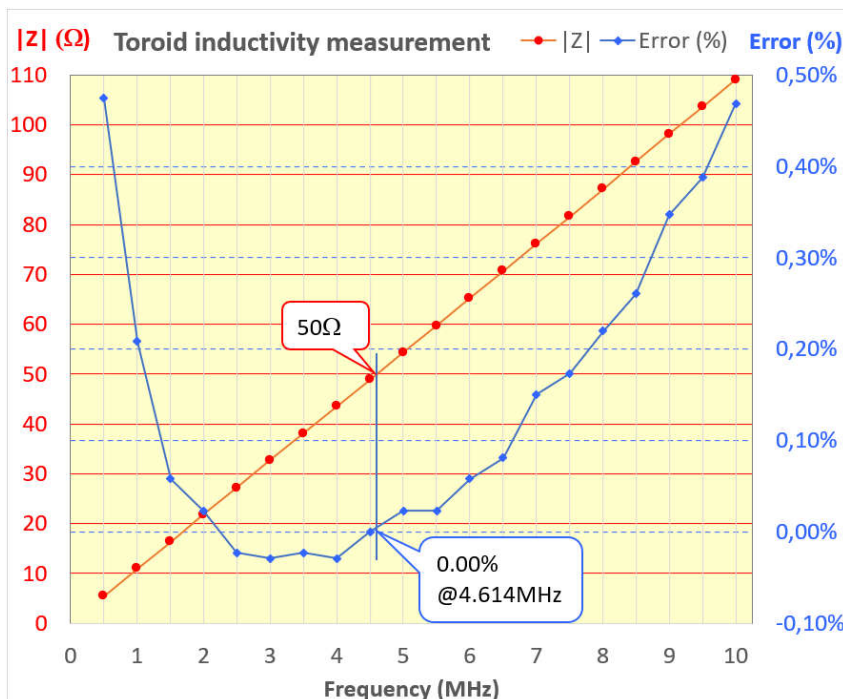


Abb. 3.10: Prozentuale Abweichung der L-Messwerte vom Wert für  $|Z| = 50\Omega$ .

Die Genauigkeits-Parabel (Abb. 0.2) ist mit etwas Fantasie wieder zu erkennen. Die Eckpunkte für eine Abweichung von  $\sim 0,5\%$  sind in Abb. 3.7 als Winkelabweichung von der Senkrechten auf den  $50\Omega$ -Mittelpunkt des Smith-Charts eingezeichnet. Zu niedrigeren Frequenzen hin ist die

Toleranzbreite offenbar etwas größer, was auf die in Abb. 3.7 nicht erkennbare, dennoch vorhandene ansteigende untere Flanke der Eigenresonanz zurückzuführen sein sollte.

Insgesamt ist die Fehlerbreite von +/- 0,5% für den Messbereich von 0,5 bis 10MHz für die untersuchte Ringkern-Induktivität erstaunlich gering. Eine **S11-Reflexionsmessung** an Induktivitäten oder Kapazitäten mit einer Frequenz, für die die **Bauteilimpedanz  $50\Omega$  +/- 20%** beträgt, ist auf alle Fälle eine gute Idee.

Betrachten wir nochmal die vom AADE LC-Meter zu  $1,721\mu\text{H}$  bestimmte Induktivität zusammen mit Abb. 3.9 und 3.10. Das AADE LC-Meter wird mit einer Frequenz in der Gegend von etwa 700kHz gemessen haben. Das ist ziemlich niedrig, aber volle Absicht, um Probleme mit der ansteigenden unteren Flanke der Eigenresonanz von vorneherein zu umgehen. Die Messung ergab aus Abb. 3.9, grob interpoliert, einen Wert von ca.  $1,734\mu\text{H}$ . Knapp daneben ist auch vorbei. Aber: Abb. 3.10 weist hier einen Fehler von ca. 0,35% interpoliert im Vergleich zum ermittelten Referenzwert  $1,728\mu\text{H}$  aus – immer noch sehr gut. Auch der direkte Vergleich -  $1,721\mu\text{H}$  (AADE LC-Meter) zu  $1,728\mu\text{H}$  ("bester" VNWA-Wert) - ist mit 0,4% Abweichung zufriedenstellend. Was, zusammen mit den Ergebnissen aus Abschnitt 2, den Schluss erlaubt, dass ein LC-Meter wie das von AADE mit seiner einfachen Bedienung hinreichend genaue Ergebnisse für den Amateurbereich liefert.



## 4 S21-Transmissionsmessungen L und Q mit dem VNWA

Bevor wir uns an die alternative Messmethode mittels S21-Transmission heranmachen, sei noch einmal unser Anliegen verdeutlicht. Wir wollen mit überschaubarem Aufwand ermitteln, ob die für den jeweiligen Einsatz vorgesehenen Induktivitäten (halbwegs) die geforderten Werte für L, Q und Eigenresonanzfrequenz haben. Exakte Daten, für die dann aber verfeinerte Messprozeduren (z.B. [1] bis [4]) heranzuziehen wären, sind dabei nicht Bedingung. Der Einbau in die Zielumgebung wird die gemessenen Eigenschaften ohnehin wieder verändern. Bei Filtern etwa werden wir die Responsekurven sicher nachmessen und, wenn nötig, z.B. die Wicklungen behutsam stauchen oder dehnen, bis es passt. Das geht mit Ringkernspulen ebenso wie mit Luftspulen. Wir beschränken uns hier also pragmatisch auf "simple and stupid", wie es Tom, DG8SAQ, in [3], drittes Zitat vorschlägt. Hinweise dazu im Help, Seite 383, mahnen allerdings zur Vorsicht, siehe auch Abb. 0.2.

Wie es genauer, dafür aber wesentlich aufwendiger geht, ist in [1] und [2] beschrieben.

Für die Transmissionsmessungen basteln wir uns einen Adapter aus SMA-Flanschbuchsen und einer zweipoligen Leiterplattenklemme, SMA-Mittelpins und Klemmenpins miteinander verlötet. Das hat mit sauberer 50Ω-Technik nur noch entfernt zu tun. Um es einfach zu halten, wollen wir aber mal nicht kleinlich sein.

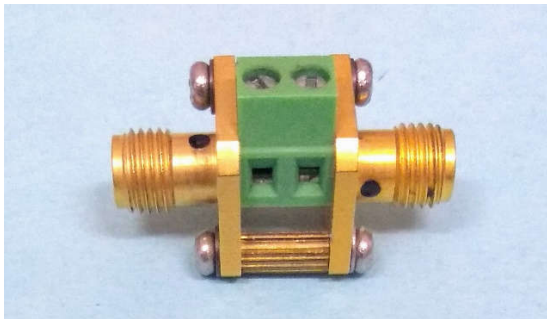


Abb. 4.1: Transmissionsadapter mit Leiterplattenklemme.

Test-Fixture: Abb. 4.1, vergleiche Abb. 0.1 rechts.

VNWA-Einstellungen zur Messung von Z, L und Q:

- VNWA für mindestens eine Stunde aufwärmen.
- Settings – Frequency Range – Linear Sweep:  
Start 0.1, Stop 200 MHz für Amidon Eisenpulver-Ringkerne,  
Stop 50MHz für Drosseln, ggf. geringer.
- Settings – Diagrams – Display – Traces (siehe hierzu Abb. 4.2):  
Trace 1, t2s,  $|Z|$ ,  
Trace 2: t2s, Real Z  
Trace 3: t2s, Imag Z  
Trace 4: t2s, L--  
Trace 5: t2s, QL  
Trace 6: S21, Phase
- Settings – Sweep: 600 Points, 50ms per Point.
- Settings – Average, Peak Hold,... - Smoothing, z.B. 10, ausprobieren,  
Optional zum Ausbügeln der etwas verrauschen Q-Kurven (Trace 5).
- Measure – Calibrate – Cal Kit – Cal Kit File Manager: Ideal calibration standards.
- Measure – Calibrate: (Nur) Thru-Calibration mit Kurzschlussbügel im Transmissionsadapter.

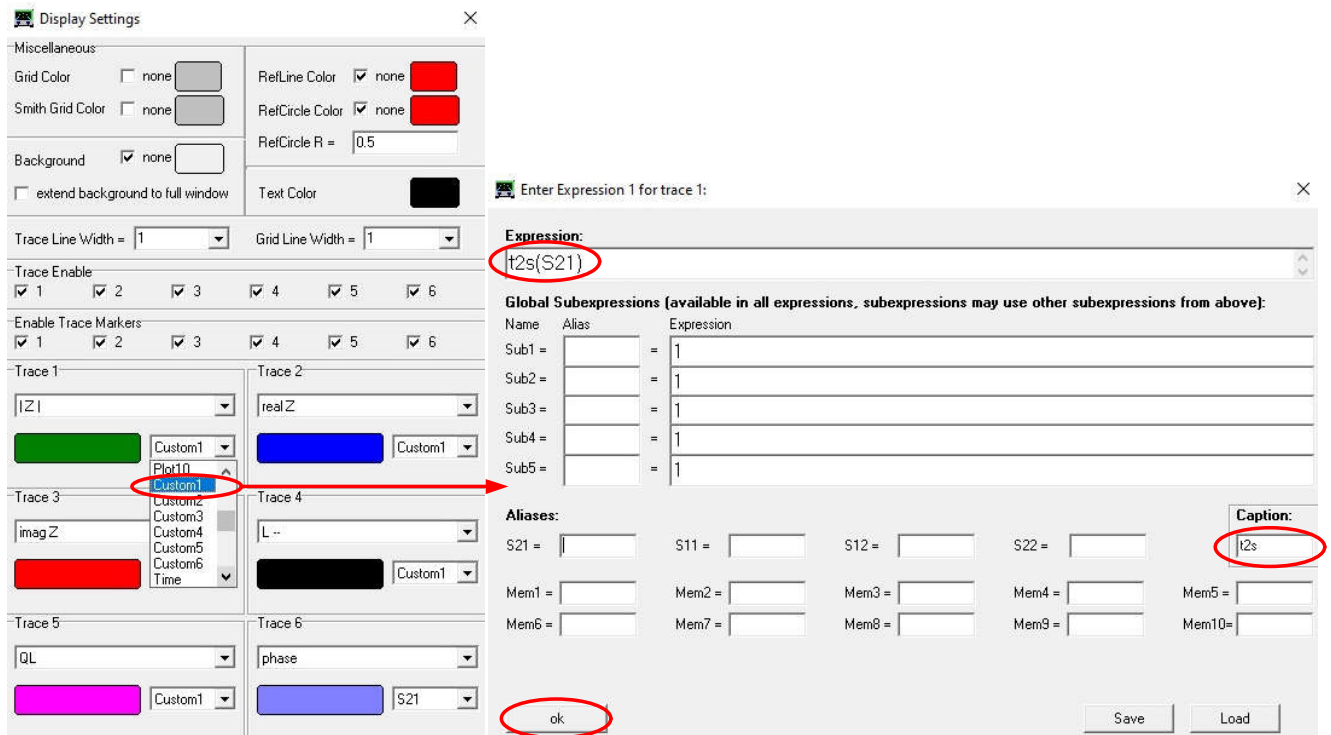


Abb. 4.2: Einstellen der Custom Traces t2s.

Die Funktion "t2s" rechnet die S21-Transmission in eine S11-Reflexion um. In älteren VNWA Softwareversionen muss als "Expression" die Umrechnungsformel " $(3 \cdot S21 - 2) / (S21 - 2)$ " explizit eingegeben werden. Die Definition von t2s als Custom1 muss nur einmal für Trace 1 ( $|Z|$ ) gemacht werden. In den folgenden Traces 2 bis 5 genügt die Auswahl "Custom1". Trace 6, S21 Phase, ist nötig, um überhaupt einen Sweep zu erzeugen. Danach kann die Anzeige deaktiviert werden. Zur Lokalisierung der Eigenresonanz könnte der Nulldurchgang der Phase jedoch auch herangezogen werden.

Mit der rudimentären Thru-Kalibrierung bewegen wir uns aber auf dünnem Eis.

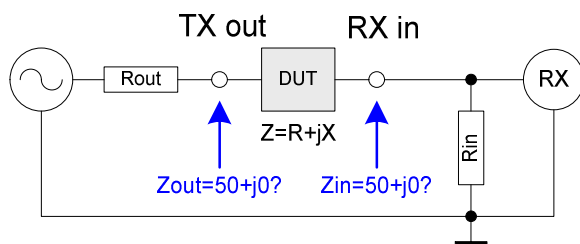


Abb. 4.3: Unsichere Impedanzverhältnisse im VNWA.

Die zur Kalibrierung gesetzten "Ideal calibration standards" mit (exakt)  $Z = 50 + j0 \Omega$  sind Wunschdenken. Sowohl Rout als auch Rin werden davon mehr oder weniger abweichen. Nur wenn Z-DUT hinreichend groß ist, wird der Strom durch ihn genügend Spannungsabfall und Phasenverschiebung bei geringem Spannungsverlust an Rout erzeugen, so dass die Ungenauigkeiten von Rout und Rin weniger Auswirkungen haben. Aber sehen wir uns das erst einmal an.

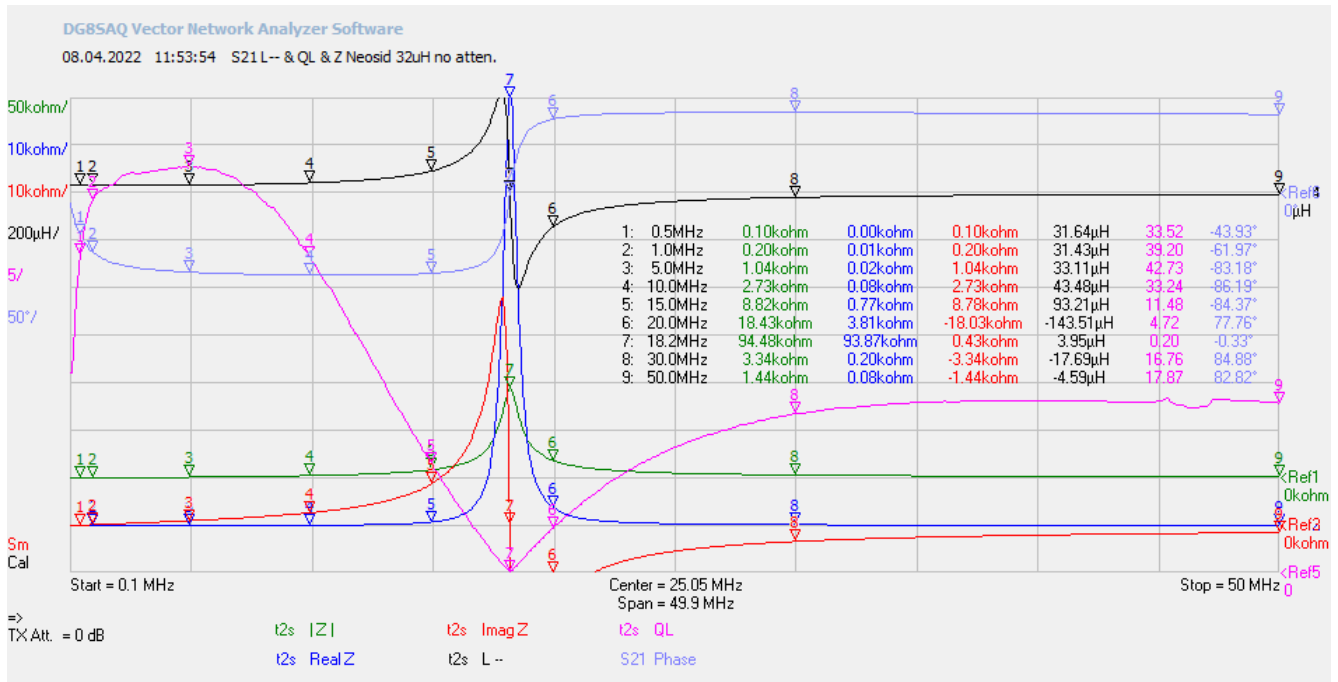


Abb. 4.4: S21-Messung Neosid 32µH ohne Abschwächer.

Die Messergebnisse für L (S21) unterscheiden sich bei der Neosid-Drossel um <2% von L (S11, Abschn. 3). Die Werte der Güte QL weichen aber stärker ab. Davon mehr weiter unten.

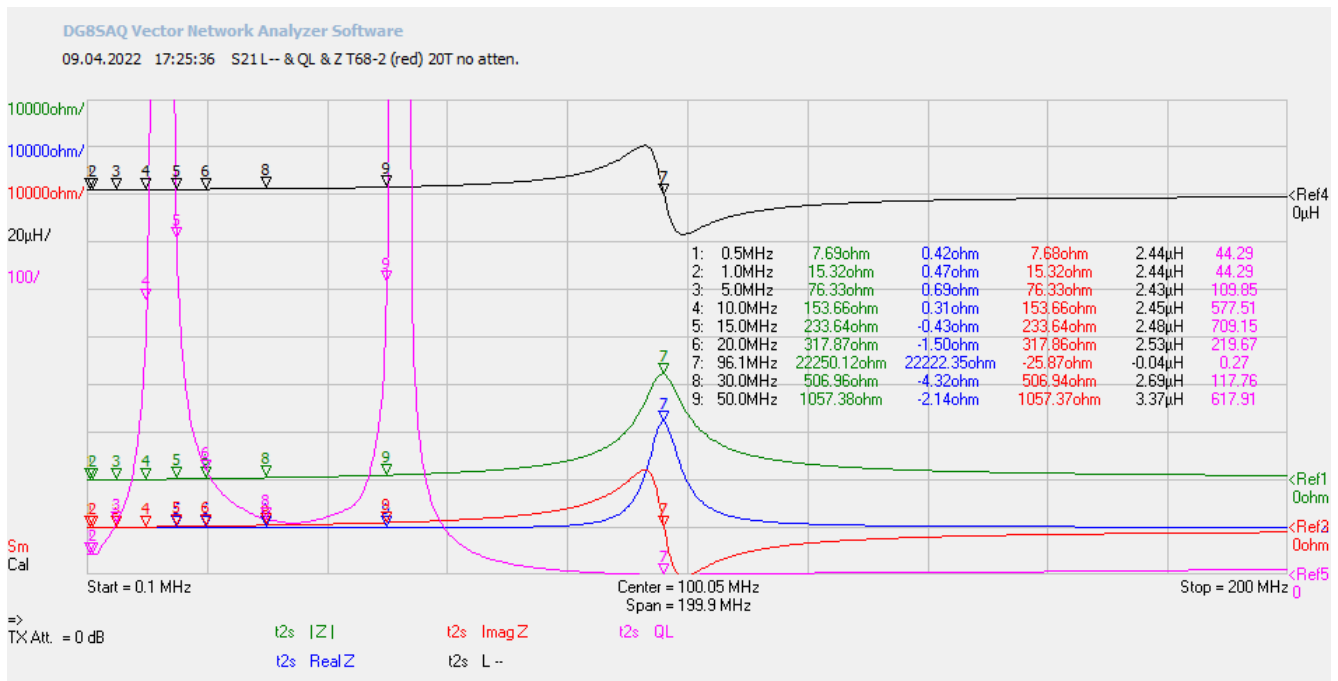


Abb. 4.5: S21-Messung Amidon T68-2 ohne Abschwächer.

Die Messergebnisse für L (S21) unterscheiden sich bei dem T68-2-Ringkern um <1% von L (S11, Abschn. 3). Bei der Güte QL gibt es ein Problem mit zwei Peaks und einer wannenförmigen Vertiefung dazwischen. Im Bereich dieser "Wanne", Marker 5, 6, 8 und 9, wird Real Z negativ gemessen. Das kann nicht sein. Hier versagt die S21-Messung.

Wenn wir nun mit hinreichend großen 50Ω-Abschwächern, hier 10dB, den TX- und RX-Ports 50Ω-Impedanzen (annähernd) aufzwingen, sollten die in Abb. 4.3 aufgezeigten Verhältnisse halbwegs geordnet werden können. Das mit der Signaldämpfung in Kauf zu nehmende Rauschen in der Q-Kurve lässt sich mit der Average-Funktion wieder etwas glatt bügeln. Wir führen eine neue S21-

Kalibrierung der Messanordnung mit je einem 10dB-Abschwächer an den Enden des Transmissionsadapters durch.

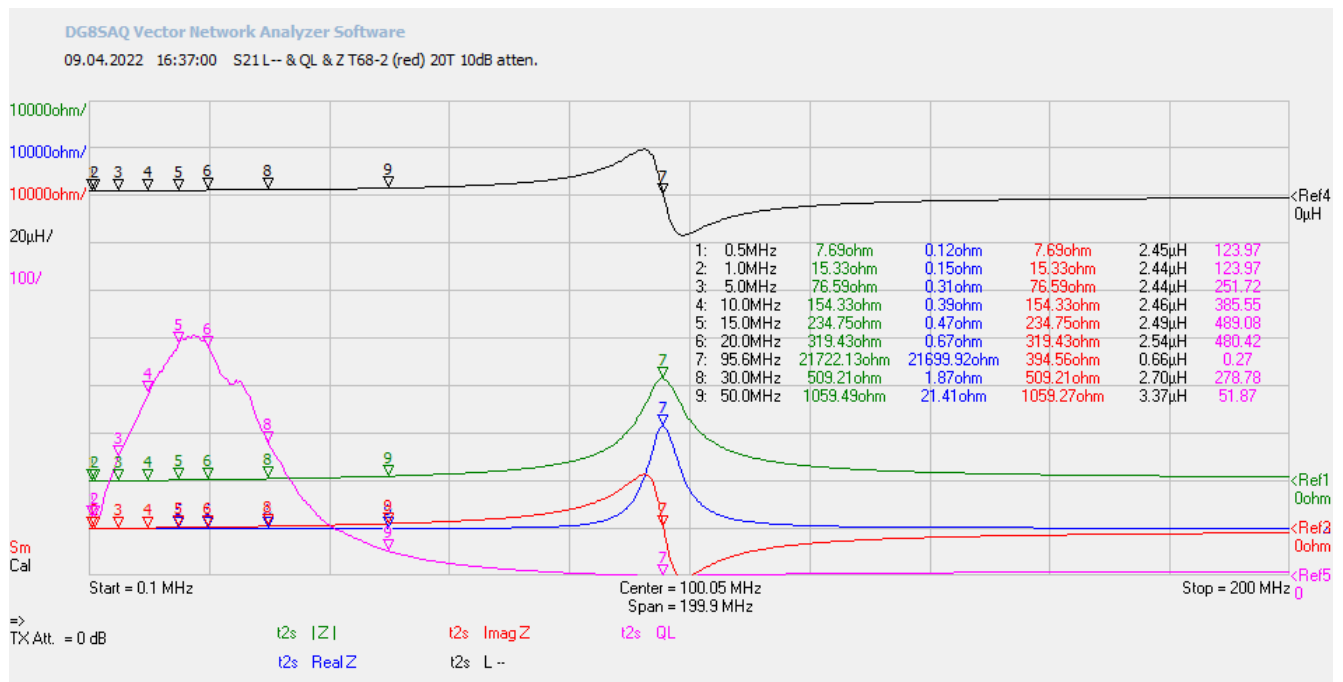


Abb. 4.6: S21-Messung Amidon T68-2 mit 10dB Abschwächer.

Die Messergebnisse für L sind nahezu identisch. Die Messung von QL erscheint nun plausibel (geglättet mit Average über 10 Punkte).

Eine zusammenfassende Darstellung aller Messergebnisse zur Bestimmung von L zeigen die nachfolgenden Abbildungen.

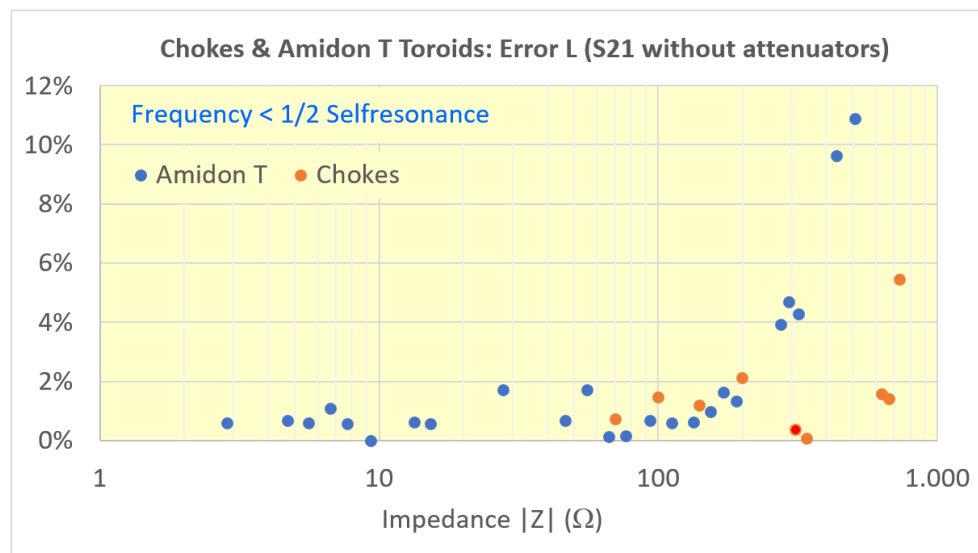


Abb. 4.7: Abweichungen (absolut) der gemessenen Induktivitäten aus S21 ohne Abschwächer.

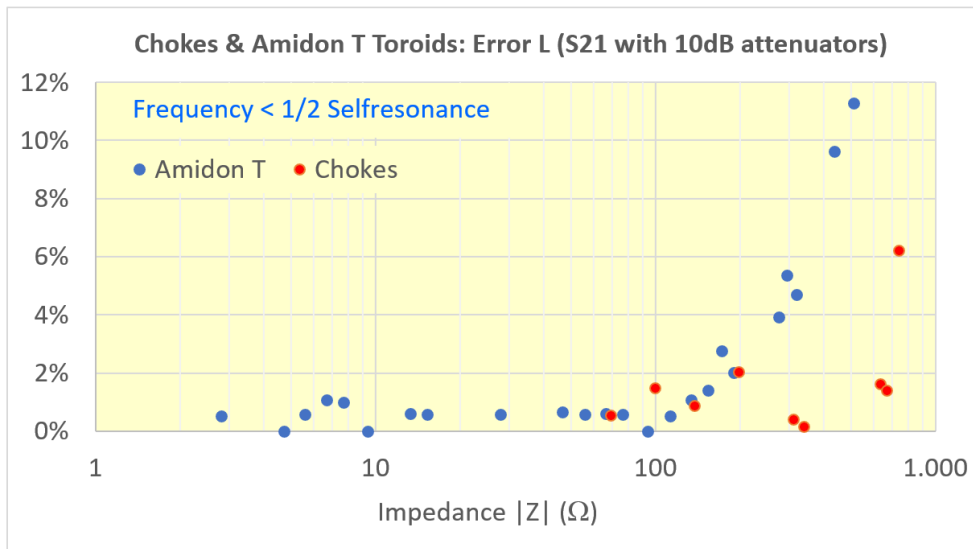


Abb. 4.8: Abweichungen (absolut) der gemessenen Induktivitäten aus S21 mit 10dB Abschwächer.

Die Ergebnisse sind kaum zu unterscheiden, jedoch ist die Streuung bei den Messungen mit Abschwächer etwas geringer. Wie in Abb. 3.6 (S11-Messungen) wurden bei den Drosseln nur die Frequenzen unterhalb der halben Selbstresonanz berücksichtigt.

### Fazit bis hierher:

1. Die Messung von Induktivitäten mit dem VNWA ist sowohl über die S11-Reflexion als auch über die S21-Transmission (mit interner Umrechnung in Reflexion) in einem weiteren Bereich möglich, als es die Hinweise im VNWA-Help vermuten lassen. Die Ergebnisse decken sich weitgehend.
2. Üblicherweise in HF-Filtern verwendete Eisenpulver-Ringkerne mit bis zu wenigen  $\mu\text{H}$ : Abweichung um  $< 2\%$  in einem Bereich von  $|Z|$  von  $\sim 2$  bis  $200\Omega$  von den mit einem LC-Meter oder dem VNWA LCR-Meter mit Frequenzen  $< 1\text{MHz}$  gemessenen Werten.
3. Untersuchte Drosseln  $22\mu\text{H}$  bis  $2,5\text{mH}$ : Abweichung um  $< 2\%$  in einem Bereich von  $|Z|$  von  $\sim 70$  bis  $700\Omega$ , sofern die Messfrequenz deutlich unterhalb der Selbstresonanz liegt.
4. Die Eigenresonanzen lassen sich mit beiden Methoden (S11 oder S21) einfach bestimmen. Dabei ist die einfachere S11-Messvorrichtung mit SOL-Kalibrierung vorteilhafter.
5. Die S21-Messung ohne Impedanzanpassung mit hinreichend großen Abschwächern wirft Probleme bei der Gütebestimmung auf infolge Unsicherheiten in Bezug auf die Impedanzen von TXout und RXin mit entsprechenden Messfehlern. Dies soll abschließend untersucht werden.

## 5 Besondere Betrachtung der Güte QL

Nicht möglich hier ist ein Vergleich der nach der S11- und der S21-Methode des VNWA gemessenen Güten QL mit Referenzwerten. Von Amidon (Hersteller Micrometals) gibt es zwar Q-Kurven, die beste im Netz gefundene Kopie ist von 1997 [5], jedoch nicht für alle verwendeten Kerne und die hier verwendeten Windungszahlen. Q ist auch abhängig von der Windungszahl und der Drahtstärke.

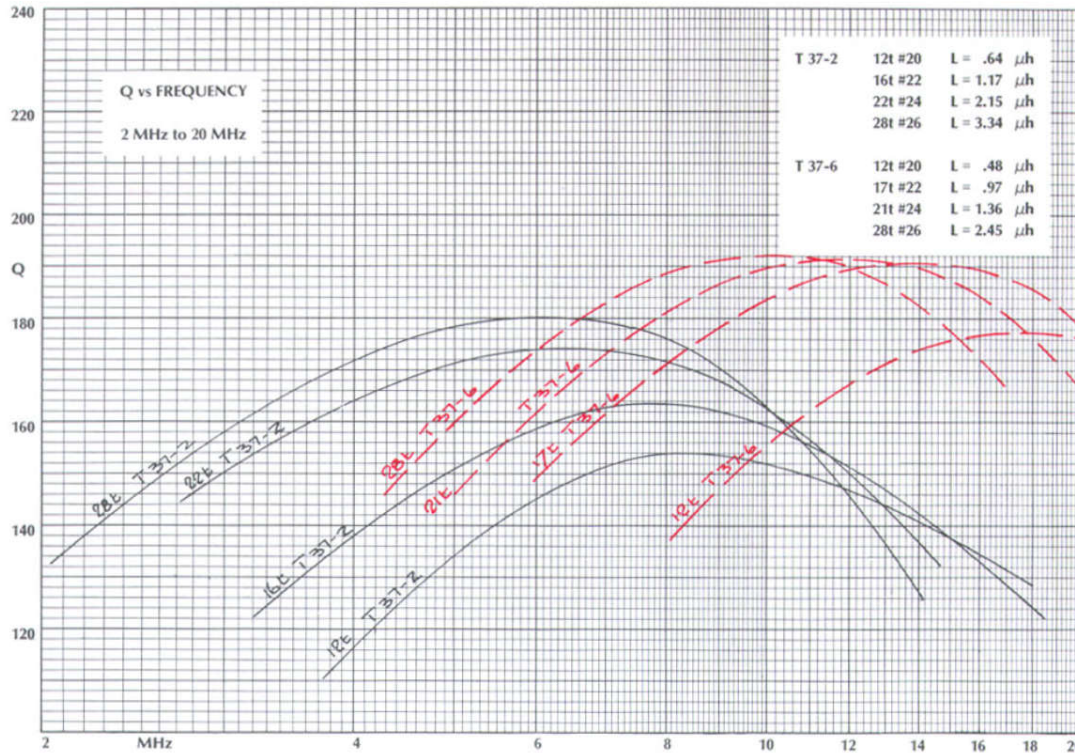


Abb. 5.1: Beispiel-Plot von Q-Kurven, u.a. T37-2, Quelle: [5].

Gütemessungen mit der S21-Methode ohne Abschwächer erwiesen sich als unzuverlässig, vgl. Abb. 4.5. Verbleiben also die S11- und die S21-Methode mit 10dB-Abschwächer. Wenn wir deren Aussagekraft anhand der wenigen Herstellerangaben aus [5] bemessen wollen, bleibt nur der Offenbarungseid.

QL-Werte		5MHz	10MHz	20MHz
T37-2, 14t	S11	195	192	144
T37-2, 14t	S21 (10dB)	180	205	192
T37-2, 12t	Micrometals	134	132	122
T37-2, 16t	Micrometals	151	159	116
T68-6, 20t	S11	258	231	149
T68-6, 20t	S21 (10dB)	361	547	826
T68-6, 23t	Micrometals	268	330	--
T68-10, 20t	S11	224	254	230
T68-10, 20t	S21 (10dB)	209	396	*)
T68-10, 15t	Micrometals	135	164	164
T68-10, 30t	Micrometals	103	176	--

Tab. 5.1: Vergleich der gemessenen QL-Werte mit Herstellerangaben [5].

\*) Anmerkung zu T68-10: QL zeigte einen Doppelpeak vergleichbar mit Abb. 4.5 mit negativen Real Z-Werten oberhalb 10MHz.

Die Messwerte S11 und S21 mit 10dB-Abschwächer sind auch nicht mit viel Fantasie zur Deckung zu bringen. Hier wären wohl ausgefeiltere Mess- und Kalibrierungsmethoden [1], [2] angebracht. Auch

passen sie kaum zu den Herstellerangaben aus den Plots [5] von 1997. Zumindest denkbar wäre, dass die Daten infolge Rezepturänderungen inzwischen obsolet sind.

Vergleichen wir noch die VNWA-Messungen nach der S11- und der S21 + 10dB-Methode.

QL-Werte VNWA	0,5MHz		1MHz		5MHz		10MHz		20MHz	
	S11	S21	S11	S21	S11	S21	S11	S21	S11	S21
SMCC 22µH	51	40	65	48	47	38	28	23	--	--
Neosid 32µH	58	33	78	41	66	41	43	29	--	--
SMCC 100µH	91	64	103	70	--	--	--	--	--	--
Geloso 100µH	22	24	19	18	14	16	--	--	--	--
Geloso 2,5mH	39	41	34	30	--	--	--	--	--	--
T37-2 14t	143	108	143	108	195	180	193	205	145	192
T68-2 20t	188	124	188	124	259	252	231	385	149	480
T68-6 20t	180	249	180	249	258	361	249	547	166	825
T68-10 20t	150	102	150	102	225	209	254	396	230	--

Tab. 5.2: Vergleich der QL aus VNWA-Messungen (S11 und S21 mit 10dB-Abschwächer).

Auch hier kann das Ergebnis nicht zufriedenstellen. Die halbwegs übereinstimmenden Messwerte sind grün markiert. Das sind eindeutig zu wenige. Die Gütebestimmung mit diesen einfachen Messmethoden ist mit Vorsicht zu genießen.

Eine Möglichkeit gibt es noch. So schnell hat der VNWA sein Pulver nicht verschossen. Wir lassen den Transmissionsadapter noch angeschlossen, nun jedoch ohne die Abschwächer. Wenn wir, statt uns die bauteilbedingte Eigenresonanz anzusehen, die Spulen mit einem (guten) Kondensator zu einem Schwingkreis ergänzen, können wir aus der Form der Resonanzkurve die Güte bestimmen.

Ein Parallelschwingkreis mit einer verlustbehafteten Spule zeigt eine glockenförmige Resonanzkurve mit einem Minimum bei der Resonanzfrequenz mit der S21-Transmissionsmessung. Deren Bandbreite B wird hauptsächlich durch den Verlustwiderstand der Spule (Abb. 1.4) bestimmt. Ein "guter" Kondensator, z.B. NP0/COG, fällt dabei nicht ins Gewicht.

Die Güte Q ergibt sich dann zu

$$Q = \frac{f_0}{B} = \frac{f_0}{f_2 - f_1} \quad \begin{array}{l} f_0 = \text{Resonanzfrequenz} \\ \text{mit } f_2 = \text{Frequenz} > f_0 \text{ bei } 3\text{dB Abfall, hier Anstieg} \\ f_1 = \text{Frequenz} < f_0 \text{ bei } 3\text{dB Abfall, hier Anstieg} \end{array}$$

Die Resonanzfrequenz  $f_0$  ist (taschenrechnertauglich)

$$f_0 = \sqrt{\frac{25330}{L * C}} \quad f_0 [\text{MHz}], L [\mu\text{H}], C [\text{pF}]$$

Der Transmissionsadapter (Abb. 4.1) kann bei Bedarf um eine zweite Leiterplattenklemme für das C erweitert werden. L und C lassen sich aber auch auf eine zweipolige Stiftleiste (RM 2,54mm) löten. Die passt in die Leiterplattenklemme.

VNWA-Einstellungen zur Messung von QL aus der Resonanzkurve:

- VNWA für mindestens eine Stunde aufwärmen.
- Settings – Frequency Range – Linear Sweep:  
Center frequency ~ Resonanzfrequenz,  
Span ca. 100 bis 200 kHz.
- Settings – Diagrams – Display – Traces:  
Trace 1, S21 dB
- Rechtsklick in das Hauptfenster: Clear all Markers (falls noch welche stehen).

- Rechtsklick in das Hauptfenster: Realtime Expression Evaluator – Start,

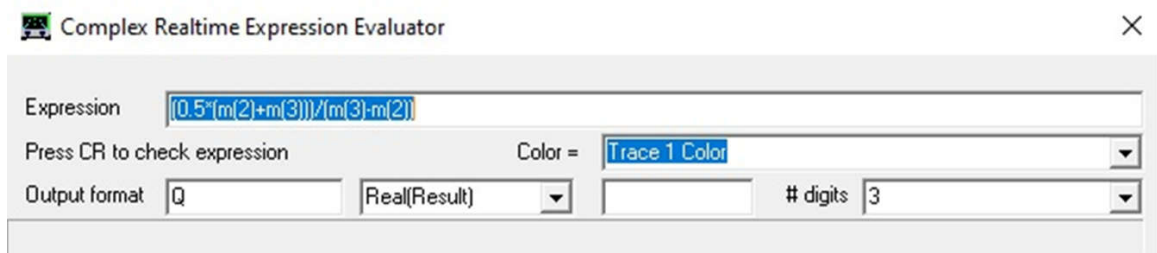


Abb. 5.2: Q-Plot Expression.

Expression:  $(0.5 \cdot (m(2) + m(3))) / (m(3) - m(2))$

m(2): Marker 2 auf der unteren 3dB-Frequenz (s. Abb. 5.3)

m(3): Marker 3 auf der oberen 3dB-Frequenz

Zähler: Mittelwert der 3dB-Frequenzen = Resonanzfrequenz (Mitte der Resonanzkurve)

Nenner: Differenz der 3dB-Frequenzen = Bandbreite.

- Rechtsklick in das Hauptfenster: Add Frequency Marker – Bandwidth – Bandstop "Bandstop" für die umgekehrte Glockenkurve.
- Es wird eine Gruppe mit 4 Zeilen 1 ...4 angezeigt (Abb. 5.3 unten).
- Rechtsklick dort hinein: Set Bandwidth Level  $\Rightarrow$  Bandstop Level 3dB, OK.
- Settings – Sweep: 600 Points, 50ms per Point.
- Settings – Average, Peak Hold,... - Smoothing, z.B. 10, ausprobieren, Optional zum Ausbügeln der Resonanzkurve.
- Measure – Calibrate – Cal Kit – Cal Kit File Manager: Ideal calibration standards.
- Measure – Calibrate: (Nur) Thru-Calibration mit Kurzschlussbügel im Transmissionsadapter.

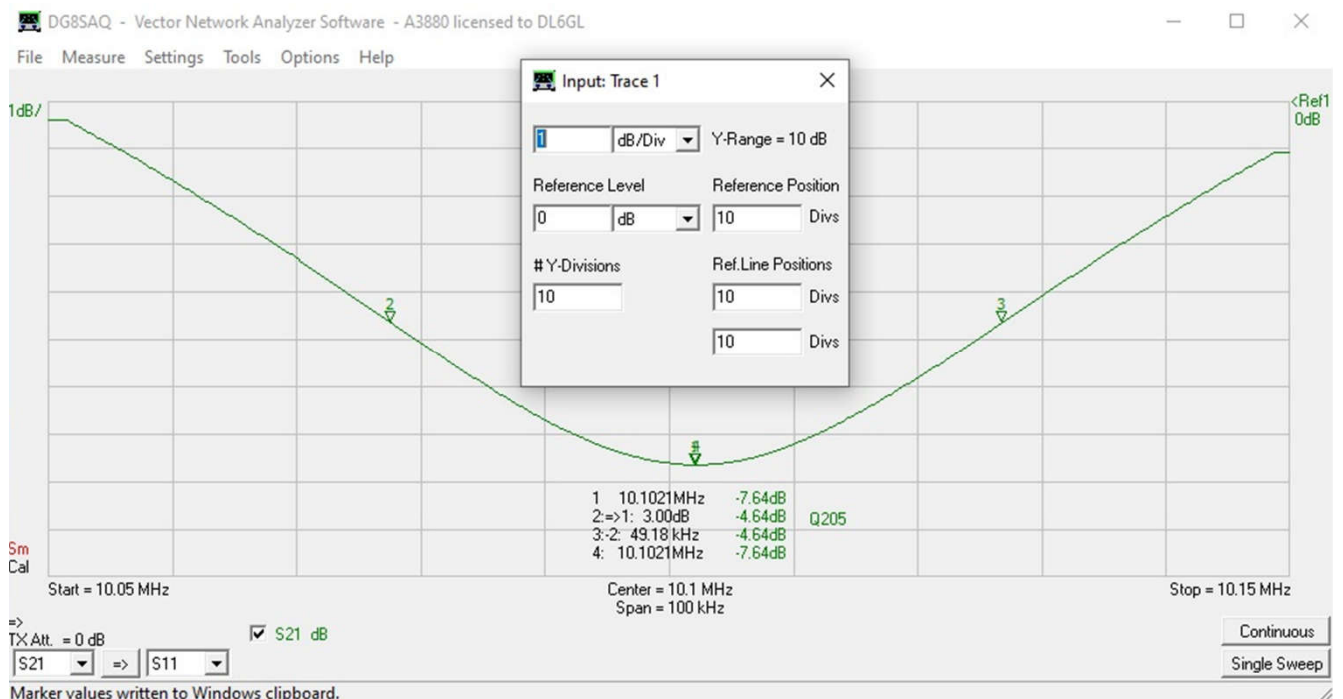


Abb. 5.3: QL-Sweep Amidon T68-2 (2,45  $\mu$ H)+100pF, Ergebnis: QL=205.

Um die Resonanzkurve auszurichten, Doppelklick auf die dB-Divisions-Anzeige links oben, dB/Div und Reference Position entsprechend anpassen. Ggf. mit Average die Kurve etwas glätten.



QL-Werte	1MHz			10MHz		
	S11	S21	Res	S11	S21	Res
SMCC 22 $\mu$ H	65	48	52			--
Neosid 32 $\mu$ H	78	41	67			--
SMCC 100 $\mu$ H	103	70	191			--
Geloso 100 $\mu$ H	19	18	17			--
T37-2 14t				193	205	218
T68-2 20t				231	385	205
T68-6 20t				249	547	234
T68-10 20t				254	396	317

Tab. 5.3: Vergleich der QL aus VNWA-Messungen (S11, S21 (10dB) und Resonanz).

Mit geeigneten C's wurden die Resonanzfrequenzen auf etwa 1MHz (Drosseln) und 10MHz T-Ringkerne für den Vergleich eingestellt. Die Resonanzkurven waren bei den für solche Zwecke vorgesehenen Amidon T-Ringkernen wie erwartet glockenförmig (Abb. 5.3). Die Resonanzkurven der Drosseln waren S-förmig.

### Fazit zur Bestimmung der Güte QL mit dem VNWA:

1. Das Ergebnis aus den drei Messmethoden ist uneinheitlich. Welche davon nun "richtige" Werte liefern, konnte mangels Vergleichsmöglichkeiten nicht eindeutig festgestellt werden.
2. Im Hinblick auf eine simple Messmethode mit einer vollständigen SOL-Kalibrierung liefert das S11-Reflexionsverfahren mit der Beschränkung auf "kleine" Induktivitäten mit einem  $|Z|$  bis zu einigen 100 $\Omega$  zumindest Anhaltspunkte zur Orientierung.
3. Wenn es das S21-Transmissionsverfahren für größere Induktivitäten sein soll, ist man für die QL-Bestimmung mit beidseitig mindestens 10dB-Abschwächen i.a. auf der sicheren Seite, was "vernünftig" aussehende Werte angeht.
4. Einen Schwingkreis herzustellen, um daraus bei einer wählbaren Resonanzfrequenz die Güte QL zu ermitteln, bedeutet zusätzlichen Aufwand. Die dahinterstehende Idee, QL aus der 3dB-Bandbreite zu berechnen, ist nachvollziehbar und erscheint vertrauenswürdig. Zu beachten ist dabei jedoch, dass man insbesondere bei Drosseln weit unterhalb deren Eigenresonanz bleiben muss.

Wenn wir aber mal davon losgelöst überlegen, wofür wir Aussagen über die Güte von Induktivitäten tatsächlich brauchen, reduziert sich das doch im Wesentlichen auf Eisenpulver-Ringkerne in Filtern. Hier würde sich bei der Auslegung etwa mit Elsie Filter Design mit der Angabe von QL die Auswirkung auf die Flankensteilheit beurteilen lassen. Mit einfachen Methoden wie hier ermittelte Schätzwerte sollten dafür ausreichen, wenn nicht gleich Daumenwerte, etwa 100 bis 200, verwendet werden. Bei Ferrit-Drosseln genügen neben der Eigenresonanz auch nur Schätzwerte für QL, um die gewünschte Drosselwirkung zu beurteilen.

### Referenzen

- [1] How to calibrate and measure a DUT like a toroid correctly the smart way.pdf  
<https://www.hamcom.dk/VNWA/How%20to%20calibrate%20and%20measure%20a%20DUT%20like%20a%20toroid%20correctly%20the%20smart%20way.pdf>
- [2] How to calibrate and measure a DUT like a toroid in shunt mode\_2.pdf  
[https://www.hamcom.dk/VNWA/How%20to%20calibrate%20and%20measure%20a%20DUT%20like%20a%20toroid%20in%20shunt%20mode\\_2.pdf](https://www.hamcom.dk/VNWA/How%20to%20calibrate%20and%20measure%20a%20DUT%20like%20a%20toroid%20in%20shunt%20mode_2.pdf)

- [3] VNWA 36.6.7 Help.pdf, How to measure impedances, Page 383  
VNWA 36.6.7 Help.pdf, Custom: Trace data manipulation, Page 404  
[https://www.sdr-kits.net/DG8SAQ/VNWA/VNWA\\_Experiments.pdf](https://www.sdr-kits.net/DG8SAQ/VNWA/VNWA_Experiments.pdf)
- [4] [https://www.clarke.com.au/pdf/CMT\\_Accurate\\_Measurements\\_VNA.pdf](https://www.clarke.com.au/pdf/CMT_Accurate_Measurements_VNA.pdf)
- [5] UK\_MIS\_Q Curve for iron powder cores\_TN.pdf  
[https://s3.amazonaws.com/micrometals-production/filer\\_public/7e/d0/7ed096a0-fe6e-4df1-9da9-e129c1ee73d2/q\\_curve\\_catalog\\_issue\\_h.pdf](https://s3.amazonaws.com/micrometals-production/filer_public/7e/d0/7ed096a0-fe6e-4df1-9da9-e129c1ee73d2/q_curve_catalog_issue_h.pdf)
- [6] [https://dc4ku.darc.de/R-L-C\\_Messung\\_mit\\_NanoVNA.pdf](https://dc4ku.darc.de/R-L-C_Messung_mit_NanoVNA.pdf)