

Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 1

Zielsetzung: Ermittlung der Induktivität, Spulegüte und Eigenresonanz von Spulen

Einleitung: Die genaue Bestimmung der wichtigsten Spulenparameter ist schon immer ein defiziles Problem in der Praxis eines HF-Amateurs. Gebräuchlich sind indirekte Verfahren, wie mit einem Dipmeter. Durch L/C Messbrücken konnte man bereits eine recht ordentliche Genauigkeit erzielen. Die Messfrequenz liegt allerdings meistens im NF-Bereich und gerade kleine Induktivitäten wie sie im HF Bereich oft benötigt werden, sind nur unzureichend ermittelbar.

Wenn dann noch die Güte interessierte, wurden die Messaufbauten schon komplizierter. In den letzten Jahren sind nun bedingt durch moderne Bauteile wie DDS-Generatoren und durch den Einzug von PC's in die Bastelstuben ergeben sich im Hobbylabor vollkommen neue Möglichkeiten.

Bisherige Messverfahren: Am bekanntesten ist die Resonanzmethode – die unbekannte Induktivität wird mit einem bekannten Kondensator zu einem Schwingkreis (meist Parallelschwingkreis) zusammengeschaltet und es wird die Resonanzfrequenz dieses Schwingkreises ausgemessen. Über die Thomsonsche Schwingungsformel kann dann die Induktivität berechnet werden. Die (höhere) Resonanzfrequenz der Spule ohne Kondensator zeigt die Eigenresonanz. Im Prinzip arbeitet auch das sehr beliebte L/C Meter von AAE nach diesem Prinzip. Dieses Gerätchen rechnet über eine gemessene Frequenzänderung an einem bekannten Schwingkreis, die durch Einfügen der unbekanntes L (bzw. des unbekanntes C's) entsteht, die Werte des Bauteiles aus und gibt das Ergebnis direkt auf dem Display an. Das funktioniert bis zu recht kleinen Werten im 1 nH und 0,1 pF Bereich verhältnismäßig gut. Für die meisten Anforderungen ist das gegenüber den üblichen L/C Messbereichen von digitalen Vielfachmessern gerade im HF Bereich viel genauer. Die Vielfachmesser haben oft den Nachteil, gerade im für uns HF-Leute wichtigen Bereich unter 1 µH nicht auflösen zu können. Leider verhalten sich Induktivitäten über die Frequenz betrachtet etwas eigenartig. Effekte wie Eigenresonanzen, Frequenzabhängigkeiten der Ferritparameter, Skin- und Approximationseffekte sowie Wickelkapazitäten sorgen für eine andere Eigenschaften, als wir sie erwarten würden.

Messung mit einem VNA: Oft wollen wir ja gerade wissen, wie hoch ist den die Induktivität bei einer bestimmten Frequenz denn nun wirklich und wie hoch ist dort die Güte der Spule? Ein VAN kann Betrag und Phase des eingespeisten Signals ermitteln. Über einen Rechner kann der interessierende Frequenzbereich vorgegeben werden und die Messwerte werden von ihm direkt verarbeitet. Über bekannte Beziehungen der gemessenen Größen können fast alle Werte berechnet werden, die unser unbekanntes Messobjekt (DUT, Device under Test) hat.

Verschiedene obligatorische Kalibrationsläufe, bei denen die Einflüsse der Messanordnung ermittelt werden müssen, machen die Sache zwar aufwendig, sorgen aber für sehr genaue Resultate. Meist ist je ein Messdurchlauf mit einem Kurzschluss (S=Short), einer offenen Leitung (O=Open), einem bekannten Systemwiderstand (50 Ohm) (L=Load) und eine Durchgangsmessung (T=Through) erforderlich.

Dabei sind mit unserem VNA (nach N2PK) drei prinzipielle Messverfahren möglich:

1. Transmissionsmessung
2. Reflexionsmessung
3. Kombination aus Transmissions- und Reflexionsmessung

Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 2

Zunächst möchte ich mich auf die Reflexionsmessung beschränken, durch die bereits viele Bauteilgrößen ermittelbar sind.

Eine Reflexionsbrücke wird von dem Generator gespeist und unser DUT ist quasi als „Last“ angeschlossen. Je nach Art unserer Last wird die Brücke verstimmt und die resultierende Brückenspannung wird über den 1. Detektor des VNA in Betrag und Phase ausgewertet. Mathematische Algorithmen berechnen dann im PC Punkt für Punkt die gewünschte Eigenschaft unseres DUT und stellen sie graphisch auf dem Display dar.

Software: Es gibt inzwischen für den N2PK VNA eine große Anzahl von Softwarelösungen, die jede für sich ihre Vor- und Nachteile besitzt. Ich benutze momentan das Windows-Programm myVNA von Dave, G8KBKB, in der Version 1.0.0.25. Es bietet sehr komfortable Messoptionen, unterstützt das CDS-Verfahren ("Correlated Double Sampling") sowie die zwei Detektoren und hat viele sehr praxisbezogene Funktionen wie Autoscala oder diverse Marker.

Einstellungen: Als Optimum zwischen Genauigkeit und Messgeschwindigkeit haben sich bei mir für die Messungen an Spulen folgende Einstellungen bewährt:

Calibration über vollen Span mit 500 Messpunkten bei ADC Speed 1 und Trace Averages 1

Darstellung mit 200 Punkten bei ADC Speed 7 oder 8 und Trace Averages 1

Frequenzbereich voller Span oder bei Filterspulen etwa deren Mittenfrequenz und etwa 10 fache Filterbandbreite.

Das DUT wird (möglichst) kurz an der „Referenzebene“ zwischen Mittelleiter und Masse angeschlossen. Die Referenzebene ist die Stelle, an der bei der Kalibration unser SOL (Short, Open und Load) angeschlossen wurden. Bei mir hat sich ein kurzes SMA Kabel bewährt, an dem ich eine SMA-Flanschbuchse mit kurzer Lötflanke an der Masse anschrauben kann. Das Testbauteil sollte angelötet werden. Für SMD Bauteile hatte Eric hier im Thread vor einiger Zeit eine SMA Buchse mit einem kleinen federnden Haltebügel vorgeschlagen.

Beispiele:

Um Vertrauen in die eigenen Messungen, den Messaufbau und die Grenzen des Verfahrens zu bekommen, empfehle ich einfach mal verschiedenste Spulen auszumessen. Ratsam ist, mit einem anderen Messgerät die Plausibilität der Messungen zu kontrollieren. Das AADE L/C-Meter wäre dabei die erste Wahl und die Ergebnisse zumindest unterhalb 1 MHz decken sich sehr gut. Als obere Grenze für die Messung von Spulen nach der Reflexionsmethode würde ich 5 ... 10 MHz ansehen (habe ich aber noch nicht genau ausgelotet!). Halbwegs plausible Gütewerte sind bis etwa 200 zu erwarten (hier habe ich die tatsächliche Grenze auch noch nicht ermittelt).

Eigenresonanzen kann man bis 60 MHz direkt sehen und mit der Markerfunktion „Tracking Maximum“ genau ermitteln.

Im Folgenden habe ich einige meiner Experimente dokumentiert und möchte die Ergebnisse versuchen allgemeingültig zu interpretieren. Sollten sich dabei Fehler eingeschlichen haben, würde ich mich über Korrekturen und Ergänzungen sehr freuen.

Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

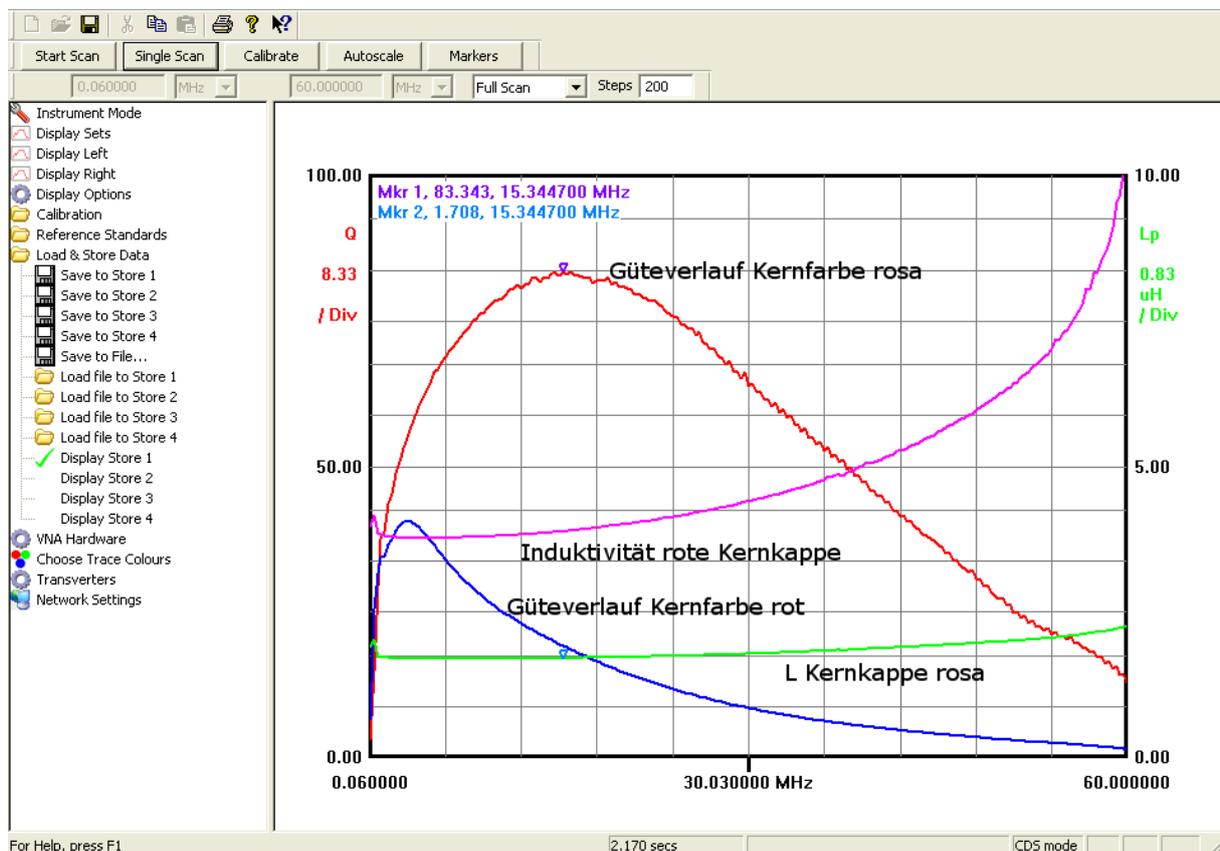
Version 1.0 DL2BZE

Seite 3

1. Bild, zwei Messungen überlagert: Spule $d = 4,5$ mm, $l = 6$ mm, Spulenkörper aus Plastik mit Kerngewinde, Wicklung: 17 Wdg, 0,3 mm CuL

Es wurden zwei Kernmaterialien benutzt. Die blaue Kurve zeigt die Güte eines Kernes aus einem AM-ZF Filter (rote Kernkappe) der dazugehörige L-Verlauf ist lila. Die Eigenresonanz kann bei etwas über 60 MHz interpoliert werden. Zur Berechnung der Wicklungskapazität nimmt man die Induktivität aus dem flachen Bereich bei 6 MHz ($4,5$ Div \times $0,83$ $\mu\text{H}/\text{Div}$) = $3,735$ μH . Wenn die Resonanzfrequenz bei 65 MHz angenommen wird ergibt sich die Spulenkapazität zu etwa $1,6$ pF.

Die rote Kurve (rosa Kappenfarbe) hat ein breites Maximum über fast den ganzen Kurzwellenbereich. Die Induktivität (grüne Kurve) verläuft recht homogen. Der Marker zeigt uns eine Induktivität von $1,7$ μH bei einer Güte von 83, was für die kleine Spulenbauform nicht schlecht ist.



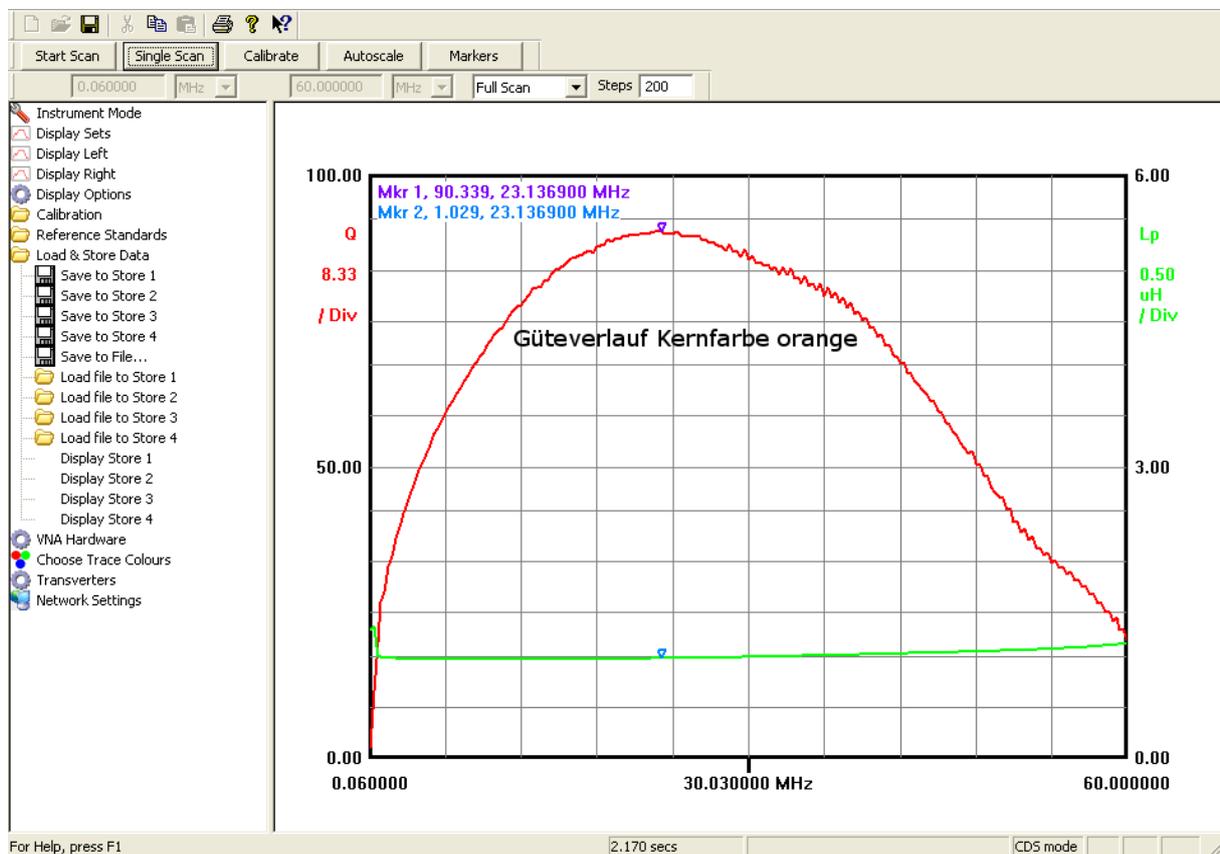
Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 4

2. Bild: Die gleiche Spule mit nochmals anderem Kern (orange Kappenfarbe) welcher sich sehr gut im oberen KW Bereich eignen würde. Die Eigenresonanz kann nicht mehr interpoliert werden, wird also weit genug von der Einsatzfrequenz der Spule entfernt liegen. Die Spulenkapazität wird immer noch bei 1,6 pF liegen (die leicht variierenden Dielektrizitätskonstanten der unterschiedlichen Kernmaterialien können wir vermutlich vernachlässigen) und somit kommen wir bei 1,6 μH Induktivität auf eine Eigenresonanz von über 99 MHz.

Bei unseren Berechnungen brauchen wir nicht mit übertrieben genauen Werten hantieren – so sehr genau sind sie leider nicht zu ermitteln auch wenn unser Rechner viele Stellen hinter dem Komma ausgeben kann! Wenn wir uns in der Größenordnung von unter 5 % Fehler bewegen, dann ist das für unsere Amateurbelange schon sehr gut – der Rest muss eh durch Feinabgleich ausgeglichen werden!

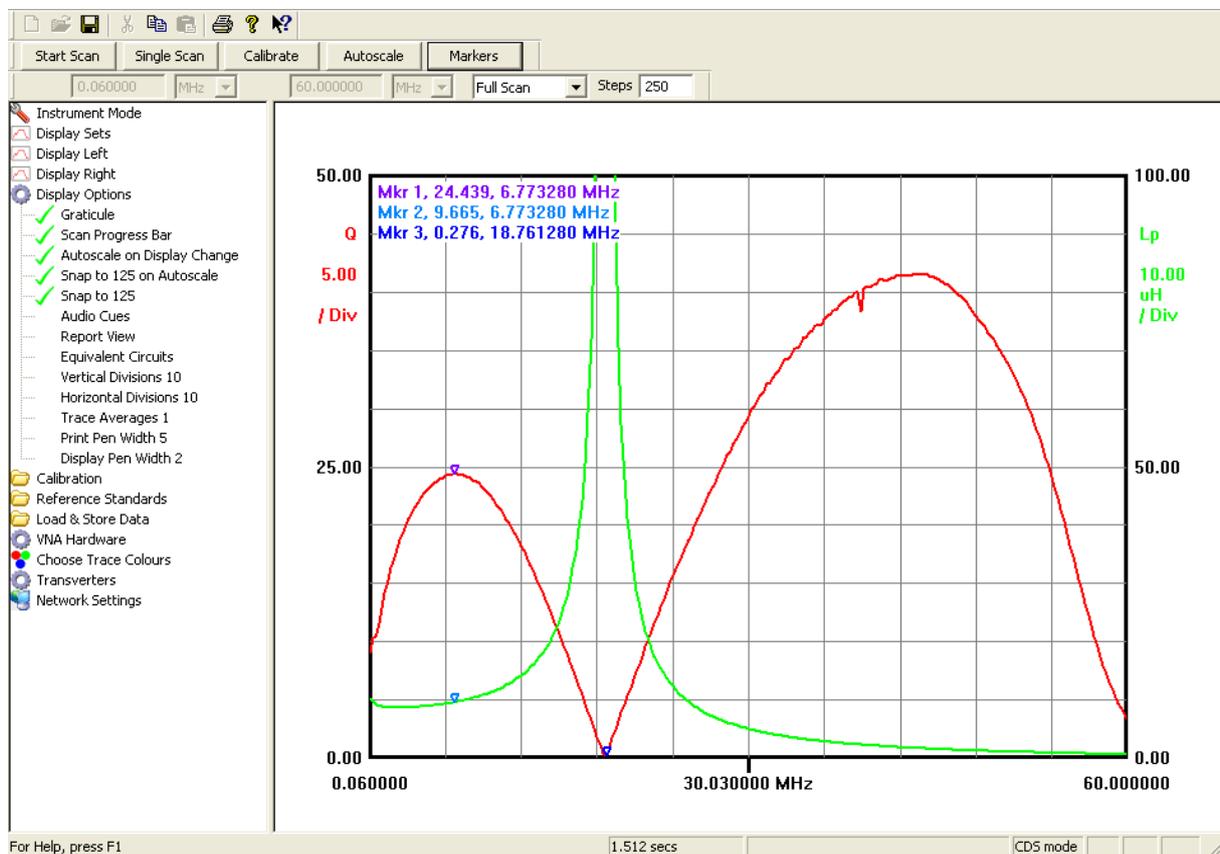


Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 5

3. Bild: Dies ist eine unbekannte Spule mit einem 0,2 mm seidenumspunnenen CuL Draht der bei 6 mm Wicklungslänge auf mehrere Lagen übereinander gewickelt wurde. Der Kern hat eine rot kodierte Kernbremse. Gegenüber einem reinen CuL Draht wirkt die Umspinnung des Drahtes kapazitätsmindernd. Wegen der Mehrlagigkeit ist dennoch eine ziemlich hohe Eigenkapazität zu erwarten. Mit dem L/C Meter wurde die Induktivität auch zu $9,6 \mu\text{H}$ ermittelt so wie man es auch am Marker 2 ablesen kann. Das entspricht bei der Resonanzfrequenz von 18,77 MHz einem C von $7,5 \text{ pF}$. Oberhalb der Eigenresonanz ist eine Spule nicht verwendbar, hier überwiegt deren kapazitiver Anteil. Das nutzbare Gütemaximum liegt bei 6,77 MHz. Der gleiche Spulenkern zeigte bei weniger Windungen sein Maximum leicht oberhalb von 7 MHz mit einer wesentlich höheren Güte aber mit der gleichen charakteristischen Form des Güteverlaufes.

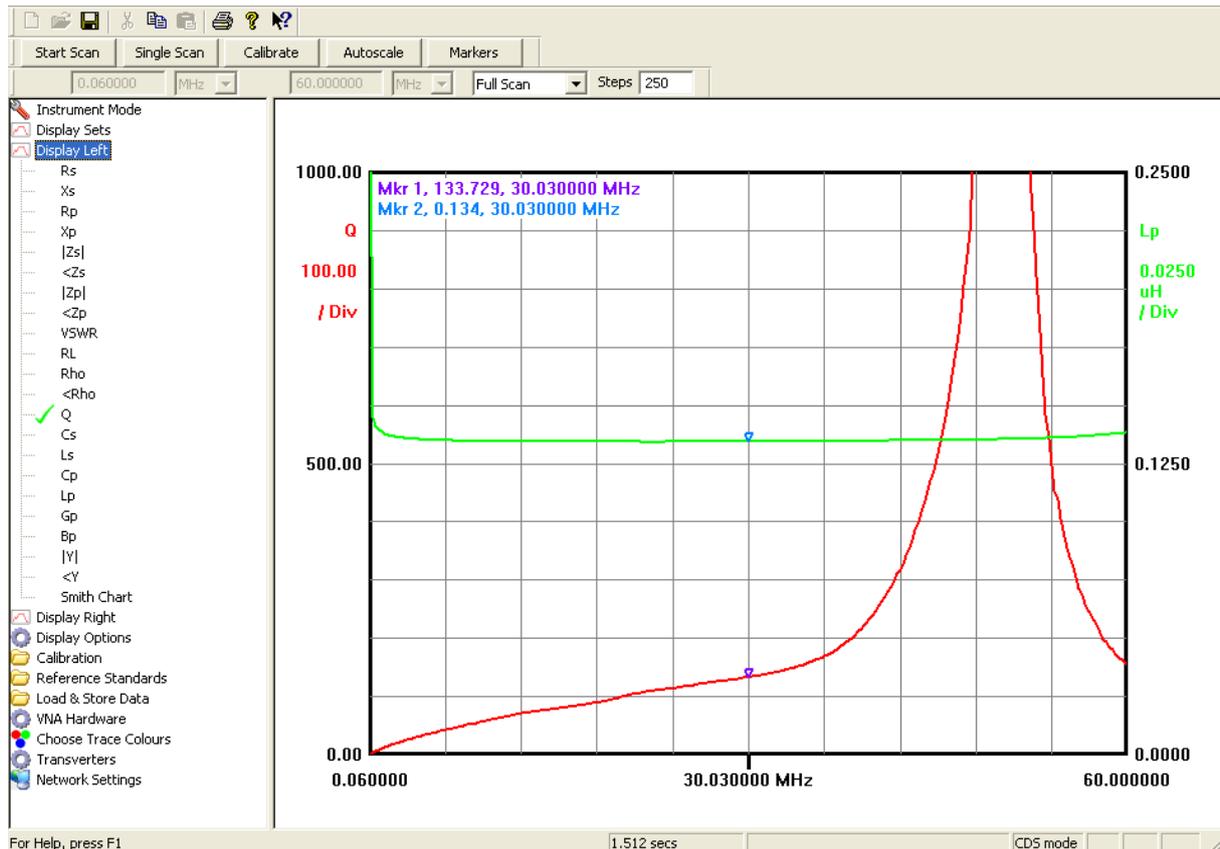


Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 6

4. Bild: Hier wird eine Luftspule mit 3 Windungen CuAg, Spulendurchmesser 13,5 mm, Spulenlänge 6 mm und Drahtdurchmesser 2 mm gemessen. Der Marker 1 zeigt uns bei 30 MHz 134 nH, Überprüfung mit RfSim99 und der Spulengeometrie: 136 nH. Zwar ist bei einer solchen Luftspule die Güte sehr hoch, aber wie die „Güteresonanz“ bei 50 MHz zu interpretieren ist, weiß ich ehrlich gesagt nicht. Eine „Entdämpfung“ wie bei einem Audion wäre eine mögliche Erklärung. Der bei 30 MHz angezeigte Güterwert von 133 scheint mir etwas knapp. Ein gewisses Maß an Misstrauen an seine Messmittel sollte man sich also immer bewahren.

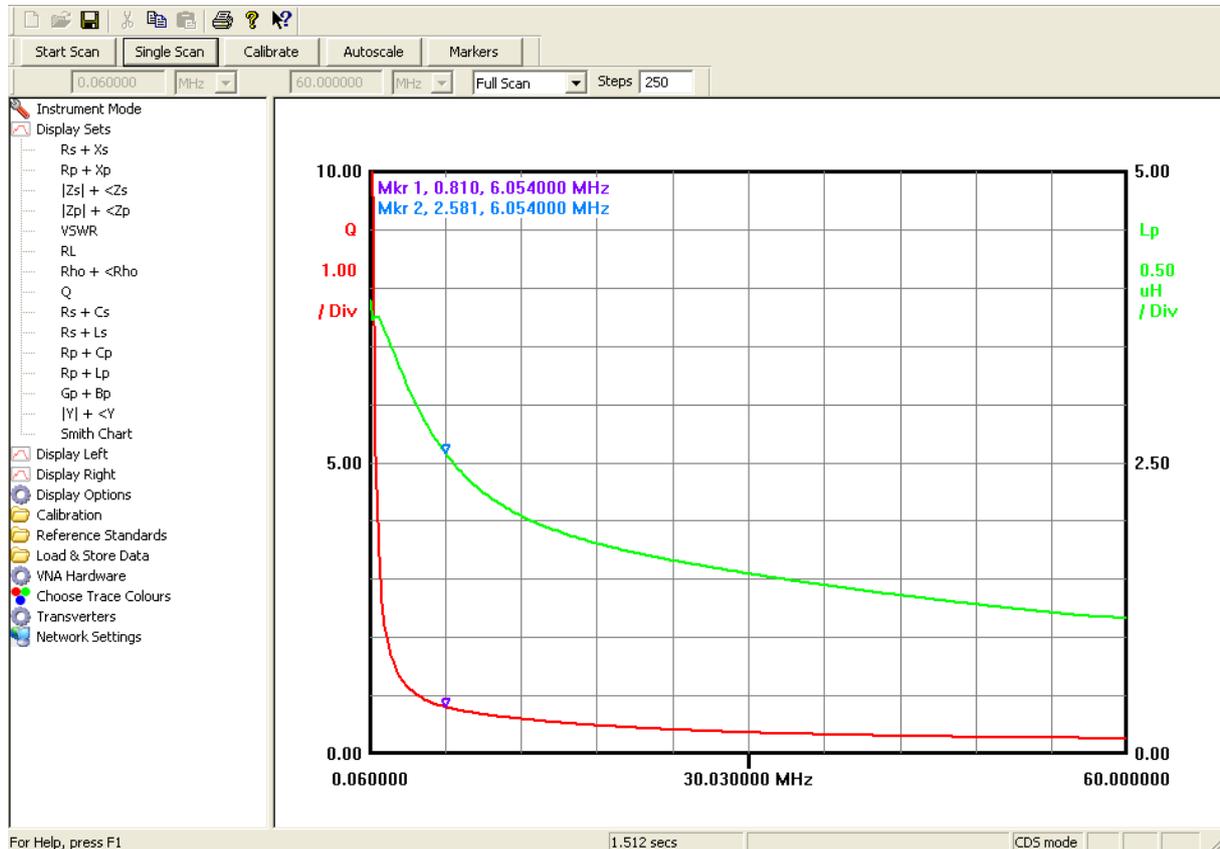


Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 7

Bild 5: Ferrithülse auf geradem Leiter. Die als Verdrosselung aus einem PC stammende Induktivität besteht aus einem 20 mm $d = 0,8$ mm Draht mit einer 10 x 3,5 mm Ferrithülse. Entgegen der Theorie nimmt die Induktivität mit steigender Frequenz ab. Das Ferritmaterial ist folglich für sehr tiefe Frequenzen ausgelegt und verliert zu hohen Frequenzen hin seine ferromagnetische Wirkung. Als HF Drossel eigentlich unbrauchbar. Die Güte, sofern man überhaupt davon sprechen kann, ist extrem gering.



Arbeitsblatt Messung an Spulen mit dem VNA nach N2PK

Version 1.0 DL2BZE

Seite 8

Bild 6: Fertiginduktivität 10 x 5 mm Farbringe or sw rt (3 0 00) mit L/C Meter 3,1 mH gemessen. Die Eigenresonanz findet man bei 1 MHz, von einer besonderen Güte kann man nicht ausgehen. Für einen Schwingkreis denkbar schlecht geeignet. Die abzulesende Induktivität stimmt mit der L/C Meter Messung noch gut überein. Vermutlich bewegen wir uns hier bereits im Grenzbereich für eine Messung nach der Reflektionsmethode.

