

Dipmeter - Resonanzen anschaulich erfahren

Reinhard Noll, DF1RN

Die Resonanz eines Schwingkreises kann mit einem Dipmeter sehr anschaulich demonstriert werden. Mein Ziel war es, eine möglichst einfache Schaltung mit wenigen Bauelementen aufzubauen, um die Funktionsweise eines Dipmeters zu demonstrieren und damit einfache Experimente ausführen zu können.

In Eckart Moltrechts Büchlein "Amateurfunk-Lehrgang Technik" findet sich ein Schaltungsvorschlag, den ich für den genannten Zweck einmal ausprobieren wollte [1]. In Vorversuchen auf einem Steckbrett habe ich u.a. die Kapazitätswerte des Colpitts-Oszillators verändert, um eine möglichst große Frequenzspanne zu erzielen. Bild 1 zeigt den schließlich umgesetzten Schaltplan. Der Oszillator wird in einer Gateschaltung mit dem N-Feldeffekttransistor BF 245B angetrieben. Die ursprünglichen Werte für C_3 und C_6 zur kapazitiven Spannungsteilung waren 120 pF und 180 pF [1]. Damit sind allerdings keine Frequenzen bis über 18 MHz erreichbar. Daher habe ich diese Werte stufenweise vermindert. Für $C_3 = 56$ pF und $C_6 = 82$ pF schwingt der Oszillator noch stabil, bei einer weiteren Verringerung von C_3 und C_6 schwingt er in der gegebenen Schaltung nicht mehr an. Weiterhin wurde der Widerstand R_1 von $1\text{k}\Omega$ auf $470\ \Omega$ und die Induktivität L_1 von $47\ \mu\text{H}$ auf $10\ \mu\text{H}$ verringert.

Mit der Buchsenleiste Jmp1 können über eine Drahtbrücke verschiedene Sourcewiderstände gewählt werden: $5.6\ \text{k}\Omega$, $2\ \text{k}\Omega$, $1\ \text{k}\Omega$ und $390\ \Omega$. Diese beeinflussen u.a. den Frequenzverstimmbereich bei einer gegebenen Spule L_x . Über die steckbare Drahtbrücke kann dieser Einfluss einfach untersucht werden.

Statt des Luftdrehkondensators für C_5 habe ich auch den Einsatz von Kapazitätsdioden (BB 212) probiert, allerdings ist der damit erzielbare Frequenzhub bei einer gegebenen Spule L_x deutlich geringer als mit dem Luftdrehkondensator, der einen Variationsbereich von 21 pF bis 545 pF bietet (Gesamtdrehwinkelbereich 548°). Die kleinste Kapazität des Schwingkreises wird aus der Parallelschaltung von 21 pF ($C_{5\text{min}}$) mit 33 pF (aus der Serienschaltung von C_3 und C_6) gebildet und beträgt 54 pF (wenn an der Auskoppelkapazität C_4 kein Frequenzzähler angeschlossen wird).

Direkt hinter C_4 ist ein Abgriff für den Anschluss eines Oszilloskops oder eines Frequenzzählers vorgesehen. Um die Schaltung so einfach wie möglich zu halten, ist keine Pufferstufe vor dem Abgriff eingefügt. Bei einem Vergleich berechneter Schwingkreisfrequenzen mit einem Messergebnis am Abgriff ist zu berücksichtigen, dass die Kapazität C_4 in Serie mit der Eingangskapazität des Frequenzzählers C_e ebenfalls parallel zu C_5 liegt. Für die Berechnung der Schwingkreisfrequenz gilt daher:

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_x \left(C_5 + \frac{C_3 C_6}{C_3 + C_6} + \frac{C_4 C_e}{C_4 + C_e} + C_p \right)}} \quad (1)$$

mit L_x steckbare Messspule, C_5 Luftdrehkondensator; C_3, C_6 kapazitiver Spannungsteiler des Colpitts-Oszillators, C_4 Koppelkondensator, C_e Eingangskapazität des Frequenzzählers, C_p parasitäre Kapazität. Beim meinem Frequenzzähler FC7008 von ELV ist die Eingangskapazität mit $C_e = 20$ pF angegeben. Die parasitäre Kapazität C_p wird bestimmt in dem für $C_{5\text{min}}$ die für die vier Messspulen (vgl. Bild 3, Tab. 1) berechneten Frequenzen f_r nach (1) mit den jeweils gemessenen verglichen werden und C_p so variiert wird, dass die Abweichungen minimal werden. Für $C_p = 14,5$ pF betragen die Frequenzabweichungen zwischen 4,17 MHz und 18,67 MHz im Mittel nur 1,13 % (bei R5-3 = $1\ \text{k}\Omega$). Zur Kapazität C_5 kommen also in der Wurzel in (1) noch hinzu: $33\ \text{pF} (C_3, C_6) + 10,5\ \text{pF} (C_4, C_e) + 14,5\ \text{pF} (C_p) \approx 58\ \text{pF}$.



Bild 3: Spulen L_x , von links nach rechts: 19,2 μH , 6,12 μH , 2,95 μH und 0,89 μH

entschieden und für einen Lackdraht mit einem Durchmesser von 0,28 mm [3, 4]. Bild 3 zeigt die aufgebauten Spulen. Auf einer Mantellinie des Spulenträgers wird am Anfang und am Ende der Wicklung jeweils ein 1 mm Loch gebohrt, um den Lackdraht ins Spulennere zu führen. An der Durchführungsstelle wird der Draht mit einem kleinen Tropfen eines Zweikomponentenklebers (Uhu Plus) fixiert. Ein weiteres Kunststoffrohr, dessen Außendurchmesser von 10 mm gerade dem Innendurchmesser des Spulenträgers entspricht, wird etwas in den Spulenträger hineingesteckt und verklebt. Dieses Kunststoffrohr besitzt wiederum einen Innendurchmesser in den gerade ein Hohlstecker hineinpasst und der darin verklebt werden kann [5]. Die Daten der Spulen L_x zeigt Tab. 1. Die Windungszahlen wurden so gewählt, dass sich die jeweiligen Frequenzbereiche lückenlos überlappen. Für eine Spule mit weniger als 6 Windungen können in der Schaltung von Bild 1 keine Oszillationen mehr erzeugt werden.

Die Spulenlänge l_s wurde mit der Schieblehre gemessen. Sie ist etwas größer als bei einer ideal dichten Wicklung zu erwarten wäre. Die Wicklungsdichte ist definiert als $\eta = d \cdot n / l_s$, mit d Drahtdurchmesser, n Windungszahl und l_s Spulenlänge. Sie ist für die aufgebauten Spulen kleiner als 1. Tabelle 1 zeigt, dass η für abnehmende Windungszahlen etwas geringer wird. Bei der manuellen Herstellung ist es offenbar einfacher bei einer größeren Windungszahl dicht zu wickeln (abnehmende Gefahr eines Verrutschens oder Auseinanderlaufens der Windungen). Der Formfaktor α der Spule berechnet sich zu [6]:

$$\alpha = \frac{l_s}{D} \quad (2)$$

mit l_s Spulenlänge, D Spulendurchmesser (für den Spulendurchmesser gilt: $D = D_t + d$ mit D_t Durchmesser des Spulenträgers). Der Formfaktor variiert von 0,16 bis 1,36. Mit den in [6] angegebenen Beziehungen kann die Induktivität berechnet werden (Formel (10) in [6] ist jedoch nicht korrekt, der Autor Paul Zwicky hat mich freundlicherweise darauf aufmerksam gemacht; im Argument der Logarithmusfunktion muss der Ausdruck "(2,241 η)" stehen und nicht "(0,2241 η)"). Zusätzlich ist die Induktivität aufgrund der Anschlussleitungen der Spule zu berücksichtigen (in der Spule bis zum Hohlstecker, von der Hohlsteckerbuchse bis zur Platine, vgl. weiße Anschlussleitungen in Bild 6). Die so berechnete Gesamtinduktivität $L_{\text{ber ges}}$ ist in der vorletzten Zeile in Tab. 1 angegeben.

Mit dem Netzwerkanalysator VNWA von SDR-Kits habe ich die Induktivitäten bei einer Frequenz von 1 MHz in der gleichen Geometrie (d.h. mit Hohlstecker, Hohlsteckerbuchse und Anschlussleitungen) gemessen, siehe letzte Zeile in Tab. 1. Die Abweichungen zum berechneten Wert betragen im Mittel nur 1,24 %. Die experimentelle Prüfung der Näherungs-

formeln aus [6] liefert für Induktivitäten im Bereich von 0,3 μH bis 14,8 μH Abweichungen von im Mittel 1.73 % [7]. Die hier gewonnenen Ergebnisse liegen also im selben Bereich.

Bild 4 zeigt auf der linken Ordinate die berechnete Gesamtinduktivität über der gemessenen Induktivität und auf der rechten Ordinate die Differenz $L_{\text{ber ges}} - L_{\text{mess}}$. Insgesamt wird eine gute Übereinstimmung erzielt, die Differenzen betragen maximal 0,4 μH .

Tab. 1: Daten der Spulen, Anzahl der Windungen n , Spulenlänge l_s , Wicklungsdichte η und Formfaktor α ; berechnete Induktivitäten der Spulen $L_{\text{ber Spule}}$ und der Anschlussleitungen $L_{\text{ber Anschluss}}$, resultierende gesamte berechnete Induktivität $L_{\text{ber ges}}$, gemessene Induktivität L_{mess} (Berechnung und Messung für 1 MHz)

	Spule 1	Spule 2	Spule 3	Spule 4
Windungen n	54	23	14	6
Durchmesser des Spulenträgers D_t [mm]	12.2	12.2	12.2	12.2
Spulenlänge l_s [mm]	0.017	0.0073	0.0045	0.002
Wicklungsdichte η [6]	0,880	0,862	0,842	0,792
Formfaktor α [6]	1,362	0,585	0,361	0,160
$L_{\text{ber Spule}}$ [μH]	18,62	5,87	2,79	0,71
$L_{\text{ber Anschluss}}$ [μH]	0,19	0,19	0,19	0,19
$L_{\text{ber ges}}$ [μH]	18,81	6,06	2,98	0,90
L_{mess} [μH]	19,2	6,12	2,95	0,89

Bild 5 zeigt die gemessene Induktivität als Funktion der Zahl der Windungen für die vier aufgebauten Messspulen. Deutlich ist zu erkennen, dass die Induktivität nicht linear mit der Windungszahl ansteigt.

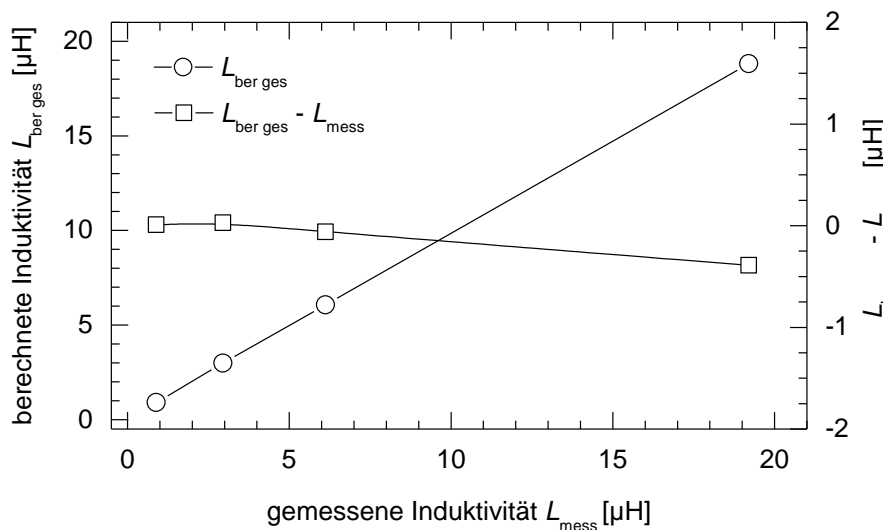


Bild 4: Berechnete Gesamtinduktivität über der gemessenen Induktivität (kreisförmige Datenpunkte). Auf der rechten y-Achse ist die Differenz zwischen berechneter Gesamtinduktivität und gemessener Induktivität aufgetragen (quadratische Datenpunkte)

Die erreichbaren Frequenzen habe ich mit dem Frequenzähler FC7008 ermittelt, der an der SMA-f Buchse, siehe Bild 2, angeschlossen wird. Laut Datenblatt besitzt dieser Frequenzähler am Eingang AC, Bereich 0 - 80 MHz, Eingangswiderstand 1 M Ω , eine Empfindlichkeit von 20 mV. Bei $C_{5\text{min}}$ wird die höchste Frequenz ermittelt. Dann wird C_5 schrittweise soweit vergrößert bis der Frequenzähler gerade noch eindeutig getriggert wird, das liefert die niedrigste Frequenz. In Tab. 2 sind die Ergebnisse für einen Sourcewiderstand von 2 k Ω zusammengestellt. Dieser Widerstand bietet in Summe die größten Frequenzspannen. Ein Frequenzbereich von 1,55 MHz bis 18,66 MHz kann überstrichen werden. Der Frequenzhub $f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$ erreicht für alle Messspulen einen Wert zwischen etwa 2 und 2,7.

Tab. 2: Frequenzbereiche des Dipmeters für einen Source-Widerstand von $2\text{ k}\Omega$

	Spule 1	Spule 2	Spule 3	Spule 4
L_{mess} [μH]	19,2	6,12	2,95	0,89
f_{min} [MHz]	1,55	2,64	3,90	9,41
f_{max} [MHz]	4,08	7,17	10,31	18,66
$f_{\text{max}}/f_{\text{min}}$	2,63	2,72	2,64	1,98

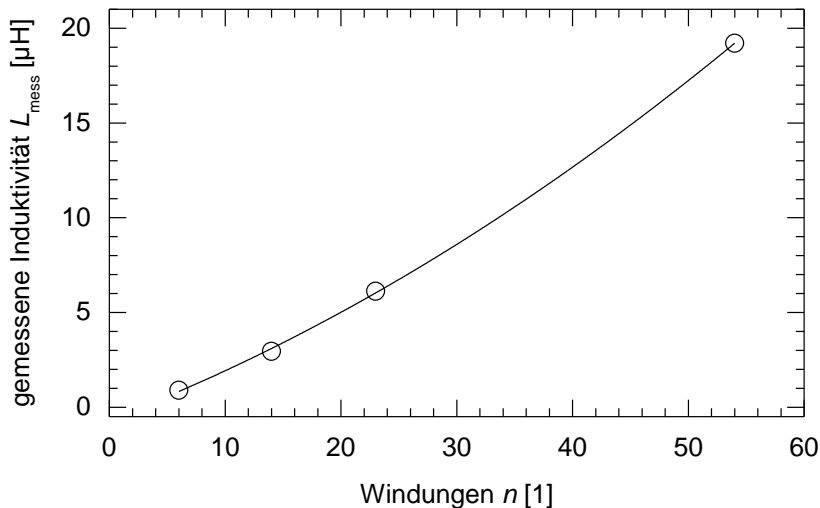


Bild 5: Gemessene Induktivität als Funktion der Windungszahl

Die Komponenten des Dipmeters habe ich in einer offenen Bauweise auf ein Holzbrett montiert. Bild 6 zeigt die Ansicht von oben und Bild 7 von vorne.

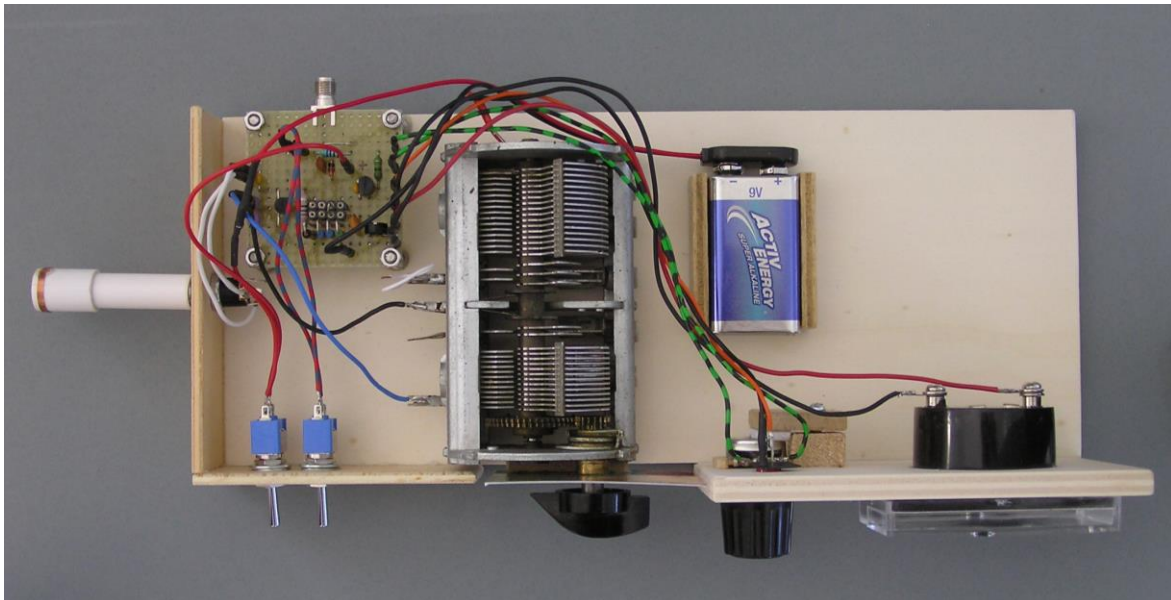


Bild 6: Ansicht des offenen Aufbaus des Dipmeters von oben. Links ist die angesteckte Messspule 4 zu sehen, von der Hohlsteckerbuchse führen zwei weiße Anschlussleitungen zur Platine. In der Mitte befindet sich der Luftdrehkondensator, dessen unterstes Plattenpaket für C_5 verwendet wird. Rechts unten ist das Potentiometer P1 zur Einstellung der Empfindlichkeit und das Drehspulinstrument zu sehen

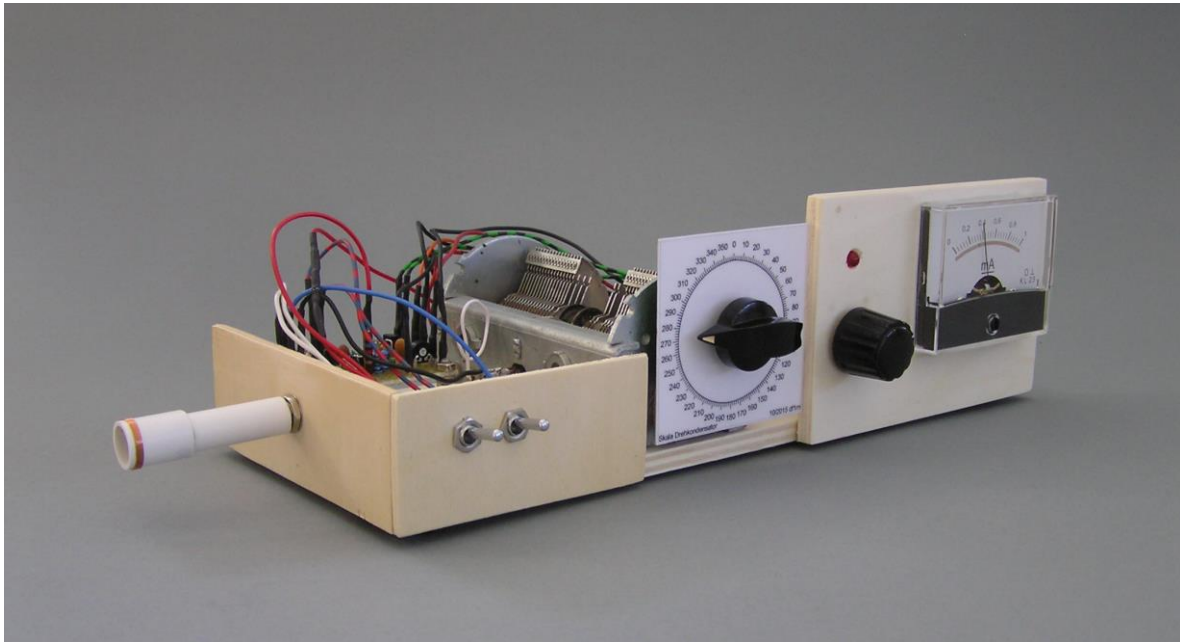


Bild 7: Ansicht des Dipmeters von vorne

Zu Demonstrationszwecken habe ich ein kleines Testboard mit einer Lochrasterplatte aufgebaut mit dem auf einfache Weise verschiedene Parallelschwingkreise durch Einstecken einer Spule und eines Kondensators realisiert werden können, siehe Bild 8. Zusätzlich ist eine SMA-f Buchse montiert, deren Innenleiter mit einer der beiden Buchsenleisten verbunden ist, der Außenleiter mit der anderen. Über diese Buchse kann mit dem Netzwerkanalysator die Resonanz unabhängig vom Dipmeter bestimmt werden.

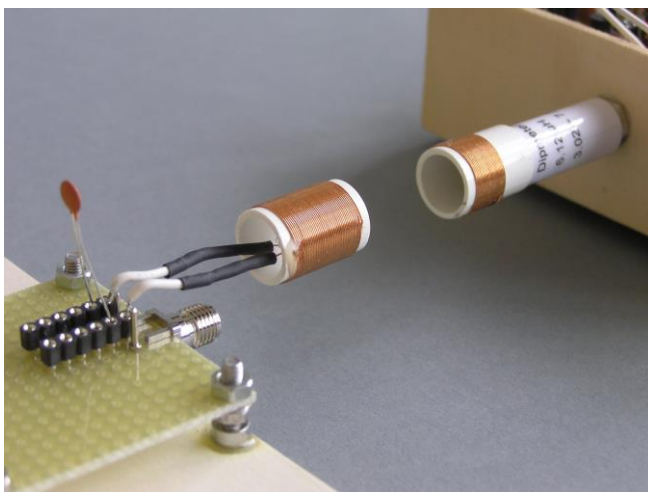


Bild 8: Links ist das Testboard mit einem Parallelschwingkreis zu sehen, rechts das Dipmeter mit der Messspule 2

Der Testschwingkreis hat im Beispiel von Bild 8 eine Spule mit einer Induktivität von $13,7 \mu\text{H}$ (gemessen bei 1 MHz). Mit einem parallel geschalteten Kondensator von 74 pF resultiert eine theoretische Resonanzfrequenz von $5,00 \text{ MHz}$. Die Überprüfung mit dem Netzwerkanalysator (an der SMA-f Buchse) ergibt für die Lage des Maximums des Betrags der Impedanz $5,03 \text{ MHz}$.

Für die Messung mit dem Dipmeter wird die Spule des Testschwingkreises nur soweit der Messspule genähert, dass der Ausschlag des Zeigerinstrumentes beim Dip von 1 (ohne Testschwingkreis; mit Potentiometer P2, siehe Bild 2, eingestellt) auf ca. 0.9 abfällt (lose Kopplung). Das ist die in Bild 8 gezeigte Situation, die Spulen haben einen Abstand von 27 mm in diesem Fall (vom Ende der Wicklung der Testspule bis zum Ende der Wicklung der Messspule). Nun wird der Frequenzzähler an das Dipmeter angeschlossen und die Frequenz gemessen. Das Ergebnis ist $4,841 \text{ MHz}$. Dieser Wert liegt um 159 kHz unter der berechneten Resonanz von $5,00 \text{ MHz}$. Die Ursache liegt - wenn wir (1) betrachten - auf der Hand: die zusätzlichen Kapazitäten müssen berücksichtigt werden. Der Luftdrehkondensator

hat beim ermittelten Dip eine Kapazität von 118 pF (über unabhängige Kalibrierung der Winkelskala des Luftdrehkondensators auf Picofarad bestimmt). Messspule 2 hat eine Induktivität von 6,12 µH (siehe Tab. 2). Mit der Zusatzkapazität von 58 pF (siehe oben, Diskussion der Beziehung (1)) folgt eine Resonanzfrequenz von 4,849 MHz. Das kommt dem Messwert des Frequenzzählers bis auf 8 kHz nahe. Von den 58 pF sind 10,5 pF durch den Anschluss des Frequenzzählers bedingt. Wird dieser nicht angeschlossen - und so hatte ich den Dip bestimmt - so sind die 10,5 pF von den 58 pF in Abzug zu bringen. Die Resonanzfrequenz des Dipmeters ist dann 5,001 MHz und dieser Wert liegt sehr nahe an der berechneten Resonanzfrequenz des Testschwingkreises.

Am Schluss noch ein kleiner Test mit Oberwellen des aufgebauten Oszillators. Für einen Source-Widerstand von 390 Ohm treten diese Oberwellen ausgeprägter auf. Mit der Spule 4 und angeschlossenen Frequenzzähler wird das Dipmeter in die Nähe eines UKW-Taschenradios gebracht. Bei bestimmten Einstellungen des Drehkondensators verschwindet der UKW-Empfang, dann liegt die betreffende Oberwelle gerade bei der Empfangsfrequenz. Tabelle 3 zeigt die eingestellten UKW-Sender und die dazu gemessenen Frequenzen der Dipmeter-Oszillation, die letzte Spalte zeigt den Quotienten dieser beiden Frequenzen. Die 6. und 7. Harmonischen der Grundschwingung sind für die beobachtete Störung verantwortlich.

Tab. 3: Störungen des UKW-Empfangs durch Harmonische des Dipmeter-Oszillators bei einem Source-Widerstand von 390 Ω

UKW-Sender [MHz]	Dipmeter-Frequenz [MHz]	Quotient
93,9	15,65	6,000
94,5	15,75	6,000
94,5	13,50	7,000
95,9	15,98	6,001
95,9	13,70	7,000
100,1	16,69	5,998
100,5	16,75	6,000

Fazit

Mit dem einfachen Dipmeter kann der Frequenzbereich von 1,55 MHz bis 18,66 MHz lückenlos überstrichen werden. In diesem liegen die Amateurfunkbänder 160 m bis 17 m. Berechnung und Messung der Induktivitäten der aufgebauten Messspulen stimmen sehr gut überein. Die Richtigkeit einer Resonanzfrequenzmessung mit dem Dipmeter ist besser als 1 %, wenn die durch die Auskopplung zu einem Frequenzzähler bedingten Zusatzkapazitäten berücksichtigt werden.

30.5.2016, Reinhard, DF1RN

Literatur

- [1] Eckart Moltrecht, Amateurfunk-Lehrgang Technik, 3. Aufl., Verlag für Technik und Handwerk, Baden-Baden, 2007, S. 256
- [2] Software Lochmaster, Vers. 3.0, Abacom, www.abacom-online.de
- [3] Kunststoffrohr, weiß, GAH Alberts, Ø 12 mm x 1 000 mm, Wandstärke 1.2 mm, in Baumärkten erhältlich
- [4] Reichelt; Kupferlackdraht, Artikel-Nr. CUL 100/0.28
- [5] Reichelt; Hohlstecker Øa = 5,5 mm, Øa = 5,5 mm, Schaft 9 mm, Artikel-Nr. HS 25-9
- [6] Paul Zwicky, Optimierung der Güte einlagiger zylindrischer Luftspulen, Funkamateur, 10/2013, 1080-1084
- [7] http://g3ynh.info/zdocs/magnetics/appendix/optQ_hb9dfz.html, pdf-Dokument vom 4.11.2013, download 14.5.2016