

# Experimenteller Vergleich kleiner Breitband-Magnetschleifen.

Experimental Comparison of Small Wideband Magnetic Loops

Chavdar Levkov LZ1AQ

Überarbeitet 1.0. 21.08.2013

Im vorherigen Artikel „Breitband-Aktivantenne mit kleiner Magnetschleife“ [1] wurde darauf hingewiesen, daß die Empfindlichkeit der Breitbandschleife erhöht werden kann, wenn der Kurzschlußstrom der Schleife erhöht wird, da die Breitbandschleife mit einem Verstärker mit geringem Eingangswiderstand geladen ist  $R$  in wobei  $\omega L \gg R$  in. Weitere Analysen zeigen, daß dieser Strom nur vom Schleifenfaktor  $M = A / L$  abhängt (siehe Anhang I und II), wobei  $A$  die Schleifenäquivalentfläche und  $L$  die Schleifeninduktivität ist. Die Größe  $M$  entspricht in gewissem Sinne der effektiven Höhengröße  $h$  für Dipolantennen. Um die Schleifeninduktivität zu verringern und die Schleifenfläche zu vergrößern, wurde eine parallele Schleifenverbindung in Betracht gezogen. Dies kann auf zwei Arten erreicht werden - mit parallelen Schleifen, bilden eines rechteckigen Prismas wie in Abb. 2 und 3 gezeigt und koplanar gekreuzte 1 (CC)-Schleifen (Abb. 1 und 5), die so verbunden sind, daß die Schleifenströme zur Last addiert werden (Querverbindung [1,2]). Es kann auch einen gemischten Ansatz geben - koplanar und parallel, wie in Abb. 4. Das Ziel des nächsten Experiments ist es, den Strom in verschiedenen Arten von Schleifen zu messen und ihn mit dem berechneten  $M$ -Faktor zu vergleichen und den Nutzen der Verwendung von Parallel- und CC-Schleifen experimentell abzuschätzen.

## 1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau wird mit drei verschiedenen Schleifen mit jeweils gleicher geometrischer Gesamtfläche  $A = 1 \text{ m}^2$  durchgeführt:

Schleife 1: Einfache Quad-Schleife mit  $A = 1 \text{ m}^2$  (1 m Seite). Der Leiter besteht aus PVC-isoliertem Cu-Draht mit einem Durchmesser von 1 mm. Dies ist die Referenzschleife und alle Messungen aus anderen Schleifen wurden damit verglichen. Die Schleifeninduktivität  $L$  beträgt  $5,9 \mu\text{H}$ .

Schleife 2: Zwei Quad-CC-Schleifen (Abb. 1) mit einer geometrischen Gesamtfläche von  $1 \text{ m}^2$  ( $0,71 \text{ m}$  Seite jeder Schleife) mit demselben Durchmesser von 1 mm. Cu-Draht. Die Induktivität der kleinen konstituierenden Schleife beträgt  $4 \mu\text{H}$  und der CC-Schleife  $2 \mu\text{H}$ .

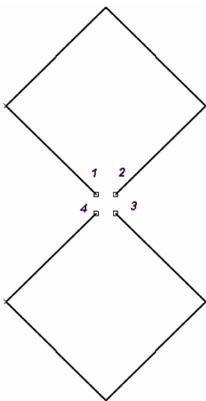


Abb. 1. CC-Loop.

Gerade und ungerade Punkte sind miteinander verbunden.

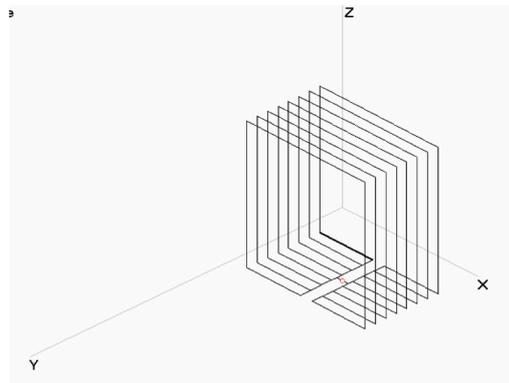


Abb. 2. Parallel-Loop.



Abb. 3.

Schleife 3: Acht parallele Schleifen (Abb. 2 und 3) mit jeweils 1 m Seite und gleichem Leiter. Der Abstand zwischen den parallelen Schleifen beträgt 4 cm. Alle Schleifen sind an der Unterseite elektrisch verbunden. Die gemessene Induktivität beträgt  $2,15 \mu\text{H}$ .

Weitere zwei CC-Schleifen wurden gemessen (Abb. 4 und 5), um sie mit der Referenzschleife zu vergleichen, da die Se-Schleifen aus praktischen Gründen interessant sind. Diese Schleifen haben nicht den gleichen Bereich wie die Referenzschleife. Sie werden ausführlich in [3] beschrieben (Punkte 3.2 und 3.3). Ein kleiner Sender (TX) befindet sich in einiger Entfernung (270 m) von der zu testenden Schleife. Der TX überträgt die kontinuierlichen Signale gleichzeitig mit 4 Frequenzen wie folgt: 1,755, 3,510, 7,022 und 10,01 MHz. Alle TX-Antennen sind vertikale Aluminiumstangen mit einer Länge von 1,2 m, die Ausnahme ist 1,755 MHz, hier beträgt die Länge 4 m als vertikaler Draht. Das übliche Gegengewicht ist ein 30 cm langer Kupferstab, der in den Boden eingeführt wird. Die Wellenpolarisation soll vertikal sein.

Die zu testende Schleife ist aktiv und es wird ein AAA-1-Verstärker [2] mit einer Eingangsimpedanz  $R$  von ungefähr 6 bis 7 Ohm verwendet, was bedeutet, daß sich die Schleifen fast im Kurzschlußmodus befinden. Die Spannung am Ausgang des Verstärkers ist proportional zum Schleifenstrom. Der DSP-Empfänger von Perseus (<http://microtelecom.it/index.html>) wird als Meßgerät verwendet. Er hat sehr gute Meßeigenschaften - seine Leistungsmessungen wurden mit dem kalibrierten Leistungsmesser HP432A verglichen und die Abweichungen lagen bei allen Frequenzen innerhalb von 1 dB. Alle Messungen werden in 100-Hz-Bandbreite durchgeführt, Dither ein, Filter aus, 125 KS / s, bei ausgeschaltetem Dämpfungsglied. Alle Geräte sind in Feldumgebungen batteriebetrieben.

1 In [1] wurde die Abkürzung CP (gekreuzte Parallele) mit  $d$  verwendet, aber ich denke, daß ein besserer Begriff gekreuzte Coplanar (CC) ist, um Verwechslungen mit parallelen Schleifen zu vermeiden.

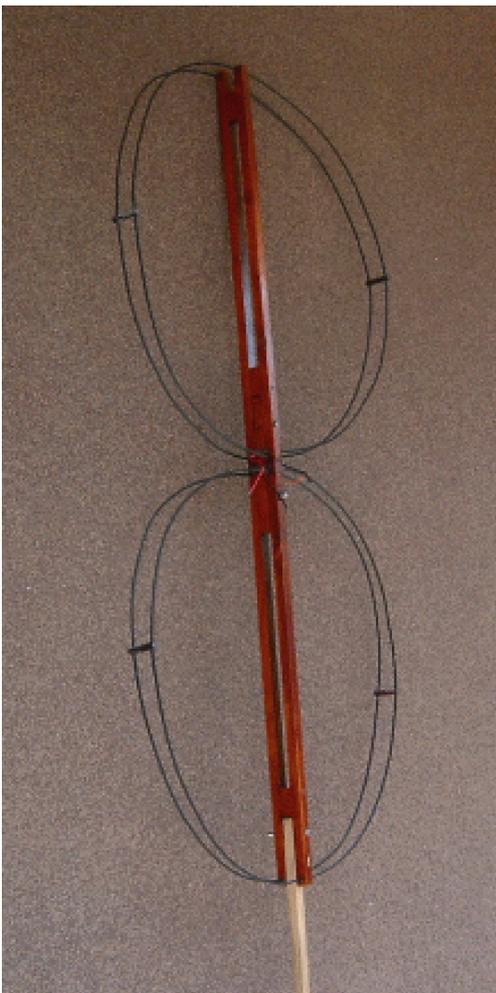


Abb. 4. Schleife 4: 2 x CC / Parallelschleifen mit 0,7 m  $\varnothing$ . Schleife bestand aus zwei parallelen Drähten.



Abb. 5. Schleife 5: 2 x CC-Schleifen mit 0,96 m  $\varnothing$ . Loop ist aus PE/Aluminiumrohr mit 15 mm  $\varnothing$ .

Vor jeder Messung wurde ein Schleifendirektivitätstest durchgeführt. Die Einzelschleifenrichtwirkung für vertikal polarisierte Signale weist ein Muster von 8 auf. Das Verhältnis zwischen maximalem und minimalem Signal wurde gemessen und auch die Richtung des Minimums. Dieses Experiment wurde auf allen 4 Testfrequenzen durchgeführt. Das Min / Max-Verhältnis sollte mindestens 20 dB betragen und es darf nicht mehr als einige Grad Richtungsunterschied der Minima geben, und das Muster muß symmetrisch sein.

Abweichungen von diesen Zahlen zeigen, daß es einige externe nicht steuerbare Faktoren gibt. Dies kann ein Gleichtakt-Empfangspfad oder ein Einfluß von leitenden Objekten usw. sein. Die Ergebnisse der Messungen sind in Tabelle 1 dargestellt. Alle Schleifen wurden mit maximalem Pegel des Empfänger-S-Meters auf die Quell-TX gerichtet. Die Höhe der Einzelschleife  $s$  über dem Boden beträgt 2,2 m (der niedrigste Schleifenpunkt der Einzelschleife oder der Mittelpunkt für CC-Schleifen). Die Anforderung  $\omega L \gg R$  wurde für alle Frequenzen erfüllt. Der empfangene Signalpegel wurde gemessen für alle Schleifen dieser 4 Frequenzen. Alle Messungen beziehen sich auf die Referenzwerte einer einzelnen Quad-Schleife ( $I_0, M_0$ ) mit  $1 \text{ m}^2$  Fläche.  $A_{tot}$  ist die Gesamtfläche der Antenne und  $L_{cc}$  ist die äquivalente Induktivität bei CC-Schleifen. Für jede Schleife wurde der M-Faktor nach Gleichung (6 & 9) berechnet.

	$A$ [m <sup>2</sup> ]	$A_{rot}$ [m <sup>2</sup> ]	$L$ [uH]	$L_{cc}$ [uH]	$M$ [uA/pT]	Measured relative signal level $I/I_0$ dB				$I/I_0$			
						1.8 [MHz]	3.5	7.0	10.0	1.8	3.5	7.0	10.0
Loop 1, 1 Quad	1	1	5.9	5.85	<b>0.17</b>	0	0	0	0	1	1	1	1
Loop 2, 2 x CC Quad	0.5	1	4.0	2.03	<b>0.25</b>	2.6	2.9	2.5	3.1	1.35	1.40	1.33	1.43
Loop 4, 2 x CC Circular	0.38	0.76	2.0	1.0	<b>0.38</b>	4.6	6.1	5.3	4.8	1.70	2.02	1.84	1.74
Loop 3, 8 parallel Quads	1	1	5.9	2.15	<b>0.47</b>	7.8	8.7	7.7	7.2	2.45	2.72	2.43	2.29
Loop 5, 2 x CC Circular	0.72	1.44	2.7	1.35	<b>0.53</b>	8.1	9.1	8.2	7.6	2.54	2.85	2.57	2.40

Tabelle 1 Die Meßdaten beziehen sich auf die Referenzschleife 1. Alle Schleifen werden bei 4 verschiedenen Frequenzen gemessen. Die Schleifen sind nach dem M-Faktor geordnet, der ein Maß für die Schleifenempfindlichkeit ist.

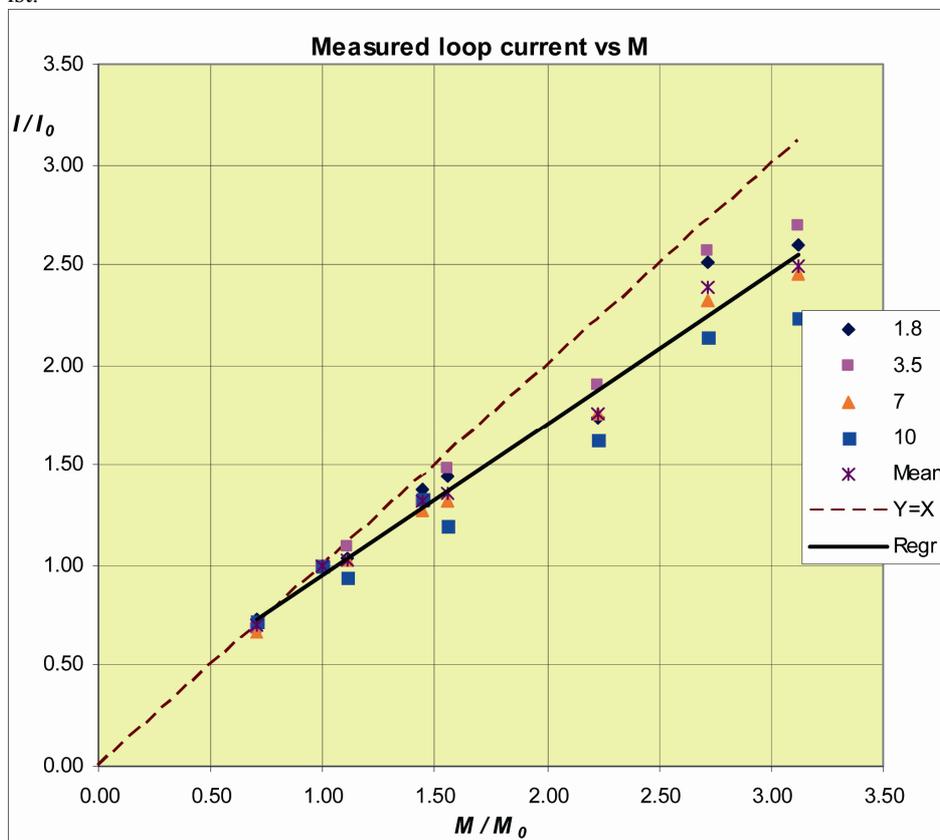


Fig. 6. Versuchsergebnisse: Beziehung zwischen gemessenem Schleifenstrom und M-Faktor. Alle Messungen beziehen sich auf die Referenzwerte der einzelnen Quad-Schleife ( $I_0, M_0$ ) mit  $1 \text{ m}^2$  Fläche. Die Beziehung wird mit der Regressionslinie angenähert. Datenpunkte stammen aus allen 5 Schleifen und für 4 Frequenzen (in MHz). Die gestrichelte Linie ist  $Y = X$ . Die Abweichung von der  $Y = X$ -Leitung zeigt einen Einfluß von einigen nicht erkannten Faktoren, höchstwahrscheinlich Übertragungseffekten (die Abweichungen bei 7 und 10 MHz sind am suggestivsten).

Die Meßdaten sind auch in Abb. 6 als Beziehung zwischen dem gemessenen Schleifenstrom und dem berechneten M-Faktor dargestellt. Die Beziehung wird mit der Regressionslinie angenähert.

## 2. Numerische Experimente

Die Schleifenströme in der durch ein externes elektromagnetisches Feld angeregten Last wurden mit MMANA berechnet (siehe Anhang III). Es wurden 15 verschiedene Schleifenmodelle getestet - Einzel-, CC- und Parallelschleifen sowie Kombinationen davon. Auch die Form wurde geändert - Quad, Rechteck, Dreieck und Achteck. Alle Schleifen haben eine Gesamtfläche von  $1 \text{ m}^2$ . Für jede Schleife wurde der M-Faktor gemäß (6) oder (9) berechnet. Die Schleifeninduktivität  $L$  wurde aus dem Wert des Blindteils der Impedanz berechnet, der aus dem MMANA-Programm angegeben wurde. Die Frequenz der Tests betrug  $3,5 \text{ MHz}$ . Alle Ströme  $I$  und M Faktoren beziehen sich auf die Referenzschleife (einzelnes Quadrat mit  $I_0, M_0$ ) und die Beziehung ist in Abb. 7 gezeigt.

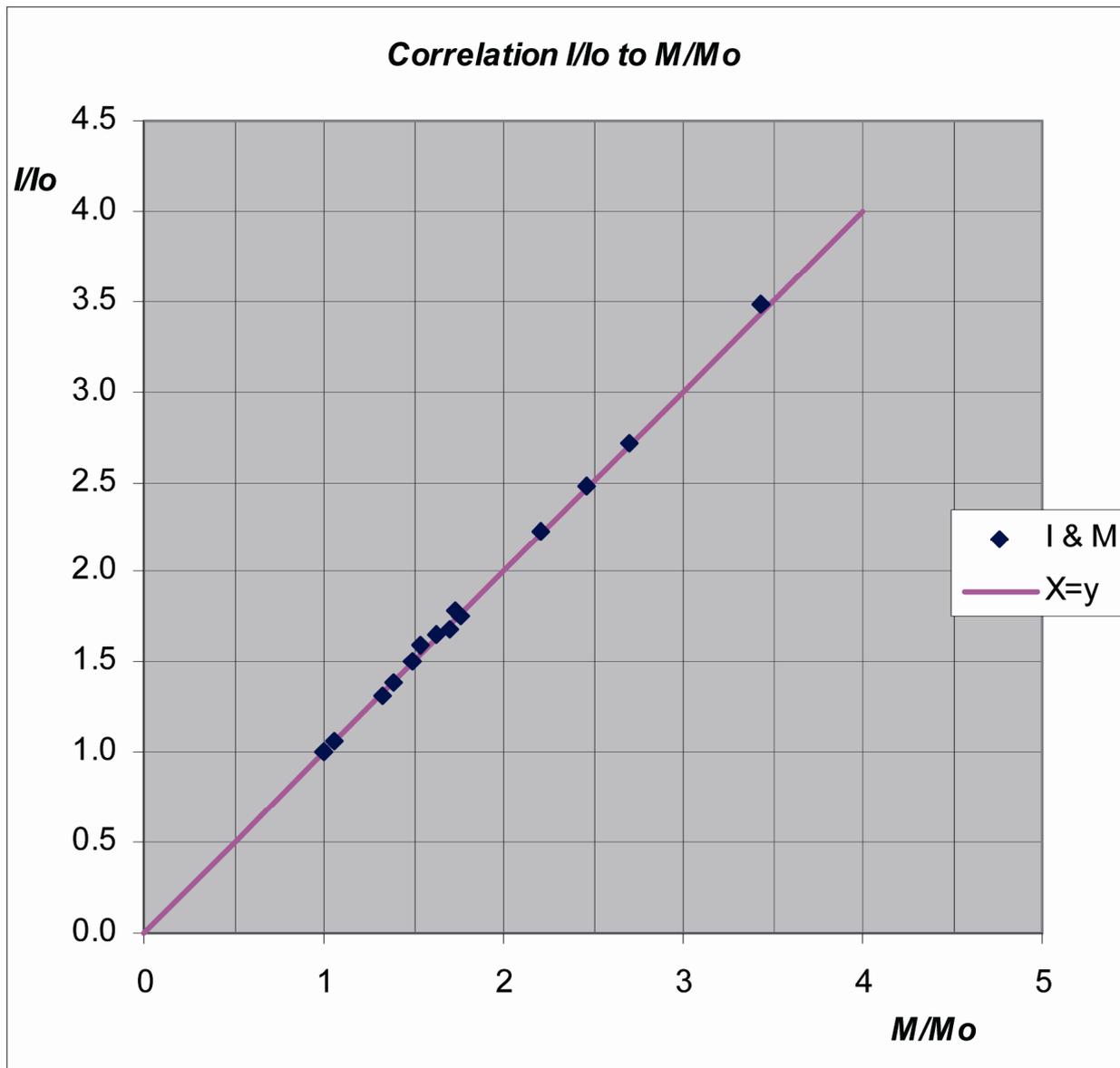


Fig. 7. Numerisches Experiment im MMANA CAD-Programm. Korrelationen zwischen Schleifenstrom und M-Faktor für 15 verschiedene Schleifen bei  $3,5 \text{ MHz}$  sind angegeben. Alle Ströme und M-Faktoren beziehen sich auf die Referenzschleife (Single Quad,  $I_0, M_0$ ). Die Korrelation ist nahezu perfekt, was bedeutet, daß  $I$  bei  $M$  ein zuverlässiges Maß für die Schleifenempfindlichkeit ist.

### 3. Schlußfolgerungen

A. Offensichtlich ist M ein guter Prädiktor für die Schleifenempfindlichkeit. Die Abweichung von der  $Y = X$ -Leitung (Abb. 6) ist wahrscheinlich auf Übertragungsleitungseffekte zurückzuführen, die bei größeren Schleifen (mit höherem M) und bei höheren Frequenzen am deutlichsten sind.

B. Durch Verwendung von CC-Schleifen können wir die Schleifenempfindlichkeit linear mit der gesamten Schleifenfläche erhöhen, z. B. zwei CC-Schleifen mit jeweils  $1 \text{ m}^2$  haben eine genau zweimal bessere Empfindlichkeit (oder einen M-Faktor) als eine einzelne Schleife mit einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$ . Eine einzelne Schleife mit einer Fläche von  $2 \text{ m}^2$  hat eine geringere Empfindlichkeit als diese beiden CC-Schleifen. Der Effekt der Aufteilung einer Schleife in kleinere CC-Schleifen ist in Abb. 8 deutlich zu sehen.

C. Durch Verdoppeln der gesamten Schleifenfläche (unter Beibehaltung der Schleifenform und des Schleifentyps) wird der Strom für alle Schleifen um ungefähr 2,5 dB erhöht.

D. Der Strom der CC-Schleifen (2 und 4 Schleifen) ist im Vergleich zu der einzelnen Schleife mit derselben Fläche ungefähr 3,5 dB bzw. 7,5 dB höher.

E. Die Empfindlichkeit der Breitbandschleife kann nun durch Berechnung des Schleifenfaktors M - Gl. (6), (9), (11). Der M-Faktor ist ein Maß für die Empfindlichkeit der Schleife gegenüber einem elektromagnetischen Feld bei Belastung mit niedriger Impedanz (oder ein Maß für den Kurzschlußstrom der Schleife). M kann auch für den Fall von koplanar gekreuzten (CC) Schleifen berechnet werden.

F. Zwei einfache Messungen sind erforderlich, um die Empfindlichkeit der Breitbandschleife vorherzusagen - der Schleifenbereich A und die Schleifeninduktivität L.

### 4. Einige praktische Anmerkungen zur Wahl der Schleife

Für Menschen, die in einem ruhigen ländlichen Gebiet leben, muß eine Schleife mit höherem M verwendet werden, da das Grundrauschen der Schleife unter dem atmosphärischem Rauschen liegen muß. Aus meinen Experimenten würde ich vorschlagen, Schleifen mit  $M > 0,5 \text{ uA} / \text{pT}$  zu verwenden, wenn ein Verstärker des in [1, 2] beschriebenen Typs verwendet wird. Im Spreadsheet WLoop\_calc.xls [4] (das von [www.lz1aq.signacor.com](http://www.lz1aq.signacor.com) geladen werden kann) wird der berechnete M-Faktor für mehrere Schleifen mit unterschiedlichen Formen und Größen angegeben. Der Benutzer kann eine geeignete Schleifenkonfiguration entsprechend seinen Anforderungen auswählen.

Zum Beispiel ist die parallele Schleife die beste Wahl, wenn wir ein minimales Volumen der Schleife benötigen. Von der anderen Seite können CC-Schleifen die beste Empfindlichkeit für eine gegebene Grenze des Schleifenbereichs ergeben. Der Niederfrequenzgang sollte auch rot sein, wenn LF-Bänder verwendet werden. Auch die mechanischen Gründe müssen berücksichtigt werden. Beispielsweise können 4 CC-Schleifen als 4 Quads oder 4 Dreiecke oder Rechtecke ausgeführt werden (siehe WLoop\_calc.xls. Abb. 14, 15, 16). Abb. 15, 16-Versionen weisen unabhängig vom etwas kleineren M-Faktor für diese Schleifenformen eine stabilere mechanische Konstruktion auf.

#### ***Berechnungsbeispiel***

Wir können die Tabelle WLoop\_calc.xls [4] verwenden. Lassen Sie uns das folgende Ziel haben: eine Schleife mit  $M = 0,8$  (dies ist eine ziemlich empfindliche Schleife) und  $f_{\text{low}} = 0,3 \text{ MHz}$ . Der Eingangswiderstand des Antennenverstärkers  $R_{\text{in}} = 6 \text{ Ohm}$ . Dann ist die minimale Schleifenäquivalentinduktivität:  $L_e = R_{\text{in}} / 2 \pi f_{\text{niedrig}} = 3,18 \text{ } \mu\text{H}$ . Versuchen wir es mit einer

einzelnen Schleife. Mit Hilfe des Quadratschleifenrechners finden wir die Vierfachsleife mit einer Seitenlänge von 4 m (16 m<sup>2</sup>) und einem Leiter von 7 mm Durchmesser. Ist  $M = 0,8$ ,  $f_{low} = 0,05$  MHz so hat diese Antenne ein Verhalten wie kleine Schleifen bis 1,87 MHz. Dies ist eine unpraktische Schleife - ziemlich groß und der Drahtdurchmesser von 7 mm muß eigentlich ein Rohr sein.

Auch die Hochfrequenzflächigkeit ist sehr begrenzt. Versuchen wir es mit zwei CC-Quad-Loops. Wir können jetzt feststellen, daß eine einzelne Schleife von 2,1 m Seite mit Draht  $d = 2,8$  mm  $L = 5,5$  uH und  $M = 0,4$  hat. Mit 2 CC-Schleifen (8,8 m<sup>2</sup>) haben wir  $2,75$  uH  $L_{eq}$  und  $M = 0,8$  und  $f_{low} = 0,34$  MHz. Diese CC-Schleife hat ein Strahlungsmuster vom Typ einer kleinen Schleife bis zu 20 MHz.

## Anhang I Schleifenfaktor M

Die kleine Breitbandschleife arbeitet fast im Kurzschlußmodus (Abb. 7a), da sie mit dem Eingangswiderstand eines Verstärkers mit niedriger Eingangsimpedanz (mehrere Ohm) belastet ist [1]. Es ist daher interessant, den Kurzschlußstrom zu berechnen, der in der Schleife fließt und durch das externe elektromagnetische Feld induziert wird.

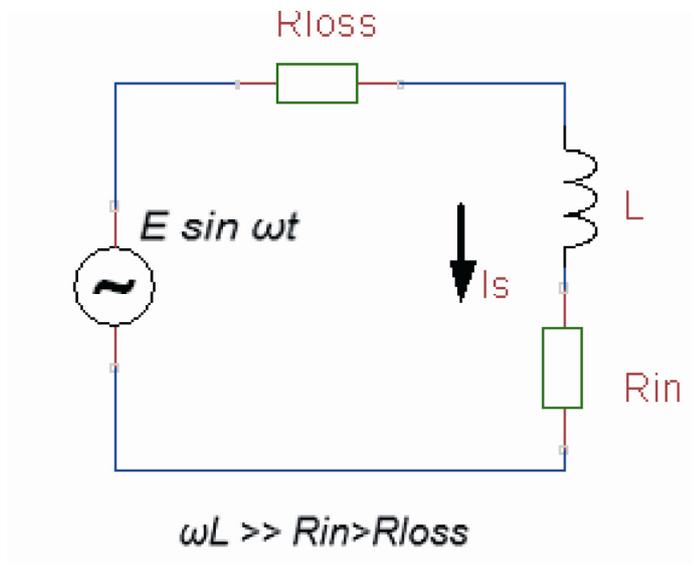


Abb. 7a: Breitbandschleifen-Ersatzschaltbild

Die bekannte Gleichung der Amplitude der induzierten Spannung  $E$  in einer kleinen Schleife (Faradaysches Gesetz), wenn die Schleifenebene senkrecht zum Magnetfeldvektor ist

$$E = \omega w A l B \quad (1)$$

wobei  $\omega$  die Winkelfrequenz der Sinuswelle ist,  $w$  die Anzahl der Windungen der Schleife ist,  $A l$  die geometrische Fläche der Schleife ist und  $B$  die Amplitude der magnetischen Induktionskomponente des Feldvektors ist. Wir gehen von Sinusspannungen und Strömen aus. Der Kurzschlußstrom  $I_s$  ist gleich:

$$I_s = E / \omega L \quad (2)$$

wobei  $L$  die Schleifeninduktivität ist. Wir ignorieren den Verlustwiderstand der Schleife, d. H. den Verlust von  $\omega L \gg R$ , und es besteht keine Notwendigkeit, komplexe Zahlenwerte zu verwenden. Unter Berücksichtigung von (1) und (2)

$$I_s = (w A l B) / L \quad (3)$$

Wir können einen Wandlerkoeffizienten M einführen, den wir „Schleifenfaktor“ nennen können. Für die magnetische Schleife gilt:

$$M = I_s / B \quad (4)$$

Dann ist

$$M = w A l / L \quad (5)$$

Wir können die schleifenäquivalente Fläche  $A = w A l$  verwenden und (5) wird zu:

$$M = A / L \quad (6)$$

M. ist ein Maß für die Schleifenempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern bei Belastung mit niederohmiger RL, d. h.  $\omega L \gg R L$ . Der M-Faktor einer Einwindungs-Schleife hängt nur von der äquivalenten Fläche der Schleife und ihrer Induktivität ab. Es hängt nicht von der Frequenz ab. M ist das magnetische Äquivalent des effektiven Höhenfaktors oder h in Dipolantennen. Die Dimension von M ist  $[A / T]$  „Ampere pro Teslas“. Bequemer ist es, als Dimension  $[\mu A / pT]$  „Mikroampere pro Pico-Teslas“ zu verwenden:

$$M [\mu A / pT] = A [m^2] / L [\mu H]$$

Hier sind berechnete Werte für Einzelwindungsschleifen ohne Magnetkern mit 1 mm Leiter-Durchmesser.

$$1 \text{ m}^2 \text{ Kreisschleife: } M = 0,199 [\mu A / pT]$$

$$1 \text{ m}^2 \text{ Vierfachschleife: } M = 0,183 [\mu A / pT]$$

Die Induktivitäten der Schleifen werden mit [5] berechnet. Ein anderer Wandlerkoeffizient kann definiert werden

$$M_e = I_s / e \quad (7),$$

wobei e die Amplitude des elektrischen Feldes ist. Es kann auf ähnliche Weise wie in (5) abgeleitet werden:

$$M_e = (1 / c) (A / L) \quad (8)$$

wobei c die Lichtgeschwindigkeit ist. Wir nehmen an, daß die Schleife ohne Magnetkern ist. Die Abmessung von  $M_e$  beträgt  $[A / (V / m)]$  „Ampere mal Meter pro Volt“. In einigen Fällen ist es möglicherweise bequemer,  $M_e$  zu verwenden, da die Intensität des elektromagnetischen Feldes üblicherweise in e in  $V / m$  angegeben wird. Die folgende praktische Gleichung kann verwendet werden:

$$M_e [nA / (\mu V / m)] = 3,33 (A [m^2] / L [\mu H])$$

Wenn eine Schleife mit einer Fläche von  $1 \text{ m}^2$  eine Induktivität von  $1 \mu H$  hat und das Feld ist  $1 \mu V / m$ , dann beträgt der Schleifenstrom  $3,33 \text{ nA}$ . Für den Fall von parallelen Schleifen ist L die äquivalente Induktivität aller parallel geschalteten Schleifen (angenommen als eine einzelne flache

Windung) und A ist die Fläche der einzelnen konstituierenden Schleife. Für gekreuzte koplanare (CC) Schleife bestehend aus n kleinen gleichen Schleifen mit jeweils Fläche A und Induktivität L.

$$M = n A / L \quad (9)$$

Die Erklärung von (2) ist sehr einfach - alle kleinen Schleifen sind mit einem gemeinsamen Widerstand von sehr geringem Wert verbunden, so daß sie als Stromquellen betrachtet werden können und ihre Ströme addiert werden. Hier ignorieren wir die gegenseitige Kopplung zwischen CC-Schleifen, die klein ist. Die konstituierenden n Schleifen sind möglicherweise nicht gleich, dann ist

$$M = A_1 / L_1 + A_2 / L_2 + \dots + A_n / L_n \quad (10)$$

Wenn wir annehmen, daß die äquivalente Induktivität  $L_{cc}$  von n gleichen CC-Schleifen fast  $L/n$  ist, wird (2) zu

$$M = A / L_{cc} \quad (11).$$

Beachten Sie, daß hier A die Fläche ist von der einzelnen konstituierenden Schleife.

## Anhang II Schleifenstrom gegen Schleifenfläche für CC-Schleifen

Durch Erhöhen der Schleifenfläche wird die Schleifenempfindlichkeit nicht linear erhöht, da auch die Schleifeninduktivität erhöht wird. Der Schleifenstrom als Funktion der gesamten Schleifenfläche ist in Abb. 8 angegeben. Bei CC-Schleifen ist diese Gesamtfläche die Summe der Flächen aller kleinen Schleifen.

Es werden Ströme von drei Schleifen aufgezeichnet - einzelne Quad-Schleifen, 2 CC-Quad-Schleifen und 4 CC-Quad-Schleifen. Die Ströme werden auf den Strom einer Einzelschleife mit einer Fläche von 0,0625 m<sup>2</sup> normiert. Die Ergebnisse stammen aus der MMANA-Modellierung (siehe Anhang III).

Alle Modelle haben einen festen Drahtdurchmesser von 1,7 mm. Die empirischen Schlußfolgerungen lauten wie folgt:

A - Durch Verdoppelung der Gesamtfläche wird der Strom für alle Schleifen um ca. 2,5 dB erhöht.

B - Der Strom von CC-Schleifen (2 und 4 Schleifen) ist ungefähr 3,5 dB und 7,5 dB höher als bei einer einzelnen Schleife mit derselben Fläche.

Eine feste Verbesserung der Stromverstärkung sollte erwartet werden, wenn eine einzelne Schleife in CC-Schleifen mit derselben Gesamtfläche umgewandelt wird. Der genaue Wert hängt wahrscheinlich in gewissem Maße von der Form der konstituierenden Schleife ab, aber die obigen Zahlen können als Arbeitsschätzung der erwarteten Verbesserung der Stromverstärkung verwendet werden. Das Erhöhen der Anzahl der konstituierenden CC-Schleifen kann nicht unendlich sein, da die Schleifeninduktivität niedrig wird und die niedrigere Breitband-Grenzfrequenz f niedrig der Breitbandschleife ansteigt (siehe auch [1]).

$$f_{low} = R_{in} / (2 \pi L_e) \quad (12)$$

wobei  $L_e$  die äquivalente Induktivität an den Schleifenanschlüssen ist. Zum Beispiel für CC-Schleifen gemäß Abb. 4 mit 0,7 m Durchmesser.

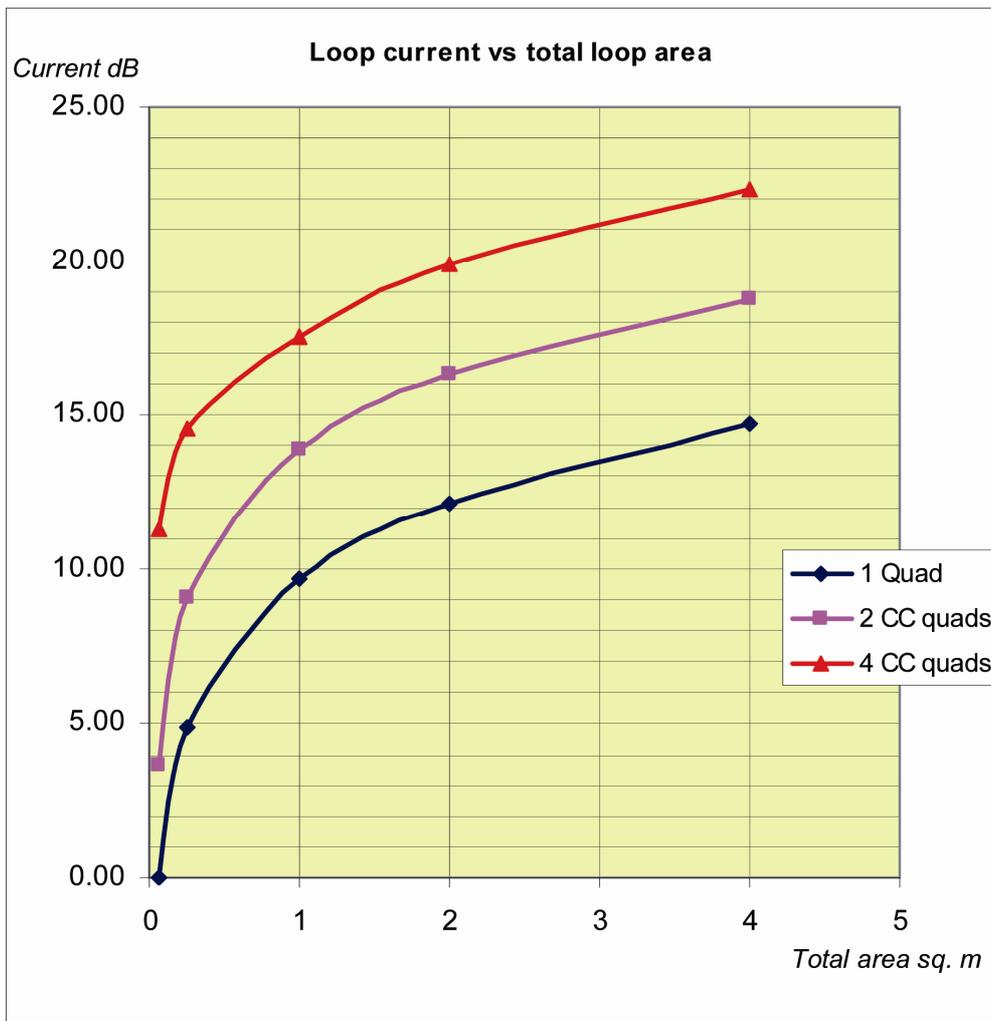


Abb. 8. Schleifenstrom gegen Gesamtschleifenfläche. Die Werte beziehen sich auf den Strom einer einzelnen Quad-Schleife mit einer Fläche von 0,0625 m<sup>2</sup>. MMANA-Modell.

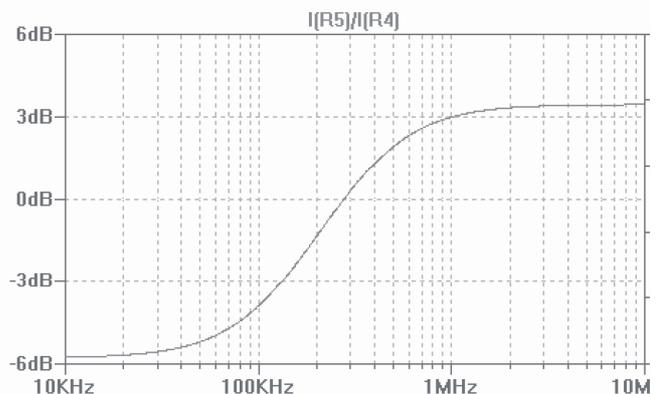
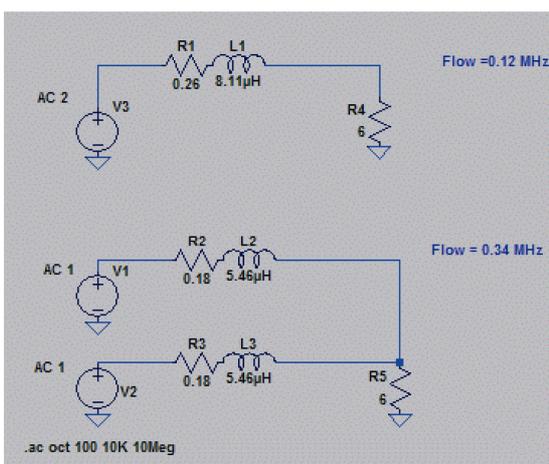


Abb. 9. Niederfrequenzgang einer einzelnen (Quad 1,41 m Seite) und 2 CC (zwei Quads mit 1 m Seite) Schleife mit gleicher Gesamtfläche und gleichem Drahtleiter (Cu, d = 1 mm). Das Stromverhältnis bei 6 Ohm Last wird angezeigt. Bei 0,28 MHz haben die Schleifen gleiche Ströme. Unterhalb dieser Frequenz hat eine einzelne Schleife einen höheren Strom, der bei sehr niedrigen Frequenzen fast 6 dB höher ist. Bei hohen Frequenzen ist die CC-Schleife 3,5 dB besser, wie von der Theorie vorhergesagt.

Die äquivalente Induktivität beträgt  $1 \mu\text{H}$  und für  $R = 6 \text{ Ohm}$  (wie auch für den AAA-1-Verstärker)  $f_{\text{low}} = 0,95 \text{ MHz}$ . Unterhalb dieser Frequenz wird der Schleifenstrom hauptsächlich von  $R$  in und nicht von der Schleifeninduktivität  $L$  bestimmt, und der Frequenzgang dieser Breitbandschleife ist nicht mehr flach. Dies bedeutet nicht, daß die Schleife nicht funktioniert, nur der Frequenzverlauf wird mit  $6 \text{ dB / Oktave}$  abklingen, was auf die Physik der Schleife zurückzuführen ist (Faradaysches Gesetz).

Eine detailliertere Analyse der Frequenzen von Einzelschleifen und CC-Schleifen unter  $f_{\text{low}}$  ist in 9 gezeigt. Die Ergebnisse der Modellierung von zwei Quad-Schleifen (Einzel- und 2 CC-Schleifen) mit derselben geometrischen Gesamtfläche sind angegeben.  $f_{\text{low}} = 0,12 \text{ MHz}$  und  $f_{\text{low}} = 0,34 \text{ MHz}$  für einzelne bzw. 2 CC-Schleifen. Verlustwiderstände und Induktivitäten werden mit der Tabelle berechnet [4].

### **Anhang III Verwendung von MMANA zur Modellierung von Empfangsantennen**

Mit dem MMANA-Programm wurde eine detailliertere Analyse der Empfangsströme in den gekreuzten koplanaren und parallelen Schleifen durchgeführt. Dieses Programm ist praktisch, um die Sendeantennen zu analysieren, aber hier werde ich eine Methode vorstellen, um diese Schleifen im Empfangsmodus zu analysieren. Die Idee ist, die Ströme im Lastwiderstand in verschiedenen Schleifen zu berechnen, die von einem kleinen Dipolstrahler angeregt werden, der in einem festen Abstand in der Fernfeldzone angeordnet ist. Mit dem Drahteditor plazierte ich im Fernfeld in  $80 \text{ m}$  Entfernung einen einfachen vertikalen Dipolstrahler mit einer Länge von  $1 \text{ m}$  mit der Speisung in der Dipolmitte. Der Dipol befindet sich in der Richtung der maximalen Schleifenempfindlichkeit (sie liegen in derselben Ebene).

Die Speisung in der Schleife wurde durch einen Lastwiderstand von mehreren Ohm ersetzt ( $6 \text{ Ohm}$  ist der Eingangswiderstand eines Breitband-AAA-1-Verstärkers). Um die Genauigkeit zu erhöhen, wurde die Anzahl der Segmente hoch eingestellt (automatische Verjüngung,  $\text{DM } 1 = 3000$ ,  $\text{DM } 2 = 800$ ,  $\text{SC} = 2$ ,  $\text{EC} = 1$ ). Nach der Berechnung sind die durch Dipolstrahlung induzierten Schleifenströme sehr klein und werden nicht auf dem grafischen Bildschirm angezeigt. Diese Ströme können jedoch aus dem Menü „Tabellenströme“ in MMANA entnommen werden. Das Programm erstellt eine \* .csv-Datei, die die Werte der Ströme in allen Segmenten enthält und zur einfacheren Verarbeitung in Excel exportiert werden kann. Die Ströme sind in relativen Einheiten angegeben. (im Doppelpunkt "Magnitude" der \* .csv-Datei).

Das Verfahren ist wie folgt: Zuerst lassen wir das Programm mit vertikalem Dipol als Strahler mit einer  $1 \text{ m}^2$  großen Quad-Schleife laufen. Die resultierende \* .csv-Datei muß gespeichert werden. Dann führen wir die neue interessierende Schleife mit demselben vertikalen Dipol wie ein Strahler aus, wobei die Programmeinstellungen dieselben bleiben wie im vorherigen Fall (Abstand, Anzahl der Segmente, Frequenz usw.). Die neue \* .csv-Datei mit den Strömen der neuen Antenne wird gespeichert und wir können die Ströme im Fluß in der Referenzschleife und in der neuen Schleife vergleichen.

Diese Ströme werden von demselben vertikalen Strahler mit demselben Erregerstrom und in derselben Entfernung induziert. Diese Datei gibt die Ströme in jedem Abschnitt jedes Drahtes an, aber wir sollten nur die Ströme in den Segmenten vergleichen, in denen die Last angeschlossen ist. Ich denke, daß dieses numerische Experiment ziemlich genau ist: Der Dipolstrahler ist klein und der Abstand ist ausreichend, so daß die Empfangsschleife fast sicher in der Fernfeldzone liegt. Die Polarisation beider Antennen ist vertikal und die Berechnung erfolgt im freien Raum. Die Induktivität einer beliebig geformten Schleife kann mit MMANA ziemlich genau berechnet werden. Durch normales Einspeisen des  $L_0$  als Sendeantenne wird der Eingangsimpuls berechnet. Die Induktivität wird aus dem reaktiven Teil der Impedanz als  $L = X / 2 \pi F$  berechnet.

## Anhang IV Verstärkung des Breitbandschleifenverstärkers

Der für Breitbandschleifen verwendete Verstärker ist ein Strom-Spannungs-Wandler - ein sogenannter Transimpedanz-Verstärker. Es ist zweckmäßig, seine Verstärkung als Verhältnis von Ausgangsspannung zu Eingangsstrom auszudrücken.

$$\text{Verstärkung} = U_{\text{out}} / I_{\text{inp}} [\text{Ohm}] \quad (13)$$

Die Abmessung erfolgt in Ohm. Die Verstärkung des AAA-1-Verstärkers beträgt 850 Ohm. Dies bedeutet, daß 1  $\mu\text{A}$  Eingangsschleifenwährung t eine Ausgangsspannung von 850  $\mu\text{V}$  ergibt. Es ist jetzt einfach, verschiedene Schleifenverstärker unabhängig von ihrem Eingangswiderstand zu vergleichen. Wenn wir zum Beispiel zwei Transimpedanzverstärker mit der gleichen Verstärkung und unterschiedlichen Eingangswiderständen haben, z. B. bei 6 Ohm und 9 Ohm unterscheidet sich ihre Spannungsverstärkung erheblich (mit 30 %), aber ihre Verstärkung als Breitbandschleifenverstärker ist nahezu gleich.

### Links

- [1] <http://www.lz1aq.signacor.com/docs/wsm1/wideband-active-sm-loop-antenna.htm>
- [2] <http://www.active-antenna.eu>
- [3] [http://www.active-antenna.eu/tech-docs/3\\_ActiveAA\\_Antena\\_11.pdf](http://www.active-antenna.eu/tech-docs/3_ActiveAA_Antena_11.pdf)
- [4] Spreadsheet WLoop\_calc.xls

Sofia, August 2013