

KW-Antennen

**Antenne
80/15/10
für beengte
Verhältnisse**

**Mitteilungen aus dem Institut
für Umwelttechnik
Nonnweiler/Saar
Dr. rer. nat. Schau
DL3LH**

Vorwort

DK5XX - Jürgen - Meckelfeld bei Hamburg, hat mich gebeten eine Antenne zu dimensionieren, die auch unter Dach verwendet werden kann. Viele neue Lizenzen wären gerne auf KW tätig, sind aber durch die Platzverhältnisse gezwungen sich auf das Hören zu beschränken. Die Aufgabe bestand also darin eine Antenne für beengte Verhältnisse und auf geringste Gesamtverluste zu optimieren.

1. Einleitung

Antennen die weit unterhalb ihrer Eigenresonanz betrieben werden, sind verkürzte Antennen. Diese haben als Eingangsimpedanz einen Realteil von nur einigen Ohm und einen großen kapazitiven Blindanteil. Um die Antenne mindestens auf Resonanz oder in deren Nähe zu bringen gibt es verschiedene Möglichkeiten.

- a. Der kapazitive Anteil wird durch eine Verlängerungsspule kompensiert.
- b. Die Antenne wird durch Dach- oder Endkapazitäten mehr oder weniger auf Resonanz gebracht.

a. hat den Nachteil, dass der Antennengewinn nahezu Null und der Wirkungsgrad der Antenne verschwindend gering wird. Ausführung b. hat den Vorteil des besseren Antennenwirkungsgrades und den Nachteil das Endkapazitäten aufwendig und mechanisch anspruchsvoll sind. Im Winter verursachen sie eine entsprechende Eislast, wenn an eine Außenanwendung gedacht wird. Außerdem können Endkapazitäten nicht beliebig groß gemacht werden (siehe Janzen Kurze Antennen).

Werden verkürzte Antennen unter Dach betrieben, ergeben sich weitere Nachteile hinsichtlich der Höhe der Impedanz der Antenne. Die Eingangsimpedanz der Antenne wird durch den nahen Boden noch kleiner und die Resonanz stark von der Höhe über Grund abhängig. Das eigentliche Verlust-Problem liegt in der notwendigen Anpassschaltung.

Eine weitere Möglichkeit ist die KW-Antenne als liegendes oder stehendes Rechteck mit optimierten Seitenlängen auszubilden. Die Optimierung bezieht sich dabei auf geringste Verluste der Gesamtanordnung bestehend aus Antenne und Anpassschaltung. Die ungünstigsten Verhältnisse sind bei der niedrigsten Frequenz und damit im 80-m Band vorhanden. Die Optimierung kann nur mit einem Rechner durchgeführt werden. Zu Fuß wäre das eine Lebensaufgabe wie bei Galileo, dessen Ausdauer ich nur bewundere.

2. Optimierung der Antenne für das 80/15/10-m-Band

Die vom Rechner optimierte Antenne für das 80/15/10 m Band zeigt Bild 1.

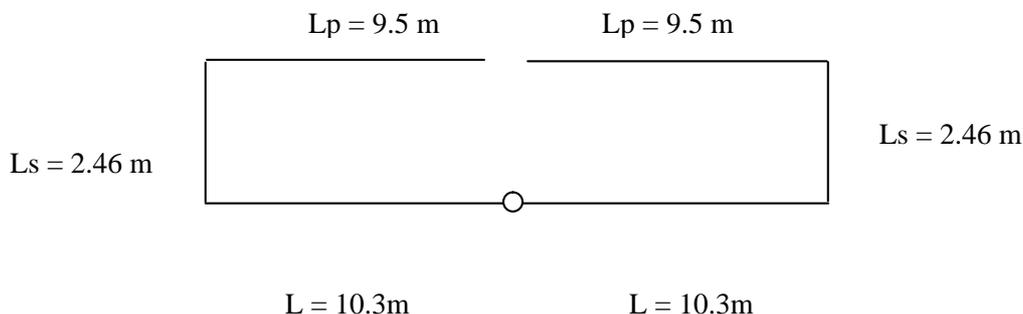


Bild 1

Drahtdurchmesser $d = 3 \text{ mm}$ in Kupfer massiv.

Die Seitenlänge beträgt $L = 20.6 \text{ m}$ ($2 \times 10.3 \text{ m}$) mit der symmetrischen Einspeisung in der Mitte. Die Querseiten haben eine Länge von $L_s = 2.46 \text{ m}$, die offene Seite jeweils eine Länge von $L_p = 9.5 \text{ m}$, die Gesamtlänge damit 44.52 m . Die Antenne kann liegend oder stehend betrieben werden, wobei sich allerdings die Impedanzverhältnisse im Einspeisepunkt verändern. Die Antenne ist nur für die Bänder 80/15/10 m optimiert.

Die charakteristischen Eingangsimpedanzen der liegenden Antenne nach Bild 1 bei verschiedenen Höhen H über Grund zeigt Tab.1. Der Untergrund habe die Werte $\mu_r = 5$ und eine elektrische Leitfähigkeit von $S = 20 \text{ mS/m}$. Diese Werte können einer Bodenleitfähigkeitskarte dem Internet entnommen werden. Die Abhängigkeit der Antennenimpedanz von diesen Werten ist allerdings gering und für die Praxis ohne Bedeutung - entgegen der allgemeinen Meinung über den Einfluss der Bodengrößen.

Höhe H über realem Grund	Frequenz MHz	Eingangsimpedanz Ω	Antennengewinn dBi
1 m	3.5	$1.4 - j 4.4$	1.82
	3.6	$1.46 + j 33$	2.14
	3.7	$1.5 - j 71$	2.46
	3.8	$1.55 - j 110$	2.76
2 m	3.5	$1.6 - j 28$	4.24
	3.6	$1.72 + j 12$	4.53
	3.7	$1.77 + j 53$	4.81
	3.8	$1.8 + j 95$	5.08
3 m	3.5	$1.9 - j 42$	5.68
	3.6	$2.0 - j 0.0$	5.93
	3.7	$2.2 + j 42$	6.15
	3.8	$2.3 + j 85$	6.36
4 m	3.5	$2.4 - j 50$	6.54
	3.6	$2.6 - j 7.0$	6.70
	3.7	$2.8 + j 36$	6.90
	3.8	$3.0 + j 79$	7.06
5 m	3.5	$3.0 - j 54$	7.05
	3.6	$3.3 - j 10$	7.19
	3.7	$3.6 + j 33$	7.32
	3.8	$3.9 + j 77$	7.44

Tab. 1

Tab. 1 zeigt sehr deutlich die Abhängigkeit des Antennengewinns von der Höhe H der Antenne über realem Grund und die enorme Abhängigkeit des Imaginärteiles d.h. die Verschiebung der Resonanz. Je höher die Antenne über Grund hängt, umso größer ist der Antennengewinn über isotropen Strahler.

Die Fußpunktimpedanzen sind mittels einer Anpassschaltung an den Senderausgang von meistens $Z = 50 \Omega$ anzupassen. Wird eine Röhrenendstufe betrieben muss sichergestellt werden, dass mittels Dummy-Load tatsächlich $R_{out} = 50 \Omega$ eingestellt wird. Die Einstellung des Anpassnetzwerkes in der Röhrenendstufe darf dann nicht mehr verändert werden. Ein in die koaxiale Leitung eingeschleiftes VSWR Meter zeigt nur so die richtigen Werte an. Hier ist das VSWR auf 1:1 – Anpassung - einzustellen. Damit geht die verfügbare Leistung der Senderendstufe tatsächlich auf die Anpassschaltung über. Wie viel der Leistung in der Anpassschaltung verbleibt, hängt von deren Ausführung ab. Die üblichen Anpassschaltungen in Form eines Pi- oder sogar T-Filters verursachen bei diesen niederohmigen Impedanzen immer hohe Verluste, so dass der Großteil der Leistung in der Anpassschaltung in Wärme umgesetzt wird. Man kann also keine vorgefertigten APN verwenden, sondern muss selbst tätig werden und eine APS in Form einer einfachen LC –Anordnung bauen. Da sicherlich der Versuch unternommen wird mit vorhandenen Anpassschaltungen zu operieren, kann das Ergebnis nur enttäuschend sein. Es liegt am Anpassnetzwerk - einfach die kommerziellen Ausführungen zur Seite legen.

3. Verluste einer 2-Element-LC-Anpassschaltung

Die Eingangsimpedanzen nach Tab. 1 und Tab. 3 der Antenne müssen mittels einer LC-Anpassschaltung direkt am Fußpunkt der Antenne an die Kabelimpedanz - meist 50Ω - angepasst werden. Dazu ist es notwendig die LC-Anpassschaltung als symmetrische Anordnung auszuführen (siehe Bild 7) oder einen gut dimensionierten Luft-Balun zu verwenden.

Um die Verluste gering zu halten ist nur eine 2-Element LC-Anpassschaltung geeignet. Da das Anpassnetzwerk direkt an der Antenne liegt, sind entsprechende Steuerungselemente für die Fernbedienung notwendig. Keinesfalls dürfen automatische oder manuelle Pi- oder T-Tuner verwendet werden. Deren Verluste sind bis 15 dB höher, als bei der gleichwertigen LC-Anpassschaltung. Man muss sich also die Mühe machen und selbst einen Tuner bauen, es sei denn man hat einen fortschrittlichen Tuner in Form eines LC-Netzwerkes – also nur 2 Blindelemente.

Tab. 2 zeigt die Verluste einer 2-Element-Anpassschaltung bei verschiedenen reellen Lasten mit $Q_L = 100$ und $Q_c = 500$. Die Leistung für die Berechnung sei zu $P = 1000 \text{ W}$ angenommen. Für andere Leistungen können Spannungen und Ströme in bekannter Weise umgerechnet werden.

Impedanz R/ Ω	Verlust dB	L μH	C pF	Verlust L/Watt	Verlust C /Watt	U_L V	U_c V	I_L A	I_c A	Bem.
1	0.36	0.32	5931	67	13	313	316	30,3	30	CpLs
2	0.26	0.45	4203	48	10	310	316	21,7	21,3	CpLs
3	0.21	0.54	3414	39	8	306	316	17,8	17,3	CpLs
4	0.18	0.61	2934	33	7	303	316	15,5	14,3	CpLs
5	0.16	0.67	2601	29	6	300	316	13,9	13,2	CpLs
10	0.10	0.89	1744	20	4	283	316	9,9	8,8	CpLs
20	0.06	1.09	1072	12	2	245	316	7,0	5,4	CpLs
30	0.04	1.09	715	8	2	201	316	5,7	3,6	CpLs
40	0.03	0.90	437	5	1	143	316	5,0	2,2	CpLs
100	0.05	2.21	446	10	2	316	445	4,5	3,2	LsCp
200	0.09	3.8	388	17	3	543	626	4,5	3,9	LsCp
300	0.12	4.89	335	22	4	699	764	4,5	4,1	LsCp
400	0.14	5.76	298	26	5	825	880	4,5	4,2	LsCp
500	0.16	6.52	270	30	6	933	982	4,5	4,2	LsCp
1000	0.23	9.39	198	43	9	1344	1378	4,5	4,4	LsCp
2000	0.33	13.3	143	60	12	1902	1926	4,5	4,4	LsCp
3000	0.40	16.2	119	73	15	2321	2339	4,5	4,4	LsCp
4000	0.46	18.63	104	84	17	2666	2682	4,5	4,4	LsCp
5000	0.52	20.73	94	94	19	2965	2979	4,5	4,4	LsCp

Tab. 2

Wie aus Tab. 2 ersichtlich, sind erhebliche Kapazitätswerte erforderlich um eine verlustarme Anpassung zu gewährleisten. Bei den niederohmigen Impedanzen fließen große HF-Ströme, d.h. Kontakte zur Induktivität und die Leitungen sind entsprechend üppig zu dimensionieren. Dabei ist der auch der Skin-Effekt zu berücksichtigen (siehe die „Antenne macht die Musik“).

4. Impedanzen der optimierten Antenne für die Bänder 80/15/10 m, die Verluste und die Dimensionierung der LC-Anpassschaltung

In Tab. 3 sind für die Bänder 80/15/10 m die Verluste und die Werte von L und C der LC-Anpassschaltung berechnet. Dabei ist $Q_L = 100$ und $Q_C = 500$ angenommen. Die Anordnung der Bauelemente Ls und Cp bedeutet von der 50 Ω Seite gesehen, eine Serieninduktivität und dann eine Parallelkapazität, parallel zur Antenne. Die Bezeichnung CpLs bedeutet von der 50 Ω Seite gesehen, erst eine Parallelkapazität und dann eine Serieninduktivität zur Antenne. Wegen der notwendigen Symmetrie halbiert sich die Induktivität nach Tab. 3, sie muss dann zweimal ausgeführt werden (siehe Bild 7).

Höhe H über realem Grund	Pos.	Typ	Frequenz MHz	Eingangsimpedanz Ω	Verluste im LC-APN dB	Induktivität μH	Kapazität pF	Verluste Pi-Filter 500 pF dB	Verluste T-Filter 100 pF dB
1 m	1	LsCp	3.60	1.4 + j 33	0,39	8,06	1563	0,90	7,72
	3	LsCp	21.2	610 – j 4095	1,18	7,76	5,5	14,56	2,89
	4	LsCp	29.0	75 – j 256	0,19	1,14	5,4	3,91	0,58
2 m	5	LsCp	3.60	1.7 + j 12	0,10	1,85	4051	nicht mögl.	7,26
	6	LsCp	21.2	978 – j 2912	0,70	4,80	9,4	10,23	1,47
	7	LsCp	29.0	140 – j 177	0,12	0,68	19,3	2,05	0,29
3 m	8	CpLs	3.60	2.0 – j 0.0	0,26	0,45	4202	0,26	6,83
	9	LpCs	21.2	1362 – j 2439	0,54	3,76	12,5	8,27	1,04
	10	LsCp	29.0	189 – j 131	0,11	0,58	29,1	1,68	0,22
4 m	11	CpLs	3.60	2.6 – j 7.0	0,34	0,82	3632	0,38	6,04
	12	LsCp	21.2	1707 – j 2268	0,49	3,43	14,2	7,57	0,91
	13	LsCp	29.0	238 – j 111	0,11	0,59	33,3	1,71	0,20
5 m	14	CsLp	3.60	3.3 – j 10	0,32	1,01	3206	0,36	5,35
	15	LsCp	21.2	2002 – j 2271	0,49	3,38	14,7	7,46	0,88
	16	LsCp	29.0	288 – j 127	0,12	0,66	32,3	1,94	0,22

Tab. 3

Für das symmetrische LC-Filter reichen 2 Rollspulen von jeweils $L_{\max} = 5 \mu\text{H}$, die nicht synchron laufen müssen. Es gilt immer die Summe beider Induktivitäten. Ganz ideal wäre ein doppeltes Variometer mit etwa $2.5 \mu\text{H}$ und guter Kopplung von etwa $k = 0.95$. Damit könnte man die Verluste nochmals halbieren. Die hohe Kapazität im 80 m Band kann durch Zuschalten eines festen Leistungs-Kondensators erreicht werden. Um zwischen LsCp und CpLs zu wechseln, ist ein zweipoliger Umschalter notwendig. Man beachte bei Verwendung der zulässigen Leistung die hohen HF-Ströme von etwa $I_{\text{eff}} = 30 \text{ A}$ bzw. $I_{\text{max}} = 42.3 \text{ A}$.

Die Spalten 7 und 8 der Tab. 3 zeigen zum Vergleich die Verluste einer Pi- Anpassschaltung mit einem Kondensator von $C = 500 \text{ pF}$ und die eines T-Gliedes mit $C = 100 \text{ pF}$ am Ausgang. Die Verluste liegen fast immer über den Verlusten der LC-Anpassschaltung. Es eignet sich also **nur** eine LC-Anpassschaltung (2 Blindelemente) für diese niederohmigen Antennenimpedanzen. Außerdem ist die Resonanzabstimmung bei der LC-Anordnung eindeutig und nicht mehrdeutig wie beim Pi- und T-Filter. In der erforderlichen, symmetrischen LC-Ausführung ist die Induktivität pro Zweig jeweils die Hälfte, da beide Induktivitäten in Reihe liegen.

Im 80 m Band ist nach Tab. 3 entweder die LsCp oder die CpLs Reihenfolge der Elemente in Anhängigkeit von der Antennenhöhe erforderlich. Da die tatsächliche Beeinflussung durch die Umgebung nicht abgeschätzt werden kann, muss man hier durch Versuch und Irrtum in Erfahrung bringen welche Anpassvariante die gesuchte Anpassung gewährleistet – ein wenig Amateurarbeit die sich lohnt. Besondere Sorgfalt gilt der Ausführung der Induktivität, damit mindestens ein $Q = 100$ erreicht wird. Ein $Q = 50$ würde die Verluste in der Anpassschaltung verdoppeln und nutzlos in Wärme gewandelt werden. Weitere Verluste entstehen durch

die eigentliche Antenne. Mit dem Drahtdurchmesser von $d = 3 \text{ mm}$ und Kupfer (massiv) ist der Antennenwirkungsgrad $\eta \approx 85 \%$, d.h. nochmals etwa 15 % Verlust.

5. Übertragungsfunktion und Reflexionsfaktor

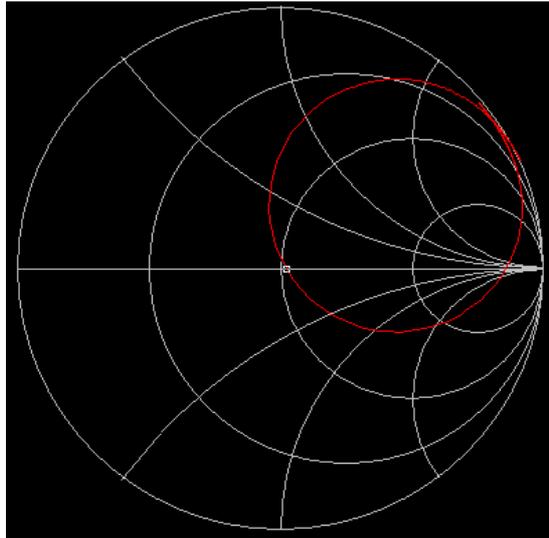


Bild 2

Bild 2 zeigt den komplexen Reflexionsfaktor der LC-Anpassschaltung im Smith-Chart und Bild 3 die Übertragungsfunktion in rot. Blau ist der Betrag des eingangsseitigen Reflexionsfaktors oder auch der Verlauf des Stehwellenverhältnisses.

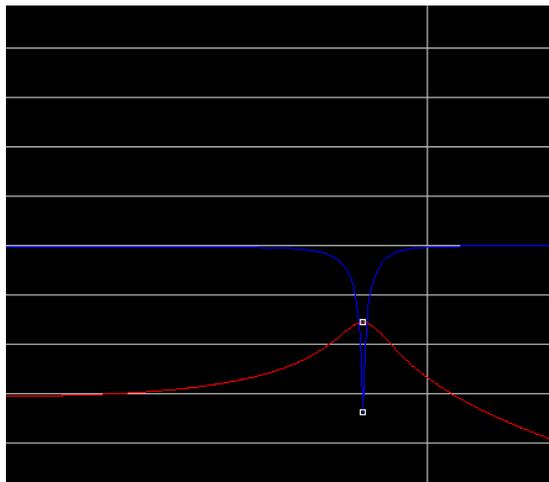


Bild 3

Der Marker liegt bei der Resonanzfrequenz $f_0 = 3.6 \text{ MHz}$ mit dem Punkt der besten Anpassung – wie es auch sein sollte.

6. Antennendiagramme der liegenden Antenne

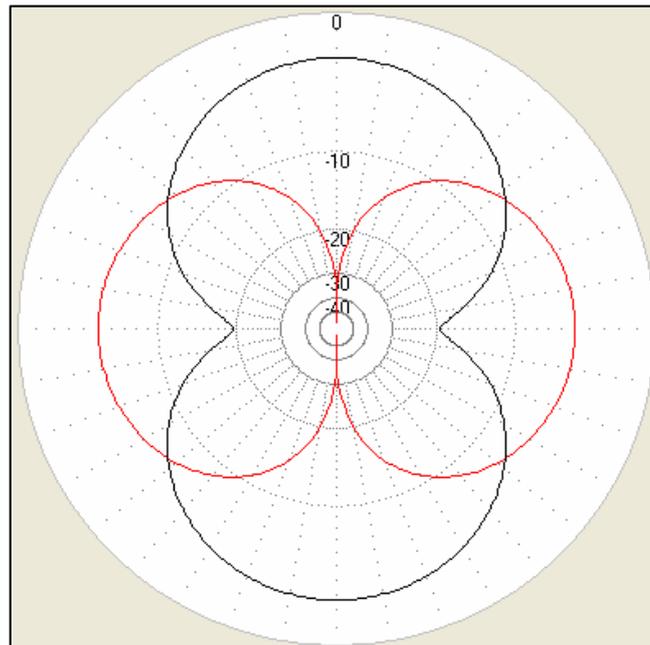


Bild 4

Bild 4 zeigt das Richtdiagramm im Fernfeld (V + H) der liegenden Antenne bei der Frequenz $f = 3.6 \text{ MHz}$ und

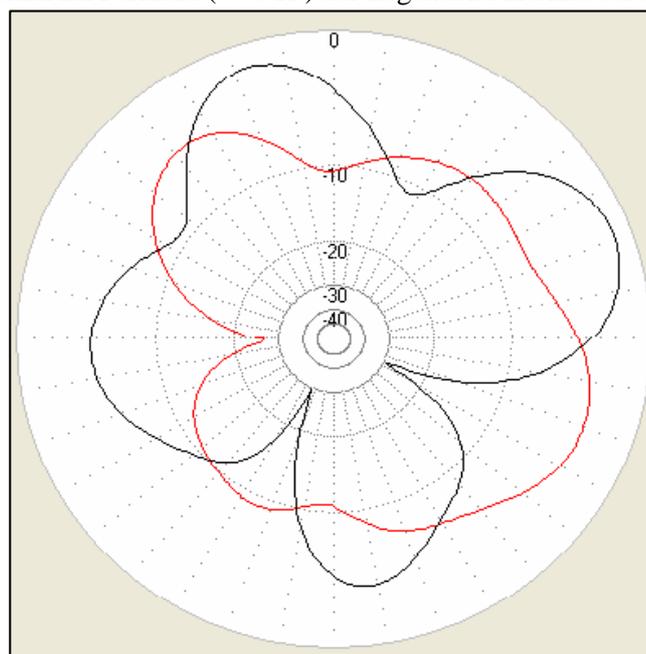


Bild 5

Bild 5 zeigt das Richtdiagramm im Fernfeld (V+H) bei der Frequenz $f = 21.2 \text{ MHz}$.

Die schwarze Kurve ist die horizontale, rot die vertikale Darstellung. Die Antenne liegt in der Horizontalen.

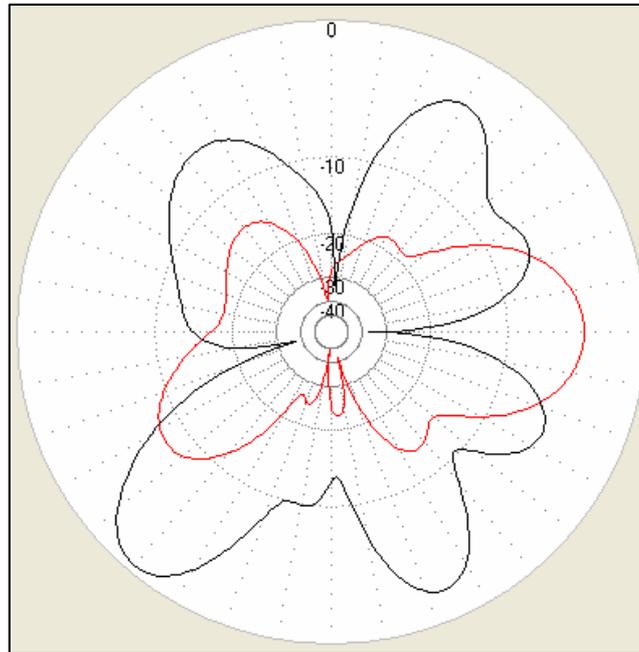


Bild 6

Bild 6 zeigt das Richtdiagramm im Fernfeld (V+H) bei der Frequenz $f = 29$ MHz. Einige eindeutige Nullstellen geben der Antenne eine Richtwirkung.

7. Vergleich mit einem Dipol 2 x 10 m in 2 m Höhe über realem Grund

Abschließend wollen wir noch einen Vergleich mit einem 2 x 10 m Dipol in 2 m Höhe durchführen. Die sich einstellenden Eingangsimpedanzen, die Verluste mit einer direkt am Fußpunkt der Antenne angebrachten LC-Anpassschaltung und die Gesamtverluste inkl. einer 15 m langen Zuleitung zeigt Tab. 4.

Frequenz MHz	Impedanz der Antenne Ω	Gewinn der Antenne dBi	Verluste LC-Netzwerk dB	Gesamtverluste inkl. einer symmetrischen 600 Ω Leitung L = 15 m dB	Gesamtverluste inkl. einer 50 Ω RG 213 Leitung L = 15 m dB
3.6	0.5 - j 932	8.07	15.01	12.27	29.18
7.05	5.2 - j 54	10.03	0.59	3.69	2.48
14.2	9937 - j 7148	10.16	0.91	0.50	11.95
21.2	37 - j 156	9.32	0.36	0.92	2.51
29.0	2620 - j 2280	8.57	0.49	0.57	8.75

Tab. 4

Wie man aus Tab. 4 sieht, erhöht nicht immer eine Zuleitung die Verluste (siehe „Die Antenne macht die Musik“), da diese Leitung transformiert.

In der letzten Spalte in Tab. 4 sind die Gesamtverluste inkl. einer 15 m langen 50- Ω -Leitung berechnet. Die Verluste mit Koaxkabel – egal welcher Bauart – sind so hoch, dass sich deren Verwendung verbietet. Bemerken möchte ich noch, dass 3 dB eine Halbierung der Senderleistung und 1 dB einen Verlust von 20 % bedeuten. Der Wirkungsgrad der reinen Antenne verschlechtert diesen Wert um weitere ca. 15 - 20 %. Daher ist es besonders wichtig eine Optimierung auf geringste Gesamtverluste durchzuführen. LC-Anpassnetzwerke und deren technische Ausführung sind auf der Seite www.ham-on-air.de unter AFU-Wiki zu finden.

8. Technische Ausführung

Auf Anregung von Jürgen DK5XX und damit es keine Missverständnisse gibt, soll noch die technische Ausführung dargestellt werden. Die Anpassschaltung muss - zur Vermeidung von Verlusten - direkt an der Antenne betrieben werden. Daher kann der Bauvorschlag des fernbedienbaren Kopplers von Jürgen auf der Seite „Ham On Air“ als ein Vorausdenken gewertet werden. Als Beispiel sei die Anpassschaltungen für das 80 m Band in Bild 7 dargestellt. Die Werte der Induktivität und Kapazität findet man in der Tab. 3 unter der Position 5. Für die symmetrische Schaltung gilt $L_s = 1,850 \mu\text{H} / 2 = 925 \text{ nH}$.

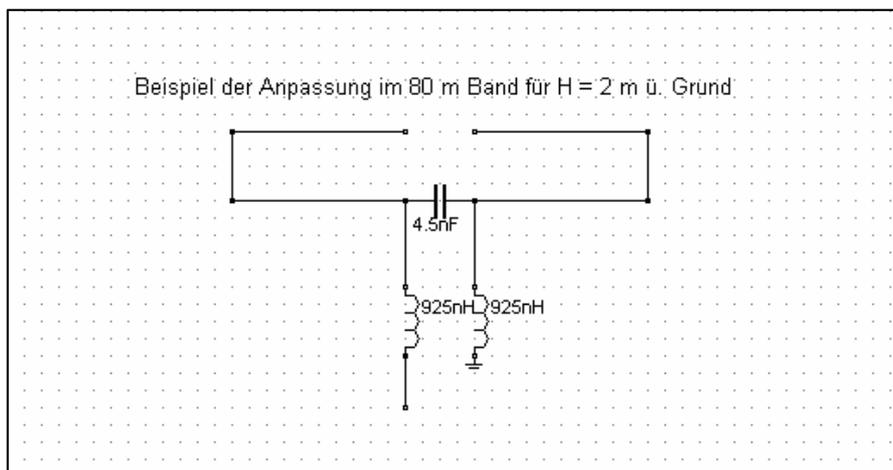


Bild 7

DL3LH, Walter

schau@rs-systems.info

www.rs-systems.info

www.heide-holst.de

www.ham-on-air.de

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.