

Magnetic Loop Antennen

Ein umfassender Leitfaden für Theorie, Praxis und Selbstbau

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung: Die Faszination der kompakten Schleife	5
1.1 Definition und grundlegendes Konzept	5
1.2 Historische Entwicklung	5
1.3 Relevanz und Einsatzgebiete im modernen Amateurfunk	5
1.4 Warum eine Magnetic Loop?	6
2 Physikalische Grundlagen und Funktionsweise	6
2.1 Der Schwingkreis als Fundament	6
2.2 Das magnetische Prinzip: H-Feld-Kopplung	6
2.3 Gütefaktor (Q) und Bandbreite	6
2.4 Spannungs- und Stromverteilung	7
2.5 Wirkungsgrad und Widerstände	7
3 Anatomie der Antenne: Die Kernkomponenten	7
3.1 Die Hauptschleife (Der Strahler)	7
3.1.1 Material und Oberfläche	7
3.1.2 Form und Dimensionierung	8
3.2 Der Abstimmkondensator (Das Herz der Abstimmung)	8
3.2.1 Spannungsfestigkeit	8
3.2.2 Bauformen	8
3.2.3 Exkurs: Der Schmetterlings-/Butterfly-Kondensator	8
3.2.4 Vergleich der Kondensator-Bauformen	9
3.2.5 Wichtige Hinweise zum Kondensator	9
3.3 Die Kopplung (Die Einspeisung)	10
3.3.1 Die induktive Kopplung und die 1/5-Regel	10
3.3.2 Feinabstimmung des SWR	10
3.3.3 Alternative Anpassmethoden	10
3.3.4 Materialien für die Koppelschleife	11
4 Technische Eigenschaften und Herausforderungen	11
4.1 Der Wirkungsgrad (η): Das Milliohm-Problem	11
4.2 Verlustquellen minimieren: „Big Fat Conductors“	11
4.2.1 Exkurs: Der Skin-Effekt im Detail	12
4.2.1.1 Physikalischer Mechanismus	12
4.2.1.2 Erhöhung des Verlustwiderstands	12
4.2.1.3 Der fatale Einfluss auf den Wirkungsgrad	12
4.2.1.4 Konstruktive Gegenmaßnahmen	12
4.3 Abstrahlcharakteristik und Richtwirkung	12
4.3.1 Vertikale Montage (Standard)	13
4.3.2 Horizontale Montage	13

4.4 Die MLA als Preselektor	13
5 Die MLA im praktischen Betrieb	13
5.1 Der Abstimmvorgang: Präzision ist der Schlüssel	13
5.1.1 Abstimmhilfe: Die Glühlampe als Resonanzanzeige	13
Physikalisches Prinzip	13
Die Glühlampe als Indikator	14
Praktischer Ablauf	14
Historischer Kontext	14
5.2 Die Problematik der „Handkapazität“	14
5.3 Vorteile der MLA im Einsatz	14
5.4 Nachteile und Einschränkungen	15
5.5 Vergleich: MLA vs. klassischer Dipol	15
6 Wichtige Sicherheitshinweise: Schutz von Mensch und Technik	15
6.1 Hochspannung am Kondensator: Die unsichtbare Lebensgefahr	15
6.1.1 Zusammenhang zwischen Sendeleistung und Hochspannung	15
Spannungsanstieg durch Resonanz	16
Konkrete Leistungswerte und Spannungen	16
Einflussfaktoren auf die Spannungshöhe	16
Technische Konsequenzen	16
6.2 Starkes magnetisches Nahfeld und Schutzabstände	16
6.3 Rechtliche Anforderungen und Bewertung (BNetzA / ICNIRP)	17
6.4 Schutz elektronischer Geräte	17
7 Beispiele und Bauprojekte	17
7.1 Kommerzielle Lösungen	17
7.2 DIY – Tipps für den Eigenbau	17
7.2.1 Materialwahl für die Schleife	17
7.2.2 Fernabstimmung und Motoren	18
7.2.3 Abstimmhilfen	18
7.2.4 Rahmen und Halterung	18
7.3 Besondere DIY-Projekte	18
8 Fazit: Der spezialisierte Problemlöser	19
8.1 Zusammenfassung der Stärken und Schwächen	19
8.2 Ideale Anwenderprofile	19
8.3 Realistische Erwartungshaltung	19
8.4 Abschließendes Urteil	19
9 Quellenverzeichnis	20
9.1 Fachartikel und Online-Publikationen	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.2 Fachliteratur und Enzyklopädien	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.3 Video-Ressourcen und Tutorials	Fehler! Textmarke nicht definiert.

9.4 Produktdokumentationen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.5 Software und Online-Rechner	Fehler! Textmarke nicht definiert.
9.6 Empfohlene Web-Ressourcen.....	Fehler! Textmarke nicht definiert.

1 Einleitung: Die Faszination der kompakten Schleife

In der Welt des Amateurfunks ist die Suche nach der optimalen Antenne eine ständige Herausforderung, insbesondere wenn Platzmangel oder restriktive Auflagen den Aufbau klassischer Drahtantennen verhindern. Hier stellt die Magnetic Loop Antenne (MLA) – auch als magnetische Schleifenantenne oder Rahmenantenne bezeichnet – eine faszinierende und oft überlegene Lösung dar.

1.1 Definition und grundlegendes Konzept

Eine Magnetic Loop ist eine **elektrisch kleine Antenne**, deren Umfang in der Regel deutlich kleiner als ein Viertel der Betriebswellenlänge ($\lambda/4$) ist. Im Gegensatz zu herkömmlichen Antennen wie Dipolen, die primär auf die elektrische Komponente (E-Feld) elektromagnetischer Wellen reagieren, koppelt die MLA in ihrem Nahfeld bevorzugt an die **magnetische Komponente (H-Feld)** an.

Physikalisch betrachtet handelt es sich bei einer MLA um einen **Parallelschwingkreis** von extrem hoher Güte. Dieser besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten:

1. Einer großen Leiterschleife, die als **Induktivität (L)** fungiert.
2. Einem variablen Kondensator, der die erforderliche **Kapazität (C)** bereitstellt, um den Kreis auf die gewünschte Frequenz in Resonanz zu bringen.

1.2 Historische Entwicklung

Die Technik der magnetischen Schleifen ist keineswegs neu. Die ersten theoretischen Grundlagen und Patente gehen bis auf F. Braun im Jahr 1899 zurück. In der Frühzeit der Funktechnik dienten Rahmenantennen oft als Empfangsantennen auf Holzrahmen.

Im Laufe des 20. Jahrhunderts fanden sie spezialisierte Anwendungen:

- **Militär und Marine:** Einsatz als Peilantennen (RDF) oder für die U-Boot-Kommunikation, da magnetische Felder Wasser und Erdboden besser durchdringen können als elektrische Felder.
- **Rundfunk:** Bekannt sind die kompakten Ferritantennen in Transistorradios seit den 1960er Jahren, die ebenfalls nach dem Prinzip der magnetischen Kopplung arbeiten.
- **Spezialanwendungen:** Heute werden sie auch in der Höhlenforschung (Speläologie) zur Kommunikation durch Felsgestein (z. B. System Cave-Link) eingesetzt.

1.3 Relevanz und Einsatzgebiete im modernen Amateurfunk

Die MLA hat sich heute zu einem unverzichtbaren „Problem-löser“ für Funkamateure entwickelt, die unter schwierigen Bedingungen operieren. Ihre Bedeutung ergibt sich aus mehreren modernen Szenarien:

- **Antennengeschädigte (Urbaner Betrieb):** In Mietwohnungen, auf Balkonen oder bei Antennenverboten ist die MLA oft die einzige Möglichkeit, überhaupt QRV (funkbereit) zu sein. Sie wird aufgrund ihrer Kompaktheit oft als „Stealth-Antenne“ getarnt.
- **Portabel-Betrieb (SOTA/POTA):** Für Aktivitäten auf Berggipfeln (Summits on the Air) oder in Nationalparks (Parks on the Air) überzeugt sie durch geringes Gewicht, schnellen Aufbau und die Unabhängigkeit von hohen Aufhängepunkten wie Bäumen.
- **Betrieb unter widrigen Bedingungen:** Da die MLA auch in geringer Höhe über Grund (1,5 bis 2,5 m) oder sogar innerhalb von Gebäuden effektiv arbeitet, bietet sie eine Flexibilität, die ein klassischer Dipol nicht leisten kann.

1.4 Warum eine Magnetic Loop?

Die Faszination dieser Antennenform liegt nicht nur in ihrer Größe, sondern in ihren einzigartigen Filtereigenschaften. Aufgrund ihrer extremen Schmalbandigkeit wirkt sie als **natürlicher Preselektor**. Sie unterdrückt lokale elektrische Störungen (z. B. durch Schaltnetzteile oder LED-Dimmer) effektiv und sorgt so für einen bemerkenswert „ruhigen“ Empfang in einer zunehmend durch Elektrosmog belasteten Umgebung.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Magnetic Loop Antenne keine „Wunderantenne“ ist, die die Physik außer Kraft setzt, aber sie ist ein hochspezialisiertes Werkzeug, das dort Kommunikation ermöglicht, wo andere Systeme scheitern.

2 Physikalische Grundlagen und Funktionsweise

Die Magnetic Loop Antenne (MLA) unterscheidet sich in ihrer Arbeitsweise grundlegend von herkömmlichen Dipol- oder Vertikalantennen. Ihr Verständnis erfordert einen Blick auf die Schwingkreis-Theorie und die Verteilung elektromagnetischer Felder.

2.1 Der Schwingkreis als Fundament

Im Kern ist eine MLA ein **Parallelschwingkreis**. Er besteht aus zwei Hauptkomponenten:

- Einer großen Leiterschleife, die als **Induktivität (L)** fungiert.
- Einem parallel geschalteten variablen Kondensator, der die **Kapazität (C)** bereitstellt. Durch Verändern der Kapazität wird der Schwingkreis auf die gewünschte Frequenz in Resonanz gebracht. Ohne diesen Kondensator wäre die Resonanzfrequenz der Schleife extrem hoch, und sie würde nicht mehr als kompakte MLA fungieren.

2.2 Das magnetische Prinzip: H-Feld-Kopplung

Der entscheidende Unterschied zu „elektrischen“ Antennen (wie Dipolen) liegt in der Feldkopplung:

- **Nahfeld:** In ihrem Nahbereich (bis ca. $0,16 \lambda$) reagiert die MLA primär auf die magnetische Komponente (H-Feld) der elektromagnetischen Welle.
- **Störfestigkeit:** Da die meisten lokalen, von Menschen verursachten Störungen (Schaltnetzteile, LED-Dimmer) im Nahfeld eine dominierende elektrische Komponente (E-Feld) haben, ist die MLA für diesen „Elektrosmog“ weitgehend unempfindlich.
- **Empfang:** Sie empfängt das gewünschte Funksignal aus dem Fernfeld, wo E- und H-Feld fest miteinander gekoppelt sind, während sie lokales elektrisches Rauschen unterdrückt. Dies führt zu einem signifikant besseren Signal-Rausch-Verhältnis (SNR).

2.3 Gütefaktor (Q) und Bandbreite

MLAs zeichnen sich durch einen **extrem hohen Gütefaktor (Q)** aus. Dies hat zwei wesentliche Konsequenzen:

3. **Extreme Schmalbandigkeit:** Die nutzbare Bandbreite ist sehr gering und kann auf den unteren Bändern nur wenige Kilohertz betragen. Ein ständiges Nachstimmen bei Frequenzwechseln ist daher zwingend erforderlich.

4. **Preselektor-Effekt:** Die Antenne wirkt wie ein hochwirksamer, schmalbandiger Bandpassfilter. Dies schützt den Empfänger vor Übersteuerung durch starke Signale außerhalb der Betriebsfrequenz und verhindert unerwünschte Mischprodukte.

2.4 Spannungs- und Stromverteilung

Innerhalb der Schleife herrscht im Resonanzfall eine spezifische Energieverteilung:

- **Strommaximum ($I_{\max}$):** Der höchste Zirkulationsstrom fließt an der Stelle, die dem Kondensator genau gegenüberliegt. Dieser hohe Strom ist die Quelle der magnetischen Abstrahlung.
- **Spannungsmaximum ($V_{\max}$):** Die höchste HF-Spannung konzentriert sich direkt am Abstimmkondensator. Selbst bei geringer Sendeleistung (z. B. 10 W) können dort Spannungen im Kilovolt-Bereich auftreten.

2.5 Wirkungsgrad und Widerstände

Der Wirkungsgrad (η) einer MLA ist das Verhältnis vom Strahlungswiderstand (R_S) zum Gesamtwiderstand ($R_S + R_V$).

- **Strahlungswiderstand (R_S):** Da die Antenne elektrisch klein ist, ist R_S extrem gering (oft nur einige Milliohm).
- **Verlustwiderstand (R_V):** Er setzt sich aus ohmschen Verlusten im Leiter (verstärkt durch den Skin-Effekt), Übergangswiderständen und Verlusten im Kondensator zusammen. Da R_S so klein ist, wirkt sich jedes Milliohm an Verlustwiderstand dramatisch negativ auf den Wirkungsgrad aus. Um effektiv zu senden, müssen daher massivste Leiter (dicke Rohre) und hochwertigste Verbindungen verwendet werden.

3 Anatomie der Antenne: Die Kernkomponenten

Eine Magnetic Loop Antenne besteht aus drei funktionalen Einheiten, die präzise aufeinander abgestimmt sein müssen, um die physikalischen Vorteile (hohe Güte, Schmalbandigkeit) nutzen zu können.

3.1 Die Hauptschleife (Der Strahler)

Die Hauptschleife ist das strahlende Element. Ihre Konstruktion ist der entscheidende Faktor für die Minimierung von Verlusten.

3.1.1 Material und Oberfläche

Um den **Skin-Effekt** (Stromfluss nur an der Leiteroberfläche bei HF) zu optimieren, werden hochleitfähige Materialien wie **Kupfer oder Aluminium** verwendet. Der Rohrdurchmesser sollte so groß wie möglich gewählt werden („Big fat conductors“), um den ohmschen Widerstand zu senken.

- **Kupfer:** Gilt als das beste Material aufgrund seiner extrem hohen Leitfähigkeit. Besonders beliebt sind dickwandige Kupferrohre (z. B. aus dem Installationsbedarf). Für das 40-Meter-Band werden Durchmesser von 5 bis 7 cm empfohlen.
- **Aluminium:** Ist eine sehr gute, leichtere Alternative zu Kupfer. Es hat zwar eine etwas geringere Leitfähigkeit (ca. 63 % von Kupfer), dies wird jedoch teilweise durch einen tiefer eintauchenden Skin-Effekt kompensiert.

- **Hochwertige Koaxialkabel:** Für portable oder flexible Loops eignen sich dicke Koax-Kabel wie RG-213 oder RG-214 (mit doppeltem Schirm). Als „Königsweg“ für Kabel-Loops wird oft Cellflex LCF 12-50 genannt, da es einen gewellten Kupfer-Außenleiter besitzt, sehr verlustarm und dennoch formstabil ist.
- **Kreative Alternativen:** Auch 26-Zoll-Fahrradfelgen aus Aluminium oder einfache Tapetenlineale (für 10 m-Experimente) wurden erfolgreich als Leiter verwendet.

3.1.2 Form und Dimensionierung

Die **Kreisform** ist physikalisch ideal, da sie bei gleichem Umfang die größte Fläche umschließt und so das stärkste Magnetfeld erzeugt. Praktische Alternativen sind Achtecke oder Quadrate.

Der Umfang sollte idealerweise zwischen **0,1 und 0,25 λ** der Betriebswellenlänge liegen. Ist die Schleife zu groß (über $\lambda/4$), verliert sie ihren magnetischen Charakter und verhält sich wie ein Faltdipol.

3.2 Der Abstimmkondensator (Das Herz der Abstimmung)

Dies ist die kritischste Komponente, da hier die extrem hohe Güte des Schwingkreises zu massiven elektrischen Belastungen führt.

3.2.1 Spannungsfestigkeit

Am Kondensator treten im Resonanzfall **extreme Hochspannungen** auf. Selbst bei nur 10 Watt Sendeleistung können Spannungen bis zu 1000 Volt entstehen; bei 100 Watt steigen diese auf bis zu 6000 Volt (6 kV) an.

3.2.2 Bauformen

- **Vakuum-Drehkondensatoren:** Die technisch beste, aber teuerste Lösung mit höchster Spannungsfestigkeit.
- **Butterfly- / Split-Stator-Kondensatoren:** Diese bevorzugten Bauformen haben keine schleifenden Kontakte am Rotor, was Übergangswiderstände minimiert und Verluste reduziert.
- **Luftdrehkondensatoren:** Oft im Selbstbau für kleine Leistungen (QRP) genutzt, benötigen jedoch für höhere Leistungen große Plattenabstände.

3.2.3 Exkurs: Der Schmetterlings-/Butterfly-Kondensator

Die Schmetterlingsform bei Abstimmkondensatoren für Magnetic Loop Antennen bietet signifikante technische Vorzüge, bringt jedoch auch konstruktive und kapazitive Einschränkungen mit sich.

Vorteile:

- **Verlustfreiheit durch fehlende Schleifkontakte:** Bei dieser Bauform ist der Rotor elektrisch isoliert und nicht Teil des Stromkreises. Da keine schleifenden Kontakte (Wiper) vorhanden sind, werden die dort üblicherweise auftretenden Übergangswiderstände und mechanischen Störfaktoren eliminiert.
- **Höherer Wirkungsgrad und Güte:** Durch den minimalen Verlustwiderstand wird eine höhere Güte des Schwingkreises erreicht, was diese Kondensatoren ideal für den Betrieb mit hohen Leistungen (QRO) macht.
- **Erhöhte Spannungsfestigkeit:** Bei einer seriellen Verschaltung der Plattenpakete verdoppelt sich die Spannungsfestigkeit im Vergleich zu herkömmlichen Drehkondensatoren.

- **Minimierung der Handkapazität:** Diese Bauform hilft dabei, die Frequenzverschiebung beim Berühren des Abstimmknopfs zu reduzieren. In der Praxis bleibt die Antenne dadurch stabiler auf der eingestellten Frequenz.
- **Einfachere Fernsteuerung:** Aufgrund ihres Aufbaus lässt sich die Schmetterlingsform oft einfacher mit Getriebemotoren zur Fernabstimmung kombinieren.

Nachteile:

- **Reduzierte Gesamtkapazität:** Durch die serielle Anordnung der Plattenpakete halbiert sich die Gesamtkapazität. Um den gleichen Abstimmbereich wie ein herkömmlicher Kondensator zu erreichen, müsste das Bauteil deutlich größer dimensioniert sein.
- **Parasitäre Kapazitäten:** Während die Nutzkapazität sinkt, wird die parasitäre Eigenkapazität des Kondensators nicht im gleichen Maße halbiert, was die untere Grenze der erreichbaren Kapazität beeinflussen kann.
- **Höherer Aufwand und Kosten:** Diese Bauteile sind mechanisch aufwendiger in der Herstellung und daher im Vergleich zu Standard-Luftdrehkondensatoren teurer und seltener auf dem Markt zu finden.

Zusammenfassend ist der Schmetterlingskondensator die technisch hochwertigere Wahl für Magnetic Loops, da er die kritischen Kontaktverluste vermeidet und höhere Sendeleistungen sicher verarbeitet, sofern man den Verlust an maximaler Kapazität konstruktiv ausgleichen kann.

3.2.4 Vergleich der Kondensator-Bauformen

Bauform	Vorteile	Nachteile	Leistungsbereich / Eignung
Klassischer Luftdrehkondensator	Preiswert und leicht verfügbar (z. B. aus alten Radios oder von Flohmärkten).	Schleifkontakte am Rotor verursachen Übergangswiderstände und Verluste; geringe Spannungsfestigkeit durch kleine Plattenabstände.	Primär für QRP (kleine Leistungen bis ca. 10–15 W) geeignet.
Split-Stator / Butterfly-Kondensator	Keine schleifenden Kontakte (Rotor ist isoliert), dadurch minimaler Verlustwiderstand und höhere Güte; Spannungsfestigkeit verdoppelt sich bei serieller Verschaltung.	Die Gesamtkapazität halbiert sich gegenüber der Einzelkapazität; mechanisch aufwendiger und teurer.	Ideal für QRO (bis 100 W) und hohen Wirkungsgrad; reduziert Handkapazität-Effekte.
Vakuum-Drehkondensator	Höchste technische Qualität: extrem verlustarm, sehr hohe Spannungsfestigkeit (bis 15 kV+), großer Abstimmbereich (bis 50:1) und umweltgeschützt.	Sehr hoher Anschaffungspreis; oft langsame Abstimmung durch viele Umdrehungen am Getriebemotor nötig.	High-End-Lösungen, kommerzielle Antennen und sehr hohe Sendeleistungen.
Koaxialkabel-Kondensator (DIY)	Kostenneutral (Abfallstücke); hohe Spannungsfestigkeit (ca. 1 pF pro cm bei RG-213/58).	Keine variable Abstimmung (Festkapazität); geringere Güte als Vakuum- oder Glimmerkondensatoren.	Experimente, feste Frequenzen oder zur Band-Erweiterung (Zuschaltkapazität).

3.2.5 Wichtige Hinweise zum Kondensator

- **Spannungsfestigkeit:** Die Spannung am Kondensator im Resonanzfall steigt massiv an. Bei 100 W Sendeleistung können je nach Güte des Kreises Spannungen zwischen 5 und 20 kV auftreten.
- **Tuning-Präzision:** Da die Abstimmung bei MLAs extrem feinfühlig ist (oft entscheiden Millimeter über das SWR), sind Kondensatoren mit integrierten Untersetzungsgetrieben (z. B. 1:3 oder 1:4) oder motorische Fernabstimmungen für den praktischen Betrieb fast unverzichtbar.
- **Handkapazität:** Butterfly-Kondensatoren oder die serielle Verschaltung von Statorplatten helfen, das Problem der Frequenzverschiebung beim Berühren des Abstimmknopfs („Handkapazität“) zu minimieren.

3.3 Die Kopplung (Die Einspeisung)

Die Kopplung dient dazu, die 50-Ohm-Impedanz des Funkgeräts an den sehr hochohmigen Schwingkreis der Antenne anzupassen. Sie ist das Bindeglied zwischen Transceiver und Antenne.

3.3.1 Die induktive Kopplung und die 1/5-Regel

Die am häufigsten verwendete Methode ist die induktive Kopplung mittels einer kleineren, galvanisch getrennten Schleife, die im Inneren der Hauptschleife montiert wird.

- **Wirkungsweise:** Die Koppelschleife fungiert als Primärwicklung und die Hauptschleife als Sekundärwicklung eines HF-Transformators.
- **Die 1/5-Regel:** Als bewährte Faustformel gilt, dass der Durchmesser (oder Umfang) dieser Koppelschleife etwa ein Fünftel (20 %) der Größe der Hauptschleife betragen sollte. In der Praxis bedeutet dies: Durchmesser der Hauptschleife $\times 0,2 =$ Durchmesser der Koppelschleife.
- **Anpassung:** Durch dieses ungefähre Wicklungsverhältnis von 1:5 wird eine gute Impedanztransformation erreicht, die das System in die Nähe der geforderten 50 Ohm bringt.

Einige Quellen geben einen etwas breiteren Bereich an und schlagen vor, dass die Koppelschleife zwischen einem Drittel und einem Fünftel des Durchmessers der Hauptschleife liegen kann.

Die Koppelschleife fungiert als Primärwicklung und die Hauptschleife als Sekundärwicklung eines HF-Transformators. Durch das Wicklungsverhältnis (bei der 1/5-Regel entsprechend etwa 1:5) wird die Impedanz des Funkgeräts (50 Ohm) an den hochohmigen Resonanzkreis der Antenne angepasst.

3.3.2 Feinabstimmung des SWR

Obwohl die 1/5-Regel eine exzellente Ausgangsbasis bietet, ist für ein perfektes Stehwellenverhältnis (SWR von 1:1) oft eine Feinjustierung am Objekt nötig:

- **Formänderung:** Das SWR kann durch leichtes Zusammendrücken (z. B. zu einer ovalen Form) oder Verformen der Koppelschleife optimiert werden.
- **Abstandsänderung:** Auch das Verändern des Abstands oder der Position der Koppelschleife relativ zur Hauptschleife beeinflusst die Kopplungsgüte maßgeblich.
- **Stabilität:** Da bereits Millimeter über die Qualität der Anpassung entscheiden können, ist ein mechanisch stabiler Aufbau der Koppelschleife essenziell, um die Frequenzstabilität zu gewährleisten.

3.3.3 Alternative Anpassmethoden

Sollte eine induktive Koppelschleife konstruktiv nicht gewünscht sein, stehen weitere Methoden zur Verfügung:

- **Gamma-Match:** Hierbei wird das Speisekabel an einem spezifischen Punkt direkt an die Hauptschleife angezapft und über einen Serienkondensator angepasst.
- **Kapazitive Kopplung:** Die Energie wird über zusätzliche Kondensatoren in den Schwingkreis eingespeist.
- **Delta-Kopplung:** Eine weitere Form der galvanischen Anpassung, die oft bei festen Installationen zum Einsatz kommt.

3.3.4 Materialien für die Koppelschleife

- **Starrer Kupferdraht:** Ein dicker Draht (z. B. 3,4 mm oder 4 mm² Installationsdraht) ist für die kleine Koppelschleife meist ausreichend.
- **Koaxialkabel:** Ein Stück RG-213 bietet die nötige Stabilität, damit die Koppelschleife ihre Form und damit das SWR hält.

4 Technische Eigenschaften und Herausforderungen

Der Erfolg einer Magnetic Loop Antenne hängt maßgeblich davon ab, wie effizient sie die zugeführte Energie in elektromagnetische Wellen umwandelt. Aufgrund ihrer geringen Größe kämpft die MLA mit physikalischen Nachteilen, die durch präzise Technik ausgeglichen werden müssen.

4.1 Der Wirkungsgrad (η): Das Milliohm-Problem

Der Wirkungsgrad einer Antenne ist das Verhältnis zwischen dem Strahlungswiderstand (R_S) und dem Gesamtwiderstand ($R_S + R_V$).

- **Der winzige Strahlungswiderstand (R_S):** Da die MLA elektrisch sehr klein ist, ist ihr Strahlungswiderstand extrem niedrig – oft liegt er im Bereich von nur wenigen Milliohm (z. B. 0,007 Ohm bei einer 2 m-Schleife). Zum Vergleich: Ein gestreckter Dipol hat einen R_S von etwa 70 Ohm.
- **Der fatale Einfluss der Verluste (R_V):** Da R_S so klein ist, wirkt sich jeder noch so kleine Verlustwiderstand (R_V) dramatisch aus. Ein Übergangswiderstand von nur 0,1 Ohm (was normalerweise vernachlässigbar wäre) ist hier bereits viel größer als der Strahlungswiderstand selbst und würde den Großteil der Sendeleistung in Wärme verwandeln.
- **Frequenzabhängigkeit:** Der Wirkungsgrad steigt mit der Frequenz stark an. Während eine 1 m-Loop auf 40 m oft nur ca. 8 % Wirkungsgrad erreicht, kann sie auf 10 m über 90 % erreichen.

4.2 Verlustquellen minimieren: „Big Fat Conductors“

Um einen akzeptablen Wirkungsgrad zu erzielen, muss der Verlustwiderstand mit allen Mitteln minimiert werden:

- **Skin-Effekt:** Bei Hochfrequenz fließt der Strom nur an der äußersten Oberfläche des Leiters. Je größer die Oberfläche, desto geringer der Widerstand. Daher gilt das Postulat: „Big fat conductors for efficient loops“. Dickwandige Kupfer- oder Aluminiumrohre (Durchmesser oft 2–5 cm) oder hochwertige Cellflex-Kabel sind ideal.
- **Materialwahl:** Nur Materialien mit höchster Leitfähigkeit wie Kupfer oder Aluminium kommen in Frage.

- **Verbindungen:** Jede Schraubverbindung ist eine potenzielle Verlustquelle. Hochwertige Loops nutzen gelötete oder geschweißte Verbindungen, um Übergangswiderstände zu eliminieren.

4.2.1 Exkurs: Der Skin-Effekt im Detail

Der Skin-Effekt spielt eine zentrale und kritische Rolle für den Wirkungsgrad einer MLA, da er den Verlustwiderstand (R_V) bei hohen Frequenzen massiv erhöht.

4.2.1.1 Physikalischer Mechanismus

Bei Hochfrequenz fließen die stromführenden Elektronen nicht mehr gleichmäßig durch den gesamten Querschnitt eines Leiters. Durch Wirbelströme kommt es zu einer Stromverdrängung in die Außenbezirke des Materials. Je höher die Frequenz ist, desto mehr tendiert der Strom dazu, ausschließlich auf der Oberfläche zu fließen. Der innere Bereich des Leiters bleibt dabei elektrisch völlig bedeutungslos.

4.2.1.2 Erhöhung des Verlustwiderstands

Da durch den Skin-Effekt nur noch ein Bruchteil des Leiterquerschnitts für den Stromfluss zur Verfügung steht, steigt der ohmsche Widerstand des Leiters stark an. Dieser so erhöhte Widerstand ist Teil des Gesamtwiderstands der Antenne und wandelt einen Teil der Sendeleistung in Wärme um, anstatt sie abzustrahlen.

4.2.1.3 Der fatale Einfluss auf den Wirkungsgrad

Der Wirkungsgrad (η) einer MLA wird durch das Verhältnis von Strahlungswiderstand (R_S) zum Gesamtwiderstand ($R_S + R_V$) bestimmt.

- **Minimales R_S :** Da die MLA elektrisch sehr klein ist, ist ihr Strahlungswiderstand extrem niedrig (oft nur im Bereich von Milliohm, z. B. 0,007 Ohm).
- **Dominantes R_V :** Durch den Skin-Effekt wird der Verlustwiderstand (R_V) oft um ein Vielfaches größer als der winzige Strahlungswiderstand.
- **Folge:** Da R_V im Nenner der Wirkungsgrad-Formel steht, führt jede durch den Skin-Effekt verursachte Erhöhung des Widerstands zu einer dramatischen Verschlechterung des Wirkungsgrads. Der überwiegende Teil der Energie wird verheizt.

4.2.1.4 Konstruktive Gegenmaßnahmen

Um den negativen Auswirkungen des Skin-Effekts entgegenzuwirken, muss die Leiteroberfläche maximiert werden. In der Praxis bedeutet das:

- **Große Leiterdurchmesser:** Es gilt das Postulat „Big fat conductors for efficient loops“. Es werden dicke Rohre (z. B. 5 bis 7 cm Durchmesser für das 40 m-Band) oder hochwertige Koaxialkabel mit großem Außenleiter (wie Cellflex) verwendet.
- **Materialwahl:** Es kommen nur hochleitfähige Materialien wie Kupfer oder Aluminium in Frage.
- **Verzicht auf Vollmaterial:** Da das Innere des Leiters ohnehin keinen Strom führt, kann zur Gewichts- und Kostenersparnis problemlos auf Rohre oder sogar metallfolienbeschichtete Kunststoffrohre zurückgegriffen werden.

Zusammenfassend lässt sich sagen: Der Skin-Effekt ist der Hauptgrund für die hohen ohmschen Verluste einer MLA. Nur durch eine extrem große Oberfläche des Strahlers lässt sich der Verlustwiderstand so weit senken, dass trotz des winzigen Strahlungswiderstands ein akzeptabler Wirkungsgrad erzielt wird.

4.3 Abstrahlcharakteristik und Richtwirkung

Die MLA bietet durch ihre Form einzigartige Möglichkeiten zur Signal- und Störoptimierung:

4.3.1 Vertikale Montage (Standard)

Die Abstrahlung erfolgt in der Ebene der Schleife (omnidirektional).

- **Scharfe Minima:** Senkrecht zur Schleifenebene befinden sich zwei tiefe Nullstellen im Diagramm. Diese „Nullen“ sind ein mächtiges Werkzeug: Durch Drehen der Antenne können lokale Störquellen (z. B. das Netzteil des Nachbarn) gezielt ausgeblendet werden.

4.3.2 Horizontale Montage

Die Antenne strahlt omnidirektional (Rundstrahler) mit einem sehr flachen Abstrahlwinkel (ca. 14 Grad), was sie exzellent für Weitverbindungen (DX) macht. Hierbei sollte sie jedoch etwas höher montiert werden (ca. 1,5 bis 2,5 m), um Bodenverluste zu minimieren.

4.4 Die MLA als Preselektor

Ein oft unterschätzter technischer Vorteil ist die **extreme Schmalbandigkeit** (hohe Güte Q). Die Antenne wirkt wie ein schmalbandiger Bandpassfilter direkt am Eingang des Empfängers. Dies schützt das Funkgerät vor Großsignal-Übersteuerungen durch starke Stationen auf benachbarten Frequenzen und sorgt für den sprichwörtlich „ruhigen“ Empfang.

5 Die MLA im praktischen Betrieb

Der Betrieb einer Magnetic Loop Antenne unterscheidet sich deutlich von der Handhabung breitbandiger Antennen. Aufgrund ihrer hohen Güte erfordert sie Interaktion und ein tieferes Verständnis für die Resonanzverhältnisse.

5.1 Der Abstimmvorgang: Präzision ist der Schlüssel

Da die Bandbreite einer MLA oft nur wenige Kilohertz beträgt, muss sie bei jedem nennenswerten Frequenzwechsel neu abgestimmt werden. Der Prozess erfolgt idealerweise in zwei Phasen:

5. **Grobabstimmung (Empfang):** Man dreht den Kondensator, bis das Grundrauschen im Empfänger oder die Signalstärke eines empfangenen Signals steil ansteigt. Dieser Punkt markiert die Resonanz.
6. **Feinabstimmung (Senden):** Mit minimaler Sendeleistung (ca. 5–10 Watt in FM, AM oder CW) wird der Kondensator feinfühlig auf das niedrigste Stehwellenverhältnis (SWR) justiert. Ein SWR von 1:1,1 bis 1:1,5 ist ideal. Hinweis: Ein interner Antennentuner (ATU) kann eine verstimmte Loop zwar dem Funkgerät gegenüber anpassen, verbessert aber nicht die Abstrahlung der Antenne selbst; nur die Resonanz der Loop zählt.

5.1.1 Abstimmungshilfe: Die Glühlampe als Resonanzanzeige

Die Abstimmung einer MLA mithilfe einer Glühlampe ist eine sehr einfache, kostengünstige und bewährte Methode, um den Punkt der Resonanz optisch sichtbar zu machen.

Physikalisches Prinzip

Der Schwingkreis einer MLA weist eine extrem hohe Güte (Q) auf. Dies führt dazu, dass im Resonanzfall am Abstimmkondensator ein Spannungsmaximum auftritt. Selbst bei geringen Sendeleistungen (QRP) im Bereich von 5 bis 10 Watt entstehen dort bereits Hochfrequenzspannungen von mehreren hundert bis über tausend Volt.

Die Glimmlampe als Indikator

Eine herkömmliche Miniatur-Glimmlampe (ausgelegt für ca. 230 V) benötigt eine gewisse Zündspannung, um zu leuchten.

- **Installation:** Die Glimmlampe wird in der Regel ohne Vorwiderstand parallel zum Kondensator oder in dessen unmittelbarer Nähe im Bereich des starken elektrischen Feldes montiert.
- **Reaktion:** Sobald man sich beim Drehen des Kondensators der Resonanzfrequenz nähert, steigt die Spannung am Kondensator steil an. Erreicht diese die Zündspannung der Lampe, beginnt sie zu leuchten.
- **Maximum:** Die Lampe leuchtet dort am hellsten, wo die Antenne exakt in Resonanz ist und somit das Spannungsmaximum erreicht hat.

Praktischer Ablauf

7. **Voreinstellung:** Zunächst wird die Antenne empfangsseitig auf maximales Rauschen oder Signalstärke eingestellt.
8. **Senden mit geringer Leistung:** Man sendet ein Trägersignal (z. B. in FM oder CW) mit reduzierter Leistung (z. B. 5 Watt).
9. **Optische Kontrolle:** Während man den Kondensator feinfühlig dreht, beobachtet man die Glimmlampe.
10. **Feinabgleich:** Sobald die Lampe aufleuchtet, sucht man den Punkt der maximalen Helligkeit. Dies korrespondiert in der Regel mit dem Punkt des niedrigsten SWR.

Historischer Kontext

Diese Methode ist ein „Klassiker“ im Amateurfunk und wurde bereits vor über 50 Jahren bei kommerziellen Modellen, wie etwa den Antennen der Firma Annecke, eingesetzt. Die Vorteile liegen in der Einfachheit und der Tatsache, dass man kein teures Messgerät direkt an der Antenne benötigt, um eine schnelle Resonanzprüfung durchzuführen.

Hinweis: Aufgrund der lebensgefährlichen Hochspannungen am Kondensator während des Sendebetriebs sollte die Glimmlampe so montiert sein, dass sie aus sicherer Entfernung beobachtet werden kann, ohne die Antenne berühren zu müssen.

5.2 Die Problematik der „Handkapazität“

Ein häufiges Phänomen beim manuellen Abstimmen ist, dass sich die Resonanzfrequenz verschiebt, sobald der Bediener die Hand vom Abstimmknopf wegnimmt.

- **Ursache:** Die Annäherung des Körpers an den Kondensator verändert die Gesamtkapazität des Schwingkreises.
- **Lösung:** Die Verwendung von Split-Stator- oder Butterfly-Kondensatoren reduziert diesen Effekt erheblich. Auch isolierte Verlängerungsachsen oder eine motorische Fernabstimmung eliminieren das Problem vollständig.

5.3 Vorteile der MLA im Einsatz

- **Geringer Platzbedarf:** Eine 1-Meter-Schleife kann oft einen 20 Meter langen Dipol ersetzen.
- **„Ruhiger“ Empfang:** Durch die Kopplung an das magnetische Feld und die schmale Bandbreite (Preselektor-Effekt) werden lokale elektrische Störungen (QRM) drastisch reduziert.
- **Kein Gegengewicht nötig:** Im Gegensatz zu Vertikalantennen benötigt die MLA keine Radials oder eine HF-Erde.

- **Flexibilität:** Sie arbeitet effektiv in geringer Höhe (1,5–2,5 m) und sogar innerhalb von Gebäuden.

5.4 Nachteile und Einschränkungen

- **Bedienaufwand:** Das ständige Nachstimmen macht schnelles „Band-Scanning“ (Search & Pounce) mühsam.
- **Mechanische Präzision:** Millimeterarbeit am Kondensator entscheidet über Erfolg oder Misserfolg.
- **Leistungsbegrenzung:** Die Spannungsfestigkeit des Kondensators limitiert oft die maximale Sendeleistung.

5.5 Vergleich: MLA vs. klassischer Dipol

Obwohl ein Full-Size-Dipol in optimaler Höhe oft einen höheren Wirkungsgrad (ca. 1–2 S-Stufen mehr) bietet, ist die MLA in vielen Situationen die bessere Wahl:

- In **gestörten städtischen Umgebungen** gewinnt die MLA oft durch ein besseres Signal-Rausch-Verhältnis (SNR), da sie Signale hörbar macht, die im Rauschen eines Dipols untergehen würden.
- Unter **Platzmangel** ermöglicht sie überhaupt erst den Funkbetrieb, wo ein Dipol nicht gespannt werden kann.

6 Wichtige Sicherheitshinweise: Schutz von Mensch und Technik

Der Betrieb einer Magnetic Loop Antenne erfordert ein hohes Maß an Verantwortungsbewusstsein. Die Konzentration hoher Energien in einem sehr kompakten Raum macht bestimmte Vorsichtsmaßnahmen unzugänglich.

6.1 Hochspannung am Kondensator: Die unsichtbare Lebensgefahr

Aufgrund der extrem hohen Güte (Q) des Schwingkreises kommt es im Resonanzfall zu einer massiven Spannungsüberhöhung am Abstimmkondensator.

- **Gefahrenpotenzial:** Bereits bei QRP-Leistungen (5–10 Watt) entstehen Spannungen von mehreren hundert bis über 1.000 Volt. Bei 100 Watt Sendeleistung können diese Werte auf 6.000 Volt und mehr ansteigen.
- **Folgen bei Berührung:** Das Berühren ungeschützter Teile des Kondensators oder der Schleifenenden während des Sendens ist lebensgefährlich. Es kann zu schweren HF-Verbrennungen der Haut, elektrischen Schocks oder zum Tod führen.
- **Brandgefahr:** Die hohen Spannungen können bei unzureichendem Plattenabstand zu Lichtbögen (Flashover) führen, die Brände auslösen oder die Antenne zerstören können.

6.1.1 Zusammenhang zwischen Sendeleistung und Hochspannung

Der Zusammenhang zwischen der Sendeleistung und der am Abstimmkondensator anliegenden Hochspannung ist bei einer MLA direkt proportional und durch den extrem hohen Gütefaktor (Q) der Antenne geprägt.

Spannungsanstieg durch Resonanz

Aufgrund der hohen Güte des Schwingkreises kommt es im Resonanzfall zu einer massiven Spannungsüberhöhung am Kondensator. Während das Spannungsmaximum direkt am Kondensator liegt, fließt der maximale Strom (Zirkulationsstrom) an der gegenüberliegenden Stelle der Schleife.

Konkrete Leistungswerte und Spannungen

Die Quellen nennen für verschiedene Sendeleistungen folgende Richtwerte für die auftretenden Spannungen:

- **5 Watt:** Hier können bereits Spannungen von etwa 455 bis 464 Volt RMS auftreten.
- **10 Watt (QRP-Bereich):** Bei dieser geringen Leistung entstehen bereits Hochfrequenzspannungen zwischen 800 und 1.000 Volt.
- **100 Watt (QRO-Bereich):** Die Spannung steigt hier drastisch an und erreicht Werte von 5.000 bis 8.000 Volt (5–8 kV). Je nach Güte des Kreises und Aufbau können sogar Spitzenwerte von bis zu 20.000 Volt (20 kV) erreicht werden.

Einflussfaktoren auf die Spannungshöhe

- **Gütefaktor (Q):** Je hochwertiger die Antenne gebaut ist (niederohmige Verbindungen, dickes Material), desto höher ist die Güte und damit auch die Spannung am Kondensator bei gleicher Sendeleistung.
- **Frequenz:** Die Spannung ist zudem frequenzabhängig; bei gleicher Leistung kann die Spannung variieren, wenn die Betriebsfrequenz geändert wird.

Technische Konsequenzen

Diese extremen Spannungen stellen hohe Anforderungen an die Konstruktion:

- **Plattenabstand:** Luftdrehkondensatoren benötigen weite Plattenabstände, um Überschläge (Lichtbögen) zu vermeiden. Bei 100 Watt wird oft ein Abstand von ca. 2 mm oder mehr empfohlen.
- **Dielektrikum:** Für hohe Leistungen werden oft Vakuum-Kondensatoren eingesetzt, da das Vakuum eine wesentlich höhere Spannungsfestigkeit bietet als Luft.
- **Spannungsspitzen:** Besonders kritisch ist die Spitzenleistung (Peak Voltage), die weit über dem Effektivwert liegen kann und oft die Ursache für gefährliche Lichtbogenbildungen oder die Zerstörung von Bauteilen ist.

Sicherheitshinweis: Aufgrund dieser hohen Spannungen ist das Berühren der Antenne während des Sendebetriebs lebensgefährlich und kann schwere Verbrennungen oder einen elektrischen Schock verursachen. Zudem können diese Felder elektronische Geräte in der direkten Umgebung beeinflussen.

6.2 Starkes magnetisches Nahfeld und Schutzabstände

Im Gegensatz zu Dipolen erzeugt die MLA in ihrem unmittelbaren Nahbereich (bis ca. $0,16 \lambda$) ein extrem starkes magnetisches Feld.

- **Wirkung:** Die Energiekonzentration ist so hoch, dass beispielsweise Leuchtstoffröhren in der Nähe der Antenne ohne elektrischen Kontakt zu leuchten beginnen.
- **Gesundheitliche Risiken:** Ein längerer Aufenthalt im direkten Nahfeld sollte vermieden werden. Besondere Vorsicht gilt für Träger von Herzschrittmachern oder anderen medizinischen Implantaten.
- **Empfohlene Abstände:** Bei Indoor-Betrieb sollte die Leistung auf maximal 10 bis 20 Watt beschränkt werden. Es müssen zwingend Sicherheitsabstände (oft 2 bis

4 Meter bei 20 W) eingehalten werden, um die Grenzwerte für die Personensicherheit zu wahren.

6.3 Rechtliche Anforderungen und Bewertung (BNetzA / ICNIRP)

Jeder Funkamateur ist gesetzlich verpflichtet, die Sicherheit seiner Anlage zu gewährleisten.

- **Expositionsbewertung:** Es muss eine Bewertung der HF-Exposition vorgenommen werden. Hierzu können Online-Rechner (z. B. der ARRL oder nach ICNIRP-Standards) genutzt werden, um die minimalen Schutzabstände basierend auf Sendeleistung, Modulationsart und Antennengewinn zu berechnen.
- **Umgebung:** Es muss unterschieden werden, ob der Bereich kontrolliert (informierte Funkamateure) oder unkontrolliert (Nachbarn, Passanten) ist, da hier unterschiedliche Grenzwerte gelten.

6.4 Schutz elektronischer Geräte

Das starke Nahfeld kann nicht nur Menschen, sondern auch Technik beeinflussen.

- **EMV-Problematik:** In unmittelbarer Nähe (z. B. auf dem Schreibtisch im Shack) können elektronische Geräte gestört werden oder ausfallen/abstürzen.
- **Nachbarschaft:** Besonders beim Senden aus Mehrfamilienhäusern (Balkon/Zimmer) ist auf die Beeinflussung fremder Unterhaltungselektronik zu achten, um Störungsklagen zu vermeiden.

7 Beispiele und Bauprojekte

Der Bau oder Erwerb einer Magnetic Loop Antenne (MLA) ist immer ein Kompromiss zwischen Portabilität, Leistung (QRP vs. QRO) und technischem Aufwand.

7.1 Kommerzielle Lösungen

Kommerzielle Antennen sind oft auf schnellen Aufbau und Portabilität optimiert:

- **AlexLoop:** Eine der bekanntesten Portabel-Antennen für den QRP-Betrieb (bis 20 W SSB). Sie deckt die Bänder von 7 bis 30 MHz ab, wiegt inklusive Tragetasche nur ca. 1,5 kg und lässt sich werkzeuglos in wenigen Minuten aufbauen. Sie wird oft für SOTA/POTA oder den Betrieb aus Hotelzimmern genutzt.
- **MC-20 Magloop:** Diese Antenne ist für den Bereich von 6,3 bis 30,3 MHz ausgelegt und wiegt lediglich 1 kg. Sie nutzt ein hochwertiges Belden H1000 Koaxialkabel als Hauptschleife und einen im Split-Stator-Verfahren verschalteten Luftdrehkondensator mit einer 1:4-Untersetzung für feinfühliges Abstimmen.
- **Chameleon P-Loop:** Eine professionelle Lösung, die ebenfalls das Split-Stator-Prinzip nutzt, um Handkapazitäts-Effekte beim Abstimmen zu eliminieren.

7.2 DIY – Tipps für den Eigenbau

Der Eigenbau bietet ein weites Experimentierfeld und ist oft kostengünstiger als kommerzielle Produkte.

7.2.1 Materialwahl für die Schleife

- **Kupferrohre (Baumarkt):** WiKu-Installationsrohre sind aufgrund ihrer guten Leitfähigkeit und leichten Formbarkeit beliebt.
- **Hochwertige Koaxialkabel:** Für transportable Loops eignen sich dicke Kabel wie RG-214 (doppelt geschirmt) oder das noch verlustärmere Cellflex LCF 12-50, das einen gewellten Kupfer-Außenleiter besitzt und sehr formstabil ist.
- **Alternative Materialien:** Sogar alte Fahrradfelgen (26 Zoll) oder einfache Tapetenlineale (mit Gamma-Match-Einspeisung) können als Basis für funktionierende Loops dienen.

7.2.2 Fernabstimmung und Motoren

Da die Abstimmung extrem scharf ist (Millimeterarbeit), ist eine Fernabstimmung oft unerlässlich:

- **Getriebemotoren:** Einfache Gleichstrommotoren mit hoher Untersetzung ermöglichen eine präzise Steuerung des Kondensators.
- **Servos:** Modellbau-Servos bieten den Vorteil, dass über die Steuerspannung eine ungefähre Rückmeldung über die Position des Kondensators möglich ist.
- **Schrittmotoren:** Diese bieten die höchste Präzision und können mittels Gabellichtschranken vom Shack aus gesteuert werden.

7.2.3 Abstimmungshilfen

- **Glimmlampe:** Eine einfache Miniatur-Glimmlampe (ca. 230 V), die parallel zum Kondensator montiert wird, dient als Resonanzanzeige – sie leuchtet am hellsten, wenn die maximale Spannung im Resonanzfall erreicht ist (siehe ausführliche Beschreibung in Abschnitt 5.1.1).
- **LED-Anzeige:** Einige Projekte nutzen eine LED als optische Hilfe zur Resonanzsuche.

7.2.4 Rahmen und Halterung

Da die Antenne in der Nähe von Metall an Leistung verliert, sollte das Stützgerüst aus nicht-leitendem Material bestehen:

- **PVC-Rohre:** Dickwandige Kunststoffrohre sind leicht und wetterfest.
- **Holz:** Einfache Dachlatten in Kreuzform sind eine sehr kostengünstige Lösung für den Indoor- oder Dachbodenbetrieb.
- **Stative:** Leichte Foto- oder Lampenstative eignen sich hervorragend für den portablen Einsatz.

Zusammenfassender Tipp: Achte beim Zusammenbau darauf, Verbindungen nach Möglichkeit zu löten oder zu schweißen anstatt zu schrauben, um jedes Milliohm an Übergangswiderstand zu vermeiden.

7.3 Besondere DIY-Projekte

- **Optimierte QRO-Loop (DK5EI):** Ein Projekt für höhere Leistungen (getestet bis 50 W), das auf Cellflex-Kabel und einem Schubert-Drehkondensator-Bausatz basiert.
- **Duo Mag 1:** Eine stationäre Indoor-Lösung für den Dachboden, bei der zwei um 90 Grad versetzte Schleifen in die Dachneigung integriert wurden, um die Bänder von 10 bis 40 m abzudecken.
- **Pedestrian Mobile Loop (Kevin Loughin):** Eine handgehaltene Loop mit ca. 60 cm Durchmesser (2 Fuß), die speziell für den mobilen Einsatz auf 20 bis 10 m entworfen wurde.

8 Fazit: Der spezialisierte Problemlöser

Die Magnetic Loop Antenne (MLA) ist eine Antenne der Extreme und kein universeller Alleskönner. Ihre Leistungsfähigkeit und Berechtigung in der modernen Funkwelt hängen stark vom jeweiligen Anwendungsszenario ab.

8.1 Zusammenfassung der Stärken und Schwächen

Wie die Analyse gezeigt hat, bietet die MLA einzigartige physikalische Vorteile, erkauft diese jedoch durch technische Herausforderungen:

Die unbestreitbaren Vorteile:

- **Kompaktheit:** Einzigartige Leistung bei minimalem Platzbedarf; eine 1-Meter-Schleife kann oft ausgewachsene Drahtantennen ersetzen.
- **Störfestigkeit:** Durch die H-Feld-Kopplung und die Preselektor-Wirkung ist sie oft die einzige Lösung in „elektromagnetisch verseuchten“ urbanen Umgebungen.
- **Flexibilität:** Sie benötigt kein Gegengewicht (Radials) und arbeitet bereits in geringer Höhe über Grund (1,5–2,5 m) oder sogar innerhalb von Gebäuden effektiv.

Die systembedingten Nachteile:

- **Bedienaufwand:** Die extreme Schmalbandigkeit erzwingt ein ständiges Nachstimmen bei jedem Frequenzwechsel.
- **Wirkungsgrad:** Besonders auf den unteren Bändern (40 m/80 m) ist sie aufgrund des geringen Strahlungswiderstands einem Full-Size-Dipol deutlich unterlegen.
- **Leistungsbegrenzung:** Die Hochspannungsfestigkeit des Kondensators setzt der Sendeleistung oft enge Grenzen.

8.2 Ideale Anwenderprofile

Basierend auf diesen Merkmalen ergeben sich klare Einsatzgebiete, in denen die MLA die oft bestmögliche Wahl darstellt:

11. **Der „Balkon- und Apartment-Funker“:** Für Funkamateure mit Antennenverbot oder Platzmangel ist die MLA oft der einzige Weg, überhaupt QRV zu sein.
12. **Der „SOTA/POTA-Aktivierer“:** Das geringe Gewicht, der schnelle Aufbau und die Unabhängigkeit von hohen Aufhängepunkten (Bäumen) machen sie zum idealen Portabel-Begleiter.
13. **Der reisende Funkamateuer:** Sie passt problemlos ins Gepäck und ermöglicht Funkbetrieb aus Hotelzimmern oder vom Campingplatz aus.

8.3 Realistische Erwartungshaltung

Die Magnetic Loop ist kein „Wundermittel“, das die Gesetze der Physik außer Kraft setzt. Ein korrekt installierter Dipol in ausreichender Höhe wird eine MLA in Sachen Sende-Effizienz meist schlagen. Dennoch: In der Praxis zählt oft nicht die reine Signalstärke, sondern das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR). Hier kann die MLA Signale hörbar machen, die bei anderen Antennen im Rauschen untergehen würden.

8.4 Abschließendes Urteil

Für den ambitionierten Contest-Betrieb oder schnelle Frequenzwechsel ist die MLA weniger geeignet. Doch als hochspezialisiertes Werkzeug öffnet sie unter schwierigen Bedingungen oft die Tür zum erfolgreichen Amateurfunk, wo andere Systeme scheitern würden. Der

Selbstbau einer solchen Antenne ist zudem ein lohnendes Experimentierfeld, das tiefere Einblicke in die Antennenphysik ermöglicht.

9 Quellenverzeichnis

- **HB9HJI FUNKWELT:** „Die Magnetische Loop-Antenne: Ein umfassender technischer Bericht“. Ein fundierter Leitfaden zu physikalischen Grundlagen, dem Vergleich mit Dipolantennen sowie detaillierten Sicherheitshinweisen.
- **Wolfgang Palme (DK5EI):** „Eine optimierte Magnetic-Loop Antenne für den Sende- und Empfangsbetrieb auf den Amateurfunkbändern von 29 bis 14 MHz für QRO“. Fokus auf den Bau einer leistungsfähigen Loop mit Cellflex-Kabel und Hochvolt-Drehkondensatoren.
- **John (DK9JC):** „Magnetic Loop (Magnetantenne) selber bauen (DIY magnetic loop antenna)“. Erfahrungsbericht über den Eigenbau mit Baumarktmaterialien, Fahrradfelgen und die Steuerung mittels Schrittmotoren.
- **Matthias Neuß (DJ7RS):** „Magnetische Antennen – Ein Bauprojekt der OV's Z 84 und H 55“. Umfassendes Dokument mit mathematischen Formeln zur Induktivitäts- und Kapazitätsberechnung sowie mechanischen Bauvorschlägen.
- **Heinz (HB9BPH) & Marcin (HB9EGA):** „Magnetic Loop: Theorie für HB9LU Bauprojekt“. Kompakter Überblick über die Theorie, die Spannungsverteilung und praktische WSPR-Testergebnisse.
- **Wikipedia-Eintrag:** „Magnetantenne“. Systematische Definition, historische Einordnung (F. Braun 1899) und Abgrenzung zu elektrischen Antennenformen.
- **Karl Rothammel:** „Antennenbuch“. Das Standardwerk für den Antennenbau, welches die Grundlagen für viele der hier genutzten Berechnungen liefert.
- **H. Nussbaum (DJ1UGA):** „Magnetantennen“. Ein Klassiker der Amateurfunkliteratur, der besonders für Selbstbauer empfohlen wird.
- **YouTube-Kanal „OE7WPA Amateurfunk“:** „MagneticLoop Teil 1 – Theorie“. Ein ausführlicher Vortrag über Wirkungsweise, Gütefaktor und verschiedene Kopplungsarten (induktiv, kapazitiv, Ringkern).
- **YouTube-Kanal „Kevin Loughin“:** „Ham Radio – Designing a small magnetic loop antenna for pedestrian mobile“. Fokus auf die Auslegung einer Loop für den Handbetrieb und die Sourcing-Möglichkeiten für Kondensatoren.
- **YouTube-Kanal „The Gaz Lab“:** „The mysterious MagLoop small loop antenna“. Praktische Vergleiche der Abstrahlcharakteristik zwischen Loop, Dipol und Vertikalantenne sowie Warnungen vor Hochspannungsspitzen.
- **John Portune (W6NBC):** „How to build an 'optimum' Magnetic Loop Antenna“. Eine Video-Ressource, die sechs Hauptfaktoren zur Optimierung des Wirkungsgrads definiert.
- **OM0ET Ham Radio Aerials:** „MC-20 MAGLOOP ANTENNA“. Technische Spezifikationen und Montageanleitung einer transportablen 8-Band-QRP-Antenne.
- **AlexLoop:** Dokumentation zur portablen QRP-Antenne, oft als Referenz für effiziente magnetische Kopplung und Portabilität genutzt.
- **66pacific.com:** „Small Transmitting Loop Antenna Calculator“. Ein viel genutztes Online-Tool zur Berechnung von Effizienz, Bandbreite und erforderlicher Kapazität.
- **MLOOP31 (DK1NB) / COIL 200:** Software-Tools zur numerischen Abschätzung von Loop-Parametern.
- **DG0KW:** Magnetic-Loop-Rechner zur Bestimmung des Wirkungsgrads.
- **Frank Dörenberg (N4SPP):** „nonstopsystems.com“. Gilt als eine der umfangreichsten Online-Quellen für technisches Wissen rund um die Magnetic Loop.
- **DL0HST:** Magnetlooprechner und weiterführende Infos.