

Loopantenne zur Peilung von HF-Störsignalen

Celso Bassanello HB9TNW (hb9tnw@hispeed.ch), Erhard Lüthi HB9CIZ (luethi.erhard@bluewin.ch) und Hanspeter Müller HB9CPT (hanspeter.mueller@petrohandels.ch)

Mit der fortschreitenden Digitalisierung und konstant neuer Elektronik in allen Belangen des täglichen Lebens wächst auch der Störnebel im gesamten Funkspektrum. Nebst den HF- sind heute auch VHF-, UHF-Frequenzen davon betroffen. Das Auffinden der Störquellen ist nicht immer ganz einfach und die den Funkamateuren dazu üblicherweise zur Verfügung stehenden Geräte sind meistens bescheiden und erlauben in vielen Fällen keine genaue Peilung und Ermittlung der Feldstärke. Erhard HB9CIZ und Hanspeter HB9CPT haben sich daher entschlossen, einen Feldstärketester mit Breitband-Loopantenne zur Peilung von hochfrequenten Störsignalen zu entwickeln und deren Technik den Funkamateuren für den Nachbau zur Verfügung zu stellen.

Einleitung

Die Ursachen von hochfrequenten Störungen sind vielfältig und meistens auf Nichteinhaltung der Verordnung der elektromagnetischen Verträglichkeit (VEMV [1]) zurückzuführen. Die VEMV regelt das Inverkehrbringen, Weitergeben, Ausstellen, Inbetriebnehmen und Betreiben von Betriebsmitteln, das heisst von elektrischen Geräten und Anlagen, die elektromagnetische Störungen verursachen oder die durch sie beeinträchtigt werden können.

Nebst den kommerziellen Funkeinrichtungen und weiteren Funkdiensten sind auch Funkamateure in einem nicht unerheblichen Masse von unerwünschten Signalen respektive Störungen des Funkspektrums betroffen. Die Störungssuche erweist sich vielfach als schwierig und sehr zeitintensiv. Die den Funkamateuren üblicherweise dazu zur Verfügung stehen Geräte sind meistens bescheiden. Dies, weil professionelle Geräte sehr teuer sind und somit das Budget des Funkamateurs vielfach überschreiten.

Bei Störungen von ortsfesten Anlagen können Störmeldungen an das Bundesamt für Kommunikation BAKOM eingereicht werden, welches darauf vor Ort interveniert und der Störungsursache auf den Grund geht. Um dies effizient durchführen zu können, ist das BAKOM dankbar, detaillierte Angaben zur Störung zu erhalten [2].

Auf Anregung der EMV-Fachleute der USKA [3] und auch aus eigenen Erfahrungen haben sich Erhard HB9CIZ und Hanspeter HB9CPT entschieden, eine für Amateurfunkbelange ausgerichtete Peileinrichtung zu entwickeln. Dabei zeigte sich bald einmal, dass dazu eine aktive Breitbandloopantenne die beste Wahl ist. Diese Antenne kann in Kombination mit einem kleinen Empfänger, wie z.B. einem ATS-25 [4] und mit einem TinySA [5] oder einem Empfänger mit Spektrumsanzeige, wie z.B. einem IC-705 [6] eine effiziente und präzise Auffindung von Störquellen ermöglichen. Nebst der akustischen Erfassung des Störers ist am TinySA oder am mobilen Empfänger mit Spektrumsanzeige auch eine Visualisierung des Störsignals möglich. Vielfach erkennt man damit auch sofort um was für eine Störquelle es sich handelt.



Abb. 1: Aktive Breitbandloopantenne

Aktive Breitbandloopantenne

Die Störungssuche im Feld erfordert eine handliche und portable Breitbandloopantenne. Diese darf deshalb nicht allzu gross und schwer sein. Nebst den Abmessungen und dem Gewicht sind jedoch auch die betrieblichen Aspekte zu beachten, wie zum Beispiel die Einsatzfrequenz und die Stromversorgung. Es wurde entschieden, sich auf einen Frequenzbereich zwischen 100 kHz und 100 MHz festzulegen. Weiter soll die Einrichtung über zwei voneinander unabhängige Ausgänge verfügen, um gleichzeitig einen Empfänger und den TinySA anschliessen zu können. Weiter soll die Stromversorgung der tragbaren Loop mit wiederaufladbaren Akkus erfolgen. Auch hat es sich aufgedrängt, eine Unterspannungsabschaltung und einen Laderegler vorzusehen. Um eventuellen Störeinflüssen vorzubeugen, sollen diese Schaltungen linear realisiert werden, also mit Verzicht auf Schaltregler. Zudem sollen die Komponenten auf dem gleichen Board untergebracht werden wie der Loopamp. Mit diesen Vorgaben wurden verschiedene Überlegungen, Berechnungen vorgenommen und Prototypen erstellt. Sämtliche Schaltungen sind vorab mit LTspice [7] simuliert worden. Daraus ging nun folgendes hervor:

Die untere Grenzfrequenz soll viel tiefer als das 1.8 MHz Band sein. Um dies zu ermöglichen, wird ein symmetrischer Vorverstärker (Loopamp) mit extrem niederohmigen Eingängen benötigt. Der niederohmige Eingang des Verstärkers dämpft auch Resonanzen des Loops, dieser ist zudem nicht abgeschirmt. Damit erreicht man eine höhere Grenzfrequenz. Der Loopamp wurde so ausgelegt, dass dieser bei einer Frequenz von 10 MHz über eine Eingangsimpedanz von $7 + j3$ Ohm verfügt, also ca. 3,5 Ohm bei jedem Eingang bzw. Loopanschluss. Der Loop selbst hat bei 10 MHz eine Impedanz von ca. $0 + j93$ Ohm.

Die Leiterplatte beinhaltet die gesamte Elektronik inkl. der Schaltungen für die Stromversorgung. Das Layout wurde auf einem Leiterplatten CAD erstellt. Die Ferti-

gung der Leiterplatte und deren Bestückung mit SMD-Komponenten erfolgte in China.

Nebst den hohen Anforderungen an die elektronische Seite werden auch an die Konstruktion der tragbaren Loop hohe Anforderungen für deren Handhabung im Portabelbetrieb gestellt. Loophalterung, Gehäuse, Traggriff müssen gleichzeitig stabil und für den Outdoorbetrieb ausgelegt sein. Schnell wurde klar, dass im kommerziellen Bereich keine geeigneten Komponenten dafür erhältlich sind. Die gesamte Mechanik wurde deshalb von Hanspeter HB9CPT mit CAD designed. Daraus wurden die Fertigungsunterlagen für alle Einzelteile generiert und Teile auf einem 3D Drucker erstellt.

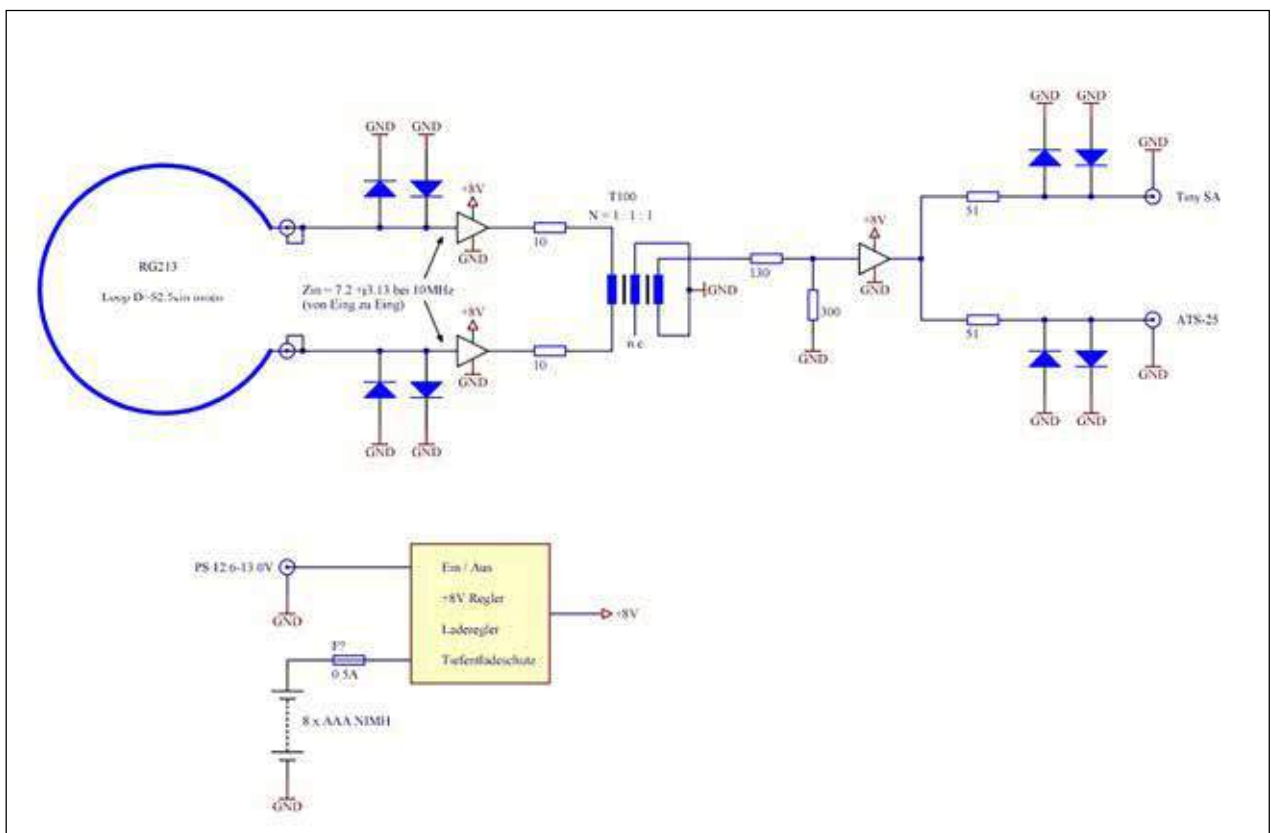


Abb. 2: Blockschema mit Loop und Loopamp

Erfassung der magnetischen Feldstärke

Beim Ganzen stellt sich zwangsläufig die Frage, wie die magnetische Feldstärke erfasst werden kann. Um die Pegel genau erfassen zu können, wäre ein Pegelvergleich mit einem geeichten Messsystem notwendig gewesen.

Da ein solches bis anhin nicht zur Verfügung stand und steht, wurde versucht, den Pegel rechnerisch aus dem Loopdurchmesser und der Verstärkung des Loopamps zu erfassen.

Die Pegelgenauigkeit des Tiny SA wurde vorab mit einem Generator HP8640 kontrolliert.

Für das Errechnen des Loopstromes wurde die Formel angewendet, welche von DL4ZAO [8] in seinem Vortrag Whip und Loop «Aktive Antennen für den Empfang» publiziert wurde. Dabei wird die Leerlaufspannung auf der Loopschleife berechnet und diese Spannung durch den Blindwiderstand X_L der Loopschleife geteilt. Durch Umstellen der Formel kann aus dem Loopstrom auch die magnetische Feldstärke H (A/m) berechnet werden. Die daraus hervorgegangenen Resultate wurden rechnerisch bei Anwendung der üblichen Formeln zur Berechnung von Magnetismus, Strom und Spannung überprüft. Dabei zeigte sich eine komplette Übereinstimmung mit den Werten, welche nach den Angaben von DL4ZAO errechnet wurden.

Stromversorgung der Loop

Die Loop ist mit wiederaufladbaren internen Akku (8 x AAA NiMH Zellen) bestückt, welche eine Betriebszeit von ca. 6-7 Stunden ermöglichen. Zu beachten, NiMH-Akkus gelten im Allgemeinen als sicher, jedoch besteht das Risiko einer Überhitzung, die zu Bränden oder Explosionen führen kann. Es ist wichtig, NiMH-Akkus richtig zu lagern, zu laden und zu behandeln.

Verwendung der Loop mit Trageeinrichtung

Nebst der kompletten Loop wurde auch eine komplette Trageeinrichtung für den Empfänger ATS-25 und den Tiny SA designt und konstruiert.



Abb. 3: Loop mit Trageeinrichtung, komplett bestückt mit dem RX ATS25 und dem TinySA

Messen des Pegels der Loop

Zum Messen des Pegels wird die Loop auf den maximalen Pegel und zur Feststellung respektive der Richtung wird die Loop auf das scharfe Minimum ausgerichtet. Die bisherige Anwendung der Loop in der Praxis anhand von 2 Störfällen ermöglichte erfolgreich und sehr schnell das Auffinden der Störquellen. Es zeigte sich, dass die Ausrichtung der Loop ein sehr präzises Orten ermöglicht.

Anmerkungen

Die effektiven und realen Werte der Loop konnten bisher nicht in einem zertifizierten Labor geprüft werden. Ebenso konnte bisher kein Vergleich zum Beispiel mit einer messtechnischen Einrichtung erfolgen, wie sie zum Beispiel von offiziellen EMV-Messstellen verwendet werden. Die kompletten Detailschemas, Bestückungspläne, Fotos usw. inklusiv den STL-Files für den 3D-Drucker sind auf der Homepage der USKA Sektion St. Gallen HB9SG [s. Seite 41] verfügbar.

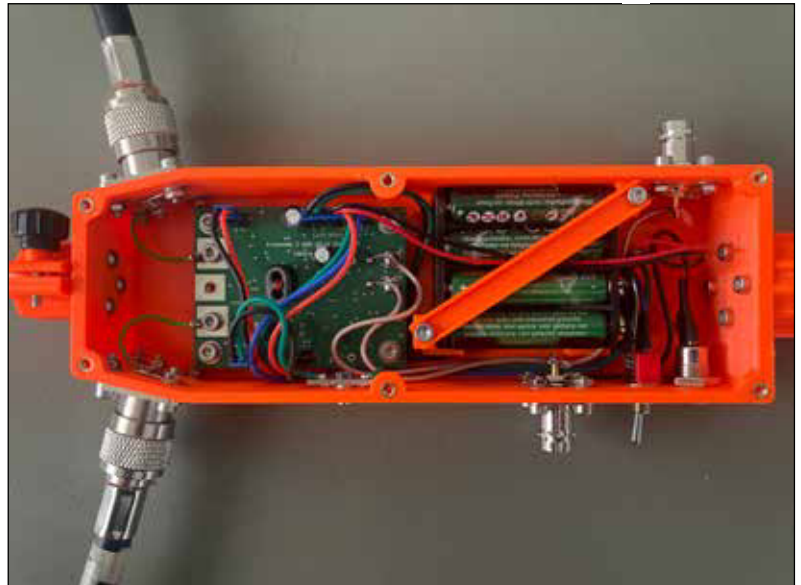


Abb. 4: Innenleben des Feldstärketesters

Formeln und Berechnungen

1 Gain Loopamp

TG Level = -40 dBm entspricht 2.23 mV an 50 Ohm. EMK = 4.46 mV

$$I_{in \text{ Loopamp}} = \text{EMK Trackinggenerator} / (50 \text{ Ohm} + Z_{in \text{ Loopamp}}) = 4.46 \text{ mV} / (50 + 7,21 \text{ Ohm}) = 77.95 \mu\text{A}$$

Loopamp Out = -18.92 dBm bei 25,25 mV an 50 Ohm

$$I_{\text{Loopamp Out}} = 25.25 \text{ mV} / 50 \text{ Ohm} = 0.505 \text{ mA}$$

$$\text{Loopamp Stromverstärkung: } I_{\text{Gain Loopamp}} = I_{\text{Loopamp Out}} / I_{\text{Loopamp in}} = 0.505 \text{ mA} / 0.07795 \text{ mA} = \mathbf{6.478}$$

2 Loopstrom berechnen

Angenommener Eingangspegel am TinySA:

-40 dBm entsprechend 2.23 mV an 50 Ohm

$$I_{\text{Out Loopamp}} \text{ entspricht } I_{\text{Eingang TinySA}} = 2.23 \text{ mV} / 50 \text{ Ohm} = 44.6 \mu\text{A}$$

$$I_{\text{Loopamp in}} = I_{\text{Loopamp Out}} / I_{\text{Gain Loopamp}}$$

$$I_{\text{Loop am TinySA}} = 44.6 \mu\text{A} / 6.478 = \mathbf{6.885 \mu\text{A}} \text{ Loopstrom bei } \mathbf{-40 \text{ dBm}}$$

3 Berechnung der Leerlaufspannung am offenem Loop

Die Induktivität des Loops wurde mit dem Nano VNA gemessen und das XL beträgt +j92.8 Ohm bei 10 MHz. Also 1.477 µH.

$$U_{\text{Loop}} = I_{\text{Loop}} \cdot X_{L_{\text{Loop}}} \text{ bei } 10 \text{ MHz} = 6.885 \mu\text{A} \cdot 92.8 \text{ Ohm} = \mathbf{0.6389 \text{ mV} = 0.6389 \cdot 10^{-3} \text{ V}}$$

4 Berechnung des magnetischen Flusses Φ durch die Loop

Magn. Fluss der Loop: $\Phi_{\text{Loop}} = U_{\text{loop}} / 2f$ ($f = 10 \text{ MHz}$ Loop bei 1 Windung)

$$\Phi_{\text{Loop}} = 0.6389 \cdot 10^{-3} \text{ V} / 2 \cdot 10^6 \text{ 1/s} = \mathbf{31.945^{-12} \text{ Vs}}$$

5 Berechnung der Flussdichte B aus dem magnetischen Fluss

Loopinnendurchmesser $D_{\text{Loop}} = 0.525 \text{ m}$, Radius $R_{\text{Loop}} = 0.2625 \text{ m}$

$$\text{Loopinnenfläche } A_{\text{Loop}} = R_{\text{Loop}}^2 \cdot \text{Pi} = 0.2625 \text{ m} \cdot 0.2625 \text{ m} \cdot 3.14 = \mathbf{0.2165 \text{ m}^2}$$

$$\text{Magnetische Flussdichte } B = \Phi_{\text{Loop}} / A_{\text{Loop}} = 31.945^{-12} \text{ Vs} / 0.2165 \text{ m}^2 = \mathbf{147.55^{-12} \text{ Vs/m}^2}$$

6 Berechnung der magnetischen Feldstärke H aus der magnetischen Flussdichte B

$$\text{Magn. Feldstärke } H = B / \mu_0 = 147.55^{-12} \text{ Vs/m}^2 / 1.256^{-6} \text{ Vs/Am} = 117.48^{-6} \text{ A/m} = 117.48 \mu\text{A/m}$$

Wenn der Tiny SA **-40 dBm** anzeigt, entspricht das einer **magnetischen Feldstärke H** an der Loopantenne von **117.48 µA/m**.

7 Anmerkung zur Beziehung Feldstärke und Flussdichte B

Die Beziehung zwischen Feldstärke H [A/m] und Flussdichte B [T] ergibt sich wie folgt:

$$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$$

$$\mu_r \sim 1 \text{ (in Luft)}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am} = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{ [Vs/Am]}$$

$$1 \text{ T} = 1 \text{ Vs/m}^2$$

8 Umrechnung der magnetischen Feldstärke H von µA/m auf dB µA/m

$$\text{dB } \mu\text{A/m} = 20 \cdot \log \text{ Feldstärke} / (1 \mu\text{A/m}) = 20 \cdot \log (117.48 \mu\text{A/m}) / (1 \mu\text{A/m}) = \mathbf{41.39 \text{ dB}\mu\text{A/m}}$$

Daraus folgt, dass 41.407 dBµA/m am Loop, also am Ausgang des Loopamp respektive am Eingang des TinySA **-40 dBm** ergeben.

9 Berechnung des e-Felds aus dem h-Feld

Bei Abstand $\geq 5 \text{ Lambda}$ zum strahlenden Objekt sind das elektrische Feld (e-Feld) und das magnetische Feld (m-Feld) starr über die Freiraumimpedanz von 377 Ohm verknüpft.

Daraus folgt:

$$\mathbf{e\text{-Feld}} = \text{m-Feld} \cdot 377 \text{ Ohm} = 117.48 \mu\text{A/m} \cdot 377 \text{ Ohm} = 44.290 \text{ mV/m} = 44'290 \mu\text{V/m}$$

Umrechnung des e-Feldes in dB µV/m:

$$20 \cdot \log 44'290 \mu\text{V/m} = 92.92\text{dB } \mu\text{V/m} \text{ gerundet } \mathbf{93\text{dB } \mu\text{V/m}}$$

Daraus folgt, dass das e-Feld bei -40 dBm am TinySA, am Loop den Werten von 93dB µV/m respektive 33dBmV/m entspricht.

10 Angabe beim h-Feld

Der Wert von -40 dBm am Ausgang des Loopamps ergibt 41.39 dBµA/m am Loop, gerundet 41.5 dBµA/m. Daraus folgt eine Differenz zwischen Ausgang des Loopamps und der Loop von ca. +81.5dB.

Zur Pegelanzeige des h-Feldes am TinySA in -dBm sind die +81.5dB (Offset) dazu zählen.

11 Angabe bei einem e-Feld ≥ 5 Lambda

Zur Berechnung des e-Feldes wird das h-Feld mit der Freiraumimpedanz von 377 Ohm multipliziert.

$$1\mu\text{A/m} \cdot 377 \text{ Ohm} = 377 \mu\text{V/m}$$

Zur Vereinfachung wird die dB-Variante genutzt mit $1 \mu\text{A/m} = 0 \text{ dB}\mu\text{A/m}$

Aus der Berechnung $20 \cdot \log 377$ resultieren 51.5dB, welche zum h-Feld zu addieren sind.

Daraus folgt für diesen Fall:

$$\text{e-Feld} = 41,5 \text{ dB}\mu\text{A/m} + 51,5 \text{ dB} = 93 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

Beispiel 1 zur Berechnung des e-Feldes bei einer Anzeige am TinySA von -40dBm

$$\text{h-Feld} = -40 \text{ dBm} + 81.5 \text{ dB (berechneter Offset, aus Punkt 10)} = 41.5 \text{ dB}\mu\text{A/m}$$

$$\text{daraus folgt e-Feld} = \text{h-Feld am Loop} + 20 \cdot \log 377 \text{ Ohm} = 41.5 \text{ dB}\mu\text{A/m} + 51.5 \text{ dB} = 93 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

$$\text{oder direkt: } -40 \text{ dBm} + 81.5 \text{ dB} + 51.5 \text{ dB} = 93 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

Beispiel 2 zur Berechnung des e-Feldes bei einer Anzeige am TinySA von -45dBm

$$\text{h-Feld} = -45 \text{ dBm} + 81.5 \text{ dB (berechneter Offset, aus Punkt 10)} = 36.5 \text{ dB}\mu\text{A/m}$$

$$\text{daraus folgt e-Feld} = \text{h-Feld am Loop} + 20 \cdot \log 377 \text{ Ohm} = 36.5 \text{ dB}\mu\text{A/m} + 51.5 \text{ dB} = 88 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

$$\text{oder direkt: } -45 \text{ dBm} + 81.5 \text{ dB} + 51.5 \text{ dB} = 88 \text{ dB}\mu\text{V/m}$$

Daraus ergibt sich:

a) für den Wert des h-Felds in dB μ A/m:

$$\text{Anzeige TinySA (-dBm)} + 81.5 \text{ dB (Offset H-Feld)}$$

b) für den Wert des e-Felds in dB μ V/m:

$$\text{Anzeige Tiny SA (-dBm)} + 133 \text{ dB (Offset E-Feld)}$$

c) für den Offset-Wert im e-Feld in dBmV/m:

$$\text{Anzeige Tiny SA (-dBm)} + 73 \text{ dB}$$

$$\text{Mit einem Offset aus } 133 - 60 \text{ dB} = 73 \text{ dB}$$

Beilagen

Die Beilagen wie Layouts, Schaltpläne, Konstruktionszeichnungen, etc. stehen als ZIP-File zur Verfügung und sind ab Anfang September 2025 auf der Webseite von HB9SG abrufbar:

<https://www.hb9sg.ch>

Literatur und Bezugsquellen

[1] <https://www.fedlex.admin.ch/eli/oc/2016/18/de>

[2] <https://www.uvek.egov.swiss/de/funk/stoerungsmeldung-beschreibung>

[3] <https://uska.ch/emv/>

[4] <https://www.elektor.de/products/ats25-max-decoder-2-fm-hf-full-band-dsp-receiver>

[5] <https://www.tinysa.org/wiki/>

[6] <https://www.icomeurope.com/produkt/ic-705/>

[7] <https://www.analog.com/en/resources/design-tools-and-calculators/ltspice-simulator.html>

[8] https://www.dl4zao.de/_downloads/Whip_and_Loop_Aktivantennen_fuer_den_Empfang.pdf

Rechtlicher Hinweis

Der Feldstärketester und die Breitband-Loopantenne (nachfolgend Gerät genannt), wurden ausschliesslich für den persönlichen, nicht-kommerziellen Gebrauch für Funkamateure entwickelt und bereitgestellt. Der Nachbau des Geräts ist unter der Bedingung gestattet, dass er ausschliesslich für private Zwecke erfolgt. Jegliche kommerzielle Nutzung, einschliesslich, aber nicht beschränkt auf Verkauf, Vermietung, Lizenzierung oder anderweitige Verbreitung des Geräts oder von Teilen davon, ist ausdrücklich untersagt. Die Entwickler dieses Geräts übernehmen keine Haftung für Schäden, Verluste oder Fehlfunktionen, die durch den Nachbau oder die Verwendung dieses Geräts entstehen können. Der Nachbau und Betrieb erfolgen auf eigene Gefahr.