

Einfaches Nahfeldstärke-Meßgerät

ARNO WEIDEMANN – DL9AH

Bei der Betrachtung von höheren elektromagnetischen Feldstärken, insbesondere in der Nähe von Amateurfunkstellen, drängt sich immer wieder die Frage auf: Ist es nicht etwa doch gefährlich und wenn ja – wie gefährlich?

Außerdem ist jeder Funkamateur, der mit mehr als 10 W EIRP sendet, in den nächsten Monaten gehalten, eine Selbsterklärung darüber abzugeben, daß die von seiner Amateurfunkstelle erzeugten Feldstärken im Expositionsbereich die Werte entsprechend den geltenden gesetzlichen Vorschriften nicht überschreiten.

Bei der Beantwortung der Frage, ob und ggf. wie gefährlich elektromagnetische Felder insbesondere in der Nähe von Amateurfunkstellen sind, könnte man sich darauf verlassen, daß schließlich mehr als 600 wissenschaftliche Forschungsprojekte auf der ganzen Welt über viele Jahre hinweg und mit einem enormen Aufwand an Mitteln geforscht und keinerlei Schäden für Leib und Leben gefunden haben, vgl. [1].

Man könnte sich auch darauf verlassen, daß es beim Bedienungspersonal von Großrundfunksendern keinerlei spezifische Berufskrankheiten gibt. Ein schädlicher Einfluß, selbst durch sehr starke elektromagnetische Felder auf die Gesundheit dieser Personen war nie zu erkennen; doch immer wieder wird davon gesprochen und geschrieben – aber nichts bewiesen!

■ Thermische Belastung

Um wenigstens in etwa in eine Größenordnung der thermischen Belastung bei diesen nichtionisierenden Strahlen zu kommen, hier ein einfaches, auf praktische Gegebenheiten bezogenes Beispiel: Ein Funkamateur betreibt einen in nur 5 m Höhe aufgehängten $\lambda/2$ -Dipol für das 10-m-Band und speist diesen mit einer Trägerleistung von 750 W (Bild 1).

Unter einem der spannungführenden Enden steht eine Person mit einer Größe von 2 m und einer durchschnittlichen Körpermasse von 75 kg. Die Frage ist nun: Welche elektrische (Wärme-)Leistung nimmt ihr Körper auf? Dabei befindet sich der spannungführende Draht der Antenne nur 3 m über dem Kopf des Probanden. Der Draht soll einen Durchmesser von 2,25 mm (entsprechend

4 mm²) haben.

Bei der nun folgenden vereinfachten rechnerischen Betrachtungsweise sollen alle Werte zu Ungunsten der Sendeleistung überhöht werden, um in jedem Fall auf der sicheren Seite zu liegen. Das beginnt mit der Berechnung der Kapazität zwischen Kopf und Antennendraht. Da nur an den Enden der Dipolhälften Spannungsüberhöhungen auftreten („Spannungsbäuche“), also nur sie für die maximale Feldstärke unter der Antenne zuständig sind, halbieren wir eine Dipolhälfte auf 1,25 m und errechnen die Oberfläche A nach Umfang (= 7 mm) × Länge (= 1,25 m) zu 8750 mm² oder 87,5 cm². Die Kapazität wird nach der üblichen Formel

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{rel}} \cdot A}{l}$$

bestimmt, wobei l der Abstand zwischen Kopf und Draht (= 3 m) und $\epsilon_{\text{rel}}=1$ ist. Daraus ergibt sich ein C_x von 0,026 pF.

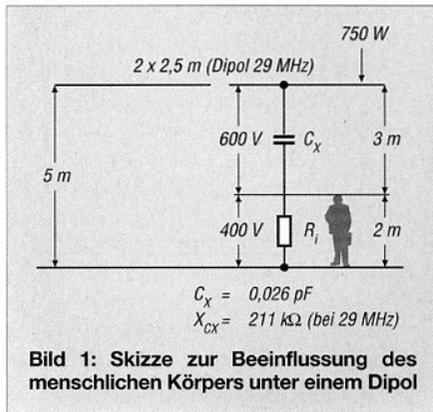


Bild 1: Skizze zur Beeinflussung des menschlichen Körpers unter einem Dipol

Obwohl bei der Leistung von 750 W die Spannungen an den Enden gegen Erde in der Praxis wesentlich niedriger sind, wollen wir annehmen, über der Hälfte einer Dipolseite stünde eine mittlere Spannung von $U_{\text{eff}} = 1000 \text{ V}$. Weiterhin wollen wir annehmen, daß die Spannung am menschlichen Körper nicht zusammenbricht, wohl wissend, daß dies in der Praxis durch den komplexen Innenwiderstand des Körpers auf Werte von weit unter 1 % geschieht.

Das bedeutet, daß wir hier eine Feldstärke von 200 V/m vor uns haben und daß zwischen Kopf und Füßen eine (unrealistisch hohe) Spannung von $U_{\text{eff}} = 400 \text{ V}$ liegt! Nachdem wir über

$$X_c = \frac{1}{\omega \cdot C}$$

den kapazitiven Widerstand von C_x bei 29 MHz mit 211 k Ω ermittelt haben, können wir den Blindstrom „durch“ C_x berechnen.

Er beträgt

$$I = \frac{U}{R} = \frac{600 \text{ V}}{211 \text{ k}\Omega} = 2,8 \text{ mA.}$$

Befinden sich keine weiteren „Erhebungen“ auf dem Erdboden, durchfließt dieser Strom im wesentlichen den menschlichen Körper. Um einerseits die Betrachtung einfach zu halten, andererseits auch hier auf der ganz sicheren Seite zu bleiben, wollen wir auf die geometrische Addition verzichten und aus dem komplexen Innenwiderstand die Blindanteile *nicht* herausrechnen, sondern annehmen, daß der gesamte Strom am WirkInnenwiderstand in Wärme umgesetzt wird; und das bei einer anliegenden Spannung von 400 V! Es ergibt sich somit nach:

$$P = U \cdot I = 400 \text{ V} \cdot 2,8 \text{ mA}$$

eine Leistung von nur 1,12 W! Verteilt auf eine Körpermasse von 75 kg ergibt das 15 mW/kg. Stellt man diese extrem niedrige Leistung der Tatsache gegenüber, daß die Sonne im Sommer auf einen nur mit einer Badehose bekleideten menschlichen Körper eine Strahlungsleistung von über 1000 W einstrahlt, wird offenkundig, daß selbst eine höhere Feldstärke als 200 V/m auch bei durchgehendem 24-Stunden-Betrieb völlig harmlos ist.

Hinzu kommt, daß der menschliche Organismus selbst durch seine verschiedenen Regulierungsmechanismen und auch durch verschiedenartige Bekleidung Temperaturunterschiede von mehr als 60 K ausgleichen kann (im Winter $-20 \text{ }^\circ\text{C}$; im Sommer $+40 \text{ }^\circ\text{C}$).

Ist also bereits jetzt, und das entspricht ja auch der Erfahrung von mehr als 60 Jahren, eine Gefährdung für Leib und Leben auszuschließen, so liegen die Verhältnisse beim Amateurfunk noch günstiger: Bei SSB-Betrieb liegt der statistische Leistungsmittelwert bei deutscher Sprache etwa 12,5 dB unter dem effektiven Spitzenwert, d.h. bei 5,6 % (!). Geht man davon aus, daß Funkamateure doch etwas mehr aussteuern könnten (Kompressionsbetrieb), so sind etwa 25 % realistisch. Die gleichen ungefähr 25 % gelten auch für Telegrafie, Amator usw. Das wären dann zeitlich gemittelt 0,28 W/75 kg.

Da in der Praxis ja nicht nur gesendet, sondern auch gehört werden muß, reduziert sich dieser Wert noch einmal mindestens auf die Hälfte, also weniger, als bei einer kleinen Taschenlampe! Es bleibt also eine mittlere Leistung von 0,14 W/75 kg. Spätestens damit wird klar, daß die Grenze von nur 27 V/m für Frequenzen oberhalb 10 MHz innerhalb der 26. Verordnung zum Bundesimmissionsschutzgesetz völlig an der Realität vorbeigehen. Dies gilt ganz besonders für die Besonderheiten des Amateurfunkverkehrs.

■ Eine politische EMV-Lösung

Hat die frühere Umweltministerin Angela Merkel in der Öffentlichkeit zu diesem Thema gesagt: „Es gibt keine wissenschaftlichen Grenzwerte, es gibt nur politische Grenzwerte...“, so ist diese obige einfache Ableitung der Beweis dafür, daß sie recht hatte. Es ist allerdings nicht zu verstehen, wie eine solche unrealistische Rechtsverordnung Rechtskraft erlangen konnte. Schließlich soll damit Recht und nicht Unrecht gesprochen werden; und zum Wahlkampf dürfte eine solche Verordnung erst recht nicht mißbraucht werden!

Der geneigte, sicher mittlerweile auch kopfschüttelnde Leser, wird sich nun fragen: Wenn selbst elektromagnetische Feldstärken von über 200 V/m völlig harmlos und ungefährlich sind, warum denn dann überhaupt noch Feldstärken messen? Das umso mehr, als das solche Messungen in der Praxis von vielen Tücken und Unwägbarkeiten begleitet und insoweit höchst ungenau sind.

Die Antwort ist einfach: Weil alle Funkdienste und im besonderen die Funkamateure über die Amtsblattverfügung 306/97 der RegTP aus den genannten rechtlichen Gründen gezwungen werden, diese technisch-physikalisch nicht nachzuvollziehende Beschränkung mitzumachen. Das gilt für den sogenannten Personenschutz und erst recht für die Herzschrittmacher-Grenzwerte, vgl. [1], [2] und [3]. Oder ist das

Ganze nur wieder vorgeschoben, um ganz anderen, nämlich wirtschaftlichen Interessen, den Weg zu bereiten?

■ Nahfeldstärke-Meßgerät

Obwohl ich auch zu den mehr als 600 Klägern gegen die Verfügung 306/97 der RegTP gehöre, habe ich diesen viel diskutierten technisch-rechtlichen Fehlgriff zum Anlaß genommen, ein KW-Nahfeldstärke-Meßgerät zu entwickeln. Nahfeldberechnungen, wie sie die RegTP anscheinend neuerdings in den zutreffenden Fällen (also für die niederfrequenten Bänder fast immer) wünscht, sind für den Amateur kaum beherrschbar, so daß hier Messungen durchaus die bequemere Lösung darstellen.

Das Gerät sollte besonders einfach, nachbausicher und preiswert sein. Vorgesehen ist es für den Frequenzbereich von 50 kHz bis 50 MHz. Es funktioniert darüber hinaus aber auch bis zu erheblich höheren Frequenzen. Allerdings ist dann wegen des bewußt groß gewählten Meßdipols eine Korrekturkurve notwendig (Resonanznähe).

Gemäß Bild 2 werden zwei dreieckige Aluminium-Blechstücke unter einem Winkel von etwa 120° vorn auf das Ende einer etwa 750 mm langen Isolierstange (ggf. Rohr) geschraubt. Dieser „Distanzbringer“ ist notwendig, weil die Feldstärke in dem Bereich, die man ja messen möchte, durch eine unmittelbare Nähe des Messenden zusammenbrechen würde.

Unmittelbar an den gegeneinander isolierten Befestigungspunkten wird mit kurzen Drähten eine schnelle und kapazitätsarme Schottky-Diode (z.B. BAT 41 mit 1 pF) quergeschaltet. Es handelt sich hier um eine doppelte Parallelgleichrichtung unter Ausnutzung der Kapazitäten der beiden Dipolseiten gegen den Raum. Es ergibt sich eine symmetrische Gleichspannung, die mit einem symmetrischen Siebglied geglättet und über mehrteilige Spannungsteiler sowie einen symmetrischen Verstärker dem eigentlichen Meßwerk zugeführt wird.

Das 5- bis 10-M Ω -Trimpotentiometer, das zunächst auf einen mittleren Wert eingestellt wird, hat einerseits die Aufgabe ggf. eine spätere Nachkalibrierung von außen zuzulassen, andererseits mitzuhelfen, Gleichspannungsfelder bei gewitterbedingter Aufladung zu dämpfen. Wie bekannt, sind zwischen einer geladenen Wolke (eine bis mehrere Milliarden Volt) und der Erde, Feldstärken von mehr als 1 000 000 V/m möglich. Selbst solche gigantischen Feldstärken, die allerdings am Innenwiderstand des Menschen zu einem minimalen Restwert zusammenbrechen, sind für den Menschen ungefährlich, zumindest so lange, wie ihn nicht der Blitz erschlägt (Durchbruchspannung der Luft von etwa 1 500 000 bis 3 000 000 V/m).

Wenden wir uns nun dem Gleichspannungsmessgerät zu. Es handelt sich um eine einfache Wheatston'sche Brücke, bei der

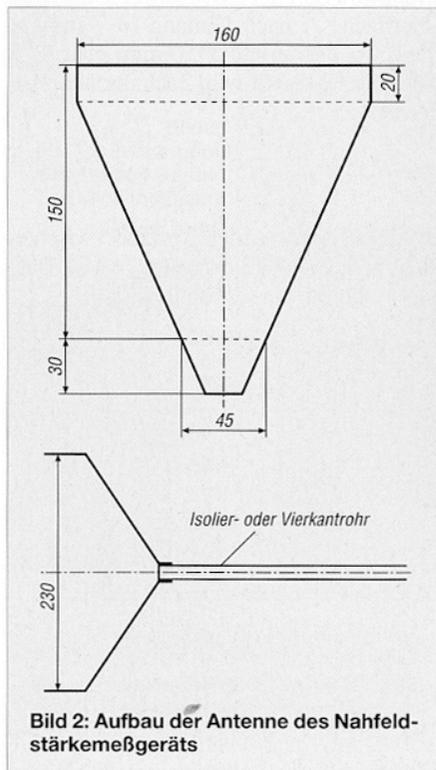


Bild 2: Aufbau der Antenne des Nahfeldstärkemeßgeräts

die Brückenarme aus den Innenwiderständen der beiden Dualgate-MOSFETs und deren Drainwiderständen ($4,7 \text{ k}\Omega$) bestehen. Auf weitere Halbleiter wurde bewusst verzichtet. Das hat den Vorteil, daß sich die Schaltung sowohl bei sinkender

Betriebsspannung als auch bei unterschiedlichen Temperaturen besonders stabil verhält. Trotzdem habe ich ein Potentiometer ($100 \text{ k}\Omega$) vorgesehen, um die Brücke von außen auf Null abgleichen zu können.

Die Empfindlichkeit ist so groß, daß man mühelos im kleinsten Bereich bei einer Feldstärke von 2 V/m Vollausschlag erreichen kann. Die hier nur als Gleichspannungsverstärker arbeitenden Transistoren BF 989B lassen sich übrigens gegen jeden anderen Dualgate-MOSFET-Typ mit einer Vorwärtssteilheit (Y_{21}) von mindestens 13 mS ($= \text{mA/V}$) austauschen. Für das $50\text{-}\mu\text{A}$ -Instrument empfiehlt sich eine Skala mit einer 2er oder 20er Endbeschriftung. Wegen der besseren Ablesemöglichkeit über den ja beim Messen einzuhaltenden Abstand sollte es so groß wie möglich sein. Alle Widerstände sind unkritisch, oberhalb von $1/10 \text{ W}$ ist alles verwendbar.

Das Mustergerät besitzt ein $160 \text{ mm} \times 95 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ ($B \times H \times T$) großes Plastikgehäuse von TeKo. Die Schaltung selbst wurde kurzerhand wieder auf ein Stück „Laborplatte“ aufgebaut [4]. Mit einer kleinen Handfräse habe ich an entsprechender Stelle zwei Lötinseln horizontal und vertikal getrennt, wodurch sich vier kleine Lötinseln ergaben. Die SMD-Transistoren BF 989B ließen sich dann genauso bequem auflöten wie die übrigen Bauteile.

■ Erzeugung eines homogenen Feldes zur Kalibrierung

Ist alles fertig, bleibt nur noch die Kalibrierung. Dazu bestehen zwei Möglichkeiten. Entweder man richtet sich nach einem anderen, bereits kalibrierten Vergleichs-Feldstärkemesser oder man baut sich selbst, wenn auch provisorisch, eine Kalibrierungseinrichtung auf. Da in der Praxis im wesentlichen die Spannung zwischen der oben hängenden Antenne und Erde von Interesse ist, wurde letztere asymmetrisch aufgebaut.

Ich habe also in meinem Labor kurzerhand zwei vom Antennenbau her übrige Glasfibröhre zwischen zwei gegenüberliegende Regalböden gelegt. Darauf kam dann in gut 2 m Höhe eine (Rest-)Aluminiumplatte von etwa $1,3 \text{ m}^2$. Darunter kam ein ebenfalls mit Blech belegter Gartentisch aus Plastik. Der Abstand betrug (zufällig) $1,2 \text{ m}$. Vom Prinzip her ähnliche Anordnungen zur Erzeugung eines homogenen HF-Feldes sind übrigens auch kommerziell üblich.

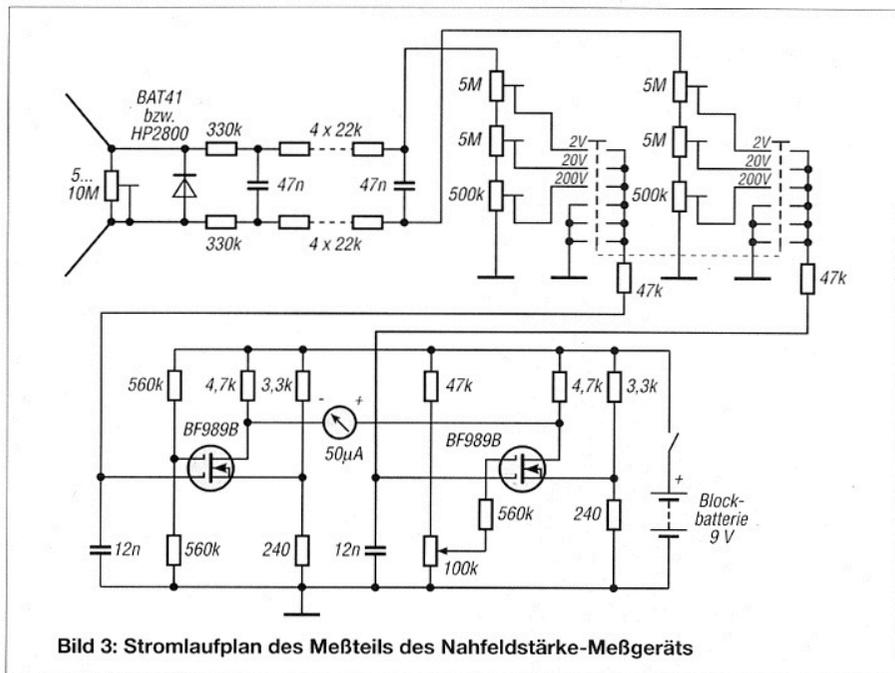


Bild 3: Stromlaufplan des Meßteils des Nahfeldstärke-Meßgeräts

Von einer Seite her wurde dann mit einem alten Röhrensender die notwendige HF-Spannung eingespeist und mit einem gut kalibrierten Oszilloskop auf der anderen Seite gemessen. Die Zuleitung zur oberen Seite auf der Senderseite, genau wie die Ableitung zu einem Lastwiderstand von etwa 200 bis 300 Ω auf der Oszilloskopseite, sollte man zur Minimierung der Zu-

und Ableitungsinduktivitäten aus möglichst breiten Blechstreifen herstellen. Für den Kurzwellenbereich genügt es aber, statt dessen auf den Längsseiten und an den Ecken gleichmäßig verteilt mehrere Laborleitungen parallel anzuklemmen und sie sowohl am Einspeisepunkt als auch am Lastwiderstand auf der Oszilloskopseite zusammenlaufen zu lassen.

■ Kalibrierung des Meßteils

Zur Kalibrierung des ersten (2-V/m-)Meßbereichs wird der Sender z.B. auf 7 MHz soweit hochgefahren, daß sich bei diesen Verhältnissen am Oszilloskop eine Spitze/Spitze-Spannung von $U_{SS} = 2 \times 2,828 \times 1,2 \text{ V} = 6,79 \text{ V}$ ergibt (der Faktor 1,2 resultiert aus dem Abstand der HF führenden Flächen).

Der Meßdipol wird bei vertikaler Polarisation in die Mitte der Fläche und des Abstands der beiden Kondensatorbelege gebracht und das Instrument mit Hilfe der beiden in Bild 2 „oberen“ 5-M Ω -Trimpotentiometern (2 V) auf Vollausschlag gebracht (gleiche Winkelstellung). Allerdings ist in diesem niedrigsten Meßbereich die Krümmung der Diodenkennlinie zu beachten; man muß also eine spezielle Skale zeichnen bzw. eine Umrechnungstabelle oder -kurve verwenden. Andernfalls erscheinen Feldstärkewerte im unteren Skalenbereich zu gering. Entsprechend erfolgt mit den anderen beiden 5-M Ω -Trimpotentiometern die Kalibrierung des 20-V/m-Bereichs. Sie erfordert entsprechend eine Oszilloskopanzeige von $U_{SS} = 67,9 \text{ V}$ usw. Im 20-V-Bereich ist die Dioden-Nichtlinearität bereits zu vernachlässigen. Vom 200-V-Bereich läßt sich nur der Anfang nutzen; andernfalls wäre die Diode überfordert.

■ Meßprobleme

Ich habe mich bei meinem Labormuster redlich bemüht, die Kalibrierung so genau wie möglich durchzuführen, obwohl eine übertriebene Genauigkeit in der Praxis eigentlich nicht vonnöten ist. Selbstverständlich kann dieses Eigenbaugerät nur elektrische Felder und die auch nicht als Vektoren messen. Magnetische Wechselfelder bleiben ihm ebenso verschlossen wie die vielen Optionen eines kommerziellen Meßgeräts.

In der Praxis sind aber die angezeigten Werte von einer Vielzahl veränderlicher Umgebungseinflüsse abhängig. So spielt es eine Rolle, ob es feucht oder trocken ist, ob eine Hecke, ein Baum oder sonstige Gewächse einschließlich Gras vorhanden sind oder nicht; und wenn ja, ob diese naß oder trocken sind. Die momentane Luftfeuchtigkeit hat genau wie eine Freileitung beliebiger Art, das Vorhandensein von metallischen Fallrohren, Fahrzeugen, Stallungen, Garagen mit und ohne Lichtleitung usw. einen Einfluß.

Innerhalb von Gebäuden lassen sich Feldstärken überhaupt nicht mehr zuverlässig messen. Das hat weniger mit der unterschiedlichen bauabhängigen Dämpfung der elektromagnetischen Wellen, sondern im wesentlichen damit zu tun, daß jede elektrische Leitung (Netz-, Telefon-, Lautsprecher-, Fernsehantennenleitungen usw.) genau wie jede Rohrleitung (Wasserrohre bis

zum verzweigten Rohrnetz der Zentralheizung) die Feldstärken verändern und beeinflussen, und das zudem noch frequenzabhängig. Jede Art von Metall, bis hin zum eingemauerten Stahlträger in der Wand, kann die Feldstärke im Haus per Sekundärstrahlung erhöhen oder per Absorption verringern, und die Feldstärkeverteilung sieht entsprechend inhomogen aus.

Folglich „mißt“ man an jeder Stelle im Gebäude andere Werte, die sich zudem noch durch den Gebrauch von elektrischen Geräten (z.B. mit oder ohne angeschlossenem Bügeleisen) ständig ändern.

Welcher Wert ist denn nun der richtige? Hinzu kommt noch die unterschiedliche Qualität auch von teuren, professionellen Feldstärkemeßanordnungen. So zeigten fünf verschiedene Meßgeräte bei gleicher Feldstärke ebenso viele z.T. gravierend unterschiedliche Werte. Bei einer EMV-Vorführung erbrachten selbst zwei amtliche Nahfeldstärke-Meßgeräte mit noch nicht abgelaufenem Eichsiegel Meßfehler von deutlich über 50 %!

Sind aber praktisch aus vorgenannten Gründen keine wissenschaftlich gefestigten, reproduzierbaren Meßwerte möglich, so sind rechnerische Betrachtungen erst recht illusorisch.

Faßt man dies alles zusammen, so erkennt man die Unhaltbarkeit der Verfügung 306/97 der RegTP. Trotzdem ist das Vorhanden-

sein eines Feldstärkemeßgeräts nicht ganz ohne Sinn. Zum einen ist es interessant, unter einer Antenne festzustellen, daß sich an den Enden wirklich höhere Feldstärken als in der Mitte nachweisen lassen; zum anderen ist eine Messung bei der Entstörung von mangelhaften Geräten der Unterhaltungselektronik insoweit von Wert, als man damit mühelos Kabelresonanzen in den Wänden ausfindig machen kann. Außerdem ist auch hier „learnig by doing“ angesagt. Also viel Erfolg beim Nachbau!

Ich bedanke mich erneut bei Peter Hufen, DL6EX aus Essen, für tätige Mithilfe bei der professionellen Ausgestaltung dieses Beitrags. Zum Thema sei noch auf [5] hingewiesen.

Literatur

- [1] Weidemann, A., DL9AH: Elektrosmog, Herzschrittmacher und die Realität, FUNKAMATEUR 48 (1999), H. 1, S. 22
- [2] Vetter, H., DL6BQ: HSM nicht zu beeinflussen, FUNKAMATEUR 48 (1999), H. 2, S. 130 (Postbox)
- [3] Schüler, R., DL4MW: Herzschrittmacher und die Realität, FUNKAMATEUR 48 (1999), H. 3, S. 259
- [4] Weidemann, A., DL9AH: Laborplatinen nach DL9AH, DL-QTC 47 (1976), H. 1
- [5] Scherz, H., DJ3NO: Feldstärkemeßgeräte und ihre Kalibrierung, CQ DL 69 (1998), H 4, S. 303