

# HF-Erde für Kurzwellenfunkstationen auf Sportbooten

Dipl.-Ing. Martin Erger, DK4FD, kontakt@sy-merger.de

## Zusammenfassung

In dem folgenden Bericht, wird die Funktion der bei unsymmetrischen Antennen notwendigen HF-Erde erklärt. Die Vor- und Nachteile der verschiedenen Möglichkeiten eine HF-Erde auf einem Boot zu realisieren werden erörtert und abschließend eine Methode vorgestellt, mit der man den Widerstand der Erde mit Amateurmitteln messen kann um deren Qualität objektiv zu beurteilen.

## Einleitung und Zielsetzung

Vielen segelnden Funkamateuren, die eine Kurzwellenstation an Bord ihres Schiffes betreiben wollen, ist die Bedeutung der für einen guten Wirkungsgrad notwendigen niederohmigen HF-Erde nicht bewusst. Häufig liegt es gerade an der Erde und nicht wie oft vermutet an der Sendeleistung, wenn eine Station nicht die von ihr erwartete Reichweite erzielt. Mit diesem Aufsatz möchte ich einen Beitrag zur Aufklärung leisten.

Um die Zusammenhänge zu verstehen, ist es notwendig einige theoretische Hintergründe zu erläutern. Ich habe mich bemüht alles so zu beschreiben, dass es mit den elektrotechnischen Vorkenntnissen, die jeder lizenzierte Funkamateur hat, verstanden werden kann. Nach der Lektüre sollte dem Leser klar sein, auf was es bei der Realisierung seiner „Erde“ ankommt und wie er sie ggf. optimieren kann.

Sinngemäß gelten die Ausführungen natürlich auch für die HF-Erde einer Kurzwellenseefunkstelle an Bord. Erfahrungsgemäß kann in diesem Fall aber nicht vom Vorhandensein der notwendigen technischen Vorkenntnisse beim Betreiber ausgegangen werden, da diese in der LRC-Prüfung nicht gefordert sind. Interessenten aus diesem Kreis empfehle ich, sich um entsprechende Unterstützung eines Fachmannes zu bemühen und die in diesem Bericht angesprochenen Punkte zu hinterfragen. In jedem Fall ist eine richtig dimensionierte HF-Erde ein wichtiger Beitrag für eine stabil laufende Station mit großer Reichweite an Bord.

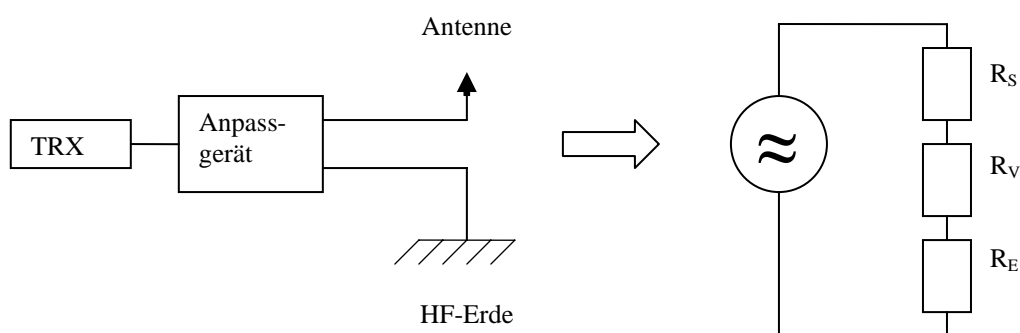
## Theoretischer Hintergrund

Auf den allermeisten Booten mit einer Kurzwellenstation werden Antennen in Form eines isolierten Achterstags oder einer Peitsche (Whip) am Heck betrieben. Beide Antennenformen sind, wenn man von der Länge absieht, prinzipiell das Gleiche und in der Literatur [1] und [2] als Marconiantenne bekannt. Für einen guten Wirkungsgrad ist eine optimale Ausgestaltung der Erde unabdingbar.

Die Realisierung einer HF-Erde ist abhängig von den individuellen Verhältnissen auf jedem Boot anders. Allein schon aus diesem Grund kann man zumindest seriös keine allgemein gültigen Kochrezepte nach dem Motto „Man nehme...“ geben. Für eine optimale Gestaltung ist es daher wichtig die theoretischen Hintergründe wenigstens einigermaßen zu verstehen.

Die Funktion einer unsymmetrischen Vertikalantenne wie sie auf unseren Booten verwendet wird ist relativ leicht zu verstehen, wenn man von der allgemein bekannten Dipolantenne ausgeht und eine der beiden Strahlerhälften durch die Erde ersetzt. Während beim symmetrischen Dipol beide Hälften gleichmäßig an der Strahlung beteiligt sind, muss bei unserer Antenne der verbleibende Strahler diese Aufgabe allein übernehmen. In die Erde fließende HF-Leistung geht verloren. Um zu verstehen was da passiert, macht man sich am besten eine kleine Zeichnung (siehe Abb. 1).

Abb. 1: Aufbau der Funkstation und Ersatzschaltbild



Das linke Bild zeigt schematisch den prinzipiellen Aufbau der Funkstation an Bord. Der Transceiver (TRX) liefert die Sendeleistung über ein Koaxialkabel an ein Anpassgerät. An dieses wiederum sind die Antenne (Achterstag oder Peitsche) und die HF-Erde angeschlossen. Mit anderen Worten könnte man auch sagen: Die vom Sender erzeugte hochfrequente Energie wird von den drei Komponenten: Antenne,

Anpassgerät und Erde verbraucht. Man kann deshalb wegen des leichteren Verständnisses für die folgenden Überlegungen genau so gut ein Ersatzschaltbild zeichnen in dem die Antenne ( $R_S$ ), das Anpassgerät ( $R_V$ ) und die Erde ( $R_E$ ) durch je einen Widerstand symbolisiert werden.

$R_S$  ist der Strahlungswiderstand der Antenne. Die in diesem Widerstand „verbrauchte“ Leistung wird wirklich abgestrahlt und kommt der Funkverbindung zu gute. Von dort her muss es vorrangiges Ziel sein, möglichst viel der HF-Energie in diesem Widerstand zu verbrauchen. Die Größe von  $R_S$  wird in der Praxis im Wesentlichen von der Länge und zusätzlich von einer ganzen Reihe anderer Faktoren bestimmt. Bei einer idealen Viertelwellenantenne beträgt er  $36 \Omega$ . Längere Antennen (gut) vergrößern diesen Widerstand kürzere (schlecht) verringern ihn.

In  $R_V$  sind alle von uns meist weniger beeinflussbaren verlustbehafteten Widerstände zusammengefasst. In erster Linie sind dies natürlich Verluste durch die Impedanztransformation im Anpassgerät aber auch Leitungsverluste und unvermeidbare Einflüsse durch Mast und Wanten. Bei einem sauberen Aufbau richtig dimensionierter Komponenten beträgt dieser Widerstand nur wenige Ohm. Da man das Anpassgerät normalerweise fertig kauft, hat man sowieso nur geringen Einfluss darauf.

Der Erdwiderstand  $R_E$  und wie man ihn beeinflussen kann ist Kernthema dieses Aufsatzes. Wir werden uns ausführlich damit beschäftigen.

Aus den Werten dieser Widerstände kann man leicht den Wirkungsgrad  $\eta$  der gesamten Antennenanlage ausrechnen (siehe Gl. 1).

$$\eta = \frac{R_S}{R_S + R_V + R_E} \quad (\text{Gl. 1})$$

( $\eta$ : Wirkungsgrad;  $R_S$ : Strahlungswiderstand;  $R_V$ : Zusammenfassung aller Verlustwiderstände;  $R_E$ : Erdwiderstand.)

Diese Gleichung (Gl. 1) spricht eine eindeutige Sprache: Der Wirkungsgrad  $\eta$  der Antennenanlage ist dann besonders gut, wenn der Strahlungswiderstand  $R_S$  groß und die verlustbehafteten Widerstände  $R_V$  und  $R_E$  sehr klein sind.

Wie oben bereits festgestellt wurde, ist der Strahlungswiderstand ( $R_S$ ) im Wesentlichen von der Antennenlänge abhängig und kann nur geringförmig von uns

beeinflusst werden. In der Praxis liegt er meistens irgendwo zwischen 20  $\Omega$  (Peitsche bei 3,6 MHz) und 50  $\Omega$  (Achterstag bei 21 MHz). Wenn wir mal von einem mittleren Wert von 35  $\Omega$  und einem Erdwiderstand von ebenfalls 35  $\Omega$  ausgehen, haben wir nur noch einen Wirkungsgrad von 50%.  $R_V$  wurde bei dieser Rechnung der Einfachheit halber vernachlässigt. Er würde das Ergebnis weiter verschlechtern. Auf Grund dieser Überlegungen ergibt sich, dass man den Wirkungsgrad der Antennenanlage eigentlich nur dadurch positiv beeinflussen kann indem man den Erdwiderstand möglichst niedrig hält. Wie man das in der Praxis macht ist Thema der folgenden Ausführungen.

## **Praktische Realisierung der HF-Erde**

Um eine Erde für Kurzwellenstationen auf einem Sportboot zu realisieren gibt es verschiedene Möglichkeiten. Im Folgenden sollen sie erläutert und mit ihren Vor- und Nachteilen diskutiert werden.

### **Die Verwendung des Rumpfes als HF-Erde auf einem Metallboot**

Diejenigen, die ein Stahl- oder Aluminiumboot ihr Eigen nennen, brauchen hier nicht weiter zu lesen. Es gibt keine bessere HF-Erde als einen Metallrumpf, der in unmittelbarer Nähe des Anpassgerätes mit diesem verbunden werden kann. Sollte eine längere Leitung notwendig sein, sind die Ausführungen dazu im Abschnitt Kiel als HF-Erde zu beachten. Durch diesen Anschluss wird der bisher eventuell massefreie Rumpf mit dem elektrischen System der Yacht verbunden. Dies kann abhängig vom Aufbau der Elektrik möglicherweise zu erhöhter Elektrolyse führen. Elektrolyse ist hier eigentlich nicht unser Thema, als einwandfreie HF-Erde wirkt der Rumpf trotzdem. Man kann solche Probleme aber vermeiden indem man diese Verbindung nicht einfach mit einem Draht sondern über einen entsprechend HF-stromfesten Kondensator (ca. 10 000 pF<sup>\*1</sup>) ausführt. Sollte der nicht zu beschaffen sein ist auch ein Relais, über das die Verbindung nur beim Betrieb der Funkstation geschlossen wird, eine gute Idee.

## Der Verwendung des Kiels als HF-Erde

Ebenso wie ein Metallrumpf ist auch der Kiel mit seiner großen Fläche zum umgebenden Wasser eine hervorragende HF-Erde. Sein großer Nachteil besteht in der räumlichen Entfernung zum normalerweise achtern im Heckbereich montierten Anpassgerät, die eine Verbindung von mehreren Metern notwendig macht. Die unvermeidbare frequenzabhängige Transformation des Widerstandes auf dieser Leitung macht oft aus einer guten Erde ein schlechte. Welche Werte abhängig von der Leitungslänge zu erwarten sind, kann man mit Hilfe eines Smith-Charts graphisch ermitteln oder auch mit dem überaus nützlichen Programm von DL2RD schnell berechnen.<sup>[4]</sup> Ich habe dies einmal beispielhaft für angenommene Erdwiderstände von 1, 3, 5, 10 und 20  $\Omega$  getan um zu verdeutlichen was da passiert. Für diese Überlegungen müssen nur die realen Widerstandsanteile berücksichtigt werden, da die imaginären durch das Anpassgerät problemlos kompensiert werden. Für eine anzustrebende kurze Verbindungsleitung zwischen Anpassgerät und HF-Erde von nur 0,5 m erhöht sich der Widerstand bei allen Frequenzen nur unwesentlich (siehe Tab. 1).

Tab. 1: 0,5 m Leitungslänge zwischen HF-Erde und Anpassgerät.

<b>Widerstände der HF-Erde in <math>\Omega</math></b>					
<b>Frequenz /Mhz</b>	<b>1,00</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10</b>	<b>20,00</b>
<b>3,60</b>	2,30	4,40	6,40	11,40	21,4
<b>7,05</b>	2,40	4,40	6,40	11,46	21,5
<b>10,15</b>	2,42	4,48	6,47	11,54	21,67
<b>14,10</b>	2,45	4,50	6,56	11,69	21,69
<b>18,10</b>	2,59	4,75	6,92	12,33	23,10
<b>21,10</b>	2,65	4,86	7,07	12,60	23,65

Schon eine etwas längere Leitung von nur 3 m (siehe Tab. 2), wie sie bei Verwendung des Kiels noch sehr günstig wäre, macht aber deutlich was passiert. Während wir für die Frequenzen im 80, 40 und 30 m Band noch von einer brauchbaren Erde sprechen können, ist die gewünschte niederohmige Verbindung für die höheren Frequenzen nicht mehr gegeben. Dadurch würde in diesen Fällen nur ein Bruchteil der Sendeenergie wirklich von der Antenne abgestrahlt werden. Dies ist möglicherweise auch eine Erklärung dafür, dass die gleiche Antenne im ebenfalls gleichen Frequenzband auf dem einen Boot spielt und auf dem anderen nicht.

Tab. 2: 3 m Leitungslänge zwischen HF-Erde und Anpassgerät.

<b>Widerstände der HF-Erde in <math>\Omega</math></b>					
<b>Frequenz /Mhz</b>	<b>1,00</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>	<b>20,00</b>
<b>3,60</b>	9,90	12,01	14,10	19,50	30,10
<b>7,05</b>	11,99	14,50	17,10	23,50	36,30
<b>10,15</b>	16,10	19,60	23,10	31,60	48,70
<b>14,10</b>	30,40	36,80	43,30	59,20	90,20
<b>18,10</b>	101,00	122,00	143,00	193,00	281,00
<b>21,10</b>	890,00	1028,00	1142,00	1334,00	1428,00

Noch deutlicher wird dies, wenn man ein Beispiel mit einer 5 m Leitung (siehe Tab. 3) durchrechnet. Diese Länge ist auf den gängigen Bootsgößen für eine Verbindung Kiel-Anpassgerät noch wesentlich wahrscheinlicher als die vorher angenommenen 3 m. Die Tabelle zeigt, wenn man vom 80 m Band einmal absieht, sehr bescheidene Ergebnisse. Im für den Fernverkehr überaus wichtigen 20 m Band ist der Kiel als Erde damit völlig unbrauchbar. Dies vor allem dadurch, dass die Länge der Verbindungsleitung in diesem Beispiel in der Nähe von  $\lambda/4$  liegt. Aus der Tabelle können wir aber auch entnehmen, dass für die tiefen Frequenzen eine zusätzliche Verbindung zum Kiel eventuell Sinn macht, wenn wir mit anderen Methoden eine genügend niederohmige Erde für diesen Bereich nicht realisieren können.

Tab. 31: 5 m Leitungslänge zwischen HF-Erde und Anpassgerät.

<b>Widerstände der HF-Erde in <math>\Omega</math></b>					
<b>Frequenz /Mhz</b>	<b>1,00</b>	<b>3,00</b>	<b>5,00</b>	<b>10,00</b>	<b>20,00</b>
<b>3,60</b>	17,79	20,17	22,55	28,49	40,38
<b>7,05</b>	31,86	36,10	40,33	50,82	71,37
<b>10,15</b>	101,50	1145,00	127,40	158,49	215,00
<b>14,10</b>	1873,00	1923,00	1943,00	1907,00	12987,00
<b>18,10</b>	56,30	637,00	71,11	89,00	123,70
<b>21,10</b>	24,71	28,00	31,30	39,50	55,66

Einige Segler haben gute Erfahrung damit gemacht, zusätzlich zum Kiel das Ruder mit in die Erdkonstruktion einzubeziehen. Dies hat den Vorteil, dass die Verbindung wesentlich kürzer ist und so für die höheren Frequenzen der Leitungswiderstand deutlich verringert wird. Dabei wird die Erde über eine Schelle an den Ruderschaft

angeschlossen. Die eigentliche hochfrequenzmäßig wirksame Erde bildet dabei das innere Metallgerüst des Ruders.

Wegen der kürzeren Entfernung zum Anpassgerät könnte jemand auf die Idee kommen statt des Kiels einen möglicherweise vorhandenen Saildrive als HF-Erde zu benutzen. Davor möchte ich ausdrücklich warnen. Um Elektrolyseprobleme zu vermeiden, ist ein Saildrive normalerweise vom Motor elektrisch isoliert eingebaut. Mit einer Verwendung als Erde würde dies alles zunichte gemacht. Wenn es sich trotzdem nicht vermeiden lässt, sollte man aber mindestens eine der oben beschriebenen Schutzmaßnahmen (Kondensator / Relais) vorsehen.

### **Die Verwendung von Erdschwämmen als HF-Erde**

Erdschwämme sind meistens aus Bronze gefertigte Metallteile, in die durch spezielle Verfahren viele Poren eingebracht wurden. Dadurch wird die vom Wasser benetzte Oberfläche sehr groß, was einen besonders niedrigen Übergangswiderstand garantiert. Besonders Händler sagen ihnen wahre Wunder nach. Nach meiner Meinung geschieht dies wohl hauptsächlich um den hohen Preis einigermaßen zu rechtfertigen.

Ein Erdschwamm hat den Vorteil in der Nähe des Anpassgerätes angebracht werden zu können. Leitungsprobleme wie beim Kiel entfallen dadurch. Der zusätzlich notwendige Rumpfdurchbruch ist kein ernsthafter Nachteil, weil er sich mit modernen Klebern sicher abdichten lässt. Ein Erdschwamm wäre also die ideale Erde, wenn sich dessen Neuzustand auf Dauer halten würde. Das ist leider nicht so.

Die vielen kleinen Poren haben den Nachteil, dass sich in ihnen im Meer sehr schnell Kleinstlebewesen ansiedeln. Jene wiederum sondern Kalk ab, der sich auf den Porenwänden festsetzt und diese elektrisch isoliert. Auf diese Weise lässt die Leitfähigkeit der Schwämme innerhalb weniger Monate im Wasser dramatisch nach wodurch ihre Wirkung obsolet wird.

Man mag dagegen einwenden, dass die Legierung der Schwämme überwiegend aus Kupfer besteht, sich dieses als hervorragendes Antifouling bewährt habe und deswegen gar kein Bewuchs stattfinden könne. In der Praxis ist das nicht so. Möglicherweise wird der Bewuchs durch den Kupferanteil verlangsamt, verhindert wird er nicht. So ist es nur eine Frage der Zeit bis der Schwamm als Erde unbrauchbar wird. Mir ist der Fall eines Seglers bekannt, der auf seinem für eine Weltumseglung vorgesehenen Boot auf Anraten seines Händlers nach dem Motto

„viel hilft viel“ gleich zwei Erdschwämme installieren ließ. Das Boot wurde in Südfrankreich ins Wasser gesetzt und bereits einige Monate später auf den Kanarischen Inseln waren die Schwämme als HF-Erde so unbrauchbar, dass sie den Eigner verzweifelt nach einer anderen Lösung suchen ließen. In anderen weniger warmen Gewässern mag das nicht ganz so schnell gehen. Trotzdem kann ich vor der Verwendung von Erdschwämmen nur ausdrücklich warnen. Sie halten keineswegs was ihr Preis verspricht.

### **Die Verwendung von im Boot verlegten Drähten als HF-Erde**

Die Kapazität eines im unteren Bootsbereich liegendes Drahtes gegenüber dem umgebenden Wasser können wir getrost vernachlässigen. Gegenüber den unvermeidbaren Impedanztransformationseigenschaften, mit denen wir uns im vorigen Kapitel ausführlich beschäftigt haben, spielen sie keine wesentliche Rolle mehr. Im Unterschied zu den Ausführungen oben sind die Leitungen am Ende offen, wenn wir die Drähte selbst als Erde nutzen wollen. Das bedeutet für uns, dass deren Impedanz nur niedriger als dieser Extremwert werden kann. Es würde zu weit führen hier alles herzuleiten, weshalb die Tatsache genügen sollte, dass dieser Wert auch im günstigsten Fall einer  $\lambda/4$ -langen Leitung nicht kleiner als  $36 \Omega$  werden kann. Dies ist auch der Grund, warum man bei Verwendung einer künstlichen Erde wie beispielsweise bei einer Groundplaneantenne immer mehrere Radials parallel schaltet. Daraus kann man leicht schließen, dass insbesondere wenn man an einen Betrieb auf mehreren Bändern denkt, eine sinnvolle Erde auf diese Weise auf einem Boot nicht wirklich zu realisieren ist. Die Vielzahl der notwendigen Radials wäre gar nicht unterzubringen.

Erstaunlicherweise wird gerade diese Methode wohl mangels besseren Wissens von vielen Funkamateuren benutzt. Die besten Ergebnisse erreicht man, wenn man für jedes Band mindestens ein  $\lambda/4$ -langes und damit resonantes Radial installiert. Davon abweichende Längen verschlechtern den Wirkungsgrad der Erde solange man deren Blindanteil nicht extra kompensiert. Für die unteren Bänder ist dies nicht zu realisieren, weshalb sich eine zusätzliche Verbindung zum Kiel empfiehlt. Wie den oben abgeleiteten theoretischen Erläuterungen zu entnehmen ist, werden bei diesem Aufbau abhängig von der Länge der verwendeten Antenne oft bis zu 50% der Sendeenergie über diese Erdkonstruktion abgestrahlt. Davon dürfte die meiste wegen der Nähe zum Wasser verloren gehen. Aber auch Funkstörungen bis hin zu glimmenden Lampen finden so eine Erklärung.

## Die Verwendung von Metallfolien als HF-Erde

Wenn die Voraussetzungen an Bord stimmen, benutze ich diese Methode eine wirksame HF-Erde zu realisieren besonders gerne. Dabei wird eine große Blechplatte ausgelegt oder einfach der Schiffsboden mit Metallfolie „tapeziert“. Die durch das GFK des Rumpfes entstehende große Kapazität gegenüber dem umgebenden Wasser ergibt ähnlich dem Kiel eine hervorragende Erde, die noch dazu in der Nähe des Anpassgerätes liegt. Ob man Kupfer- oder Aluminiumfolie verwendet ist nicht wirklich wichtig. Kupferfolie hat den Vorteil, dass man sie leicht verlöten kann. Aluminium ist wesentlich billiger und leichter zu beschaffen. Dem Nachteil der wegen der Oxydbildung schlechten elektrischen Kontaktierbarkeit kann man leicht begegnen indem man die Folie an der Wand etwas hochzieht und dort die Verbindung durch einen angeschraubten Draht herstellt. Die Schraube selbst wird dabei fest in der Holzwand verschraubt. Wenn man dabei eine Zahnscheibe zwischen Folie und Ringöse des Verbindungsdrahtes unterlegt entsteht eine gasdichte Verbindung, die auch den elektrischen Kontakt sicherstellt solange man sie nicht wieder aufmacht.

Im praktischen Anwendungsfall auf meinem Boot ist das Anpassgerät im achteren Teil der Backskiste installiert. Unmittelbar daneben ist der Schiffsboden unter einer Doppelkoje mit der schon erwähnten Aluminiumfolie tapeziert. Ich verwende dazu die dickere Qualität, wie sie im Baubedarf als Feuchtigkeitssperre fürs Mauerwerk zu haben ist. Dank der durch die Doppelkoje zu Verfügung stehenden Fläche stehen mir etwa 2 m<sup>2</sup> zur Verfügung. Zum Verkleben eignet sich Sprühkleber aus der Dose besonders gut. Die direkte Nähe zum Anpassgerät ermöglicht eine Verbindungsleitung von nur 30 cm Länge. Für alle benutzten Frequenzen habe ich einen Widerstand von weniger als 10  $\Omega$  gemessen. Für das wichtige 20 m Band liegt er sogar in der Größenordnung von nur 1  $\Omega$ . Diese sicherlich überdurchschnittlich gute Erde ermöglicht mir meinen Sender mit gedrosselter Leistung zu fahren, so dass ich mit nur 25 W HF jederzeit mit den anderen Maritime-Mobile-Stationen mithalten kann.

Solch ideale Verhältnisse wie ich hat nicht jeder an Bord. Manchmal steht für eine Folienerde nur die Achterpik oder der Boden unter der Backskiste zur Verfügung. Man wird dann feststellen, dass die Fläche insbesondere für die langwelligeren Bänder nicht ausreicht. In solchen Fällen empfehle ich zusätzlich den Kiel

anzuschließen und wie oben schon beschrieben evt. das Ruder in die Konstruktion mit einzubeziehen.

## Messen des Erdwiderstandes

Um zu wissen wie gut eine HF-Erde ist, muss man deren Widerstand messen können. Dieses darf man natürlich nicht einfach mit Gleichstrom und einem Multimeter machen sondern die Messung muss zwingend mit einem Wechselstrom auf der vorgesehen Betriebsfrequenz erfolgen. Eine aufwendige Impedanzmessbrücke haben die wenigsten Funkamateure. Gerade im Kurzwellenbereich kann man sich aber auch recht gut mit einer bei eigentlich jedem Funkamateur vorhandenen Stehwellenmessbrücke helfen. Wie das geht versuche ich hier zu erklären. Für das Verständnis ist zunächst wieder ein bisschen Theorie notwendig.

Wir erinnern uns, dass das Stehwellenverhältnis (SWR) als das Verhältnis der Leitungsimpedanz ( $Z_0$ ) zum daran angeschlossenen Widerstand (R) definiert ist. Es gilt also

$$\text{SWR} = \frac{Z_0}{R} \quad \text{bzw.} \quad \text{SWR} = \frac{R}{Z_0} \quad (\text{Gl. 2})$$

(SWR: Stehwellenverhältnis;  $Z_0$ : Impedanz des Kabels; R: angeschlossener Widerstand.)

Dabei wird immer die Formel angewandt, bei der das Verhältnis größer als 1 ist.

Ein angepasstes System bei dem die Leitung mit Wellenwiderstand abgeschlossen ist ( $Z_0 = R$ ) hat damit ein SWR von 1. Eine offene oder kurzgeschlossene Leitung führt zu einem unendlich großen SWR. Dies macht auch schon ein kleines Dilemma deutlich: Außer 1 führen alle anderen SWR-Werte zu einem doppeldeutigen Ergebnis. Bei einer üblichen Leitungsimpedanz von  $50 \Omega$  kann also ein SWR von 2 bedeuten, dass ein  $25 \Omega$  oder ein  $100 \Omega$  Widerstand angeschlossen ist. In der Praxis ist das nicht wirklich schlimm, da meistens durch eine einfache Überlegung festgestellt werden kann, welcher der beiden Werte richtig ist. Eine weitere Schwierigkeit ist, dass eine einigermaßen genaue Messung eigentlich nur bei angeschlossenen Widerständen zwischen  $25 \Omega$  und  $100 \Omega$  möglich ist, da alle

anderen zu einem SWR > 2 führen. Ein solches SWR ist auf der logarithmischen Skala nur schwer mit der notwendigen Genauigkeit abzulesen.

Die folgende Tabelle 4 gibt für ein 50 Ω-System die beiden möglichen Widerstände an.

Tab. 4: SWR und angeschlossene Widerstände für ein 50 Ω-System.

SWR	R1 /Ω	R2 /Ω
1,00	50,0	50
1,05	47,6	53
1,10	45,5	55
1,20	41,7	60
1,30	38,5	65
1,40	35,7	70
1,50	33,3	75
1,60	31,3	80
1,70	29,4	85
1,80	27,8	90
1,90	26,3	95
2,00	25,0	100
2,50	20,0	125
3,00	16,7	150
5,00	10,0	250
10,00	5,0	500

Nachdem der theoretische Hintergrund bekannt ist, können wir uns nun der Praxis zuwenden. Dazu müssen wir zunächst klären, gegen was wir unsere HF-Erde messen. Geeignet ist dazu wie beispielsweise der Kiel jede leitende Fläche die einen geringen Widerstand zum umgebenden Wasser hat. In meinem Fall habe ich den Saildrive als Hilfserde benutzt, da dieser in unmittelbarer Nähe der als HF-Erde verwendeten Aluminiumfolie ist und dadurch keine längeren Leitungen benötigt werden, die das Messergebnis verfälschen könnten. Zum Messen selbst verwende ich eine aktive SWR-Brücke (MFJ 259B) die den HF-Generator schon eingebaut hat. Das ist sehr bequem, weil man sie wegen des Batteriebetriebes leicht zum Messort bringen kann. Der normale mit kleinstmöglicher Leistung betriebene Kurzwellensender tut es aber auch. Auch diesen muss man nicht zum Messort bringen, da man genau so gut durch das Koaxialkabel messen kann. Wie sich noch

zeigen wird, werden die Ergebnisse in der Nähe der Leitungsimpedanz liegen, so dass das Messergebnis nur unwesentlich verfälscht wird.

Abb. 2: Aufbau zum Messen des Erdwiderstandes ohne und mit Hilfswiderstand.



Am Ausgang des SWR-Meters wird der Innenleiter an die zu messende HF-Erde und der Außenleiter über eine kurze Leitung an die Hilfserde angeschlossen und das SWR auf der Betriebsfrequenz gemessen. Da wir ja alles dafür getan haben um eine möglichst niederohmige Erde zu bekommen, wird das SWR-Meter erwartungsgemäß einen sehr hohen Wert zeigen, wissen wir doch aus obiger Tabelle, dass ein  $\text{SWR} = 10$  einem Erdwiderstand von  $5 \Omega$  entspricht. Eine genauere Anzeige bekommen wir durch einen kleinen Trick. Wir fügen in die Leitung einen zusätzlichen  $50 \Omega$  Hilfswiderstand ein. Damit haben wir bei einem angenommenen Erdwiderstand von  $5 \Omega$  jetzt  $55 \Omega$  welcher zu einem SWR von  $1,1$  führt, welches wesentlich genauer abzulesen ist.

Puristen werden einwenden, dass diese Messung nicht den wirklichen Widerstand der HF-Erde sondern die Reihenschaltung aus HF- und Hilfserde misst. Das ist natürlich richtig. Für uns sollte es aber genügen, dass der gesuchte Widerstand der HF-Erde immer geringer als das gemessene Ergebnis sein wird.

## Literatur:

- [1] Karl Rothammel in *Antennenbuch*, Telekosmos-Verlag Stuttgart, **1973**.
- [2] William Orr, Stuart Cowan in *Vertical Antennas*, Radio Publications, **1986**.
- [3] Gerd Janzen in *HF-Messungen mit einer aktiven Stehwellenmessbrücke*, Kempten, Eigenverlag des Autors, **1996**.
- [4] DL2RD in *Impedanztransformation an verlustbehafteter Leitung beliebiger Länge*; das Programm (Excel) kann im Downloadbereich bei der Zeitschrift Funkamateureur ([www.funkamateureur.de](http://www.funkamateureur.de)) herunter geladen werden.

## Urheberrecht und sonstige Hinweise:

Dieser Artikel darf jederzeit weitergegeben werden, solange dies ungekürzt unter Nennung des Autors und kostenlos geschieht ohne jedwede kommerzielle Zwecke zu verfolgen. In allen anderen Fällen, auch im Falle der Übersetzung in andere Sprachen, ist vorher die Einwilligung des Autors einzuholen. Alle Rechte der Verwertung liegen in jedem Fall beim Autor.

Trotz sorgfältiger Arbeit sind Fehler nicht immer zu vermeiden. Für Hinweise und Verbesserungsvorschläge bin ich jederzeit dankbar.

Weitere Hinweise zum Betrieb einer Amateurfunkstation an Bord einer Segelyacht findet man auf der Webpage [www.sy-merger.de](http://www.sy-merger.de) des Autors.

## Korrekturen:

\*1) An dieser Stelle auf Seite 4 fehlte in der Ausgabe 1.0 eine „0“. Richtig hätte es heißen müssen „ca. 10 000pF“. Danke für den Hinweis an Andy 9Y4ZC.