

Den Mantelwellen auf der Spur

Werner Schmittner, DJ4WG

In der Amateurfunkliteratur ist schon viel über Mantelströme, den daraus entstehenden Mantelwellen und Symmetriergliedern bzw. Drosseln in Form von Baluns zu ihrer Unterdrückung geschrieben worden. Allen Veröffentlichungen ist eine Behauptung gemeinsam: Ein solcher Balun unterdrückt jegliche Mantelwellen. Nirgendwo finden sich konkrete Aussagen darüber, welche Vorgänge zwischen dem Balun, dem Sender und der Erdung ablaufen.

Der langen Reihe von Abhandlungen möchte ich eine weitere hinzufügen, die den bisherigen Rahmen erweitert. Untermauert werden die Erkenntnisse nicht durch theoretische Herleitungen, sondern durch einfache Messversuche, die leicht nachvollziehbar sind.

► Das System Erde, Sender, Speiseleitung, Anpass- und Symmetrierglied, Antenne

Bild 1 zeigt dieses, auf das Wesentliche reduzierte System. Der Sender soll ein allseitig geschlossenes Gehäuse und einen Koaxausgang besitzen. Ein Koaxkabel leitet die Sendeenergie zu einer Anpassschaltung, einem Symmetrierglied und evtl. eine Paralleldrahtleitung oder ein weiteres Stück Koax zur Antenne. Das Gehäuse des Senders ist über die Netzleitung und/oder eine separate Erdleitung mit der Erde verbunden. Diese Verbindungen bis zur Erde besitzen eine Impedanz, hervorgerufen durch den Strahlungs- und Verlustwiderstand der Leitungen und ihre Wechselwirkung mit der Umgebung. Einzelne Komponenten dieser Kette müssen nicht unbedingt vorhanden sein. Schließlich greift der Operator zu Taste oder Mikrofon und wird dadurch Teil dieses Systems. Zwischen drei Fixpunkten findet das Abstrahlen der Sendeenergie statt: der „absoluten Erde“, an der keine HF-Spannung mehr messbar ist, sondern evtl. ein HF-Strom, und den beiden Enden der Antennenäste, an denen Spannungsmaxima liegen und der HF-Strom 0 ist. Ein weitere Stelle ist wichtig: das obere Ende des vom Sender kommenden Koaxkabels. Dort sind, wenn das SWR 1 ist, Spannung und Strom in Phase und haben, abhängig von der Sendeleistung und dem Wellenwiderstand des Kabels, bestimmte Werte. Das Potential der Außenseite des Koaxmantels gegenüber Erde an dieser Stelle muss aber nicht 0 sein, wie weiter unten erläutert wird. Das Innere des Senders ist bei den Betrachtungen ohne Bedeutung, vorausgesetzt, alle in den Sender führenden Leitungen sind gegen das Sendergehäuse ordnungsgemäß abgeblockt.

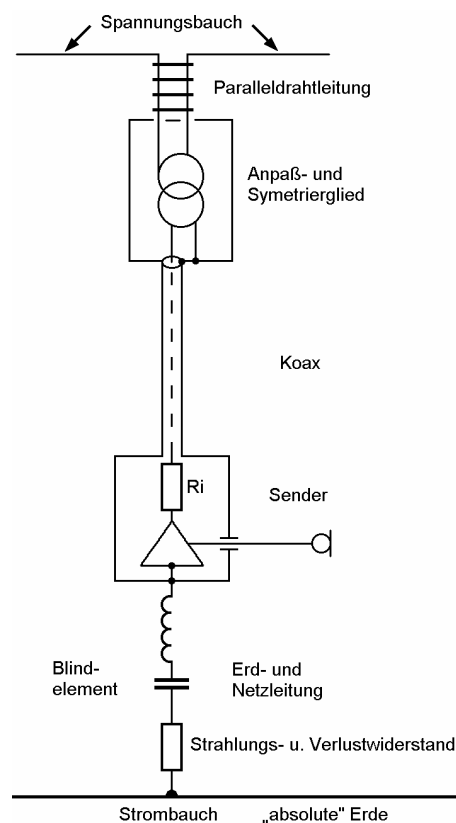


Bild 1 Das Prinzip einer Sendeanlage

► Vergleich Koaxkabel und Paralleldrahtleitung

Die Vorgänge bei der Leistungsübertragung unterscheiden sich bei beiden Leitungstypen wesentlich. Bei einem Koaxkabel sind an jeder Stelle der Strom auf dem Innenleiter und der Innenseite des Mantels gleich groß und entgegengesetzt gerichtet. Bei SWR 1 ist der Strom überall im Kabel gleich,

ebenso die Spannung. Bei idealer, d. h. absolut dichter Abschirmung strahlt das Kabel keine Energie ab. Auf der Außenseite des Koaxmantels dagegen kann ein, von den Vorgängen im Kabel völlig unabhängiger Strom fließen, der Mantelstrom. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Welle im Koax hängt vom Verkürzungsfaktor des Kabels ab, während sich die Mantelwellen mit nahezu Lichtgeschwindigkeit ausbreiten.

Ganz anders dagegen verhält sich eine Paralleldrahtleitung. Sie wird, da sie verlustarm ist, ohne Beachtung des SWR betrieben. In Abhängigkeit von den Lastbedingungen am Ende der beiden Leiter ergeben sich Ströme, Spannungen und Phasenlagen, die auf beiden Leitern völlig unabhängig voneinander sind. Eine solche Leitung strahlt auch bei idealer Symmetrie Energie ab, da sich die Felder beider Drähte wegen deren Abstand nie vollständig aufheben. Auch eine Eindrahtleitung (z. B. Außenmantel eines Koaxkabels) verhält sich zusammen mit ihrer leitenden Umgebung wie eine Zweidrahtleitung.

► Was sehen Anpassglied und Balun in Richtung Antenne?

Eine Dipolantenne hat im ungünstigsten Fall ungleiche Äste, ist nicht resonant und durch Einflüsse der Umgebung ungleich kapazitiv belastet. Von den Spannungsbäuchen an den Antennenenden ausgehend ändern sich Strom, Spannung und Phase. Im Anschlusspunkt der Speiseleitung haben sich Bedingungen eingestellt, die gewöhnlich nicht symmetrisch sind. Eine angeschlossene Zweidrahtspeiseleitung transformiert dieses Spannungs-Strom-Phasen-Mix weiter.

Verbindet man diese Zweidrahtleitung direkt mit einem Koaxkabel, so bilden sich an der Übergangsstelle Strom, Spannung und Phase so aus, wie es die Impedanzverhältnisse erfordern. Auf der Außenseite des Koaxmantels fließt zusätzlich ein Strom Richtung Erde, der den Strom im Koax zu den Strömen auf der Zweidrahtleitung ergänzt. Damit wird der Außenmantel ebenfalls zum Strahler und das ganze Speisekabelsystem einschließlich Sender und Erdleitung führt Hochfrequenz- die unerwünschten Mantelwellen verseuchen ihre Umgebung. Herrscht auch noch Resonanz, so können sich diese zu beträchtlicher Höhe aufschaukeln, den gefürchteten Gleichtaktwellen. Eine Anpassschaltung muss nun zwischen diesem Chaos auf der Zweidrahtleitung und den sauberen Bedingungen am Koaxeingang vermitteln. Einerseits muss sie den Wellenwiderstand des Koaxkabels auf die Eingangsimpedanz der angeschlossenen Antenne transformieren und andererseits die Unsymmetrie des Kabels auf die mehr oder weniger schlechte Symmetrie der Antenne übertragen.

Die erforderliche Impedanzanpassung übernimmt ein geeignetes Netzwerk. Die Symmetrierung wird durch einen Balun durchgeführt. Umfassendes Hintergrundwissen und zahlreiche Bauanleitungen kann man den Büchern von J. Servick, W2FMI (3) entnehmen.

► Wie wirken Baluns?

Zunächst eine Begriffsbestimmung: Zur Unterdrückung von Mantelströmen muß die erdunsymmetrische Koaxleitung elektrisch symmetriert werden. Dazu dienen Baluns der verschiedenen Ausführungen. Wird nicht symmetriert, so tritt auf dem Koaxmantel ein Mantelstrom auf, zu dessen Unterdrückung eine entsprechende Drossel eingesetzt wird. Diese Drossel entspricht aber elektrisch genau dem Strombalun (s. u.), so dass im Folgenden nur von „Balun“ gesprochen wird. Für die Anwendung im Kurzwellenbereich scheiden Symmetrieranordnungen aus, die auf Resonanz beruhen. Sie sind zu groß und nur schwer auf mehreren Frequenzen ohne Umschaltung zu realisieren. Auf Ferritbasis dagegen lassen sich kompakte, aperiodische Symmetrierglieder bauen, die als Baluns bekannt sind und bei geeigneter Dimensionierung den gesamten Kurzwellenbereich abdecken.

Es wird, je nach dem Funktionsprinzip, zwischen Spannungs- und Strombalun unterschieden. Ein Spannungs- oder Dreileiterbalun (Bild 2a) löst die Aufgabe perfekt. Wie auf dem Bild zu sehen ist, wirkt er wie ein Spartransformator. Auf der Primärseite wird die halbe Eingangsspannung abgegriffen

und durch den 3. Leiter wiederum die halbe Spannung symmetrisch zur Erde hinzugefügt. Bei exakt gleicher Belastung der beiden Sekundäranschlüsse verschwindet der Mantelstrom theoretisch völlig. Auch bei schlechtem SWR bleibt die Unterdrückung erhalten. Bei ungleicher Belastung allerdings ergibt sich ein von der Unsymmetrie abhängiger Mantelstrom.

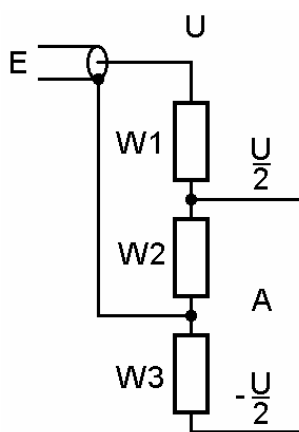


Bild 2a Spannungsbalun

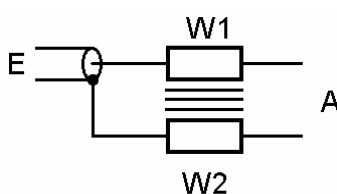


Bild 2b Strombalun

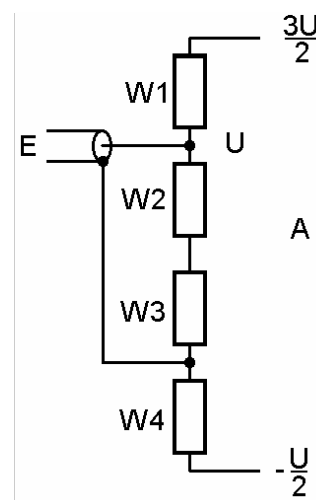


Bild 2c Guanella-Balun

Ganz anders dagegen funktioniert ein Strombalun (Bild 2b). Er wirkt ausschließlich auf Grund seiner Induktivität. Ein möglicher Mantelstrom induziert in der Wicklung des Baluns eine Spannung, welche die Ursache dieses Stromes zu schwächen sucht (Lenzsche Regel). Diese induzierte Spannung hebt aber die Unsymmetrie nicht auf, sondern vermindert sie nur, denn sie wird ja erst durch diese erzeugt. Am unsymmetrischen Eingang ist also stets ein Mantelstrom vorhanden, der nie Null werden kann. Eine andere Betrachtungsweise ist folgende: Die Wicklung 2 (Bild 2b) erhält vom angeschlossenen Dipolast die Spannung $U/2$ gegen die absolute Erde. Diese Spannung wird geteilt: ein Teil fällt am induktiven Widerstand dieser Balunwicklung ab und der Rest verteilt sich auf Kabel und Leitungen bis zur Erde. Der Operator, kapazitiv oder galvanisch mit dem Sendergehäuse verbunden, bekommt dabei auch seinen Anteil. Ein Mantelstrom ist also unvermeidbar; er kann nur durch Vergrößerung der Baluninduktivität vermindert werden.

Noch kritischer wird der Fall, wenn die Antenne nicht im Strombauch gespeist wird. Der Balun wird dann durch eine noch höhere Spannung beaufschlagt. Abhilfe kann nur eine hochinduktive Mantelwellendrossel schaffen, wie z. B. der „Kellermann-Balun“ (1).

Eine Zwitterstellung nimmt der als Guanella-Balun bekannte 1:4 Transformator ein (Bild 2c). Hier wird die Spannung U noch um $U/2$ zu $3U/2$ aufgestockt, während Null um $-U/2$ nach unten gelegt wird. Der Symmetriepunkt der Sekundärseite liegt dann bei $U/2$, was im Betrieb auf jeden Fall einen Mantelstrom hervorruft.

Der Mantelstrom hat natürlich einen Einfluss auf die Stromverteilung in den Dipolästen. Er verändert aber das Strahlungsdiagramm nur unwesentlich.

► Der Mantelstromsensor

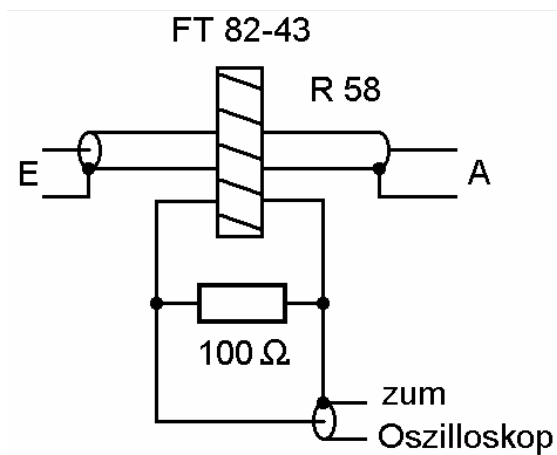
Der Sensor (Bild 3a) besteht aus einem Ringkern FT 82-43, auf den 15 Windungen Schaltdraht aufgebracht sind. Ein 100-Ohm Widerstand schließt diese Wicklung ab und macht den Sensor nahezu aperiodisch. Dieser Kern wird über das Koax geschoben. In der Wicklung wird eine zum Mantelstrom proportionale Spannung induziert, die mit einem Oszilloskop gemessen wird. Zum einmaligen Eichen

ÜBERTRAGUNGSTECHNIK

erzeugt man in einem durch den Kern gesteckten Draht einen HF- Strom bekannter Größe und misst die induzierte Spannung.

Um eine Bezugsgröße für den Mantelstrom zu haben, wird der durch 1,0 Watt Leistung in einem 50-Ohm Widerstand fließende Strom (0,14 A) gleich 0 dB gesetzt. Die gemessenen Mantelströme sind dann um ...dB geringer als die Bezugsgröße. Bei meinem Mantelstromsensor beträgt z. B. auf 3,5 MHz die durch 0,14 A induzierte Spannung 2,6 V_{ss}.

Die Tabelle 3b gibt die am Oszilloskop gemessene Spannung für die vier unteren Kurzwellenbänder an.



f	1,8	3,5	7,0	10	MHz
U _s	2,8	2,6	2,0	1,6	V _{ss}

Bild 3a Der Mantelstromsensor

Bild 3b Tabelle

► Die Messanordnung

Umfassende, reproduzierbare und mit der Theorie übereinstimmende Messungen lassen sich nur mit Hilfe eines geeigneten Laboraufbaues durchführen. Ich verwandte die im Bild 4 gezeigte Anordnung. Eine Blechplatte stellt die absolute Erde dar. Der einspeisende Messsender ist durch eine hochohmige Mantelstromsperre von der Schaltung entkoppelt, der Einspeisepunkt für die Hochfrequenz hat also kein festes Potential.

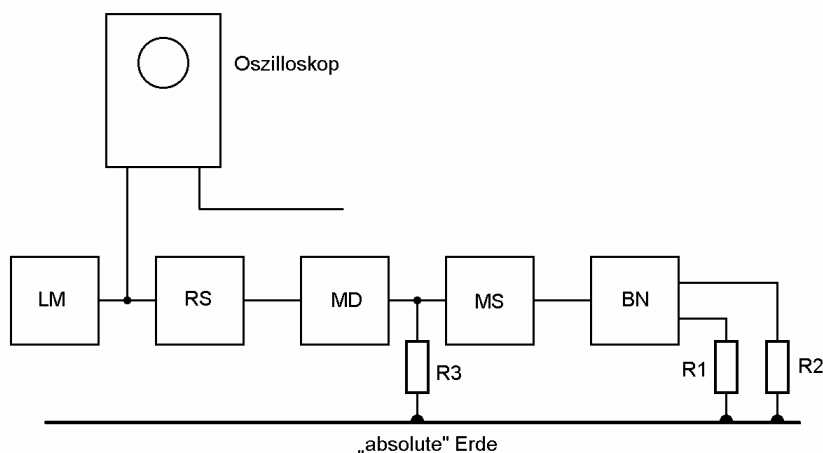


Bild 4 Laboraufbau

► Die Komponenten der Messeinrichtung

LM Leistungsmessender. Die Ausgangsleistung wird mit dem Oszilloskop auf genau 1,0 Watt eingestellt. Die angezeigte Spannung beträgt dann genau 20,0 V_{ss}.

RS Rücklaufsensor. Dieses „halbe“ SWR- Meter zeigt an, dass die Messanordnung korrekt mit 50 Ohm abgeschlossen ist

MD Hochinduktive Mantelwellendrossel zum Entkoppeln des Messsenders.

MS Mantelwellensensor. (siehe oben).

BN Balun zum Test

R1, R2 Widerstände zur Simulation der Eingangswiderstände der beiden Dipoläste. Ihre Summe entspricht stets 50 Ohm. Durch Variieren dieser Widerstände kann Unsymmetrie eingestellt werden.

R3 Dieser Widerstand von 47 Ohm ersetzt den Realteil der Eingangsimpedanz von Kabelmantel und Erdleitung, vom Ende des Speisekabels aus gesehen. Der Blindanteil dieser Impedanz kann beliebige, nicht vorhersehbare Werte annehmen, welche die oben erwähnte Eingangsimpedanz nur vergrößern können. R3 stellt also den ungünstigsten Fall dar.

► Baluns im Test

- Spannungsbalun unbekannter Herkunft. Querinduktivität parallel zum Eingang 24,4 μH .
- Strombalun 18 Windungen RG 174 auf Kern FT 82-43. Längsinduktivität zum Ausgang 263 μH .
- Strombalun nach DG0SA (2). 2x2x9 Windungen auf Ringkern mit $A_l = 116$. Längsinduktivität 13 μH .
- Strombalun nach DG0SA (2). 2x2x9 Windungen auf Kern FT 82-43. Längsinduktivität 62 μH .
- Balun 1:4. 2x2x18 Windungen auf 2 Ferritstäben. Querinduktivität parallel zum Eingang 29 μH .
- Koaxbündel. 20 Windungen RG 213 mit ca. 20 cm Durchmesser

► Durchführung der Messungen

Die beiden Ausgänge der Baluns wurden mit den Widerständen R1 und R2 gegen die absolute Erde belastet. Dabei wurde R1 stufenweise von 0 auf 50 Ohm erhöht und R2 jeweils verringert, so dass ihre Summe stets 50 Ohm betrug. Bei Balun 5 war die Widerstandssumme entsprechend 200 Ohm. Bei jeder Belastungsstufe wurde der Mantelstrom bestimmt, in Relation zu 0,14 A gesetzt und in dB umgerechnet. Das Diagramm (Bild 5) zeigt nun die Dämpfung des Mantelstroms in Abhängigkeit von der Symmetrie der Belastung. In der Praxis wird extreme Unsymmetrie nicht vorkommen.

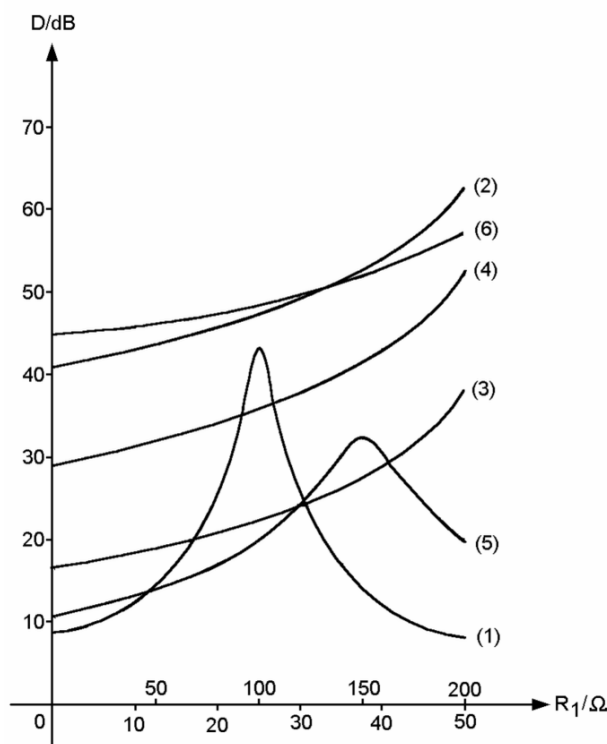


Bild 5 Die Mantelstromunterdrückung in Abhängigkeit von der Belastung

► Interpretation der Diagramme

Klar zu sehen ist, dass Spannungsbaluns bei entsprechender Belastung ein Dämpfungsmaximum zeigen. Schon bei geringen Abweichungen von der Symmetrie fällt die Dämpfung schnell ab. Beim 1:4- Balun liegt dieses Maximum bei einem Belastungsverhältnis von 150:50 Ohm, wie am Funktionsprinzip schon zu erkennen ist. Strombaluns dagegen zeigen einen wesentlich gleichmäßigeren Verlauf der Mantelstromdämpfung. Diese hängt aber wiederum von der Längsinduktivität des Baluns ab. Es ist also stets ein Exemplar mit hoher Induktivität zu wählen. Das Ansteigen der Kurven kommt daher, dass es davon abhängt, welcher der beiden Balunausgänge mit dem kleineren und welcher mit dem größeren Widerstand belastet wird.

► Welcher Balun ist der richtige?

Wie die Messungen zeigen, ist nur der Strombalun in der Lage, in einem großen Belastungsbereich Mantelwellen ausreichend zu unterdrücken. Er ist zwar nicht perfekt, liefert aber durchweg gute Ergebnisse, so dass ihm stets gegenüber dem Spannungsbalun der Vorzug zu geben ist. Auch ein Kabelbündel reicht völlig; nur ist sein Magnetfeld nicht in einem Kern konzentriert. Ein weiterer Vorteil des Strombaluns ist die Kerngröße: Während der Kern eines Spannungsbaluns stets die halbe Sendeleistung übertragen muss, darf ein Strombalun durch den Mantelstrom nur nicht in die Sättigung geraten. Es genügt daher ein weitaus kleinerer Kern. Wie Messungen an der eigenen Station zeigen, wird die Wirkung eines Baluns überlagert von der Einstrahlung der Sendeantenne in die Speiseleitung und durch die Ausstrahlung des nicht perfekt abgeschirmten Senders. Es sind also einige Versuche notwendig, die geeignete Stelle für einen (oder auch zwei) Baluns zu finden. Ein Mantelstromsensor leistet dabei wertvolle Hilfestellung.

ÜBERTRAGUNGSTECHNIK

Eines steht jedoch fest: Mantelstrom ist stets vorhanden. Erst wenn sich HF-Einstrahlung in die häusliche Elektronik bemerkbar macht oder Mikrofon- und Tasteingang sonderbare Effekte zeigen, sind weitergehende Experimente notwendig. Sonst verrichtet ein brauchbarer Strombalun seinen (beruhigenden) Job.

Literaturverzeichnis

- (1) FUNK 12/2001 Der Kellermann- Balun
- (2) CQ-DL SPEZIAL: Antennen, DG0SA: Warum funktionieren manche Baluns nicht so richtig?
- (3) FUNKAMATEUR-Leserservice
Jerry Sevick, W2FMI
Transmission Line Transformers
Building and Using Baluns and Ununs