

ENTWURF - Preliminary

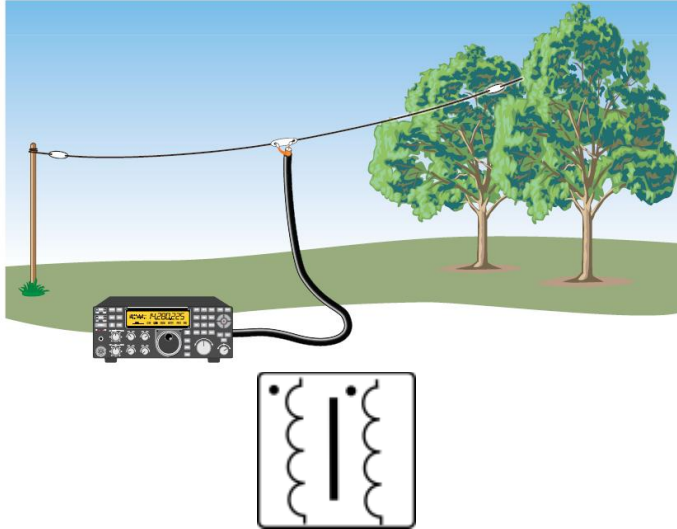
Teil 1: Grundlagen.

Ursachen von Mantelwellen.

Eigenschaften von Mantelwellensperren.

Teil 2: Praxis – Workshop

Aufspüren von Mantelwellen. Bauen, messen und vergleichen von unterschiedlichen Ferrit (Strom-BalUn) Mantelwellensperren.



Tech-Talk plus Workshop –

FACW e.V. - DARC OV Weinheim, A20

EMV-Referat Distrikt A - Baden

Mantelwellen-Gleichtaktdrossel-BalUn

Günter Fred Mandel, DL4ZAO

Grundlagen, Eigenschaften und Praxis von Gleichtaktdrosseln (Strom-BalUn) als Mantelwellensperre in Antennensystemen.

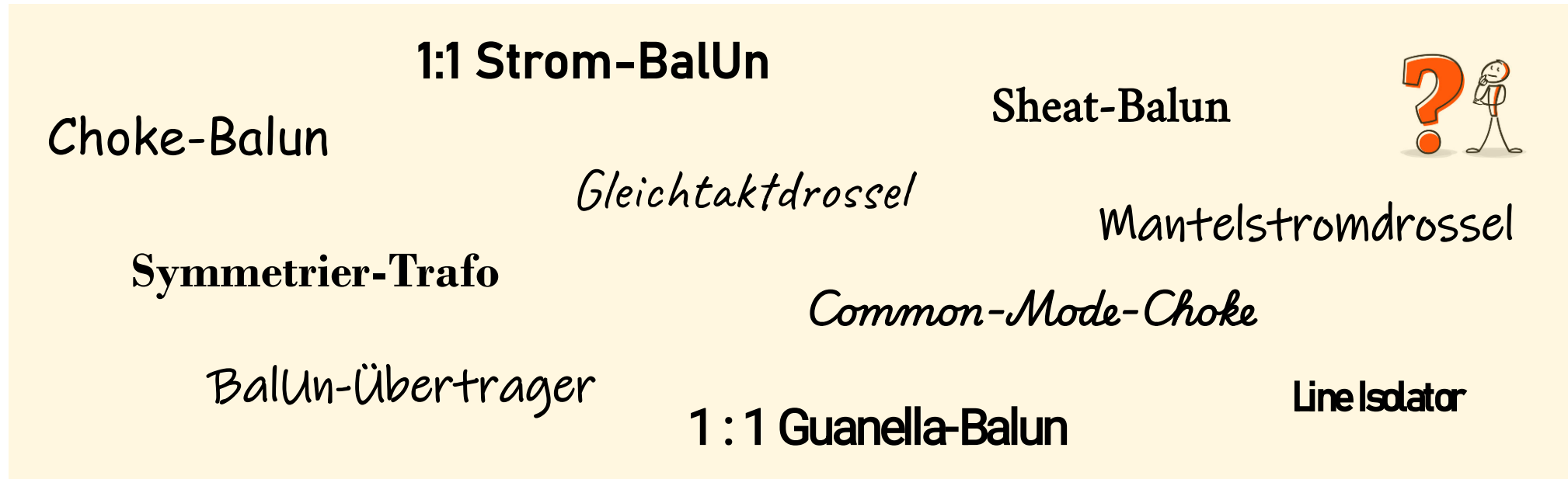
- Ursache von Mantelwellen
- Gleichtakt – Gegentakt – Symmetrie verstehen
- Was bewirkt eine Mantelwellensperre
- Eigenschaften von Mantelwellensperren
- Praxis: Aufspüren von Mantelwellen mit der Stromzange
- Praxis: bauen von Mantelwellensperren / BalUn
- Praxis: Messen der Kennwerte mit dem NanoVNA

Gleichtakt-Ströme auf der HF-Speiseleitung (Mantelwellen)

- **Unerwünschte Gleichtaktströme auf Koaxialkabeln äußern sich als Mantelwellen**
- **Gleichtakt-Ströme (englisch: Common-Mode-Currents) fließen nicht nur auf dem Schirm von Koaxialkabeln, es gibt sie genauso auf symmetrischen Paralleldraht-Leitungen oder verdrehten Leitungen.**
- **Eine Gleichtakt-Drossel (englisch: Common Mode Choke) wirkt als Mantelwellensperre. Sie unterdrückt Gleichtaktströme auf dem Kabelmantel und lässt gegenphasige Ströme im Koaxialkabel ungehindert passieren.**
- **Ein „1:1 Strom-BalUn“ ist eine Bauart einer Gleichtaktdrossel, wie sie häufig als Mantelwellensperre verwendet wird. Ein Strom-Balun erzwingt symmetrische Gegentakt-Ströme auf einer Leitung.**

Was davon ist (auch) eine Mantelwellensperre ?

Es gibt wohl kaum eine Komponente, die von Funkamateuren so häufig verwendet und gleichzeitig so oft missverstanden wird, wie die Gleichtaktdrossel. Uneinheitliche Bezeichnungen sorgen in der BalUn Mythologie zusätzlich für Konfusion



Jedes davon! Es sind alternative Bezeichnungen für elektrisch den gleichen Gesetzmäßigkeiten folgende Komponenten. Der verwendete Name wechselt manchmal mit dem jeweiligen Anwendungszweck, auf den das Bauteil besonders ausgelegt oder optimiert ist. Dennoch bleibt das Wirkprinzip gleich.

Neues aus dem BalUn Märchenwald

anonym

... ich hab an meinem Dipol nur einen Strom-Balun, keine Mantelwellen-Drossel....



Für die Wicklung einer Mantelwellensperre ist zwingend Koaxialkabel zu verwenden, denn nur auf einem Koaxialkabel können auf der Außenseite der Abschirmung überhaupt Mantelwellen auftreten.



Creating a Choke Balun

Note: although called a choke balun, this DOES NOT match the unbalanced feedline to the balanced antenna. It simply stops (or helps reduce) common mode currents flowing on the coax as a result of the miss-match at the feedpoint.



Serge Strobrandt ON4AA auf Hamwave.coms

... the common mode rejection of a current balun may not be sufficient for the connected coaxial cable at the lower frequency bands. An additional coaxial sheath current choke may be required



Begriffsklärung vorab

Im Folgenden wird der Begriff Gleichtakt-Drossel, englisch: Common Mode Choke (CMC) verwendet. Wir beschränken uns dabei auf die Form von Gleichtakt-Drosseln, wie sie in typischen Kurzwellen Antennensystemen zur Unterdrückung von unerwünschten Gleichtaktströmen (*Beim Koaxialkabel: Mantelwellen*) verwendet werden.

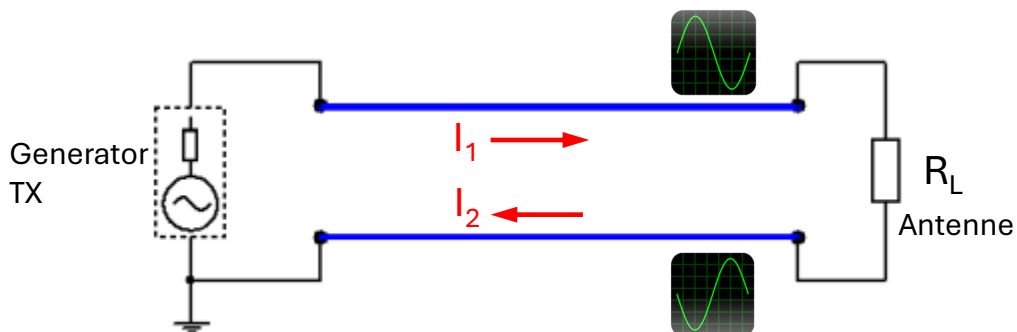
Als BalUn bezeichnet man üblicherweise das Bauteil, das den rückwirkungsfreien Übergang von symmetrischen (eng. Balanced) zu unsymmetrischen (eng. Unbalanced) Komponenten ermöglicht.

Weil „BalUn“ oft fälschlich als Bezeichnung für beliebige Arten von HF-Übertragern benutzt wird, wird der „1:1 Strom-BalUn“ als Mantelwellen-Sperre nachfolgend auch als „*Gleichtaktdrossel*“ oder in Grafiken abgekürzt als „*CMC*“ oder als *Mantelwellensperre* „*MWS*“ bezeichnet.

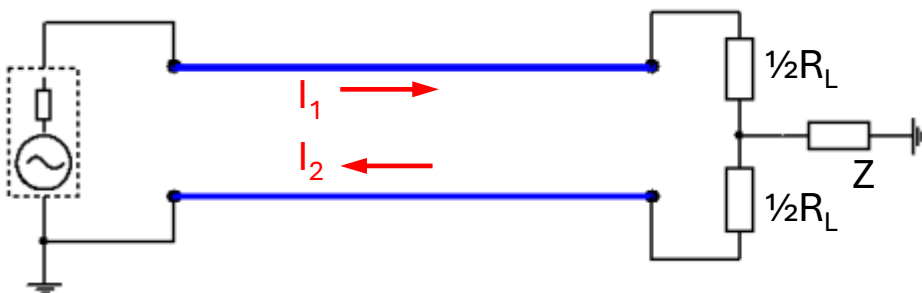
Der Haupt-Kennwert einer Gleichtakt-Drossel ist die frequenzabhängige Impedanz, die sie Gleichtakt-Strömen entgegenstellt. Die davon abhängige Drossel-Dämpfung ist ein Maß, um ihre Fähigkeit zur Unterdrückung von Gleichtaktsignalen zu quantifizieren - Gleichtaktunterdrückung (eng. Common Mode Rejection, CMR).

Abgrenzung: eine normgerechte Messung des „Gleichtakt-Unterdrückungs-Verhältnis“ (eng. Common-Mode-Rejection-Ratio, CMRR) erfordert strenggenommen eine VNA 3-Port Messung unter Berücksichtigung der Phasen- und Amplituden-Unsymmetrie. Dies ist für die amateurmäßige Quantifizierung der Gleichtaktunterdrückung einer Gleichtakt-Drossel als Mantelwellensperre für Speiseleitungen nicht notwendig.

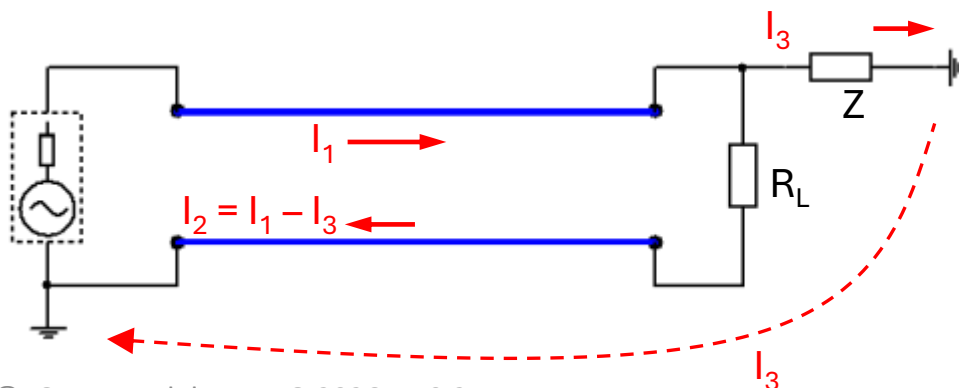
Gleichtakt – Gegentakt – Symmetrie



Symmetrische Last „floating“, in Bezug zu Erde. $I_1 = -I_2$, fließt aber in entgegengesetzter Richtung (180° gegenphasig). Gleiche aber entgegengesetzt gerichtete Ströme auf einer Übertragungsleitung heißen Gegentaktströme. Felder zwischen den Leitern kompensieren sich zu Null, die Leitung strahlt nicht.



Die Last hat zwar einen Bezug zu Erde, ist aber wegen der exakt 50 : 50 Aufteilung symmetrisch; auch hier: nur Gegentaktströme $I_1 = -I_2$



Unsymmetrische Last durch einseitige oder ungleiche Impedanz Z zu Erde. $I_2 = -(I_1 - I_3)$

Auf der Leitung tritt ein einseitiger Strom I_3 mit Rückweg über Erde auf. Die Stromverteilung auf der Leitung ist unsymmetrisch. Ströme die nur in einer Richtung fließen, heißen Gleichtaktströme. Sie führen zur Wellenablosung, die Leitung strahlt.



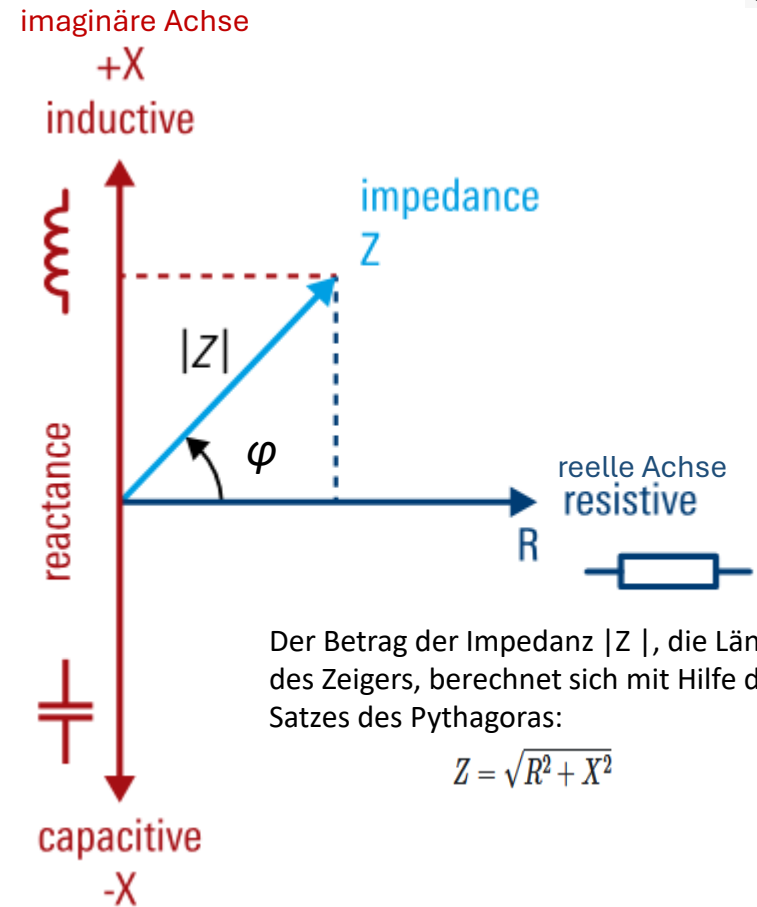
Wie war das nochmal mit der Impedanz ?



- Die Impedanz Z (deutsch: Scheinwiderstand) mit der Einheit Ω (Ohm) ist der elektrische Widerstand im Wechselstromkreis. Er setzt sich aus einem realen ohmschen Widerstand (R), und einem induktiven (X_L) oder kapazitiven Blind-Widerstand (X_C) zusammen.

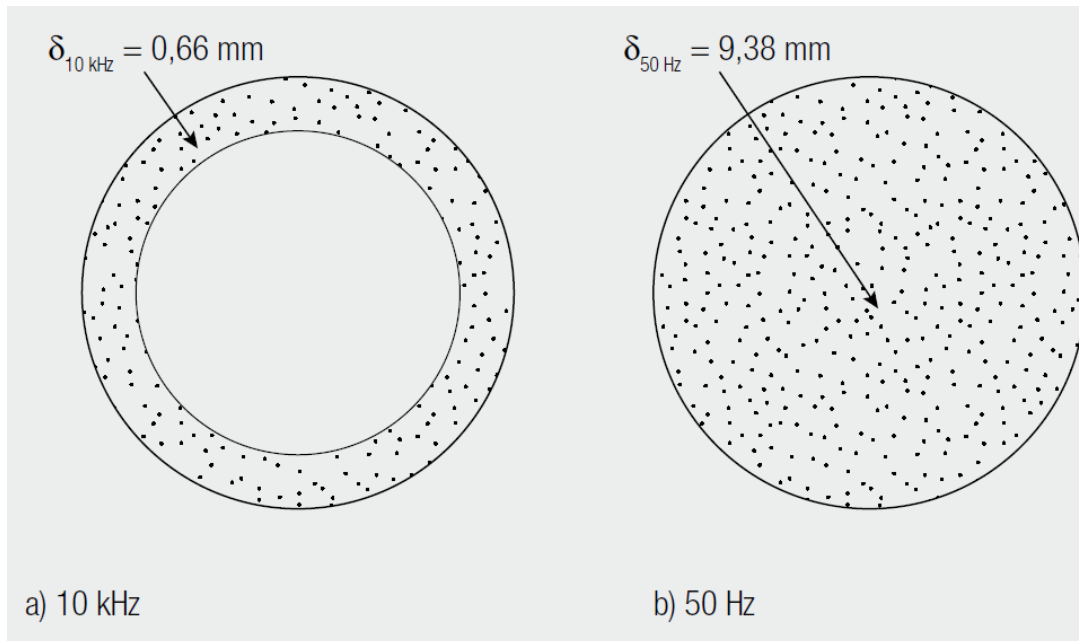
$$Z = R + jX$$

- Blindwiderstände (Reaktanzen) X_L und X_C kennzeichnet man durch ein vorangestelltes j („ j “ steht für imaginär).
- An einem reinen Blindwiderstand besteht zwischen Strom und Spannung eine Phasenverschiebung von 90° (X_L : $+90^\circ$, X_C : -90°).
- Ein Zahlenpaar, das aus einem Realteil und einem Imaginärteil besteht, nennt man eine komplexe Zahl.
- Die komplexe Impedanz wird alternativ auch geometrisch als Zeiger (Vektor) der Länge $|Z|$ mit dem Phasenwinkel φ dargestellt.



Reelle (resistive) Widerstandswerte werden im Impedanz-Diagramm auf der horizontalen Achse angetragen. Je nachdem ob der Blindwiderstand (Reaktanz) induktiv oder kapazitiv ist, wird ein Blindwiderstand jX rechtwinklig um 90° nach oben (+) oder unten (-) auf senkrechten „imaginären“ Achse angetragen. Der Phasenwinkel φ stellt die Phasendifferenz zwischen Spannung und Strom der Impedanz Z im Stromkreis dar.

Skin Effekt



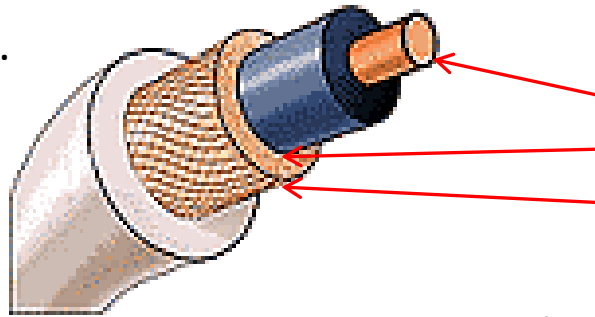
Grafik: Wikimedia

Frequenz	Eindringtiefe
16 kHz	0,524 mm
50 kHz	0,297 mm
160 kHz	0,166 mm
500 kHz	0,0938 mm
1,6 MHz	0,0524 mm
5 MHz	29,7 μ m
16 MHz	16,6 μ m
50 MHz	9,38 μ m
160 MHz	5,24 μ m
500 MHz	2,97 μ m
1,6 GHz	1,66 μ m

In einem von Wechselstrom durchflossenen Leiter ist die Stromdichte im Inneren des Leiters niedriger als in den Außenbereichen. Das Innere des Leiters trägt nahezu nicht mehr zur Stromleitung bei. Der für den Elektronenfluss effektiv wirksame Leiterquerschnitt verringert sich. Der Wirkwiderstand des Leiters nimmt zu.

Durch den Skin-Effekt verringert sich mit steigender Frequenz die Eindringtiefe des Wechselstromes in einem Leiter

Der „dritte Draht“ beim Koaxialkabel

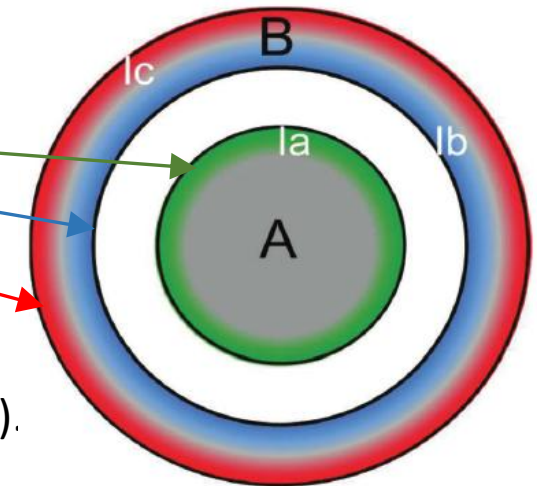


- Ein Koaxialkabel hat wegen des Skineffektes quasi drei Leiter:

Innenleiter A mit seiner Oberfläche

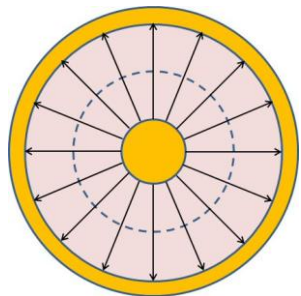
Der Schirm B auf seiner inneren Oberfläche

Der Schirm B auf seiner äußeren Oberfläche



Koaxialkabel im Querschnitt

- HF Ströme I_a und I_b im Inneren sind immer gleich groß aber entgegengesetzt gerichtet (Gegentakt, gegenphasig). Der Energietransport erfolgt als TEM Welle in einem elektromagnetischen Feld im Dielektrikum des Kabels.
- Der Strom I_c auf der Außenseite des Schirms fließt unabhängig von einem Strom I_b auf der Innenseite des Schirms. Beide Ströme interagieren nicht.
- Wegen des Skin-Effekts wirkt die äußere Oberfläche des Schirms für HF wie ein separater dritter Leiter. Als Erklärungs-Modell ist ein Koaxialkabel eine drei-Leiter Anordnung mit der Außenseite des Kabelschirms als „dritten Draht“.

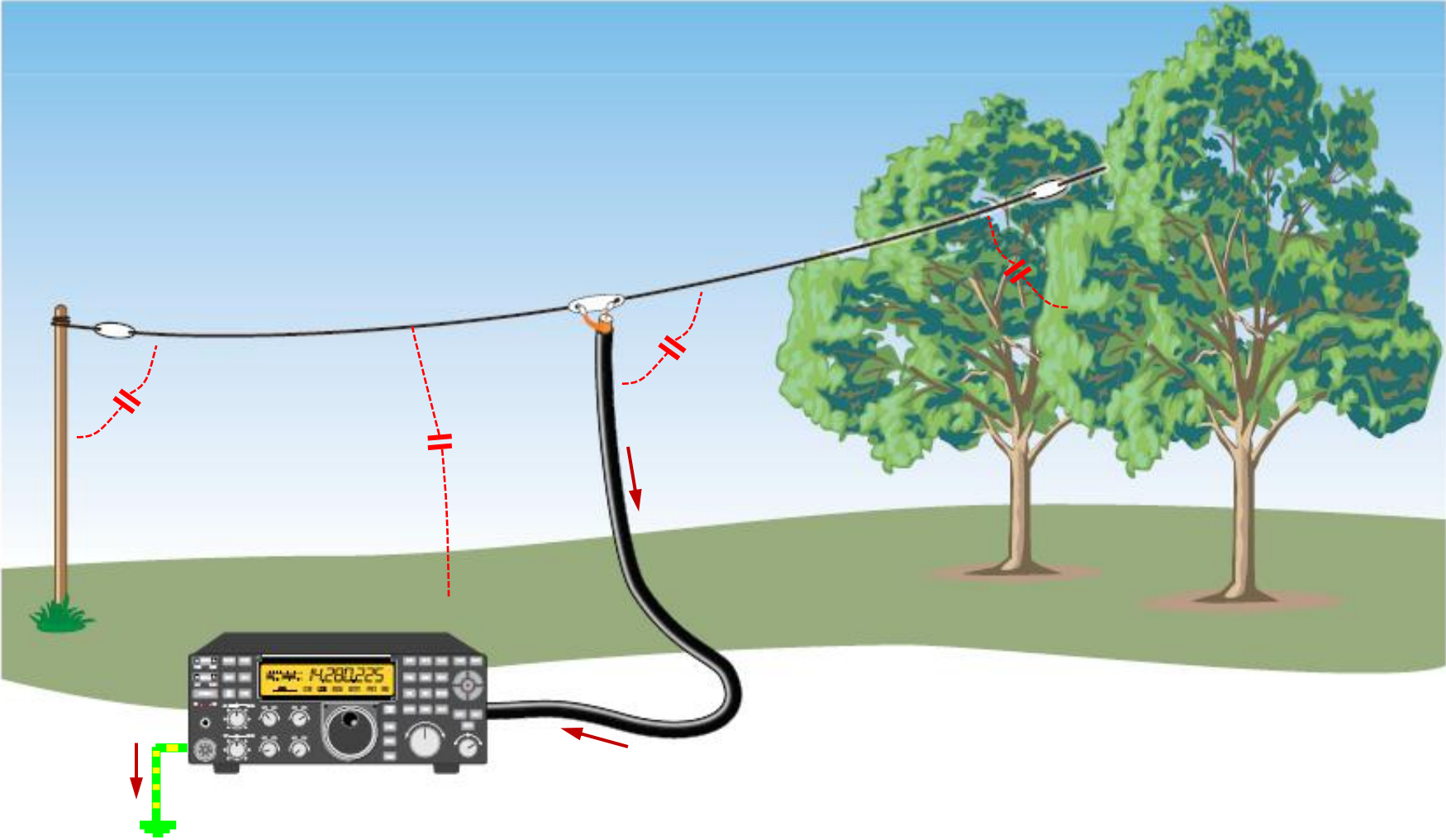


TEM Feld im Kabelinneren

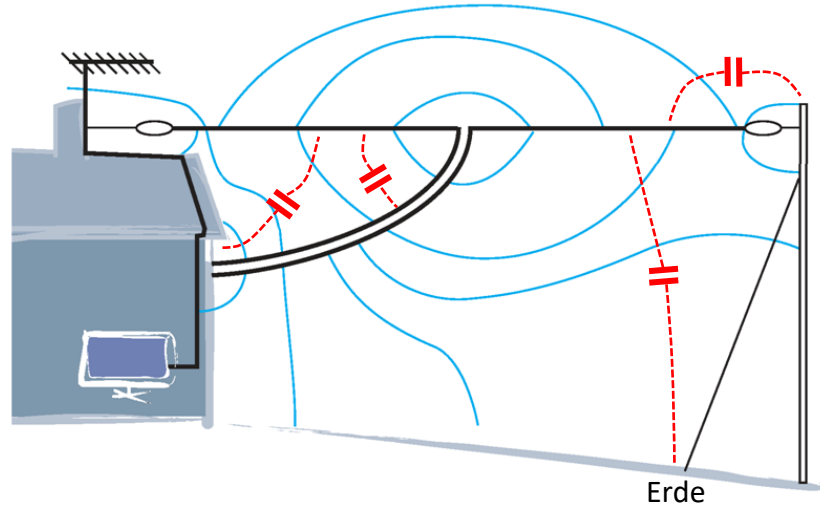
Der „dritte Draht“ auf der Schirm Außenseite hat einen anderen, größeren Verkürzungsfaktor als das Koaxialkabel!



Mantelwellen ?



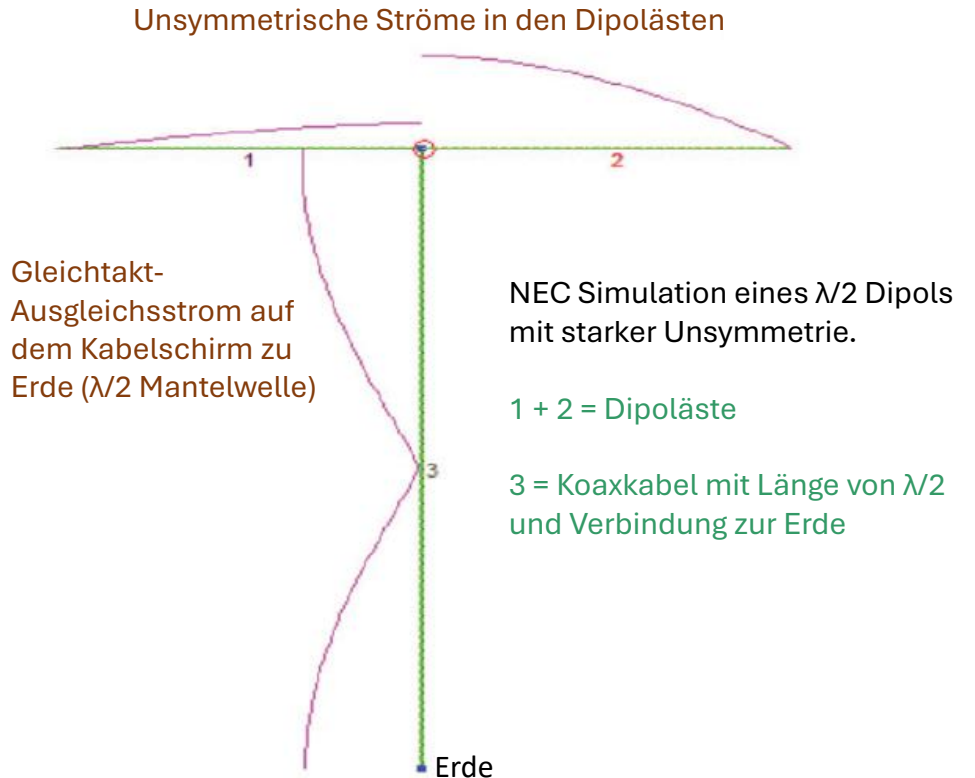
Un-Symmetrie als Ursache von Mantelwellen-Strömen



Reale Antennen sind selten symmetrisch in Bezug zu Speiseleitung und Erde. Gebäude, Bewuchs, Höhenunterschiede, verursachen unterschiedliche Impedanzen der Dipoläste.

Dies führt zu unterschiedlichen Strömen und zu Potentialunterschieden der Dipoläste in Bezug zu Erde.

Potentialunterschiede verursachen beim Koaxialkabel Ausgleichsströme auf dem Kabelschirm – Mantelwellen.



Gleichtakt-Ausgleichsstrom auf dem Kabelschirm zu Erde ($\lambda/2$ Mantelwelle)

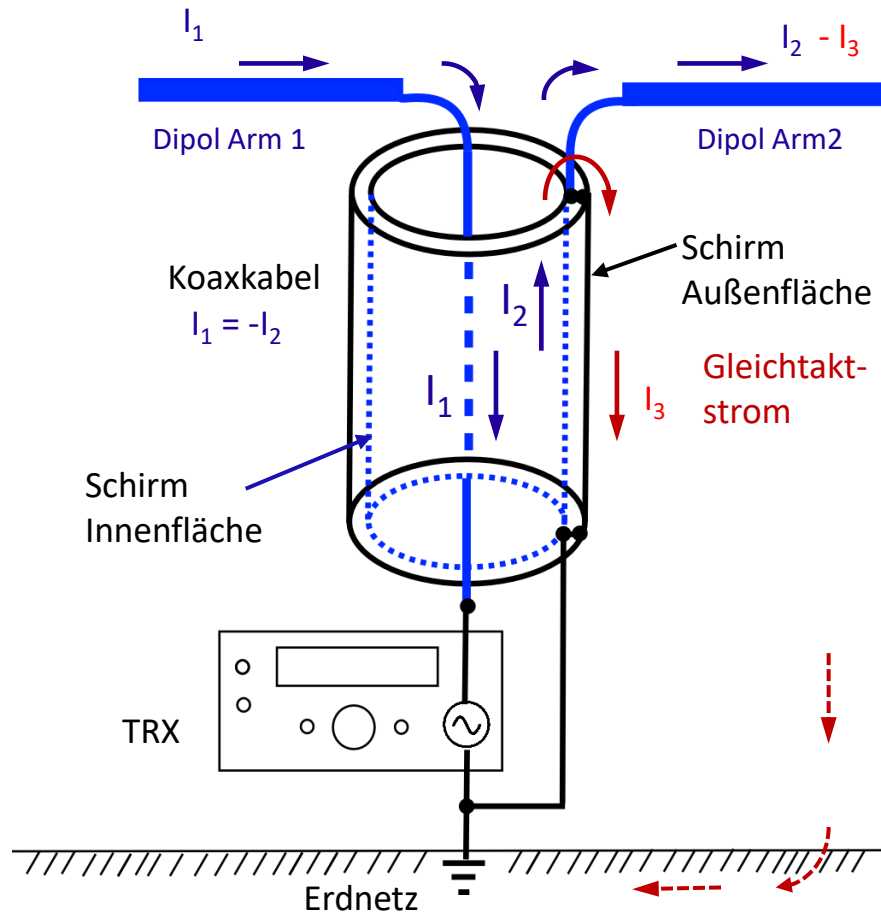
NEC Simulation eines $\lambda/2$ Dipols mit starker Unsymmetrie.

1 + 2 = Dipoläste

3 = Koaxkabel mit Länge von $\lambda/2$ und Verbindung zur Erde

Der Kabelschirm am Dipol Fußpunkt liegt hier in einem Strommaximum und stellt eine niedrige Impedanz dar. Ein großer Teil des Stromes, der in den Dipolast 1 fließen sollte, fließt stattdessen über den Kabelmantel zu Erde. Der Schirm wirkt als „dritter Draht“ und strahlt als Antenne. Aus dem Dipol wird faktisch ein „Tripol“.

Unsymmetrie – führt zu Strom auf der Schirm-Außenfläche



- HF fließt als Strom I_1 (Innenleiter) und Strom I_2 (Innenseite des Koaxschirms) zur Antenne.

- I_1 und I_2 im Koaxkabel sind immer im Betrag gleich und entgegengesetzt gerichtet (Gegentakt)

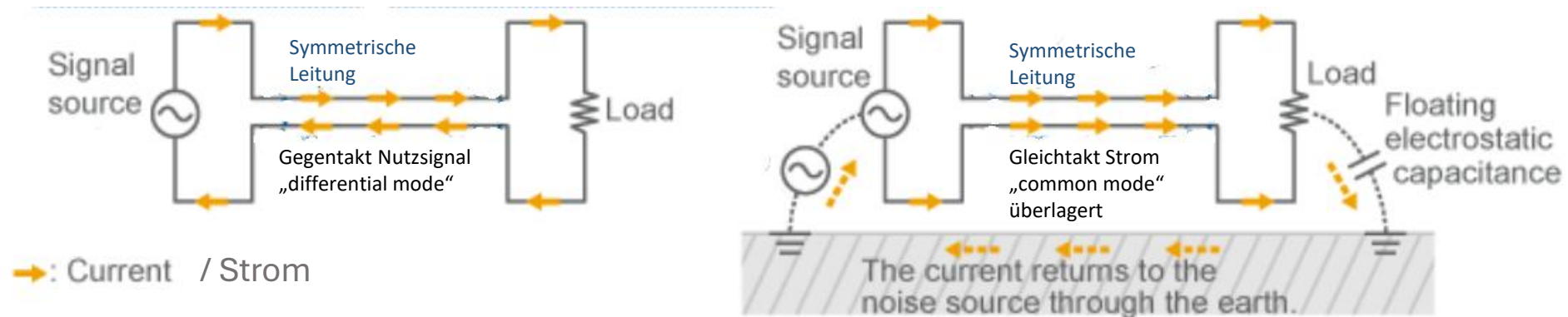
- Der Außenmantel des Schirms wirkt als separater Leiter zwischen Dipol-Arm 2 und Erde.

- Unsymmetrie der Antenne führt zu einem Potentialunterschied, einer Spannungsdifferenz in Bezug zum Erde-Potenzial.

- Die Spannungsdifferenz verursacht einen HF-Gleichtaktstrom (I_3) der auf dem Außenmantel des Koaxkabels zu Erde fließt. Es bildet sich eine Mantelwelle. Aus dem Dipol wird ein "Tripol".

Der Schirm strahlt als Antenne!

Common Mode Strom auf der Paralleldrahtleitung



Auf einer symmetrischen Speiseleitung fließt im Idealfall ein „Differential-Mode“ Gegentakt-Nutzsignal ohne Erde-Bezug. Die Ströme auf beiden Leitern sind symmetrisch: gleich groß aber entgegengesetzt gerichtet. Die Felder zwischen den Leitern heben sich zu Null auf, die Leitung strahlt nicht.

„Common-Mode“ Gleichtakt-Ströme können jedoch auch auf einer symmetrischen Speiseleitung fließen. Gleichtaktströme auf einer Paralleldraht-Leitung (balanced line) werden durch unsymmetrische Lastimpedanzen, Kopplungen und Potenzialunterschiede der Leiter in Bezug zu Erde verursacht. Sie fließen auf beiden Leitern und nehmen den Rückweg über die Erde.

Diese Gleichtaktsignale können durch das Einfügen einer Gleichtakt-drossel unterdrückt werden. Wegen des höheren Wellenwiderstandes einer symmetrischen Speiseleitung ist eine höhere Drossel-Impedanz als in einer 50 Ω Umgebung erforderlich.

Mantelwellen – Entstehungs-Mechanismen

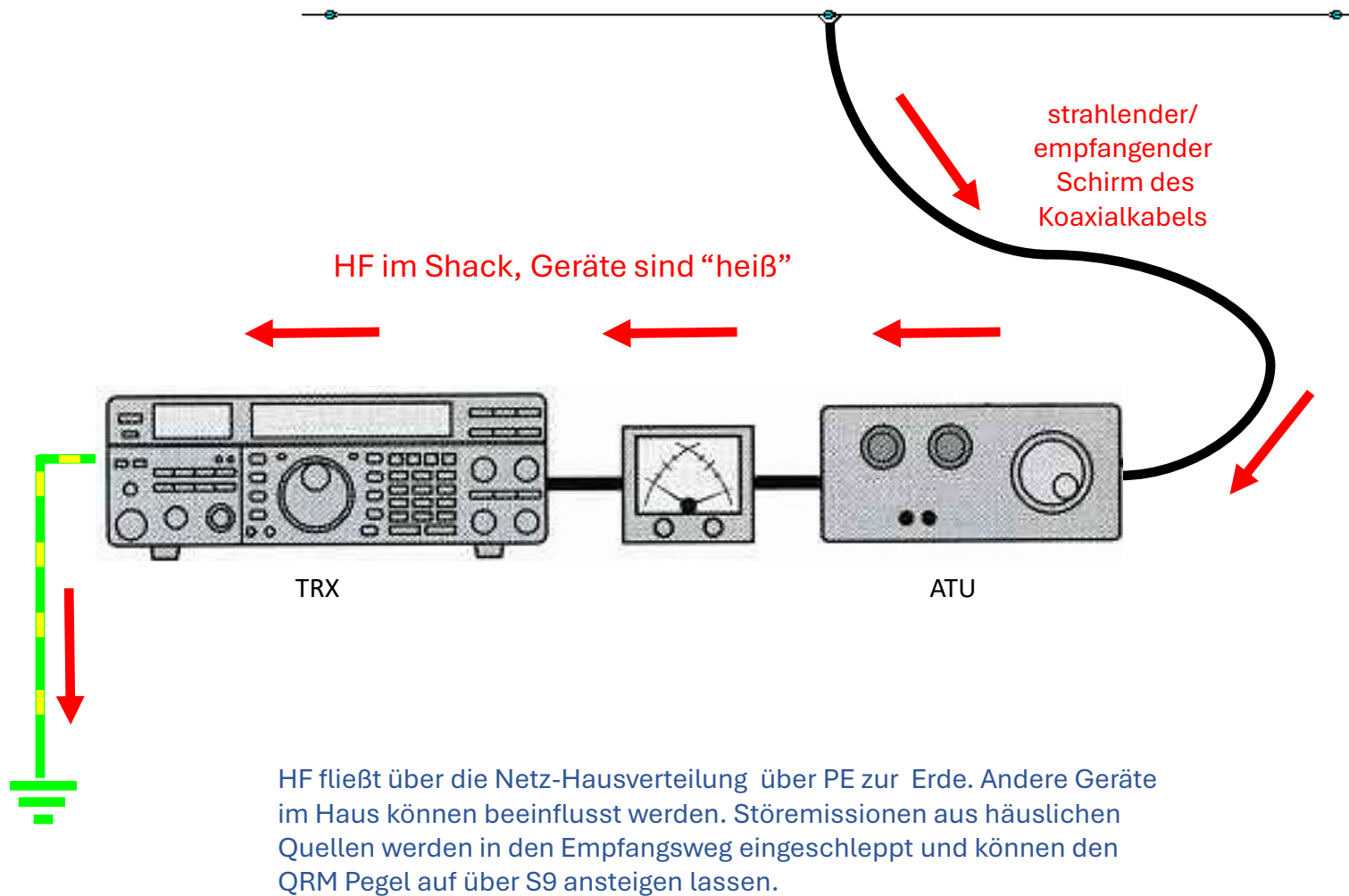
Geleitet - Mantelströme sind Ausgleichsströme durch Potenzialunterschiede wegen:

- Unsymmetrie der Last (Antenne) gegen Erde
- Unsymmetrie der Lastimpedanzen

Strahlungs-gekoppelt

- Einstrahlungen auf die Leitung durch elektromagnetisches Feld
(Mantelwellen auf der Leitung trotz Symmetrier- BalUn direkt an der Antenne)

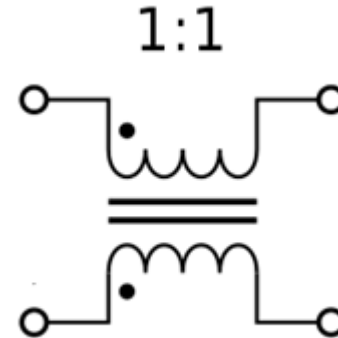
Mantelwellenströme sind unerwünscht (meistens)



Unerwünschte Folgen:

- Als Antenne strahlendes und empfangendes Koaxialkabel. Abgestrahlte Leistung steigt quadratisch mit dem Strom!
- Verzerrung des Antennen-Richtdiagramms und Beeinflussung des VSWR durch den unbeabsichtigten „dritten Antennendraht“
- RFI Störungen von Elektrogeräten durch vagabundierende Hochfrequenz im Hausnetz.
- Hoher Störpegel beim Empfang

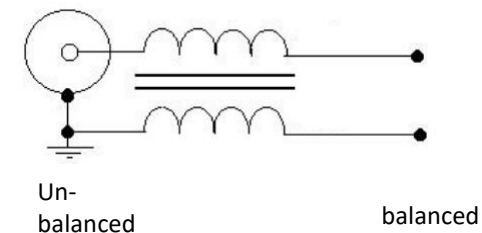
Wir brauchen eine Mantelwellen-Sperre !



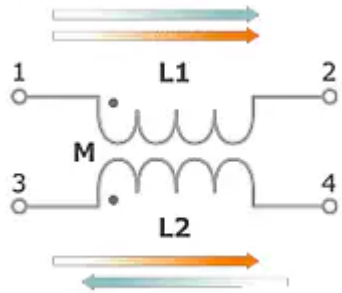
Schaltbildsymbol einer
Gleichtaktdrossel

- Eine Gleichtaktdrossel an der Antenne und in der Speiseleitung unterbindet, dass HF-Ausgleichsströme (Mantelströme) über Wege fließen, die sie nicht sollen.
- Sie sperrt unerwünschte Gleichtaktströme und lässt Gegentaktströme ungehindert passieren.

Eine Gleichtakt-Drossel wirkt am Übergang zwischen symmetrischen (balanced) und unsymmetrischen (unbalanced) Schaltkreisen als Strom-BalUn bzw. als Symmetrier-Trafo. Sie erzwingt an beiden Ports symmetrische, im Betrag gleiche aber entgegengesetzt gerichtete „Gegentakt“ Ströme.



Gleichtaktdrossel Wirk-Prinzip



Gleichtaktdrossel - common mode choke



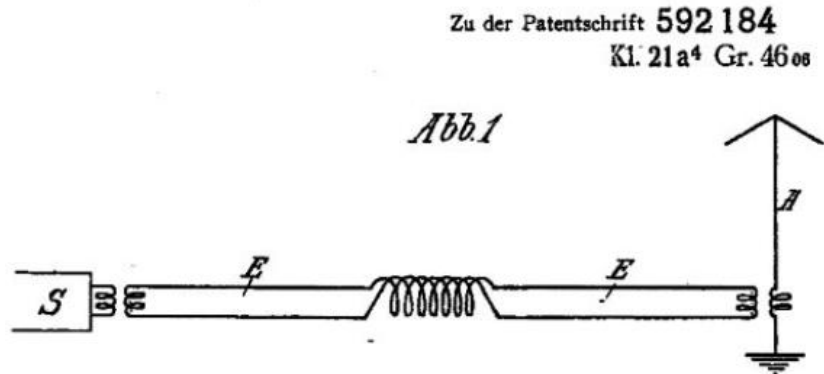
Gleichtakt - Common mode



Gegentakt - differential mode

- Eine Gleichtaktdrossel ist eine Spule mit zwei magnetisch gekoppelten Wicklungen auf einem gemeinsamen Kern; ein Leitungs-Transformator. Gleichtakt-Strömen wird eine hohe Drossel-Impedanz entgegengesetzt, während das Gegentakt Nutzsignal ungehindert passieren kann.
- Gleichtakt-Ströme fließen in beiden Spulen-Leitern in die gleiche Richtung, erzeugen sich addierende Magnetfelder im Kern und werden durch den frequenzabhängigen induktiven Widerstand X_L der Drossel stark gedämpft.
- Gegentakt-Signale fließen in den Leitern entgegengesetzt, die entgegengesetzt gerichteten Magnetfelder im Kern heben sich auf. Es entsteht kein induktiver Blindwiderstand, der das Gegentaktsignal dämpft.

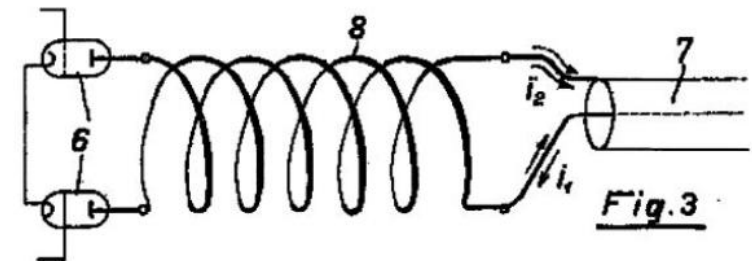
Wer hat's erfunden?



Dr. Felix Gerth wickelt eine bifilare (zweidrähtige) Spule und erfindet damit die *Gleichtaktdrossel*. Indem sie gleichphasigen (Gleichtakt-) Strömen auf einer hochfrequenten Übertragungsleitung eine hohe Reaktanz entgegenstellt aber für gegenphasige (Gegentakt-) Ströme in ihren beiden Leitern transparent ist und diese ungehindert fließen lässt, erzwingt sie Stromsymmetrie auf der Leitung und verhindert, dass diese Teil der strahlenden Antenne wird und Ausgleichsströme über unerwünschte Pfade fließen. Seine Erfindung wird 1932 als "*Energieleitung für Antennen*" für die C. Lorenz AG als Patent angemeldet (DE 592184).

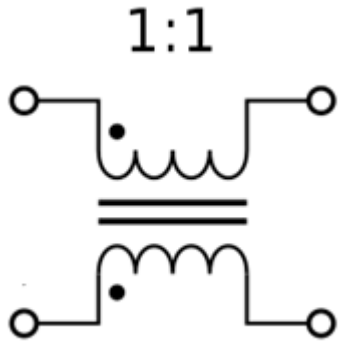
Der Schweizer **Gustav Guanella** (er)findet dieselbe Gleichtaktdrossel und meldet sie 1942 als "*Spulenähnliches Leitungsgebilde mit stetig verteilten Leitungskonstanten*" zum Patent an.

Das Neue an seinem Patent ist nicht die Gleichtaktdrossel an sich, sondern wegen ihrer Strom-symmetrierenden Eigenschaft die Anwendung als Bindeglied zwischen symmetrischen und unsymmetrischen Netzwerken, indem sie unerwünschte Ausgleichsströme unterdrückt. Guanella beschreibt als ihre Anwendung erstmals als das, was wir heute "**BalUn**" (Balanced-Unbalanced) Übertrager nennen, betrachtet dabei die bifilare Wicklung selbst als aufgewickelte Übertragungsleitung und berücksichtigt auch deren Wellenwiderstand.

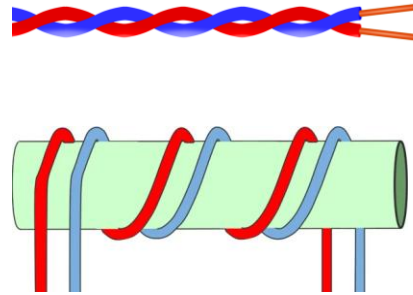


Quelle DJ5IL [5]

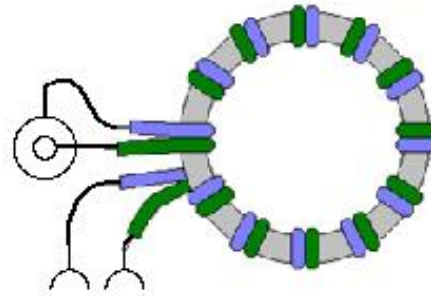
Alles Gleichtakt oder was?



Schaltbildsymbol einer
Gleichtaktdrossel /
1 : 1 Guanella Trafo



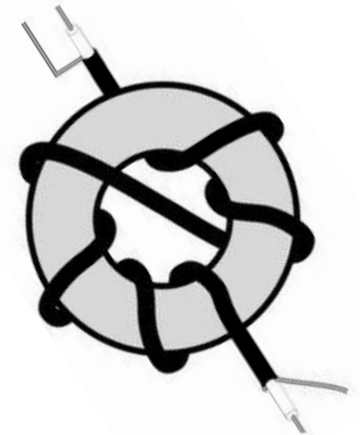
bifilare oder bifilar-
verdrillte Leitung. Auf
Ferritstab gewickelt oder
ohne Kern als Luftspule.



bifilare Leitung auf
einem Ferrit-Ringkern



Koaxialkabel auf einem Ferrit-
Ringkern oder Doppellochkern.
Durchgehend oder mit „cross-
over“ Wicklung nach J. Reiser
W1JR (unter Beibehaltung des
Wickelsinns !)



Koaxialkabel-Wicklung als BalUn / Gleichtaktdrossel



Gleichtaktstrom ist definitionsgemäß die Vektor-Summe der beiden einzelnen Leiterströme. Indem die beiden Ströme nahezu gleich aber entgegengesetzt sind, zwingt ein "Strombalun" den Gleichtaktstrom auf nahezu Null. Ein (1 : 1 Guanella) Strom-Balun wirkt als Gleichtaktdrossel.

Bei Koaxialkabel sind die Gegentaktströme im Inneren gleich aber entgegengesetzt und damit „unsichtbar“. Die Impedanz der Wicklung wirkt nur auf Gleichtaktstrom auf dem Mantel.

- Wickelt man eine Paralleldraht-Leitung oder ein Koaxialkabel mit der gleichen Anzahl von Windungen auf einen identischen Kern, ist auch die Impedanz für Gleichtakt-Ströme im Idealfall gleich.

Anforderungen an eine Gleichtaktdrossel

- **Unterdrückt unerwünschte Gleichtaktströme. (Kennwert: Gleichtakt-Unterdrückung, CMR)**

Als Gleichtaktdrossel stellt sie über den geforderten Nutzfrequenzbereich für Gleichtaktstrom (Mantelwellen) eine hohe Impedanz mit einem hohen induktiven Widerstand X_L entgegen. Der Haupt-Kennwert ist die Drossel-Impedanz Z_w der Wicklung, (*engl. Choking-Impedance*). Sie bestimmt die Drosseldämpfung bzw. die Gleichtakt-Unterdrückung, (*eng. Common-Mode-Rejection – CMR*).

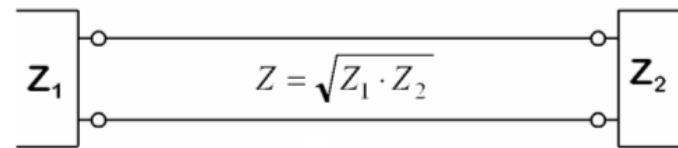
- **Lässt Nutzsignal-Gegentaktströme ungehindert passieren (Kennwerte: S21, S11)**
 - minimale Durchgangsdämpfung (S21) über den geforderten Nutzfrequenzbereich
 - keine Verschlechterung des VSWR (S11) auf der Leitung im geforderten Frequenzbereich
- Ermöglicht als Symmetrier-Trafo einen rückwirkungsarmen Übergang zwischen symmetrischen (balanced) und unsymmetrischen (unbalanced) System-Komponenten (BalUn).
- Ge-setztes Power Limit ohne Sättigung oder Überhitzung des Kerns. Verursacht keine Intermodulation durch Unlinearitäten des Ferrits.

Daumenregel für die Wicklungs-Impedanz

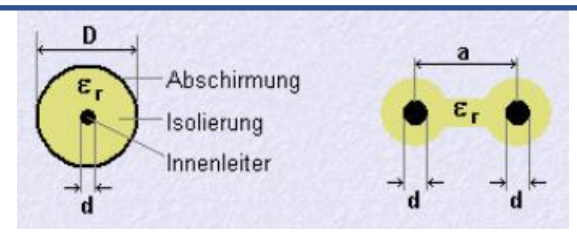
- Die Wicklungsimpedanz Z_W ist die Impedanz, die die Wicklung der Gleichaktrossel hätte, wenn sie aus einem einzigen Leiter bestehen würde. Für eine Unterdrückung von Gleichtaktströmen soll Z_W mindestens das 20-fache, wie die zu verdrosselnde Impedanz betragen. Der maßgebliche induktive Widerstand X_L der Wicklungsimpedanz beträgt:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

- Um Fehlanpassung (Beeinträchtigung des VSWR) zu vermeiden, muss der Wellenwiderstand Z der als Wicklung verwendeten HF-Leitung dem geometrischen Mittel zwischen Ein- und Ausgangs-Impedanz des Balun bzw. der Gleichaktrossel entsprechen. Die aufgewickelte Leitung so kurz wie nötig halten.

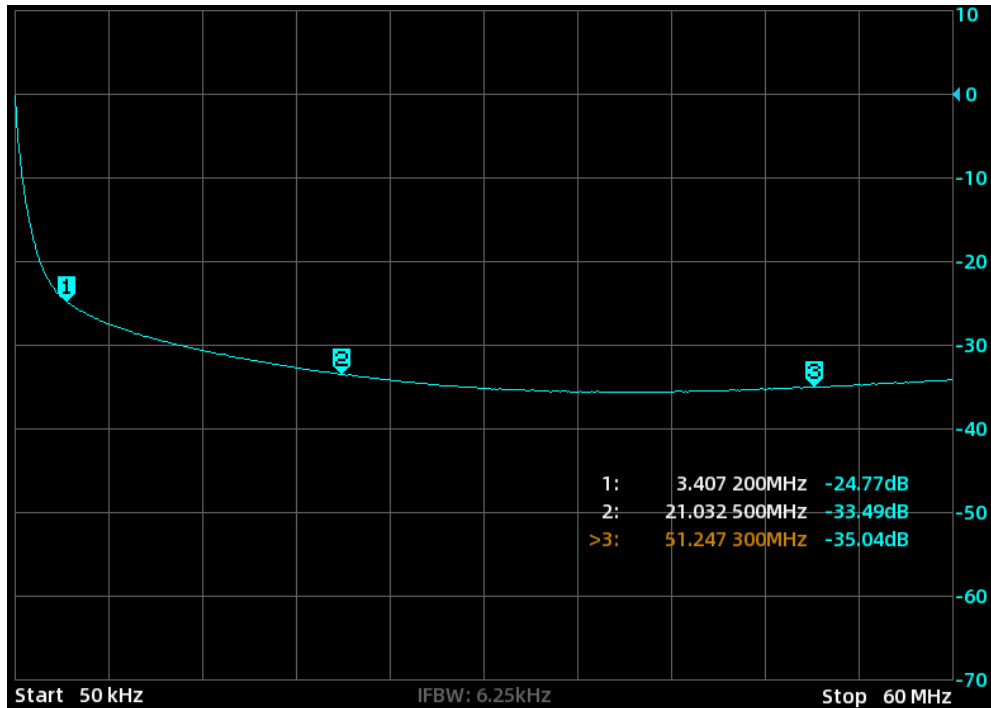


Der Wellenwiderstand Z_0 einer Leitung wird bestimmt vom Verhältnis zwischen dem Durchmesser der beiden Leiter und dem Abstand zwischen den Leitern, sowie der Dielektrizitätszahl ϵ_r des Materials zwischen den Leitern. Handelsübliche PVC isolierte Lautsprecherlitze $2 \times 0,75 \text{ mm}^2$ hat z.B. etwa 100Ω Wellenwiderstand.



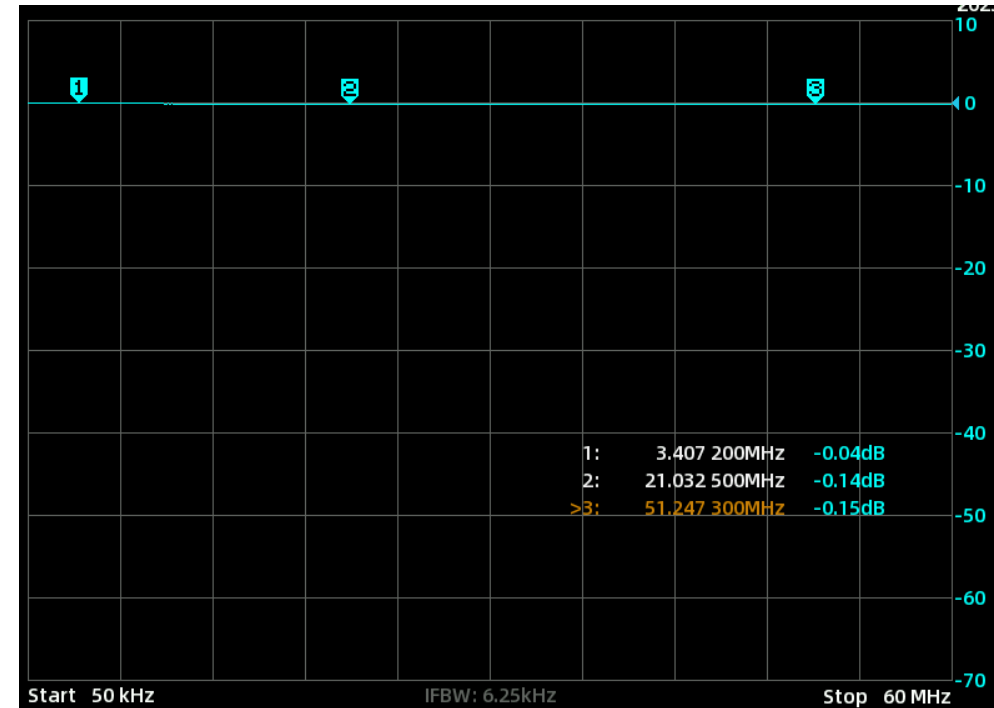
Kennwerte eines BalUn / Gleichtaktdrossel als Messkurve

Sperrt Gleichtaktsignale



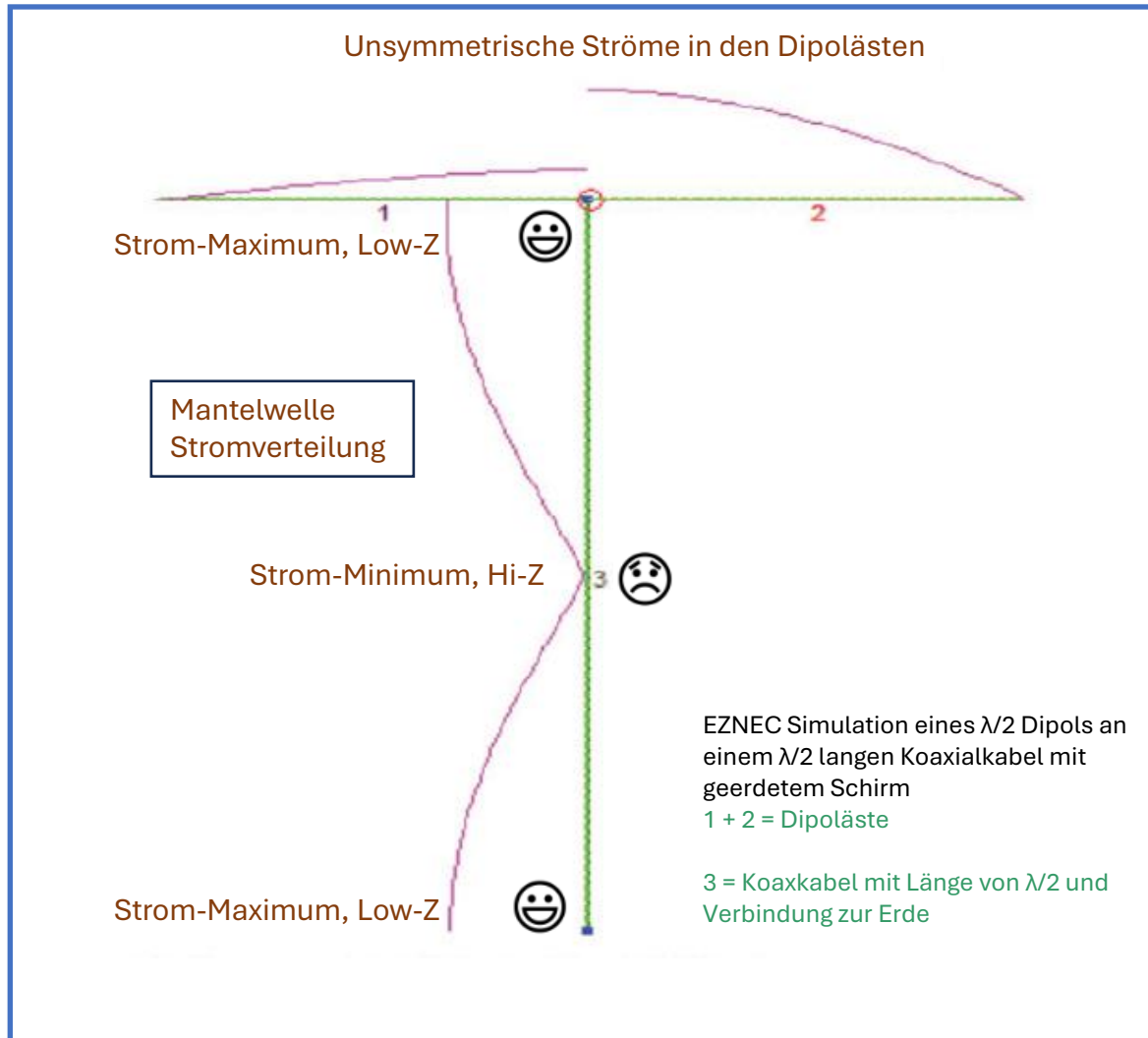
Einfügedämpfung für Gleichtaktsignale, S21 in dB in der 50 Ω Umgebung. (als Vergleichsmaß für die Gleichtaktunterdrückung)

Lässt Gegentaktsignale ungehindert passieren



Durchgangsdämpfung für Gegentaktsignale S21 in dB

Wo wirkt eine Gleichtaktdrossel am effektivsten ?



- Mantelwellenströme bilden eine stehende Welle
- Strom-Maxima sind Punkte mit niedriger Impedanz
- Strom-Minima sind Punkte mit hoher Impedanz
- Beste Wirkung „dort wo Strom fließt“. An Stellen mit niedriger Impedanz (Lo-Z), nahe am Strom-Maximum der Mantelwelle.
- Je größer die Drossel-Impedanz Z_W einer Gleichtaktdrossel, desto besser ist die Sperrwirkung.

beachten: wegen unterschiedlicher Dielektrika ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit einer Welle im Inneren des Koaxialkabels verschieden zu dem auf dem Außen-Mantel. Der Verkürzungsfaktor des Schirms beträgt ca. 0,95..0,99 im Vergleich zum Koaxkabel (ca. 0.65 ..0,8). Bei gleicher Frequenz ist daher die Wellenlänge λ einer Mantelwelle länger als die des Gegentakt Signals im Inneren des Koaxialkabels.

Strom-BalUn alias Gleichtaktdrossel und Mantelwellensperre

Unter einem „Strom Balun“ versteht man eine bestimmte Bauform einer Gleichtaktdrossel. Der Begriff „*Strombalun*“ wurde von Roy Lewallen, W7EL 1985 in seinem ARRL Artikel "*Baluns: What They Do and How They Do It*" geprägt [6], weil er an seinen Ports symmetrische Gegentakt-Ströme erzwingt.

In der Fachliteratur wird diese Bauform als 1:1 Guanella Leitungs-Transformator (Transmission Line Transformer) bezeichnet. Nach Guanella besteht die Wicklung der Gleichtaktdrossel aus einer HF-Leitung mit einem definierten Wellenwiderstand Z_0 . Die Leitung soll viel kürzer als $\lambda/4$ sein.

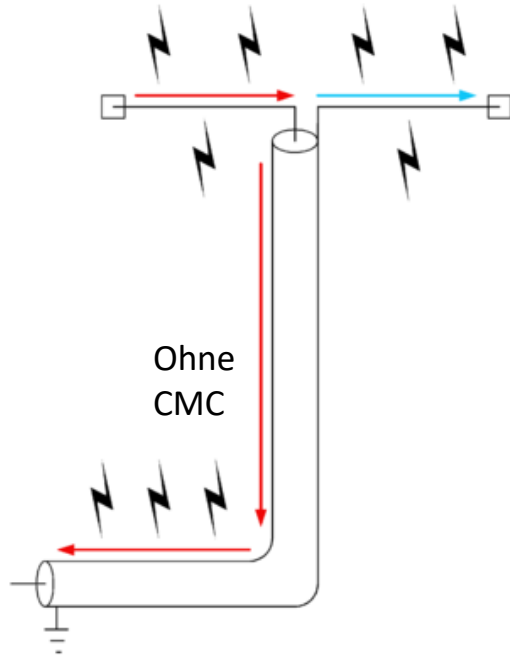
Für maximale Breitbandigkeit der Anpassung (für ein gutes VSWR) muss der Wellenwiderstand Z der aufgewickelten HF-Leitung eines Guanella Strom-BalUn dem geometrischen Mittel zwischen Ein- und Ausgangs-Impedanz an seinen Anschlüssen entsprechen.

$$Z_{Leitung} = \sqrt{Z_{Ein} * Z_{Aus}}$$

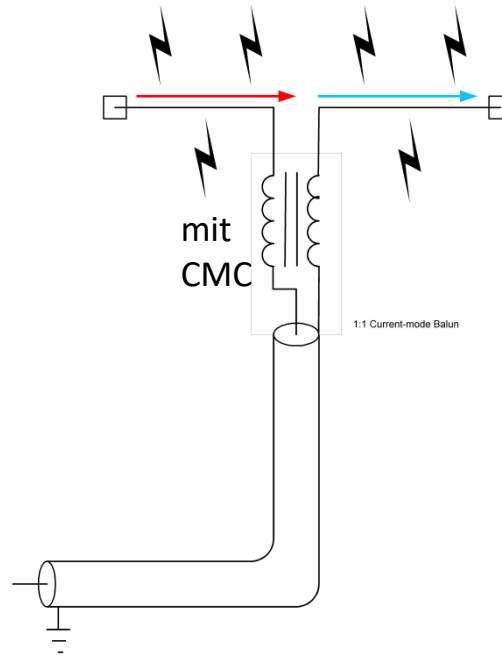
In einem System mit 50 Ω Eingangs- und Ausgangsimpedanz wäre demnach für die Wicklung eine Leitung mit einem Wellenwiderstand von 50 Ω gefordert: $Z_{Leitung} = \sqrt{50\Omega * 50\Omega} = 50\Omega$

Ein 50 Ω Koaxialkabel eignet sich daher in vielen Fällen gut als Leitung für einen Strom-BalUn.

Fazit: Gleichtaktdrosseln unterdrücken Mantelwellen



Der Schirm wirkt wie ein zusätzlicher strahlender Antennendraht. Aus dem Dipol wird ein Tripol



- Durch Mantelwellen wird der äußere Schirm des Koaxialkabels ungewollt zum strahlenden Teil der Antenne.
- Eine Gleichtaktdrossel (engl. Common-Mode-Choke, CMC) unterbindet Mantelwellen. Sie setzt Gleichtaktströmen auf dem Schirm des Koaxialkabels eine hohe Impedanz entgegen und erzwingt symmetrische Gegentakt-Ströme im Inneren des Koaxialkabels.
- Die Gleichtaktdrossel wirkt am besten, wenn sie an einer Stelle mit niedriger Impedanz, in einem Strom-Maximum der Mantelwelle eingefügt wird. Dort ist die Gleichtaktunterdrückung (CMR) am größten.

Eine Gleichtaktdrossel erzwingt symmetrische Ströme auf der Leitung, sie wirkt als Strom-BalUn

Vergleichsmessung zweier Gleichtaktdrosseln / MWS

Marker 1

Frequency: 1.89097 MHz	VSWR: 36.478
Impedance: 1.42k-j759 Ω	Return loss: -0.476 dB
Series R: 1.4165 kΩ	S11 : 0.947
Series L: -63.905 μH	S11 Phase: -1.69°
Series C: 110.85 pF	S21 Gain: -23.591 dB
Parallel R: 1.8235 kΩ	S21 Phase: -39.58°
Parallel X: 24.74 pF	

Marker 2

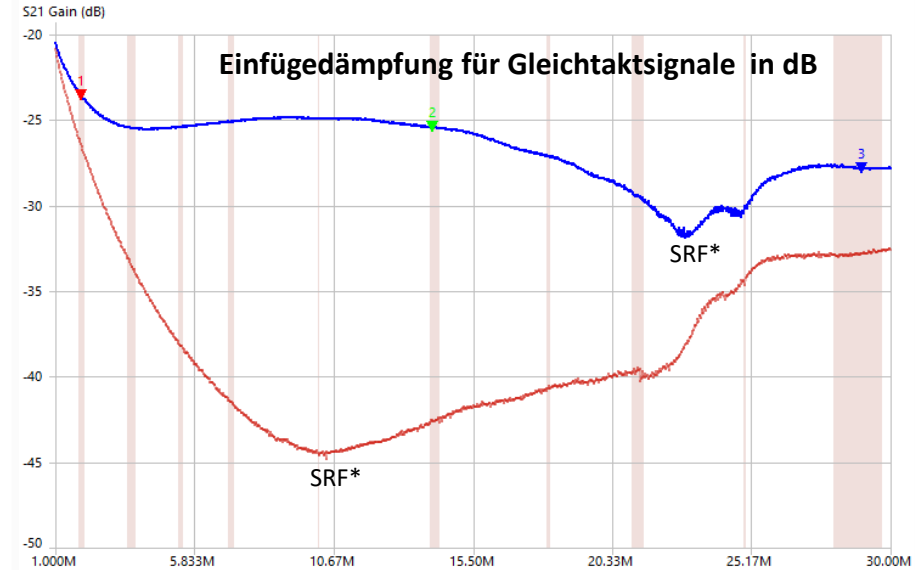
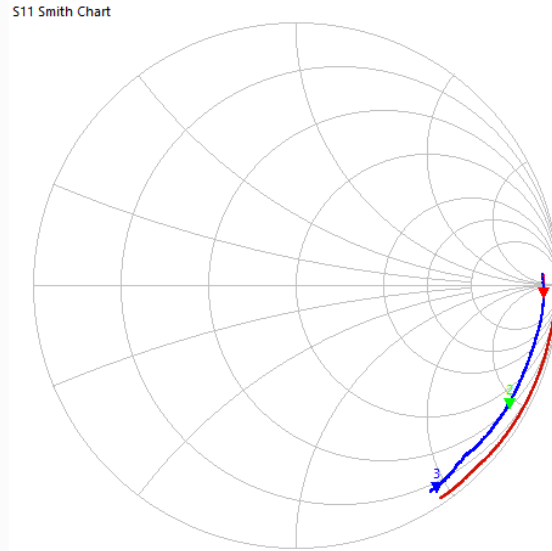
Frequency: 14.1059 MHz	VSWR: 28.526
Impedance: 27.6-j190 Ω	Return loss: -0.609 dB
Series R: 27.628 Ω	S11 : 0.932
Series L: -2.1465 μH	S11 Phase: -28.90°
Series C: 59.308 pF	S21 Gain: -25.460 dB
Parallel R: 1.3376 kΩ	S21 Phase: -37.69°
Parallel X: 58.083 pF	

Marker 3

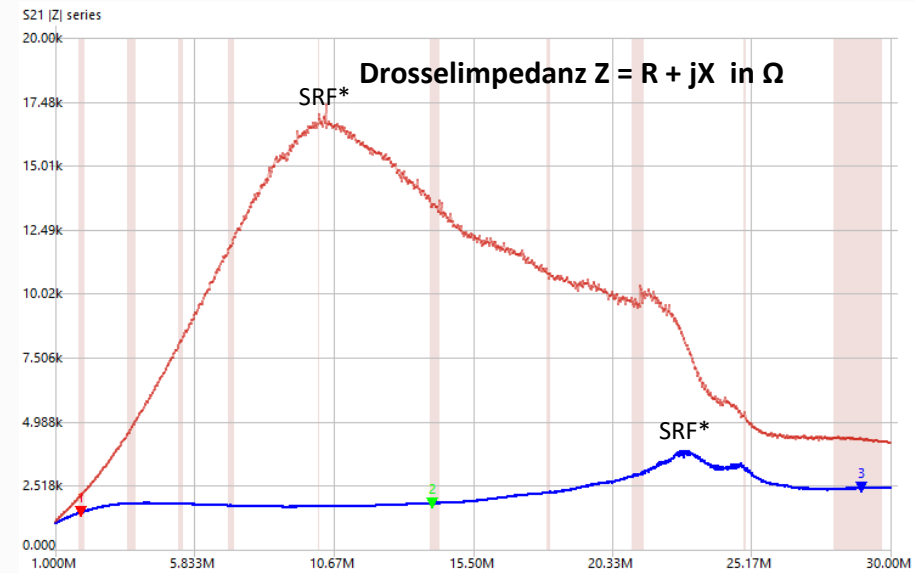
Frequency: 28.9937 MHz	VSWR: 32.428
Impedance: 7.17-j95.3 Ω	Return loss: -0.536 dB
Series R: 7.1726 Ω	S11 : 0.940
Series L: -523.33 nH	S11 Phase: -55.14°
Series C: 57.578 pF	S21 Gain: -27.835 dB
Parallel R: 1.2744 kΩ	S21 Phase: -38.52°
Parallel X: 57.254 pF	

S11	Min VSWR: 23.013 @ 22.7857MHz Return loss: -0.755 dB
S21	Min gain: -31.875 dB @ 22.8719MHz Max gain: -20.512 dB @ 1.00000MHz

Analysis ...



* SRF = Selbst-Resonanz-Frequenz der Wicklung



CMC rot:
16 Windungen
RG178 auf
Ferrit-Ringkern
FT140-43

CMC blau:
„W2DU Balun“
Mehrere
Ferrithülsen
über das
Koaxialkabel
geschoben



blaue Kurven

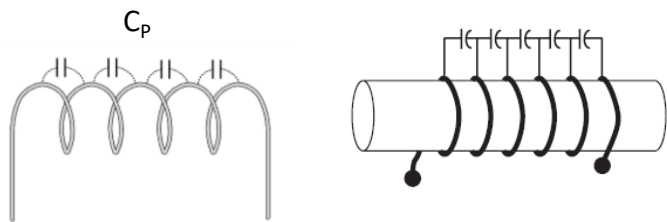
Rote Kurven

Entwurf - Preliminary



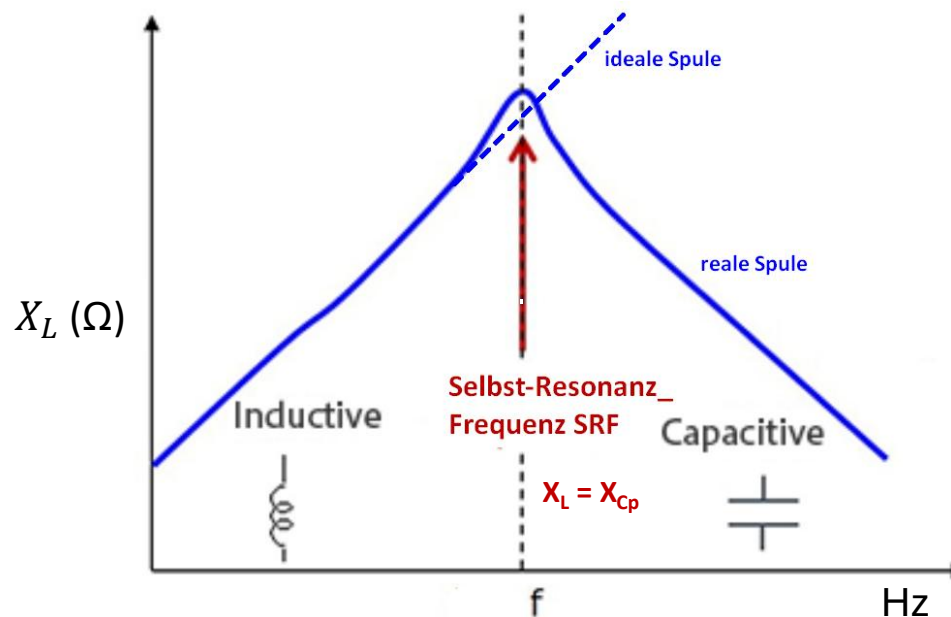
Spule, Induktivität, Selbst-Resonanz-Frequenz (SRF)

Die Haupteigenschaft einer Spule ist ihre Induktivität L , angegeben in der Einheit H (Henry). Eine Spule mit einer Induktivität L hat einen frequenzabhängigen induktiven Widerstand: $X_L = 2 \pi f L$, angegeben in Ω .



Die Induktivität einer Spule bildet mit ihrer unerwünschten Wicklungskapazität einen Schwingkreis mit Resonanzüberhöhung.

Die Resonanz-Frequenz des Schwingkreises aus L und der parasitären Kapazität C_p ist die Selbst-Resonanz-Frequenz SRF der Spule.



$$X_L = 2 \pi f L$$

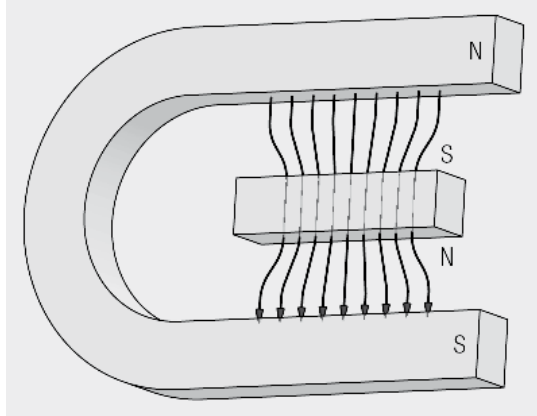
$$X_C = \frac{1}{2 \pi f C}$$

$$SRF = \frac{1}{2\pi\sqrt{L C_p}}$$

$$Q = \frac{X_L}{R_{Cu}}$$

Oberhalb ihrer Selbst-Resonanz-Frequenz geht der induktive Charakter der Spule verloren. Die Wicklungskapazität überbrückt zunehmend die Induktivität. Der induktive Widerstand X_L der Spulen Impedanz nimmt oberhalb der SRF ab. Durch konstruktive Maßnahmen strebt man bei einer Induktivität eine SRF oberhalb des Nutzfrequenzbereiches an.

magnetische Leitfähigkeit – Permeabilität μ



Grafik: Wuerth Elektronik

Bringt man einen ferromagnetischen Stoff (z.B. Eisen oder Ferrit) so in ein Magnetfeld, konzentriert sich der magnetische Fluss im Werkstoff.

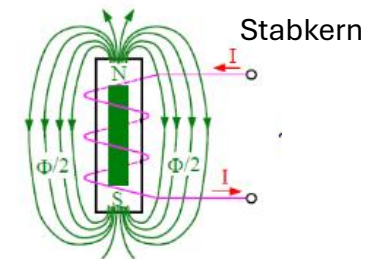
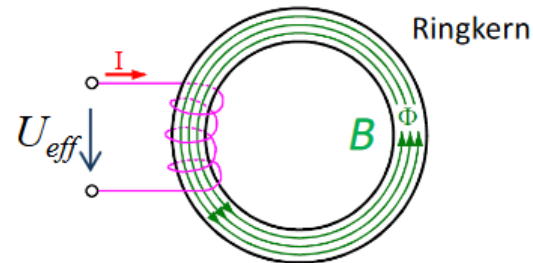
Eisen und Ferrite verhalten sich wie ein guter Leiter für die magnetischen Feldlinien. Die Permeabilität lässt sich als magnetische Leitfähigkeit vorstellen. Man bezeichnet sie mit „ μ “ (μ)

- Die **relative Permeabilität μ_r** ist eine Verhältniszahl für die magnetische Leitfähigkeit eines Materials im Verhältnis zum Vakuum oder zu Luft.
- Die relative Permeabilität von Vakuum (fast gleich: Luft) ist $\mu = 1$. Ersetzt man z.B. bei einer Spule die Luft, durch ein Material mit $\mu = 100$, ergibt die Spule die hundertfache Induktivität.
- Ferrite sind ferromagnetische Materialien mit hoher Permeabilität μ_r . Bei gleicher Bauart hat eine Wicklung mit Ferrit-Kern eine größere Induktivität. Mit einem Ferritkern kann man mit weniger Windungen eine hohe Induktivität mit hohem induktiven Widerstand X_L realisieren.

Magnetische Eigenschaften von Ferriten

Ferrite sind keramische Sintermaterialien aus Eisen-Oxid (Fe_2O_3) und Zusätzen von anderen Metalloxiden, wie Nickel-Mangan- oder Zink-Oxiden. Ferrite gibt es in unterschiedlichen Formen, Zusammensetzungen und magnetischen Eigenschaften.

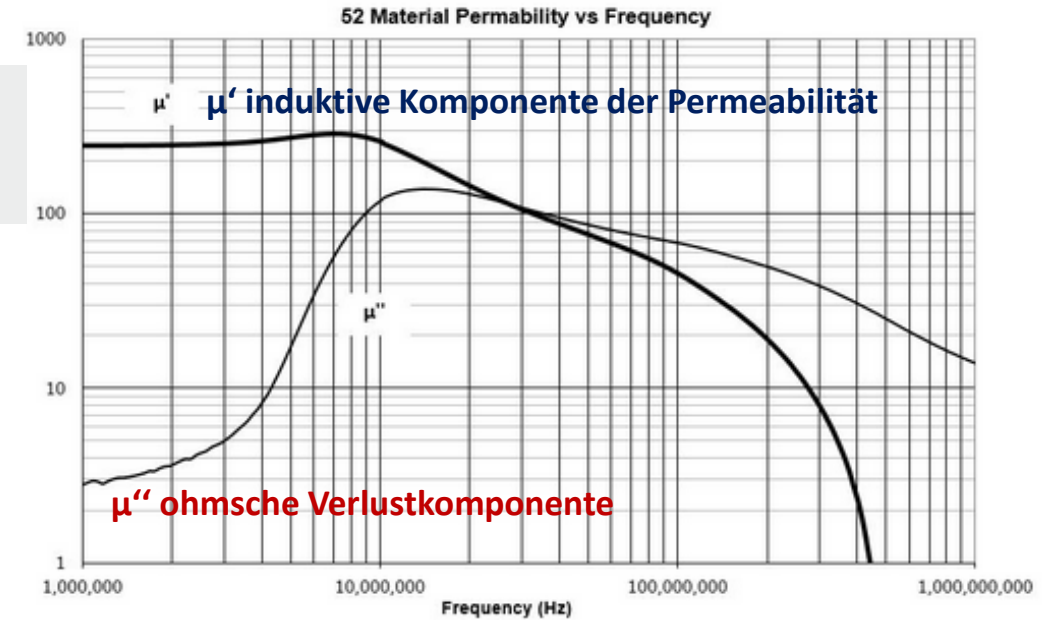
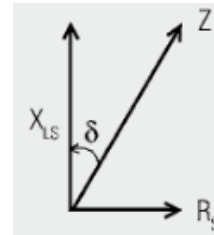
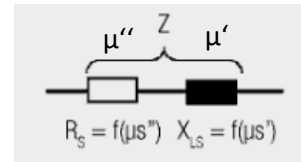
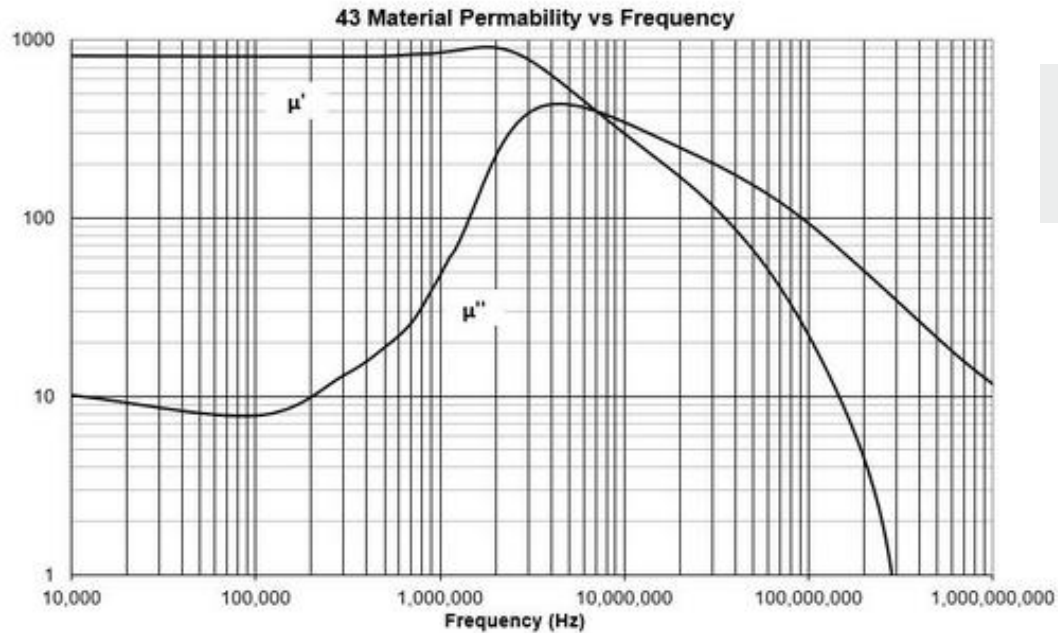
Ferritmaterialien haben einen großen Einfluss auf die Wirksamkeit einer Gleichtaktdrossel. Die Auswahl des geeigneten Ferritkerns und des Ferritmaterials ist ein Kompromiss zwischen: Größe, Frequenz-Bandbreite, Induktivität der Wicklung, Kernverlusten und der maximal übertragbaren Leistung.



Bei einem Eisen oder Ferrit-Ringkern verlaufen die magnetischen Feldlinien fast vollständig im Inneren des Kerns. Die Streuverluste sind gering. Ringkernspulen koppeln nur wenig auf benachbarte Objekte.

Beim Stabkern verlaufen die magnetischen Feldlinien zu einem Teil außerhalb des Ferritkerns durch die Luft und koppeln auf die Umgebung.

Ferrit - komplexe Permeabilität μ' und μ''

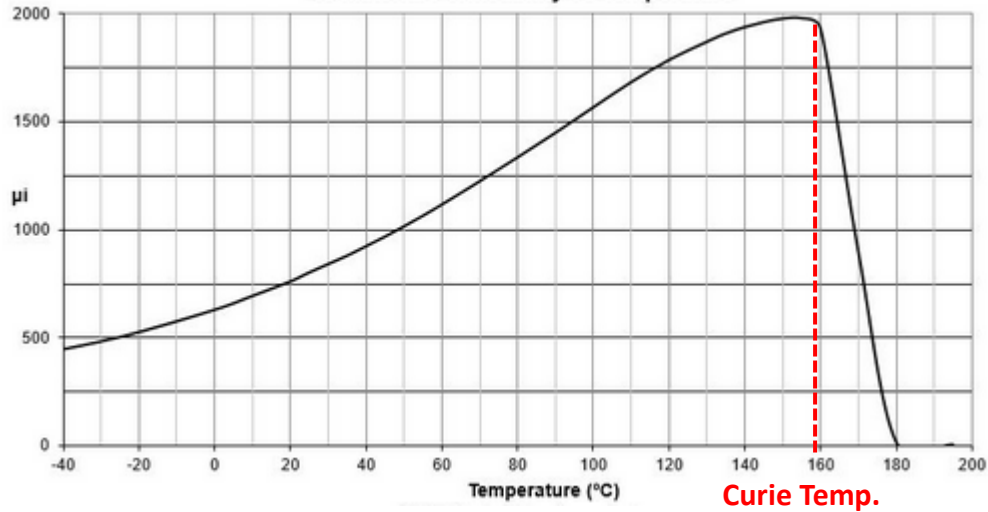


- Die komplexe Permeabilität als Materialeigenschaft von Ferrit setzt sich aus einem induktiven Anteil μ' und einem ohmschen Verlust-Anteil μ'' zusammen. μ' ist maßgeblich für die Induktivität einer Wicklung, μ'' ist verantwortlich für die Verluste im Ferrit.
- Die Permeabilität von Ferriten ist nicht konstant, sondern variiert mit der Frequenz, der Temperatur und der magn. Feldstärke H .
- Die Impedanz Z einer Wicklung auf einem Ferritkern setzt sich aus dem induktiven Blindwiderstand X_L der Spule und dem Verlustwiderstand R des Ferrits zusammen. Bei tiefen Frequenzen dominiert der induktive Anteil, bei hohen Frequenzen überwiegt R .

Temperaturabhängigkeit der Permeabilität - Curie Temperatur

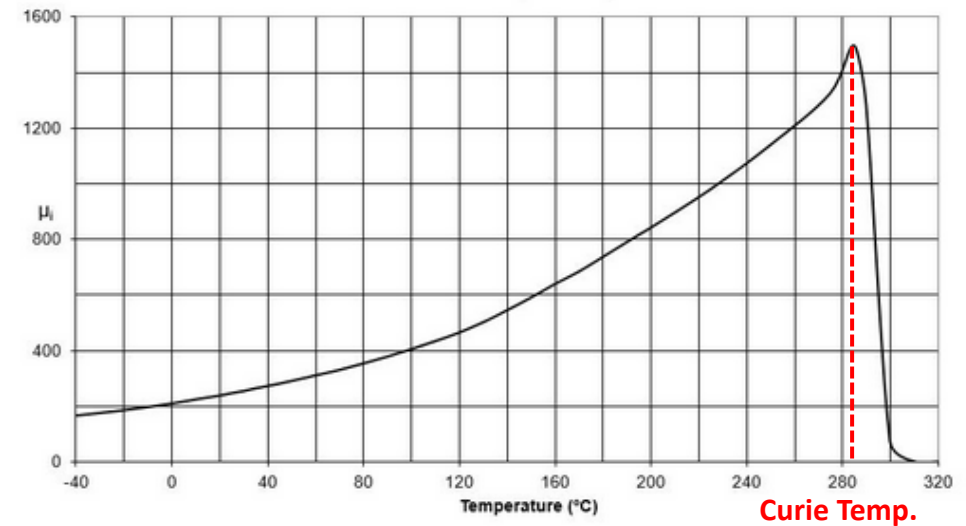
Fair-Rite NiZn Ferrit #43

43 Material Permeability vs Temperature

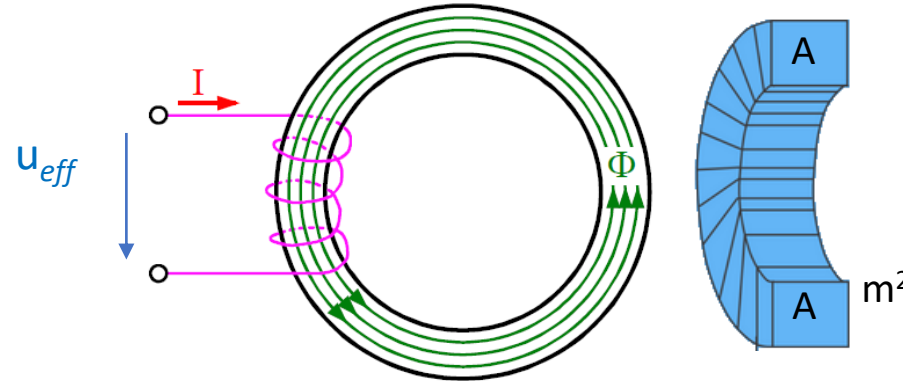


Fair-Rite NiZn Ferrit #52

52 Material Permeability vs Temperature



Magnetischer Fluss im Ferrit-Ringkern - Sättigung



Nicola Tesla

Nach ihm ist die Maßeinheit für die magn. Flussdichte benannt.

$$B = \frac{U_{eff} \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot A \cdot N}$$

B ist der Spitzenwert der magnetischen Flussdichte in Tesla

U_{eff} ist die angelegte Spannung in Volt

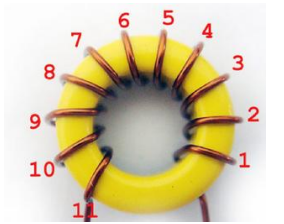
A ist die Querschnittsfläche des Kerns in m²

N ist die Anzahl der Windungen

f steht für die Frequenz in Hz

- Wird die maximal zulässige Flussdichte B eines Ferrits erreicht, gerät der Kern in die magnetische Sättigung. Die Permeabilität sinkt auf 1 (der Wert von Luft). Die höchste Flussdichte tritt bei niedrigen Frequenzen und wenigen Windungen auf.
- Bei Sättigung verliert ein Ferrit seine magnetischen Eigenschaften.
- Auf verlustbehafteten Ferritkernen und hin zu höheren Frequenzen ist der Temperaturanstieg durch Verlustwärme im Kern oft eher das Limit als die Sättigung.

Ringkernspulen Praxis - Regeln



- Führt man bei einem Ringkern einen Leiter durch die Öffnung des Kerns, oder schiebt man einen Kern über den Leiter zählt das als eine Windung. Man zählt die Windungen daher am besten auf der Innenseite.
- Wickelt man mehrere Windungen auf einen Ringkern, nimmt die Induktivität L und der induktive Widerstand der Wicklung quadratisch mit dem Windungsverhältnis zu. $L \sim W^2$. z. B. Verdreifachung der Windungen führt zum Neunfachen der Induktivität. $3^2 = 9$
- Ringern-Spulen, kann man in Reihe schalten. Bei der Reihenschaltung gleicher Spulen vervielfachen sich die Gesamt-Induktivität und der induktive Widerstand proportional mit der Zahl der in Reihe geschalteten Einzel-Spulen.
- Gleiche Ferrit-Ringkerne kann man aufeinander stapeln. Das wirkt ähnlich wie eine Reihenschaltung. Die Induktivität und der induktive Widerstand der Wicklung steigt proportional mit der Anzahl der gestockten Ringkerne.
- Man kann Gleichtaktdrosseln aus unterschiedlichen Ferritmaterialien in Reihe schalten um einen breiteren Frequenzbereich zu realisieren.

Eigenschaften gängiger Ferritmaterialien

Ferrit-Material Mit Link zum Hersteller-Datenblatt		μ_i	Kernverluste	Curie Temp °C	Kommentar
TDK Siferrit N30	MgZn	4300	hoch	>130	XFMR VLF, EMV
FairRite / Amidon* #77	MgZn	2000	hoch	>160	CMC ab 1 MHz , Lo Bands, EMV
FairRite / Amidon* #31	MgZn	1500	mittel/hoch	>130	CMC 1,5 – 30 MHz
FairRite / Amidon* #43	NiZn	800	moderat	>130	KW-Breitband XFMR / CMC
Wuerth 4W620 (DARC)	NiZn	620	moderat	>150	KW-Breitband XFMR / CMC
FairRite / Amidon* #52	NiZn	250	niedrig	>250	Hi-Bands/ QRO gestockte Kerne
Ferroxcube 4C65	NiZn	125	niedrig	>350	XFMR / CMC Hi-Bands bis VHF
FairRite / Amidon #61	NiZn	125	niedrig	>300	XFMR / CMC Hi-Bands bis VHF
Amidon #2, rot <small>Eisenpulver kein Ferrit!</small>	Eisen	10	sehr niedrig	hoch	Hi-Q schmalband Anwendungen

Zum Vergleich

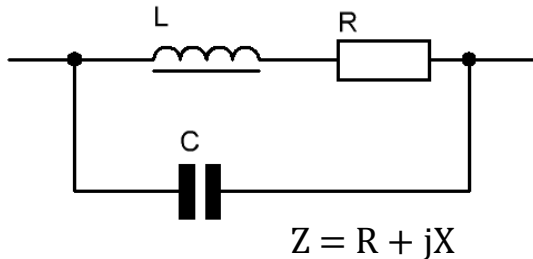
* Amidon ist eine Vertriebsfirma ohne eigene Fertigung. Sie beziehen ihre Ferritmischungen vom Hersteller Fair-Rite, aber auch von anderen Herstellern wie z.B. National Magnetics. Amidon Ferrite können also trotz gleicher Mix Nr. unterschiedliche Eigenschaften aufweisen.

Die Angaben für die Anfangspermeabilität und der Al Wert sind vom Ferrit Hersteller meist bei einer Frequenz von 10 kHz ermittelt!

XFMR = HF-Transformator
CMC = Gleichtaktrossel, Choke Balun
EMV = Störunterdrückung, RFI
QRO = Hohe Leistung

Ferritkern-Drosselspule: Verlustwiderstand erwünscht

Ersatzschaltbild einer realen Spule auf einem Ferritkern



L ist die Induktivität der Wicklung (μ')

R steht für die Verluste im Ferrit (μ'') und die Drahtverluste, die sich wie ein Serien-Widerstand auswirken.

C ist die parasitäre Wicklungskapazität zwischen den Windungen

L und **C** ergeben einen Resonanzkreis mit einer Selbst-Resonanzfrequenz SRF, der durch den Ferrit-Verlustwiderstand **R** bedämpft wird (niedrige Güte)

Spulen für HF-Filter oder in Anpass-Gliedern sollen möglichst lupenreine Blindwiderstände X_L ohne Verluste sein. Sie speichern Energie nur vorübergehend und setzen sie nicht in Verlustwärme um. Die „Spulengüte“, das Verhältnis von induktivem Widerstand X_L zum Verlustwiderstand R soll möglichst groß sein.

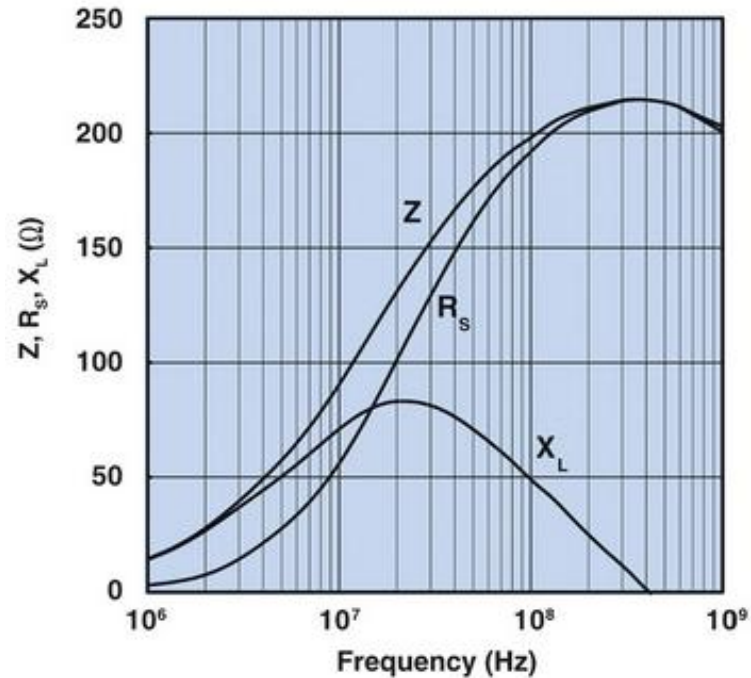
Spulen auf einem Ferritkern haben hingegen einen frequenzabhängigen Verlustwiderstand. Sie sind daher kein reiner Blindwiderstand, sondern eine **Impedanz Z_w** , die sich aus dem induktiven Widerstand X_L und dem Verlustwiderstand R der Wicklung zusammensetzt: $Z = R + jX_L$. Die „Spulengüte“ X_L / R ist reduziert.

Der Verlustwiderstand des Ferrits setzt Energie in Wärme um.

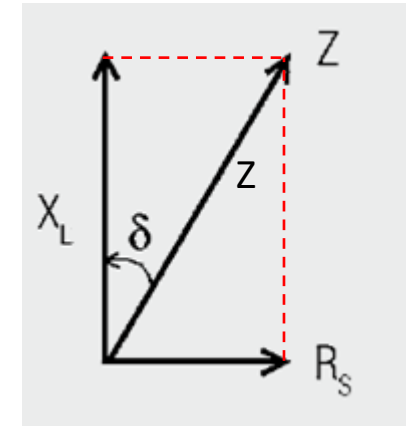
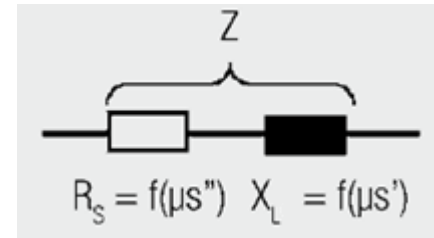
Drossel nennt man spezialisierte Spulen mit einer Impedanz die hoch genug ist, um HF Störströme zu unterdrücken. Eine **Gleichtaktdrossel** ist dafür konzipiert, nur die Gleichtaktströme zu unterdrücken.

Bei einer Ferritkern-Drossel nutzt man bewusst einen hohen Verlustwiderstand ihrer Impedanz für die Drosselwirkung aus. Bei tieferen Frequenzen überwiegt der induktive Widerstand X_L , bei höheren Frequenzen übernimmt zunehmend der Verlustwiderstand R die Drosselwirkung. Ein Nachteil ist die damit verbundene **Erwärmung des Kerns: $P = (I^2 \times R)$.**

Ferrit - Zusammensetzung der Impedanz aus R und X_L



Das Diagramm zeigt exemplarisch die Kurven für den induktiven Widerstand X_L , den Verlustwiderstand R_s und die daraus resultierende Impedanz Z am Beispiel einer Windung auf einer Ferrithülse aus der #43 Ferritmischung von Fair-Rite.

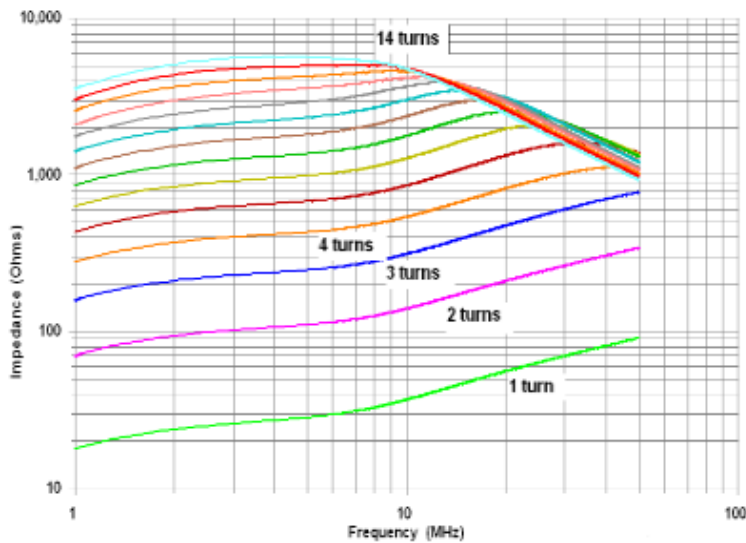


Die Impedanz Z berechnet sich mit Hilfe des Satzes des Pythagoras: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$

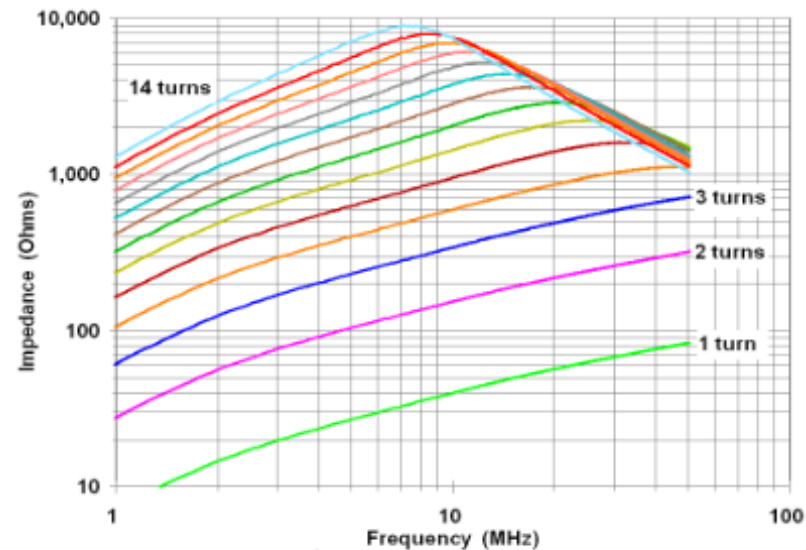
Die Einführung der komplexen Permeabilität erlaubt die Trennung in eine ideale (verlustlose) induktive Komponente X_L und in den frequenzabhängigen Widerstandsanteil R , der die Verluste des Kernmaterials repräsentiert. Dabei repräsentiert μ' den induktiven Anteil und μ'' den resistiven Anteil

Welche Ferritmischung eignet sich, welche Windungszahl?

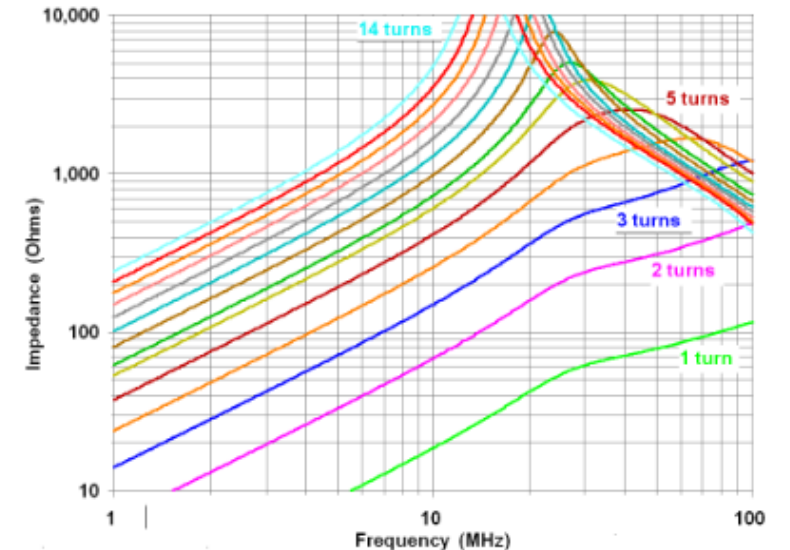
Gemessene Drosselimpedanz Z_W auf einen T240 Ringkern (61 mm \varnothing) bei verschiedenen Ferritmischungen und Windungszahlen



#31 Impedance



#43 Impedance



#61 Impedance

Messungen: Jim Brown, K9YC [9]

- Unterhalb ihrer Eigenresonanzfrequenz (SRF) nimmt die Impedanz einer Drossel-Wicklung auf einem Ferrit-Ringkern proportional zum Quadrat der Windungszahl der Wicklung zu.
- Mit mehreren Windungen auf einem Kern lässt sich eine hohe Sperrimpedanz erreichen.
- Ein Klappferrit-Ringkern wirkt wie eine Gleichtaktdrossel mit einer Windung.

Ferrite – kurz und bündig

Was man über Ferrite wissen sollte:

- Ferrite sind unlineare Materialien, ihre magnetischen Eigenschaften variieren u. a. mit der Frequenz, der Temperatur und dem magnetischen Fluss.
- Die Permeabilität eines Ferritmaterials ist komplex und setzt sich zusammen aus der induktiven Permeabilität (μ') und der ohmschen Verlustkomponente (μ''). Beide Werte sind nicht konstant, sondern variieren mit der Frequenz.
- Die Permeabilität μ' und damit die Induktivität einer Wicklung fallen ab einer bestimmten Frequenz ab, die Kern-Verluste μ'' steigen weiter an und überwiegen ab einer bestimmten Frequenz.
- Verluste im Ferrit heizen den Kern auf. Beim Überschreiten der Curie Temperatur verliert ein Ferritmaterial seine magnetischen Eigenschaften, die Induktivität einer Wicklung sinkt rapide. Der Vorgang ist reversibel.
- Beim Überschreiten der maximalen Flußdichte (Sättigung) verliert der Kern seine Permeabilität und die Induktivität einer aufgewickelten Spule fällt rapide ab.

Bau-Varianten von BalUn – Gleichtaktdrossel - MWS



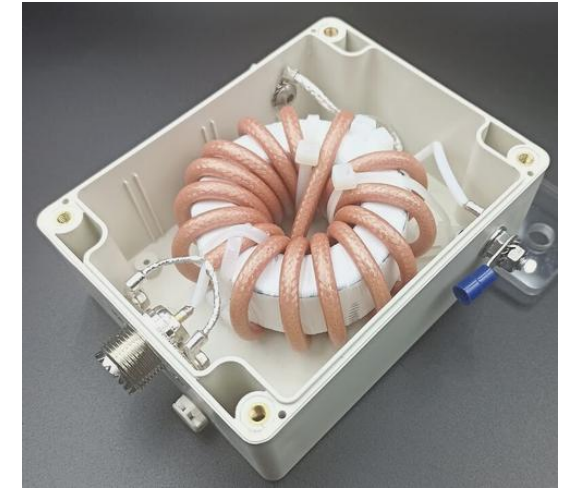
Cross-over Wicklung nach Joe Reiser. Ein- und Ausgang liegen gegenüber; weniger Übersprechen.



Mit bifilarer Litze gewickelt. Z_0 der Leitung beachten! (Balun Designs 4115)



BalUn / Gleichtaktdrossel, In-Out auf Buchse, zum Einfügen in eine Speiseleitung



BalUn Koax Gleichtaktdrossel mit symmetrischen Anschluss für eine sym. Antenne (Dipol)



„Kellermann BalUn“ mehrere kleine 3 Wdg. Gleichtaktdrosseln in Serie



Koaxkabel als Luftspule aufgewickelt. L ist nur für obere KW-Bänder ausreichend



Gestockte Kerne für hohe Leistung



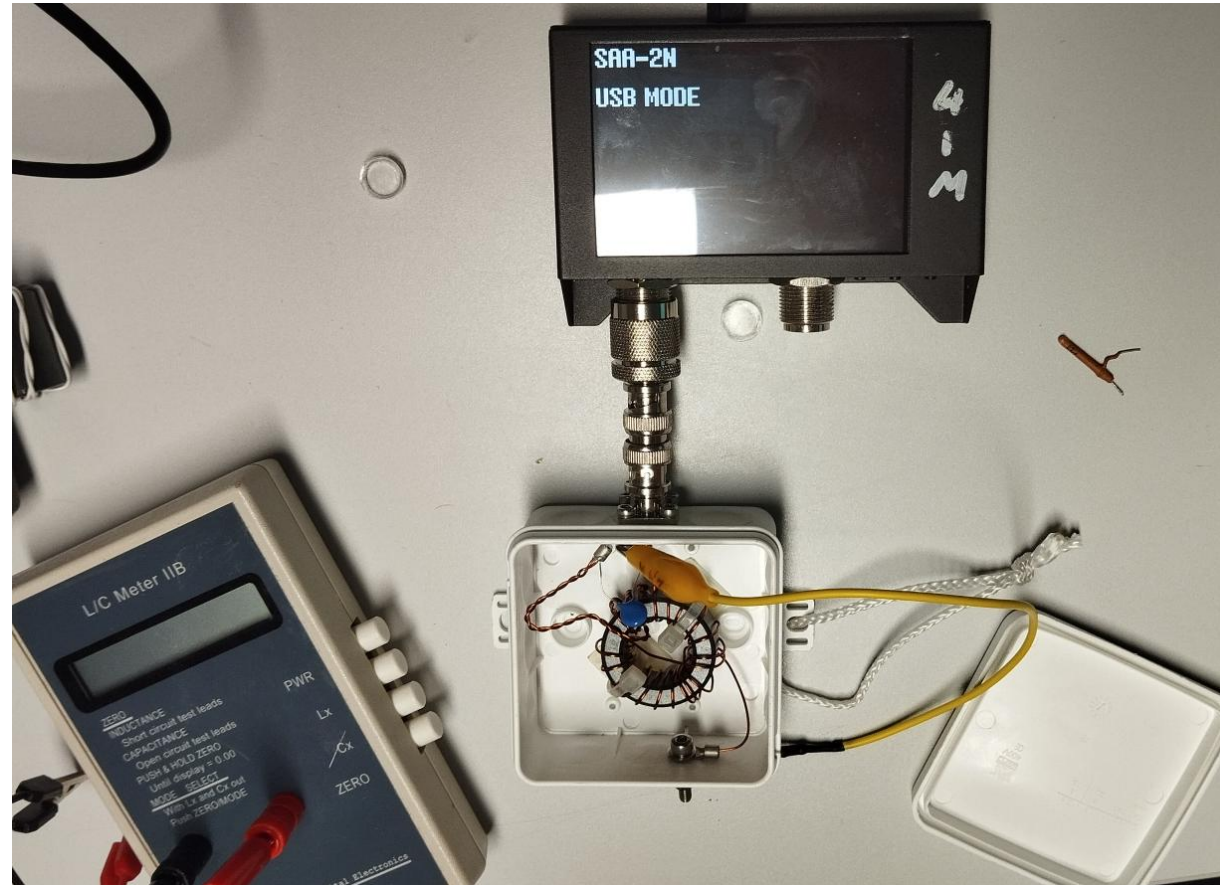
MWS nach Walt Maxwell, W2DU. Ferritrings über Koaxkabel gezogen und mit Schrumpfschlauch fixiert. = Reihe von n Drosseln mit einer Windung. Sperrimpedanz nur moderat, Verluste!

Big Mac



RG213 auf 3 Stk.
Ringkern \varnothing 76 mm

praktische Übungen: Mantelwellensperren mit dem NanoVNA messen

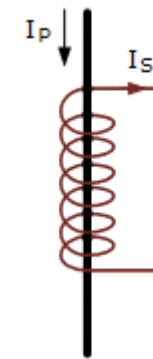
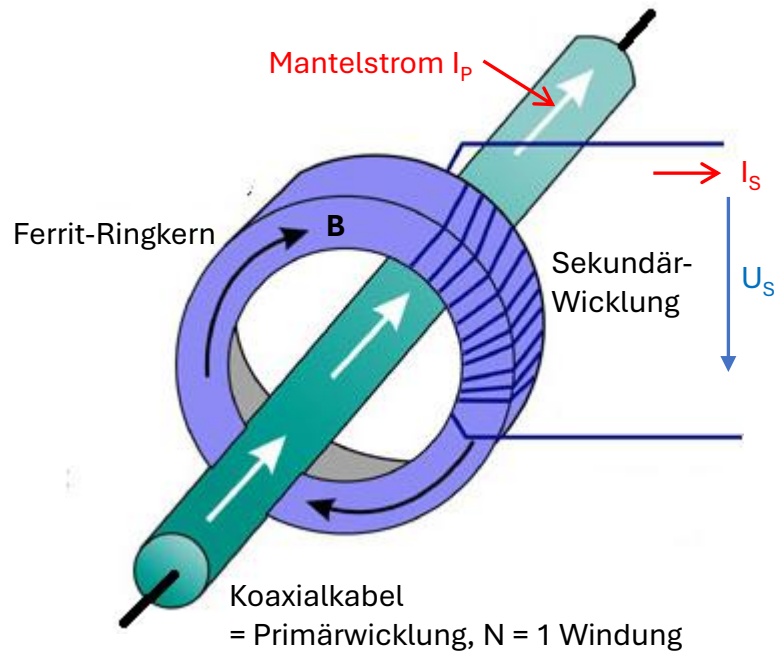




messen steht am Anfang von wissen

HF Strom-Transformator

Ein HF-Stromtransformator oder Stromwandler besteht aus einer Sekundärwicklung auf einem Ringkern oder einem Klappferrit als Stromzange. Die Primär-"Wicklung" mit einer Windung ist das Koaxialkabel durch den Kern. Ein Gleichtakt HF Strom auf dem Mantel des Koax-Schirms induziert eine Spannung in der Sekundärwicklung. Wenn die Sekundärwicklung mit einem Widerstand abgeschlossen wird, fließt ein entsprechender Strom I_s . Gegentaktströme im Inneren des Koaxialkabels verursachen keinen Sekundärstrom.



Stromübersetzung:

$$I_s = \frac{I_p}{\ddot{u}}$$

\ddot{u} = Windungsverhältnis 1 : N

N = Windungszahl Sekundärwicklung

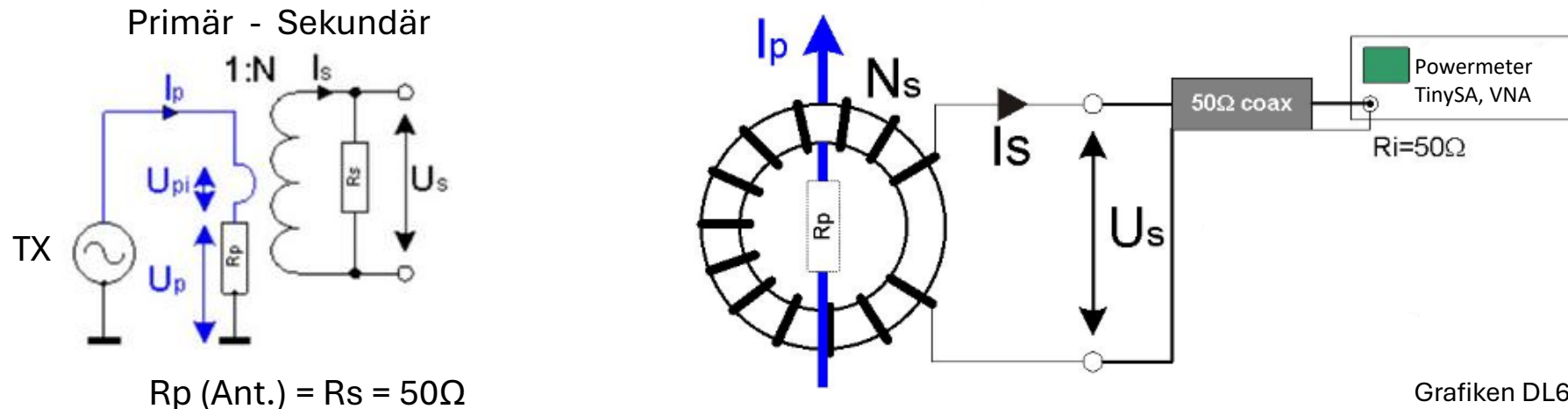
I_p = Primärstrom

I_s = Sekundärstrom

Prinzipschaltbild Stromwandler-Trafo

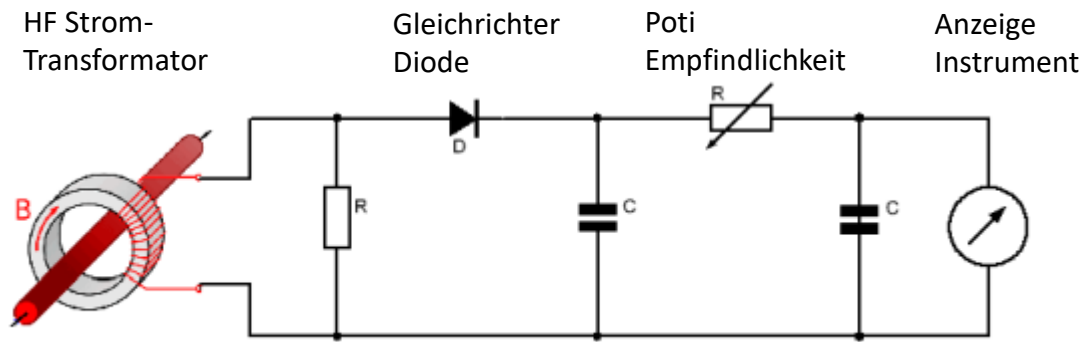
Messen mit dem HF Strom-Transformator

Zur detaillierten Dokumentation, Verweis auf die [Webseite von DL6GL](#) [9] ,



- Für genaue Messungen muss auf definierte Impedanzen und Abschlüsse (hier 50 Ω) geachtet werden. Mantelströme auf einem Koax-Kabel lassen sich zumindest qualitativ vergleichen, z. B. Maxima und Minima.
- Die Felder der Gegentaktsignale im Inneren des Koaxialkabels heben sich auf – Messergebnis ist Null.
- Nur der Gleichtakt Mantelstrom „ I_p “ auf dem äußeren Schirm wird auf die Sekundärseite des Stromtrafos transformiert „ I_s “ und führt an einem Powermeter, SDR, NanoVNA oder TinySA zu einem Messergebnis.

Einfaches HF Strom-Amperemeter mit Klappferrit

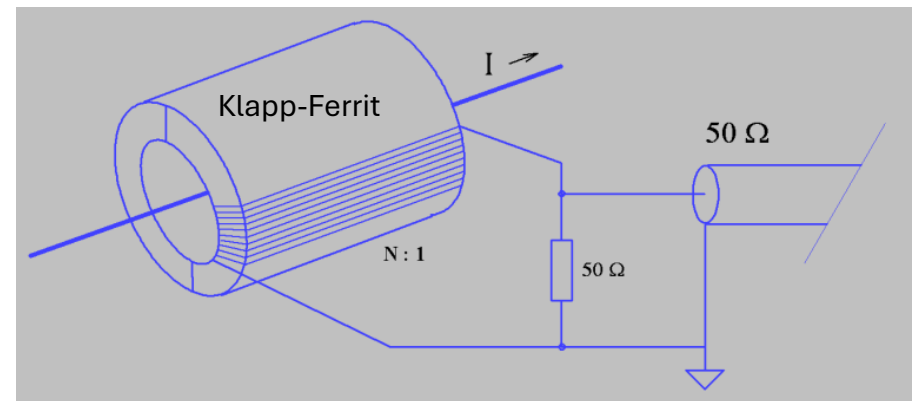


DIY HF Stromzange mit Klappferrit
Bauvorschlag von HB9BLA
Video dazu: [„Problem Solver“](#)



Kommerzielle Stromzange
MFJ-854

DIY Strom-Messzange



HF-Stromzange mit Klappkern am TinySA





Gleichtaktdrossel mit dem VNA messen

- **Unterdrückt unerwünschte Gleichtaktströme. (Kennwert: Gleichtakt-Unterdrückung, CMR)**

Die maßgebliche Kenngröße einer Gleichtaktdrossel / Mantelwellensperre (MWS) ist die frequenzabhängige Sperrdämpfung gegenüber Gleichtaktströmen, die Gleichtakt-Unterdrückung CMR. Sie hängt von der Drossel-Impedanz Z_w ab die die aufgewickelte Leitung den Mantelströmen entgegengesetzt.

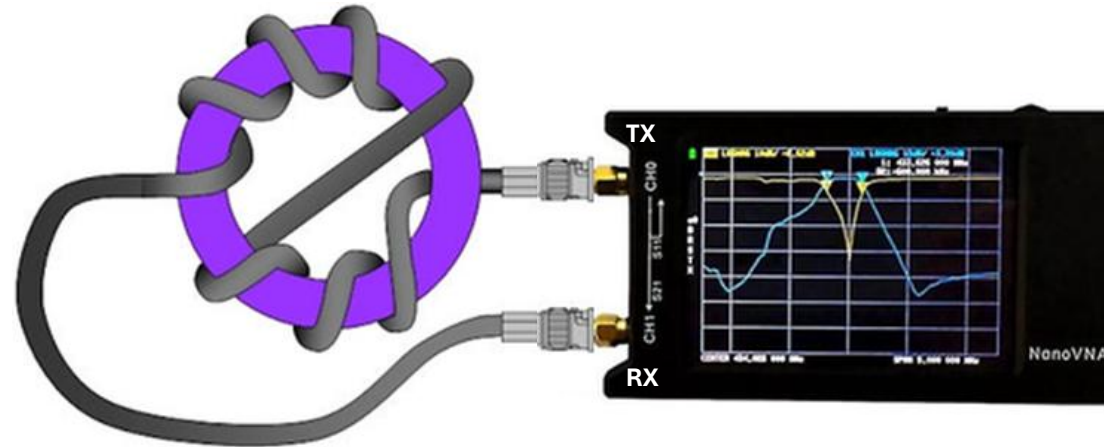
Man misst für die Gleichtakt-Dämpfung amateurmäßig, in dem man die Drosselspule in Serie zwischen die Innenleiter von RX und TX des VNA einfügt. Gemessen wird Transmission (S_{21} in dB) bzw. Series- $|z|$.

- **Lässt Nutzsignal-Gegentaktströme ungehindert passieren (Kennwerte: S_{21} , S_{11})**

Man misst hierzu die Übertragungsdämpfung der Leitung als S_{21} (Gain in dB) und die Reflexion S_{11} . Als Messwert angezeigt als VSWR oder als Rückflusdämpfung in dB.

Die gemessene Drossel-Dämpfung in dB gilt in Bezug zu der 50Ω Impedanz des Mess-Systems. Sie ist ein Richtwert für den Vergleich von Gleichtaktdrosseln bzw. BalUn. Im praktischen Betrieb an einem realen Koaxialkabel treten daher je nach Frequenz und Einfüge-Stelle im Kabelweg unterschiedliche Impedanzen auf dem Kabelmantel auf. Das Spannungsmaximum einer Mantelwelle ist hochohmig, das Strommaximum einer Mantelwelle ist niederohmig. Die beste Wirkung wird in einem Strommaximum erreicht.

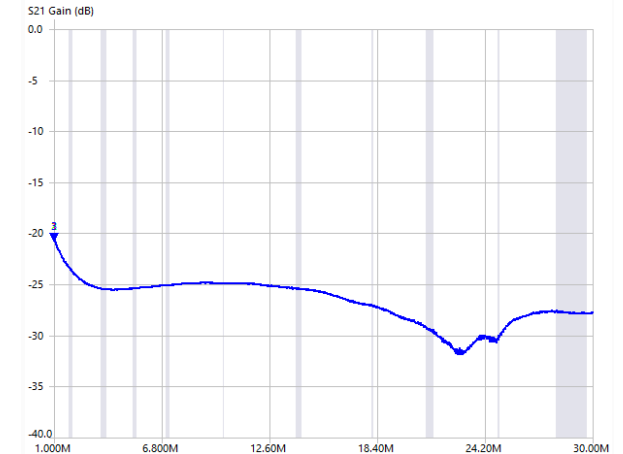
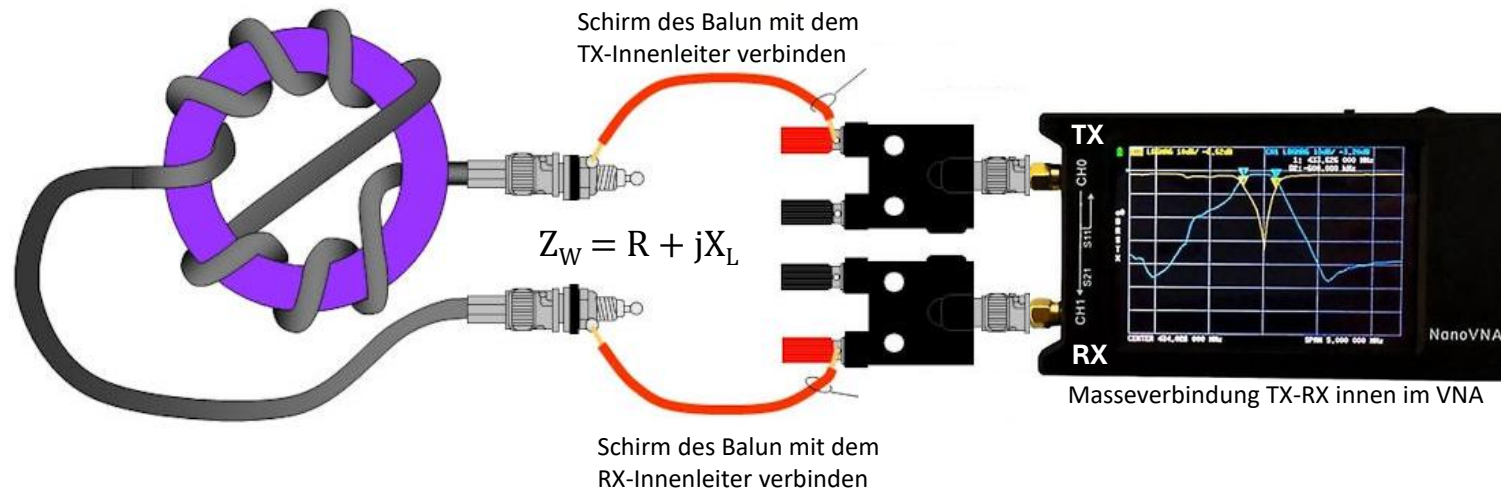
Durchlassdämpfung (S21) und VSWR (S11) messen



- Die Durchgangsdämpfung einer Gleichtaktdrossel für das Gegentakt-Nutzsignal wird durch die Messung der Übertragung / Gain (S21 in dB) der HF-Leitung ermittelt. Sie soll im geforderten Nutzfrequenzbereich möglichst klein ausfallen.
- Das VSWR S11 ist ein Maß für die Fehlanpassung durch einem vom Sollwert abweichenden Wellenwiderstand der Leitung. Das VSWR soll möglichst klein sein.

Diese Messung erfasst nur die Übertragungseigenschaften für symmetrische Gegentaktströme im Inneren des aufgewickelten Koaxialkabels bzw. der aufgewickelten Leitung. Sie ist kein Maß für die Gleichtakt-Unterdrückung CMRR.

Messen der Drosselimpedanz und der Drosseldämpfung

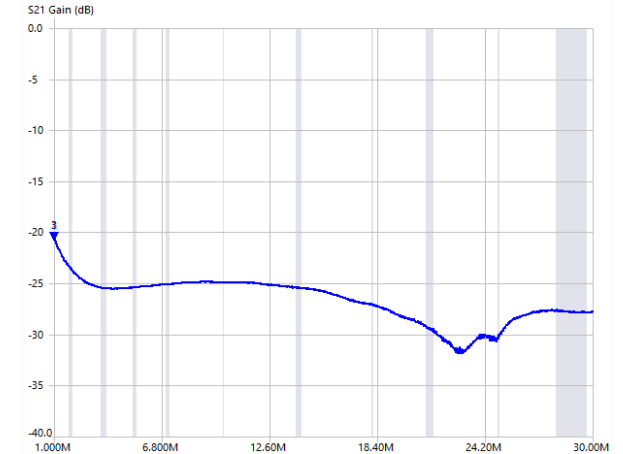
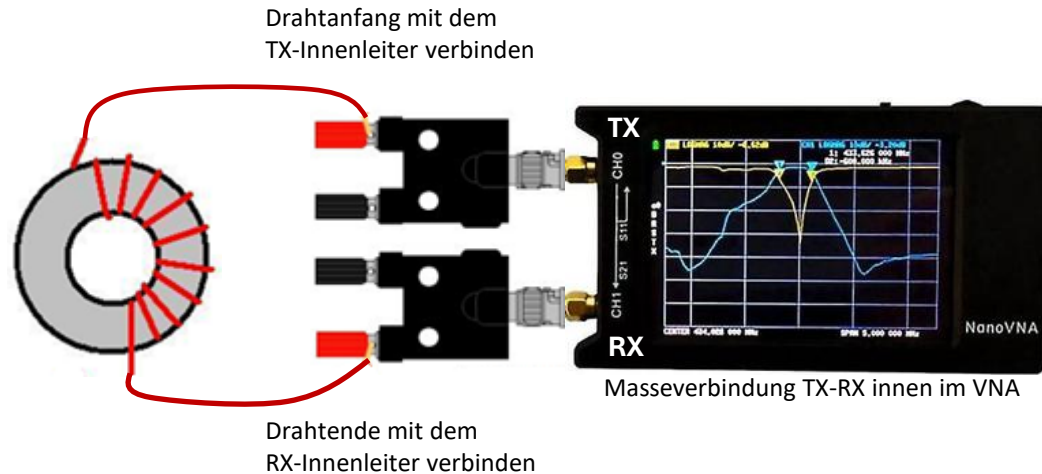


- Die Drossel-Dämpfung eines Balun als Mantelwellensperre beruht auf der frequenzabhängigen induktiven Impedanz der Wicklung Z_W . Der Kabelschirm kann dabei wie ein einzelner Draht einer Spule betrachtet werden.

$$Z_W = R + jX_L$$

- Zur Beurteilung der Mantelwellen-Sperrwirkung in Bezug zur 50 Ω Systemimpedanz misst man die Einfügedämpfung (S21 Gain in dB) als Maß für die Gleichtaktunterdrückung und/oder die Drossel-Impedanz Z_W der Wicklung als „series“ Messung zwischen TX und RX des NanoVNA.

Prüfung: Eignung von Ferritkern und Windungszahl

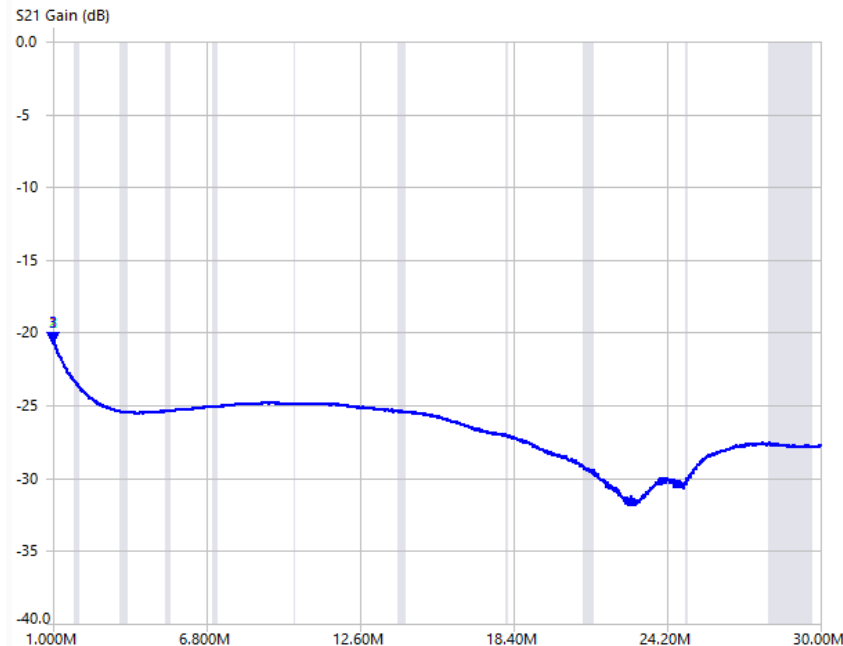
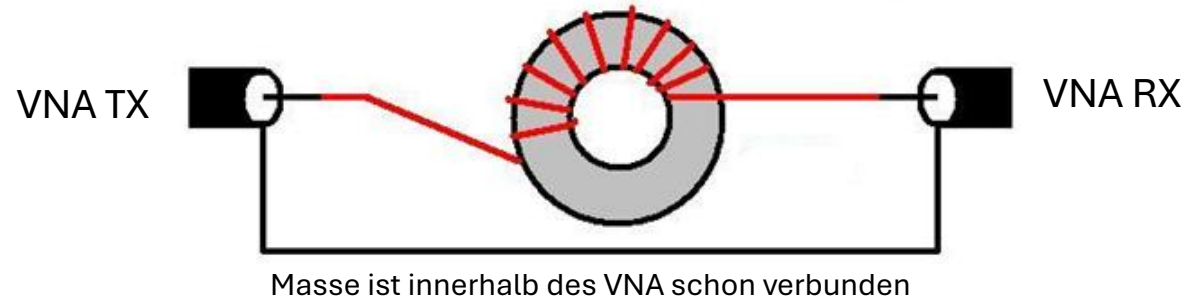


Die Wicklungsimpedanz Z_W ist die Impedanz, die die Wicklung der Gleichtaktdrossel hätte, wenn sie aus einem einzigen Leiter bestehen würde.

Zur Prüfung der Eignung und der Sperrwirkung eines Ferritkerns als CCM/ BalUn reicht es daher, statt einer HF-Leitung bzw. Koaxialkabel einfachen Draht auf den Kern zu wickeln und die Drossel-Dämpfung (S21 Gain) und / oder die Drossel-Impedanz Z_W mit dem VNA zu messen. So kann man schnell und einfach die Wirksamkeit von Wicklungen auf unterschiedlichen Kernen oder mit unterschiedlichen Windungszahlen zu beurteilen.

Kernprüfung mit Draht - Interpretation des Messergebnisses

Messung S21 – Gain (db)



Der Draht der Drosselwicklung liegt im Strompfad zwischen TX, der 50 Ω Quelle und RX, der 50 Ω Last des VNA. Die Kurve zeigt die Drosseldämpfung Z_W im logarithmischen Maßstab in -dB (Y-Achse) über die Frequenz (x-Achse).

Angestrebt werden ein Drosseldämpfung von besser als -20dB.

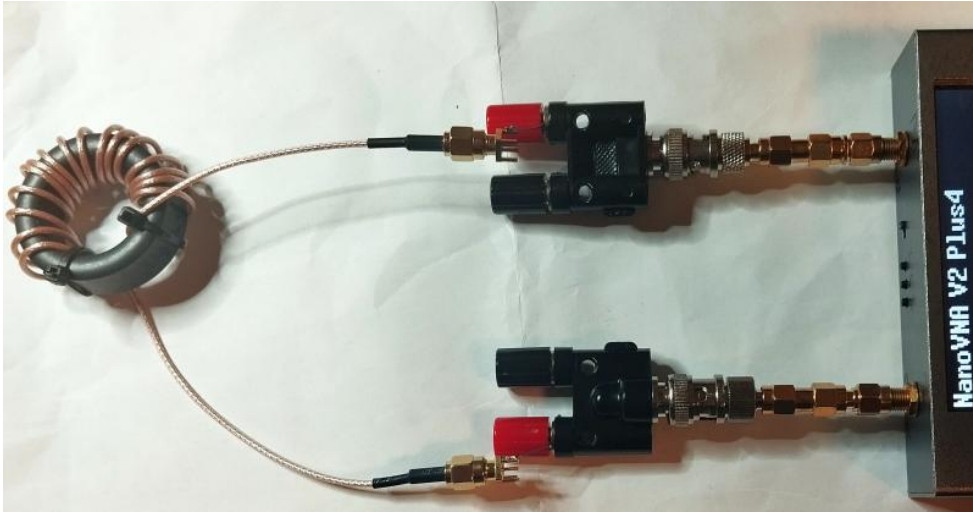
Interpretation des Messergebnisses:

Wird die -20 dB Linie nach unten unterschritten, entspricht das einer Drosselimpedanz Z_W von $>1,0$ k Ω .

Wird die -30 dB Linie nach unten unterschritten, entspricht das einer Drosselimpedanz Z_W von $>3,0$ k Ω .

Wird die -40 dB Linie nach unten unterschritten, entspricht das einer Drosselimpedanz Z_W von >10 k Ω

S21 Gain (-dB) MWS Sperrdämpfung – real gemessen

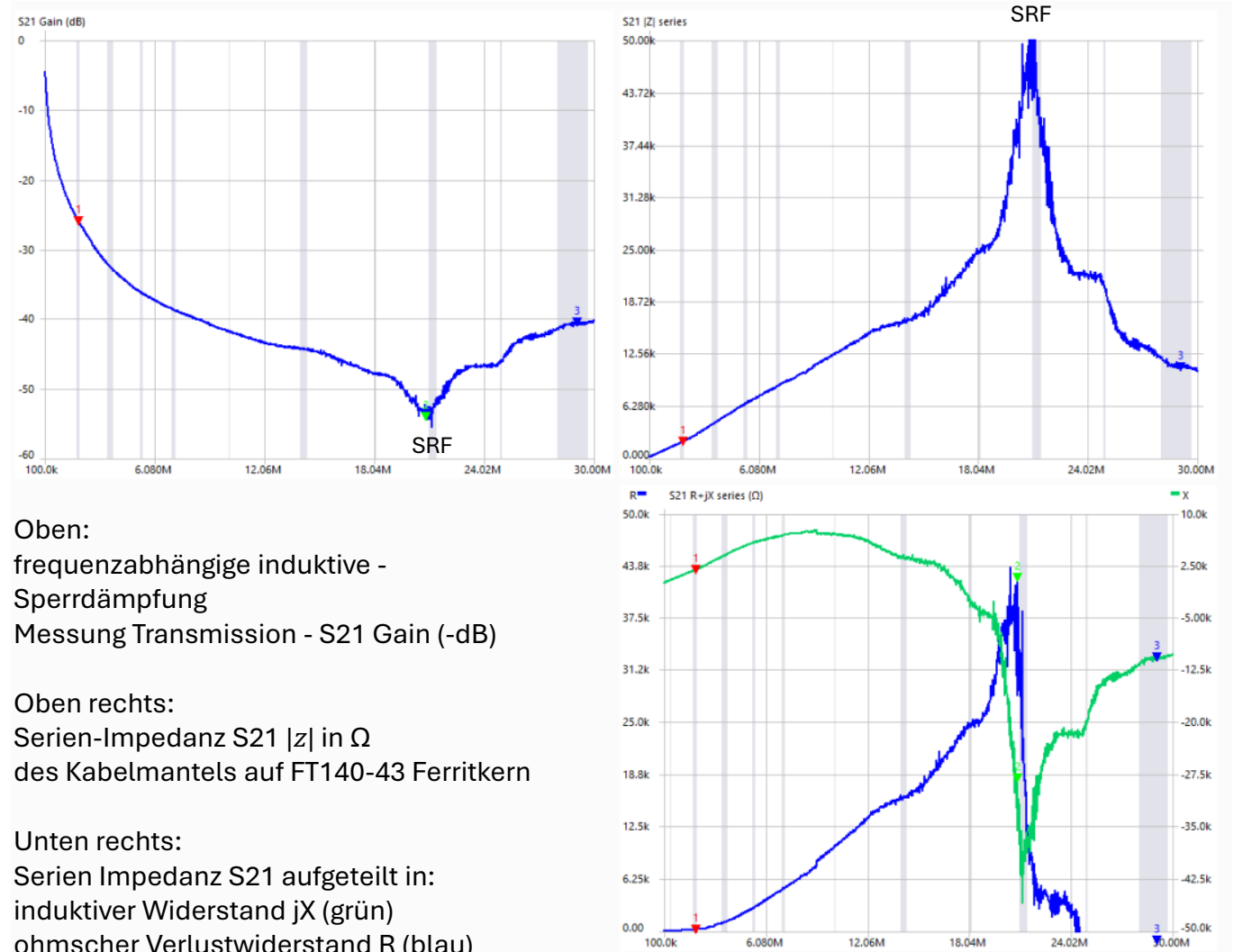


1:1 Balun / Mantelwellensperre (CMC, MWS)
10 Wdg. RG178 auf Kern: Fair-Rite FT140-43

Hinweis:

Die gemessene Mantelwellen-Sperrdämpfung in dB ist ein Richtwert und gilt in Bezug zu der 50Ω Impedanz des Mess-Systems.

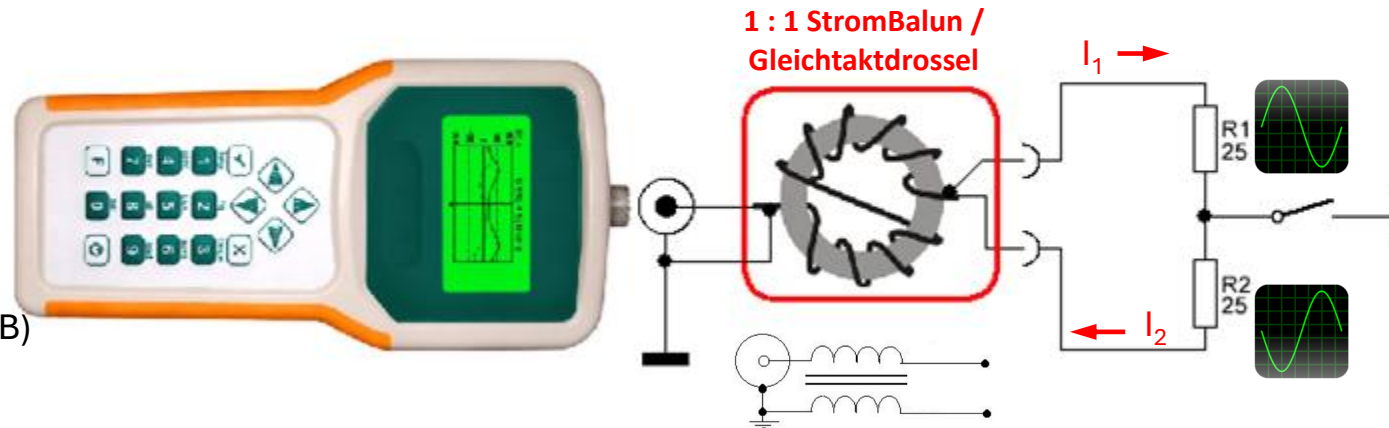
Mantelströme bilden stehende Wellen. Im praktischen Betrieb an einem realen Koaxialkabel treten je nach Frequenz und Einfüge-Ort im Kabelweg unterschiedliche Impedanzen auf dem Kabelmantel auf. Das Spannungsmaximum einer Mantelwelle ist hochohmig, das Strommaximum einer Mantelwelle ist niederohmig. Die beste Sperrwirkung erzielt eine MWS an einer niederohmigen Stelle, also im Strombauch oder direkt am 50Ω Anschluss der Antenne.



Prüfen: Symmetrierwirkung mit VNA oder Antennen-Analyzer

Messung mit VNA oder Antennenanalyzer:

S11 (Logmag)
(Reflexionsdämpfung in -dB)
bzw. VSWR



➤ S11 / VSWR ohne Balun - Abschlusswiderstände direkt angeschlossen (Balun überbrückt)

Bei geöffnetem Schalter entspricht der Abschlusswiderstand $R_1 + R_2 = 50\Omega$ Last gegen Masse. Der Analyzer zeigt einen großen Reflexionsfaktor (-dB) bzw. ein VSWR von 1. Bei geschlossenem Schalter wird R2 gegen Masse überbrückt. Der TX Port des Analyzers „sieht“ jetzt nur noch $R_1 = 25\Omega$ Last gegen Masse. Wegen des 50% Fehlabschlusses springt das VSWR auf einen Wert von 2 bzw. eine Reflexionsdämpfung von -3 dB.

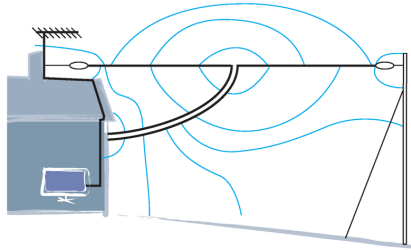
Test: S11 / VSWR mit eingefügtem Strom-Balun:

Bei geöffnetem Schalter entspricht der Abschlusswiderstand $R_1 + R_2 = 50\Omega$, ohne Massebezug. Das VSWR-Meter zeigt ein SWR von ideal 1. Wird der Schalter gegen Masse geschlossen, wird bei einem Balun, der Gleichtaktströme gut sperrt, das VSWR sich nur wenig verändern. Je geringer die Verschlechterung des Reflexionsfaktor / VSWR ausfällt, desto besser ist die Symmetrier-Wirkung und die Sperrdämpfung für Gleichtaktströme .

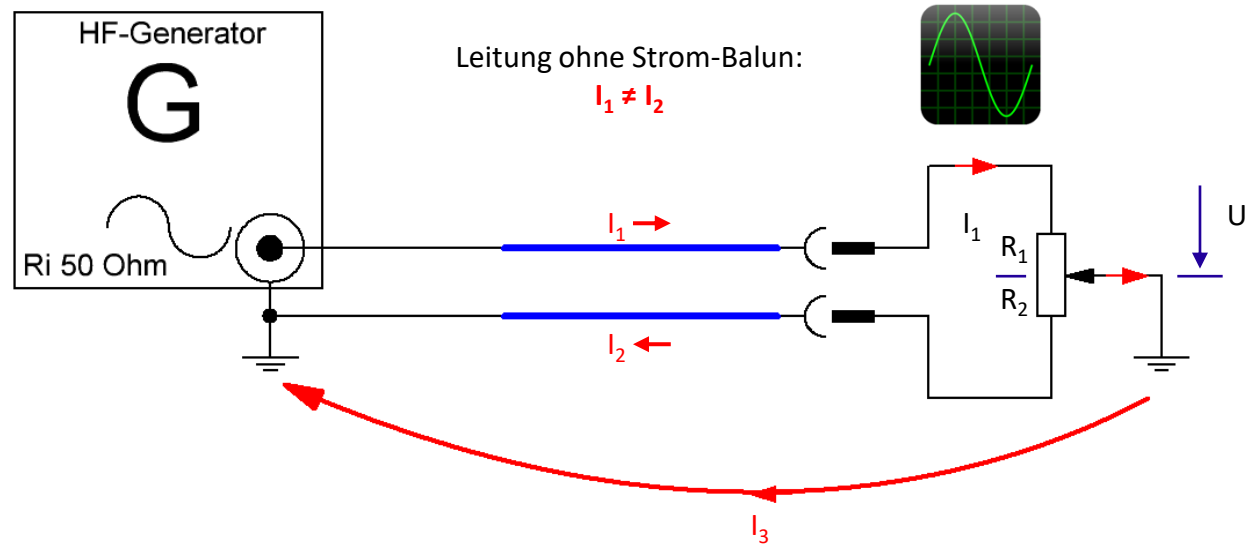
Erklärung: Durch die im Balun-Trafo erzwungenen symmetrischen Gegentakt-Ströme summiert sich an der Verbindung der Teilwiderstände die Spannung gegen Masse weiterhin zu Null. Bei Spannung null gegen Masse wird kein Strom über den Schalter fließen, wenn dieser geschlossen wird. Eingang und Ausgang des Balun sind wegen seiner Strom-Symmetrierwirkung für HF Gleichtaktströme quasi voneinander isoliert. Der Balun sperrt Gleichtaktströme. Der S11 / VSWR Analyzer am Eingang des Balun „sieht“ weiterhin 50Ω als Abschluss (statt 25Ω).



Prüfung der Symmetrierwirkung mit dem Scope (1)

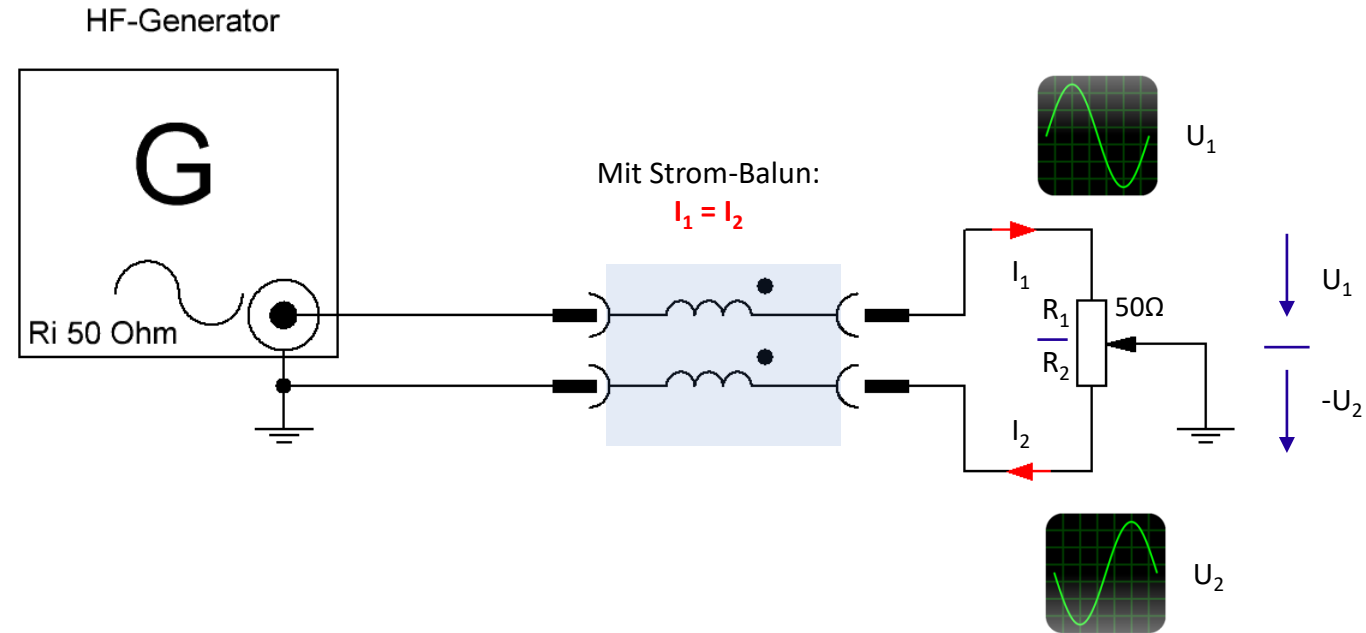


Eine gegen Erde unsymmetrische Antenne wird für die Prüfung durch zwei Kunstwiderstände aus einem Poti simuliert. Der Schleifer des Poti wird mit GND/Erde verbunden. Je nach Stellung des Schleifers werden dadurch zwei gegen Erde unsymmetrisch verteilte Impedanzen simuliert.



Bei einer gegen Erde unsymmetrischen Last ($R_1 \neq R_2$) nimmt ein Teil des Stromes (I_3) den Weg über Erde zurück zum Generator. Im Falle eines Koaxialkabels bedeutet das Ausgleichsströme auf dem äußeren Kabelschirm zu Masse/Erde. Bei symmetrischer Leitung Gleichtaktströme auf beiden Leitern.

Prüfung: Strom-Symmetrierwirkung mit dem Scope (2)



- Bei einer gegen Erde symmetrischen Last (Stellwiderstand genau in Mittelstellung, $R_1 = R_2$) sind U_1 und U_2 vom Betrag gleich groß aber entgegengesetzt. Die Spannung gegen Erde an der Mitte der Teilwiderstände wird zu Null - es fließt kein Strom zur Erde.
- Bei asymmetrischer Last (Stellwiderstand außermittig, $R_1 \neq R_2$), ändert sich am Ausgang des Balun das Verhältnis der Spannungen U_1 und $-U_2$ über den Teilwiderständen in einem Maße, dass der Strom durch den Balun symmetrisch ($I_1 = I_2$) bleibt. Durch die im Balun-Trafo erzwungene Stromsymmetrie kompensiert sich die Summe der Spannung an der Verbindung der Teilwiderstände gegen Erde zu Null. Da die Spannung Null ist, fließt auch null Strom über Erde ab ($I=U/R$).

Referenzen und weiterführende Literatur

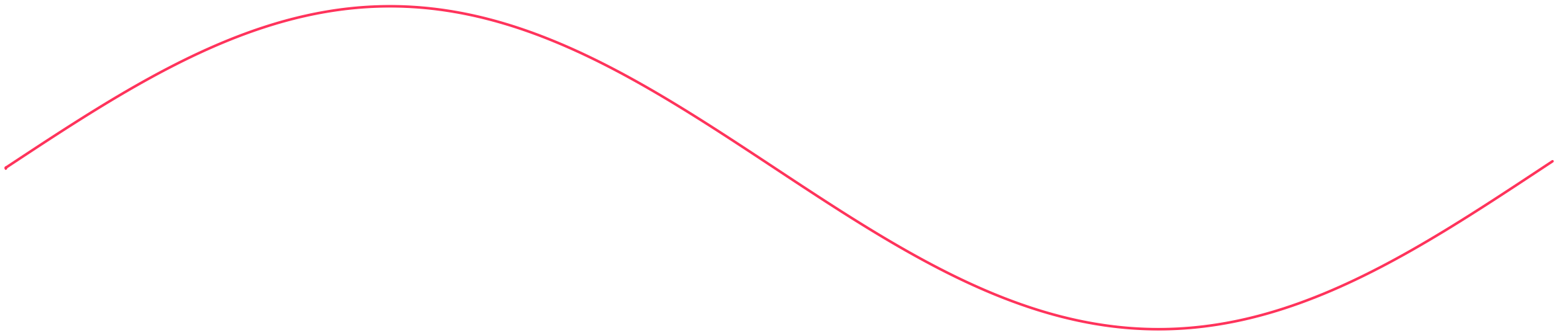
- [1] Günter Fred Mandel, DL4ZAO, „[Balun Workshop](#)“
- [2] Steve Hunt G3TXQ „High performance common mode chokes“
- [3] Steve Hunt G3TXQ „[Amateur Radio common mode chokes](#)“
- [4] Karl Fischer , DJ5IL „[Geschichte der Leitungsübertrager](#)“, <http://www.cq-cq.eu/tlt.htm>
- [5] Roy Lewallen, W7EL „[Balun, what they do and how they do it](#)“
- [6] Günter Fred Mandel, DL4ZAO „[Koaxialkabel](#)“
- [7] Fa. Würth, „[Trilogie der induktiven Bauelemente, Grundlagen \(pdf\)](#)“
- [8] Georg Latzel, DL6GL „[HF-Stromwandler](#)“
- [9] James Brown, K9YC „[A Ham's Guide to RFI, Ferrites, Baluns, and Audio Interfacing](#)“
- [10] Charles „Tom“ Rauch W8JI „[Common Mode Current](#)“
- [11] Roy Lewallen, W7EL „The 1 : 1 Current Balun Circuit Model“, 1995
- [12] Chuck Counselman, W1HIS „[Common Mode Chokes](#)“
- [13] Tool „Coil64 freeware Ringkern Spulenrechner“ <https://coil32.net/rf-toroid.html>

Empfehlenswertes Videotutorial:

Robert DJ3KJ, „[Schau mal einer an - Mantelwellenserie Folge 1 bis 5](#)“



Anhang



Ergänzende Informationen zu BalUn Übertragern und zu Impedanz-Transformatoren im:

[BalUn Workshop „Balun verstehen – bauen – prüfen \(pdf\)“](#)

Anhang

A "current balun" is a common mode choke. Common mode current, by definition, is the (vector) sum of the two individual conductor currents (or 1/2 the sum depending on the definition). By forcing the two currents to be very nearly equal and opposite, a "current balun" forces the common mode current to be very nearly zero. Roy Lewallen, W7EL <https://forums.qrz.com/index.php?threads/transformer-balun-cmrr-measurement.891207/page-6>

The problem with that definition is that it only applies to a transmission line made of a pair of parallel, narrow-spaced, wires. Since the vector sum of currents internal to the coax is always (nearly) zero, a balun of that definition has nothing to balance!

Now if you consider that with coax feeding an antenna, it is the job of a choke to impede the flow of the CM current on the outside of the coax, without even being aware of how much RF power the coax is transporting internally, then the balun word does not apply!

Choking coax is accomplished by wrapping many turns of that coax through the aperture of a modern ferrite toroidal core to effectively insert an impedance in series with the coax shield where the choke is placed (not necessarily at the antenna). That impedance is in the form $R + jX$. It is both dissipative and reactive.

I'd like to elaborate a bit on what I posted. As you noted, my description was most appropriate for two parallel conductors. I'll try to explain why it's also appropriate for coax. w7ark

As it turns out, common mode current can be defined the same way (the vector sum of two conductor currents) for coax if you consider the shield to be one of the conductors, and its current to be the sum of the inside and outside currents. But with coax, the internal currents are purely differential while the common mode component is physically separate on the outside of the shield. For both types of cable though, only the common mode component of the current encounters the series impedance of the core. In the case of parallel wires, the differential component either doesn't interact with the core or the differential contributions from the two conductors cancel and result in near zero interaction. In the case of coax, the differential currents on the inside are invisible to the core and only the common mode current on the outside encounters its impedance. The net effect is exactly the same, and if you have a parallel conductor cable and a coaxial cable with the same number of turns through identical cores, the impedance seen to the common mode component current will be the same. If the impedance is high enough, the result will be nearly equal and opposite currents in two parallel conductors, and nearly no current on the outside of the coax. These are the conditions for very little common mode current.

You can measure the common mode impedance of a "current balun" or common mode choke by winding a single wire (or pair of wires connected together, or piece of coax with conductors connected together) through a core or into an air core inductor and measuring the impedance. This will be the impedance seen by common mode current on either a pair of parallel wires or a coaxial cable.

I personally don't like to use the term "balun" at all for what I dubbed a "current balun" because of the nearly universal misconception of what's "balanced" or being "balanced". It's ok only if you define "balance" as having equal and opposite currents in two conductors, whether the conductors are parallel or concentric (again, using the sum of inner and outer currents for an effective coax shield). When conductors are "balanced" in that sense, there is by definition no common mode current.

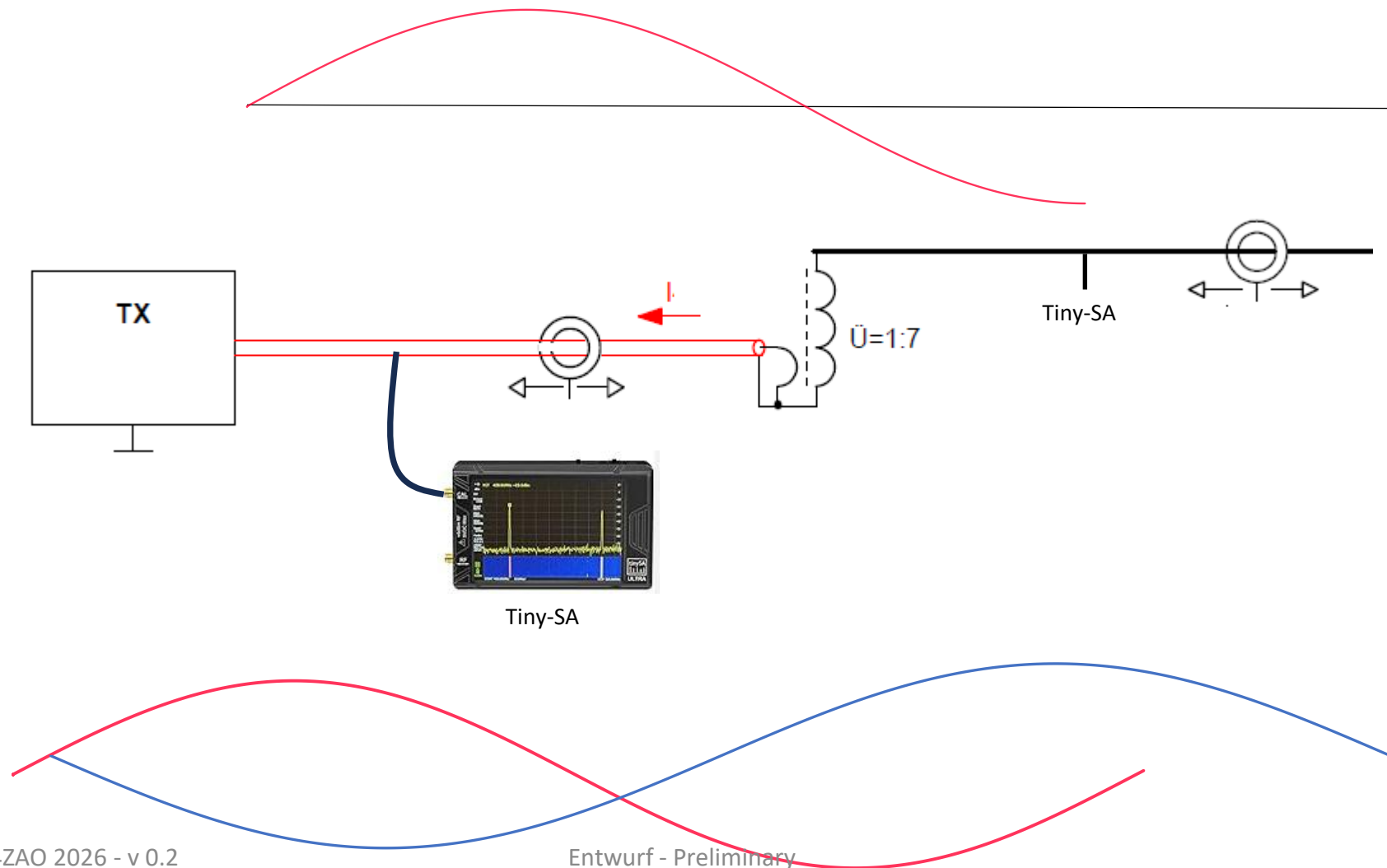
Roy w7el

Fair Rite Ferrit Mischungen

Property	Unit	Symbol	61	52	51	44	46	43	15	31	20	77	78	73	75	76
Material Type			NiZn	NiZn	NiZn	NiZn	MgZn	NiZn	NiZn	MnZn	NiZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn	MnZn
Initial Permeability @ B <10 gauss		μ	125	250	350	500	500	800	1500	1500	2000	2000	2300	2500	5000	10000
Flux Density	gauss	B	2500	4200	3500	3000	2550	3500	2700	3600	3300	5100	4800	4200	4800	4000
	mT		250	420	350	300	250	350	270	360	330	510	480	420	480	400
@ Field Strength	oersted	H	15	10	10	10	10	10	5	5	10	5	5	5	5	5
	A/m		1200	800	800	800	800	800	800	400	800	400	400	400	400	400
Residual Flux Density	gauss	Br	1000	2900	2300	1100	1680	2200	1800	2600	1980	1800	1500	1100	1000	1800
	mT		100	290	230	110	168	220	180	260	198	180	150	110	100	180
Coercive Force	oersted	Hc	1.2	0.6	0.6	0.45	0.53	0.36	0.2	0.34	0.14	0.25	0.2	0.18	0.11	0.12
	A/m		96	48	48	36	32	36	16	27	12	20	16	16	9	10
Loss Factor	10^{-6}	tan δ/μ	90	45	30	150	60	100	15	20	35	15	3	10	15	15
@ Frequency	MHz		10	1	1	1	0.1	1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
Temperature Coefficient of Initial Permeability (20 – 70°C)	%/°C	T.C.	0.1	0.8	1.3	1.6	0.85	1.25	1.1	1.3	2.0	1.2	1	0.5	1	0.5
Curie Temperature	°C	Tc	>300	>250	>170	>160	>140	>130	>105	>130	>110	>200	>200	>160	>140	>120
Resistivity	ohm-cm	ρ	10^8	10^9	10^9	10^9	10^8	10^5	10^8	3000	10^7	100	200	100	300	50
Application Area	EMI suppression															
Recommended Frequency Range	MHz		200-2000	50-1000	50-500	25-300	25-300	25-300	10-300	1-300	1-300	<10	<10	<50	<20	<5

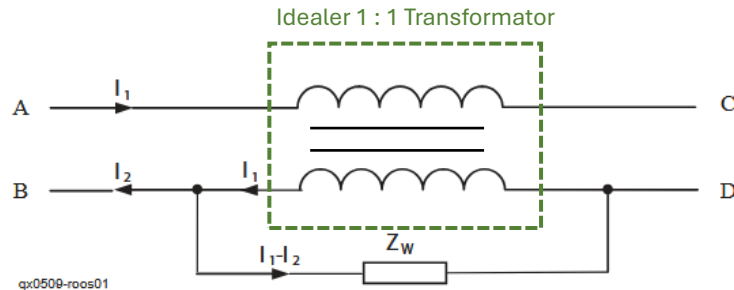
<https://fair-rite.com/materials/>

Praxis Experiment: Mantelwellen aufspüren

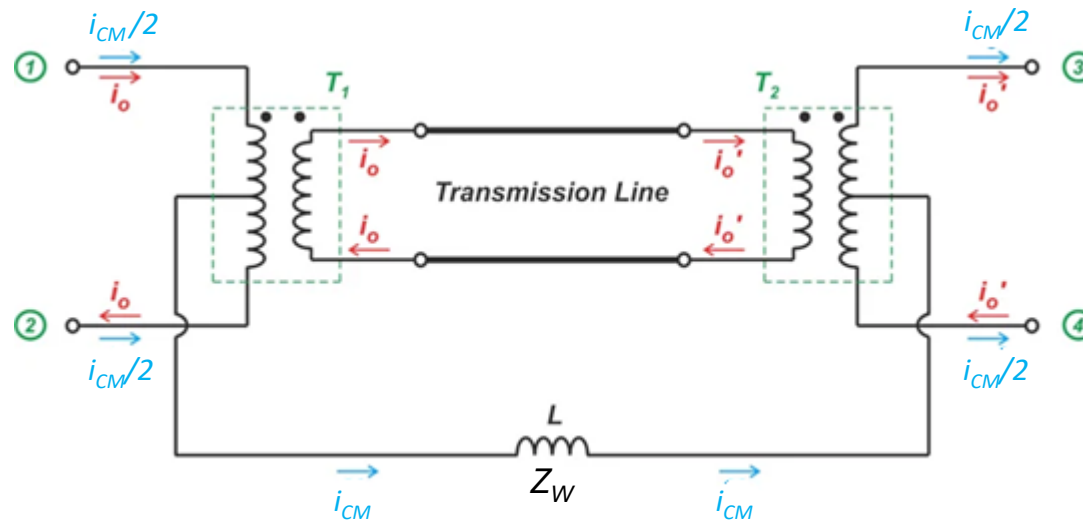


Ersatzschaltbild des 1:1 Guanella Balun

Vereinfacht - R. Lewallen, W7EL



Nach Guanellas Patentschrift



Die Transformatoren T1 und T2 sind ideale Transformatoren, die die Trennung von Gleichtakt- und Differenzströmen darstellen.

Der Gleichtaktstrom i_{CM} wird über die Drossel-Impedanz Z_W geleitet und von dieser beeinflusst.

Der Gegentakt-Strom i_o fließt unbeeinflusst in der Übertragungsleitung