

Balun, Mantelwellensperre, HF-Transformator – Wofür?

**Prof. Dr.-Ing. Michael Hartje , DK5HH, hartje@etech.hs-bremen.de
Fachbereich Elektrotechnik und Informatik, Hochschule Bremen**

HF-Trafos-Balune-20210406/Dr. Ha.

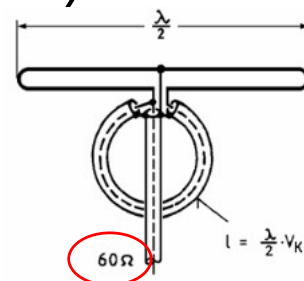
Überblick

- Anspruch: kein „Balunseminar“ zum Selbstbau
aber: Verständnis für die Materialien und Auslegung
- Balune
 - Spannungsbalun
 - Strombalun
 - Mit Übersetzungsfaktoren der Impedanzen
- Mantelwellensperre (Common Mode Choke) – ist das ein Balun?
- HF-Transformatoren (Halbleiter-PA, Vorverstärker)

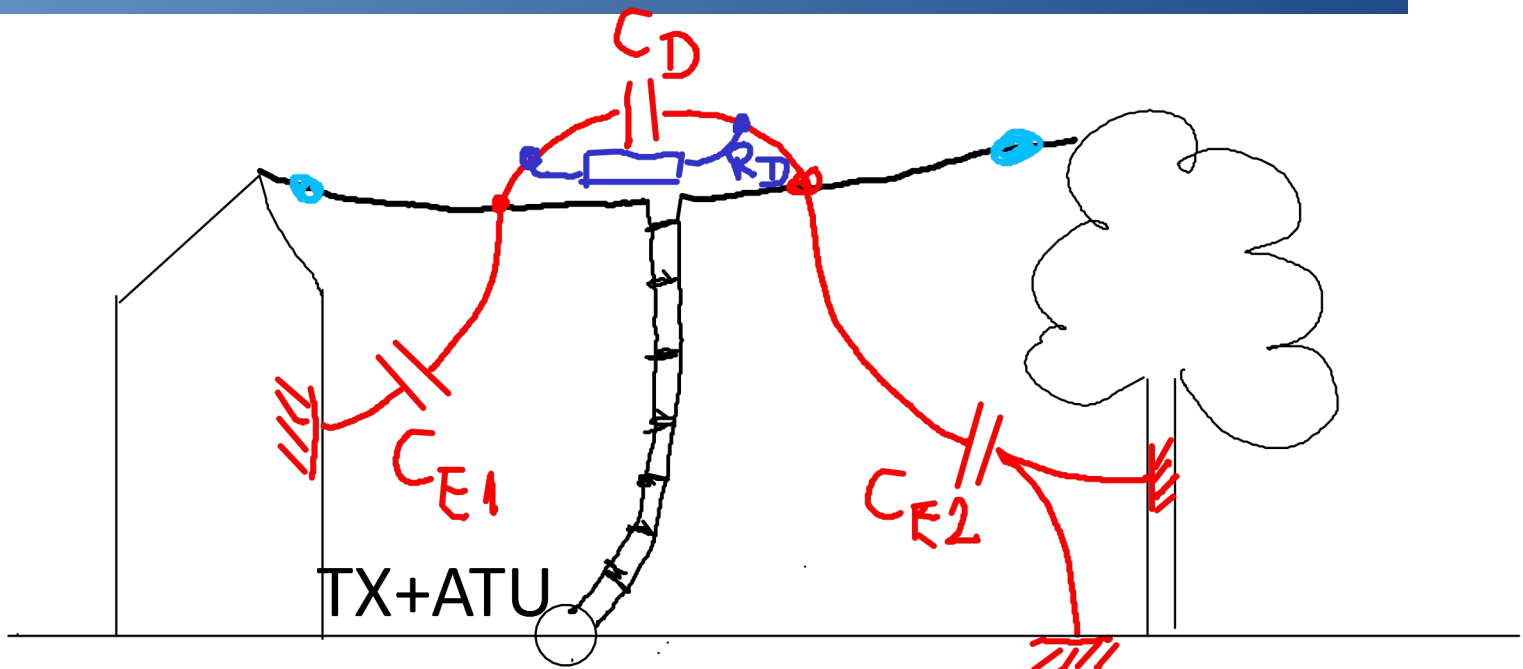
Motivation

Stand und Prüfungsfragen

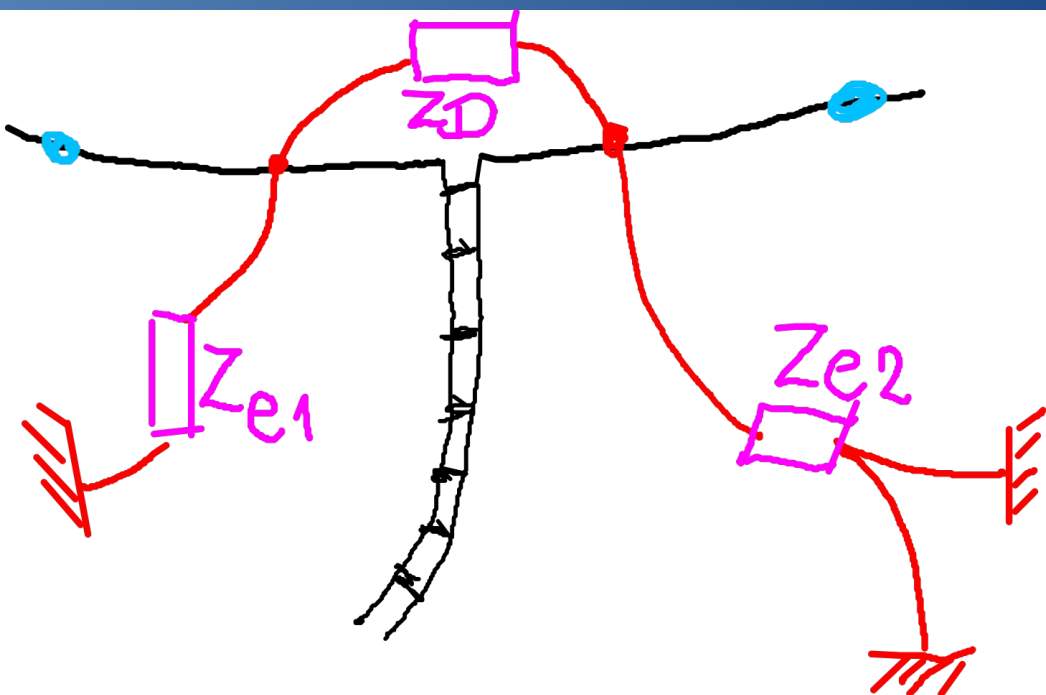
- Balun (23 Fragen mit und ohne Kern)
- PI-Filter für Röhren-PA
 - wie verbreitet sind diese noch?
- Kernmaterialien
 - Welche kennst Du?
- HF-Transformatoren
 - Hast Du schon mal berechnet?
 - Selbst gewickelt?



Symmetrische Antenne und Lasten

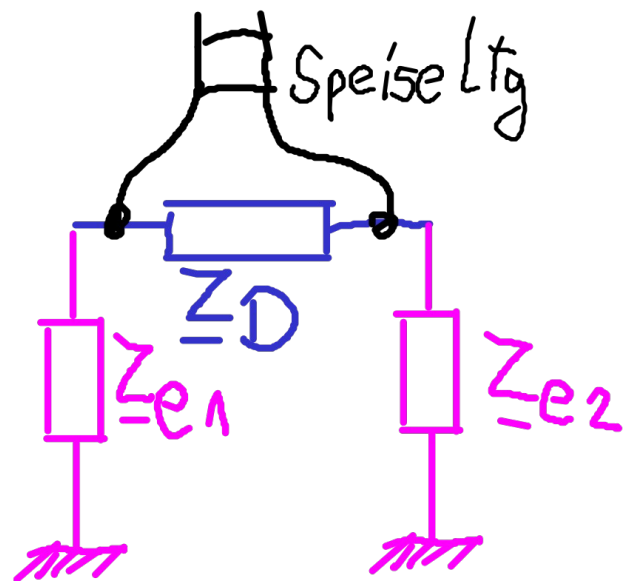


Vereinfachtes Ersatzschaltbild Antenne



Ersatzschaltbild Antenne

- Z_D : Strahlungswiderstand
- Erd-Impedanzen



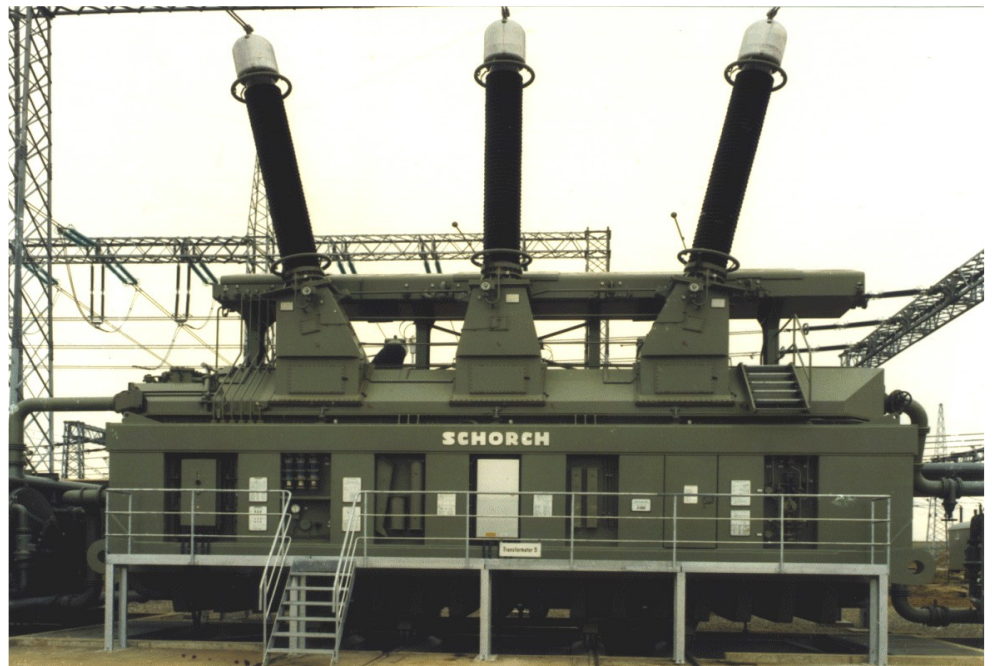
**Ist das
symmetrisch?**

Trafos

Was sind die Auslegungsprinzipien?

Trafos

- 3 Phasen
- 600 MVA
- 380 /110 kV



HF-Transformatoren-Balune-Mantenllwellensperren/Dr. Ha.



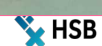
- 9 -

Aktivteil ohne Kessel

- „kleiner“ Netztransformator
- Aktivteil, 40 MVA, Ölkühlung



HF-Transformatoren-Balune-Mantenllwellensperren/Dr. Ha.



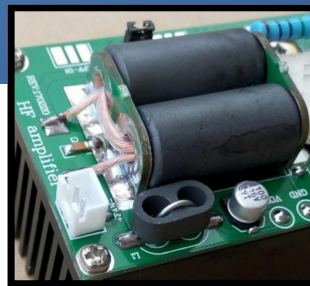
- 10 -

Prinzipien Netztrafo

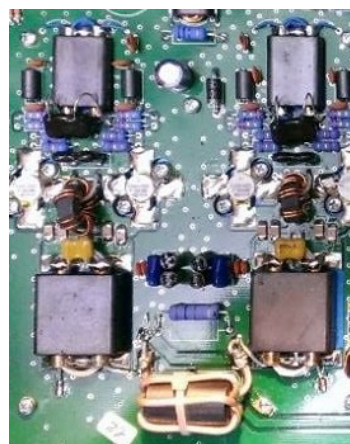
- Wicklungen sind konzentrierte Elemente
- Isolation der Wicklungen erfordert großen Abstand
- Wickeldraht erregt Magnetfeld im Kern
- Magnetfeld ist Kopplung Primär / Sekundär
- Magnetfeld braucht hochpermeablen Kern $\rightarrow$ hohe Kopplung
- Kernmaterial mit extrem geringen Verlusten $\rightarrow \eta > 90 \%$
- Leerlaufimpedanz $\gg$ Betriebsimpedanzen (kleine Blindleistung)
- Etablierte Messmethoden (zB. Leerlauf, Kurzschluss)
- Quellwiderstand: nahe bei 0Ω (Lastunabhängigkeit)

HF-Trafo

- 100 W PA
- Ausgangsübertrager 1:4



ohne Wicklung



Wieviel Trafos/Drosseln?

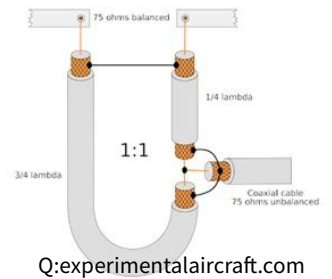
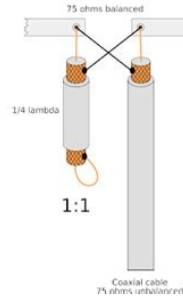
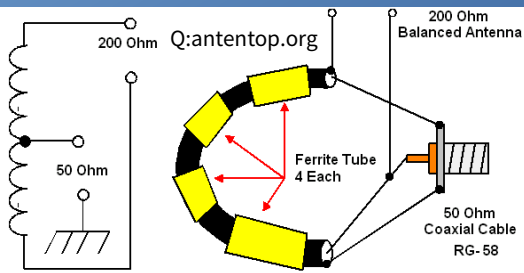
Historische Entwicklung der Balune

- 1889: Ernst Lecher: $\lambda/4$ -Leitung zur Frequenzmessung
- 1935: Felix Gerth: Patent: aufgewickelte $\lambda/4$ -Leitung mit höherer Bandbreite (auch mit Kern)
- 1942: Patent: Gustav Guanella: aufgewickelte „Gerth-Leitung“ zur Impedanztransformation mittels Leitungswiderstand (verdrillte Drähte $\sim Z_0$)
- 1963: Bill Amidon Verkauf von Fair-rite-Kernen
- Ab 2000 : EMV Entstörungskerne (z.B. Wuerth Electronic)

Balun-Auslegungsgrundsätze

- Impedanz der Hauptinduktivität $X_L > \{3..5\} \cdot Z_0$
- Wickeldraht kürzer als $\lambda/20$ ($\varphi < 18^\circ$)
 - kein Einfluss auf den Wellenwiderstand der Anordnung
 - benötigen daher keine verdrillten Leitungen
 - benötigen einen magnetischen Fluß (Kern)
- Betriebsinduktion unterhalb der Sättigung
 - Bestimmung mit komplexem Stromwert
 - μ' aus Materialdaten

HF-Balune



HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 15 -

HF-Balune (Mantelwellensperren)



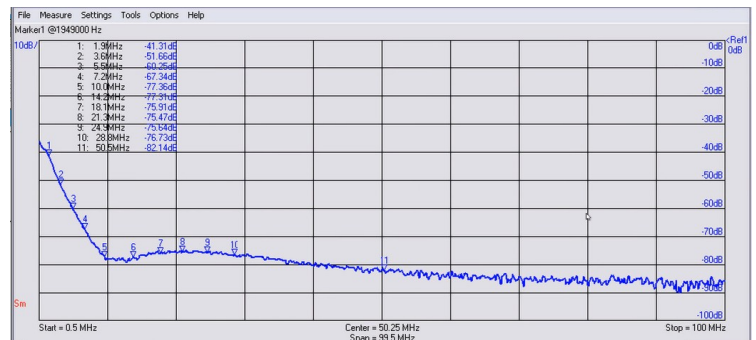
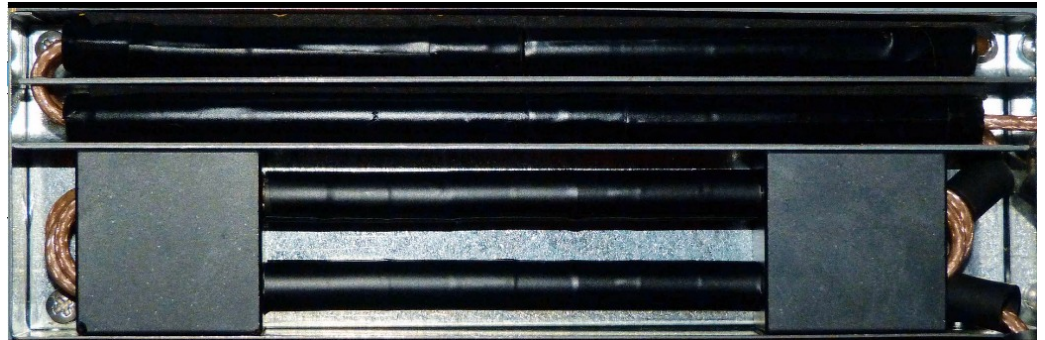
HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 16 -

HF-Balune (Mantelwellensperren)

- Q: DK6BQ,
DK3XA
- CST-Simulation
- Gute Dämpfung
- Messung:
-40 .. -80 dB



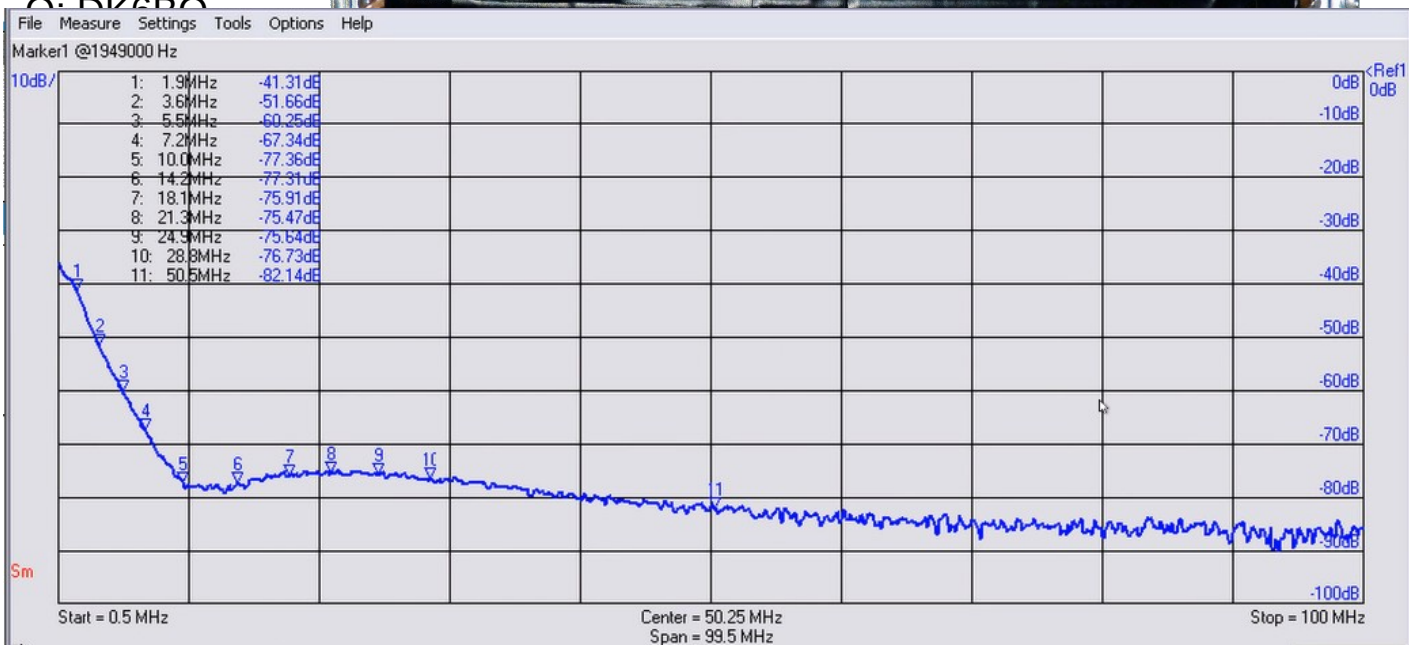
HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 17 -

HF-Balune (Mantelwellensperren)

- Q: DK6BQ



HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 18 -

Prinzipien HF-Trafo

- Wickeldraht als Leitung mit Z_0
- Wickeldraht **sehr viel kürzer** als $\lambda/4$ oder gezielt
- Einzelne Wicklung als verteilte Elemente der Wicklung mit Kopplung untereinander
- Wicklungskopplung induktiv und kapazitiv
- Kernmaterial mit niedriger Permeabilität, teils mit hohen Verlusten
- Wenig etablierte Messmethoden
- Prinzip: Impedanztransformation
- Betrieb mit Blindleistung im Magnetfeld

Balune – wo ist der Nutzen

Balune in der Antennenleitung

- TX: Symmetrie der symmetrischen Antenne wird durch Ströme auf der Speiseleitung gestört → Abstrahlung vermindert
- RX: Einkopplung von Versorgungsnetznahen Störquellen beim Empfang: Schwerpunkt tiefe KW-Bänder
- Mantelwellensperren (CMC - Common Mode Choke)
- Bedeutung wird gerne **unterschätzt**

Balune = Transformator

- Nachgemessen werden gerne
 - Einfüge-SWR
 - (schon schwieriger:) Einfüge-Verluste (Kopplung)
 - Ggf. Übersetzung
 - Selten jedoch: CMRR (common mode reject ratio)
- Frage: Was ist wichtig?
- Messung mit VNA leicht möglich – kennen noch sehr wenige

Grundsätzliche Einstufung

- Volltransformator – für $\ddot{U} > 2$
- Spartransformator – für $\ddot{U} < 2$
- Als Balun
 - Leitungswicklung mit Z_0
 - Voll- oder Spartransformator
 -
- Mantelwellensperre = Drosselspule (leerlaufender Trafo)

Grenzen und Aufgaben

- HF-Trafo – über viele Oktaven unveränderte Eigenschaften
- Prinzip des Netztrafo: magnetische Kopplung
- HF-Trafo: Leitung
- Leitungen kurz gegen $\lambda/4$ → Resonanz!!
- Verdrillen? Leitung mit Z_0
- Trafo mit magnetischer Kopplung fordert: Leerlaufstrom « {4-5} · Betriebsstrom

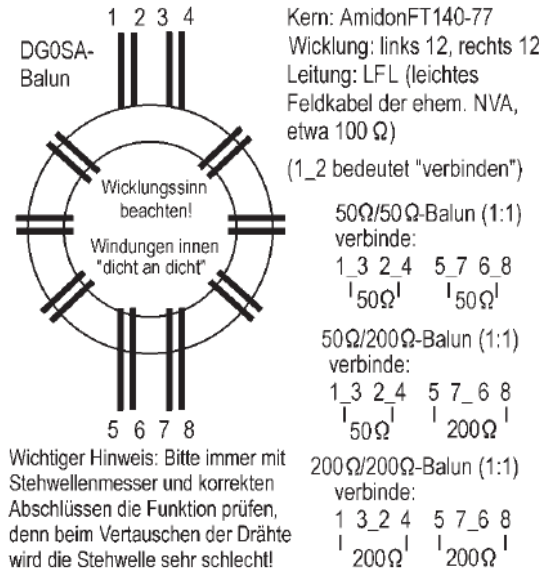
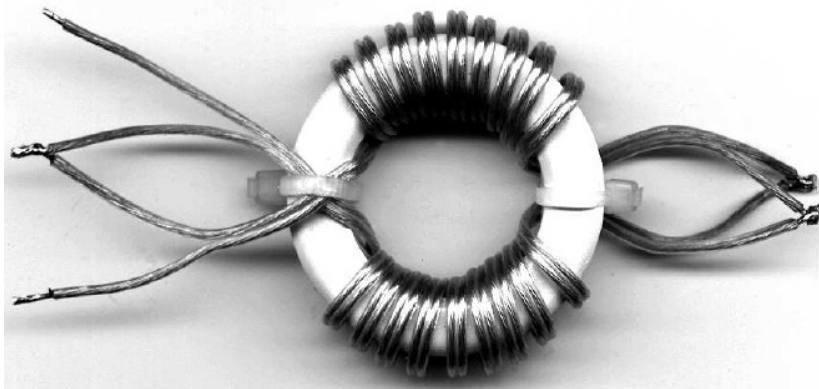
Begriffe

- Permeabilität μ
- relative Permeabilität μ_r als dimensionslose Zahl
- Kernverluste als $j \mu$ oder μ''
- Magnetische Feldstärke H in A/m
- Magnetische Induktion B in T
- V, A, Ω , W, VA

Untersuchung eines Beispiels

DG0SA† (cqDL 5/2002)

- 2 · 10-Wdg auf FT140-77
- hochpermeables Material

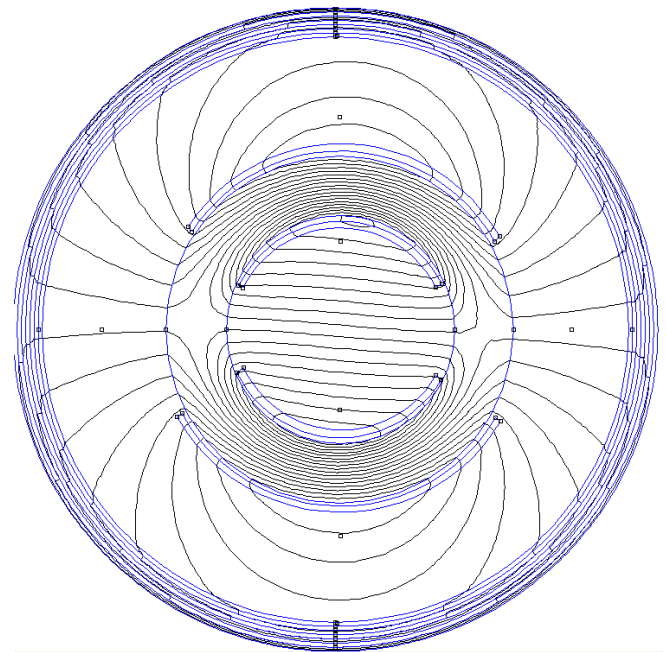
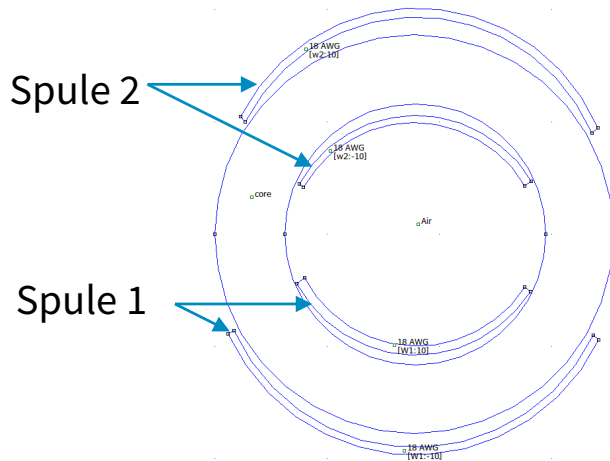


Untersuchung mit Finite Elemente Programm

- Finite Elemente = Aufteilung des Feldraumes in kleine Tetraeder (3D) oder Dreiecke (2D)
- Elemente mit homogenem Feld (zwischen den Ecken)
- Randbedingungen (Potenziale, magn. Erregung)
- Materialeigenschaften
- Aufstellen einer großen Matrix
- Iteratives Lösen (mit Genauigkeitsanforderungen)
- Auswerten

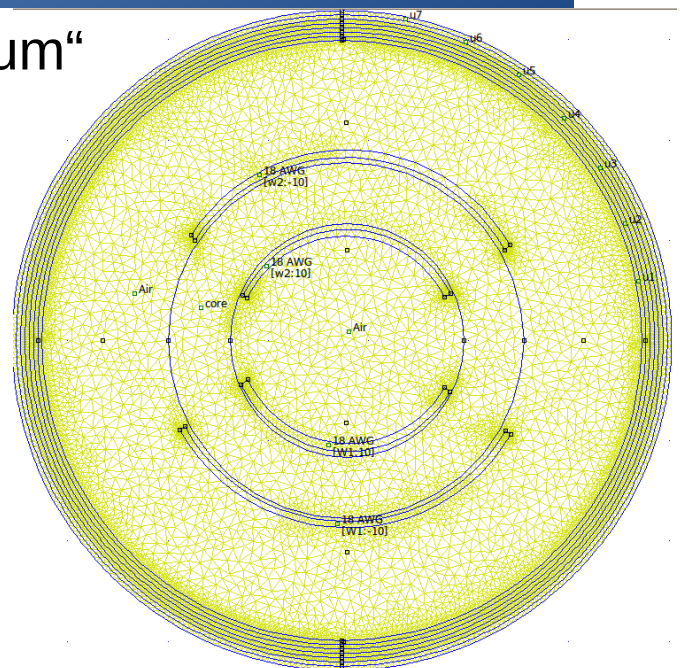
Balun für 50 Ohm geschaltet

- Modell
- Feldbild (gegenseitig)



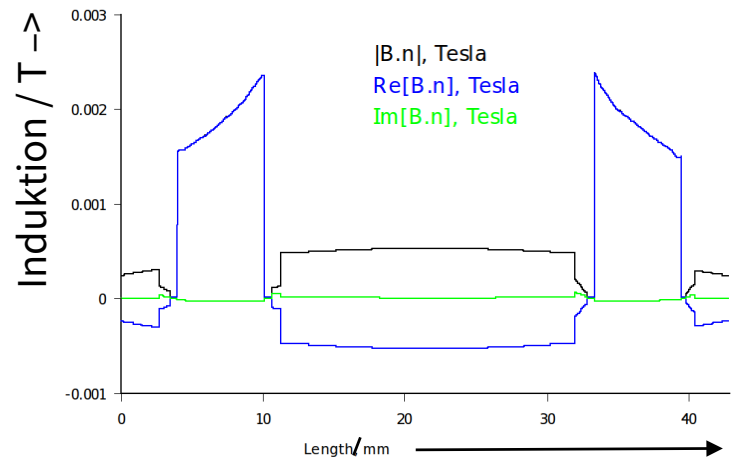
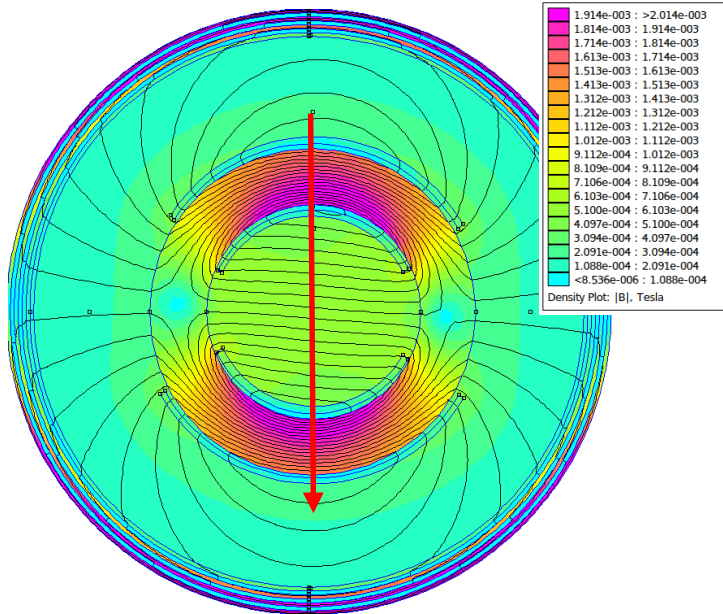
Ringkern mit 2 Wicklungen

- Bereich „unendlicher Feldraum“
- 18551 Knoten
- 36740 Elemente



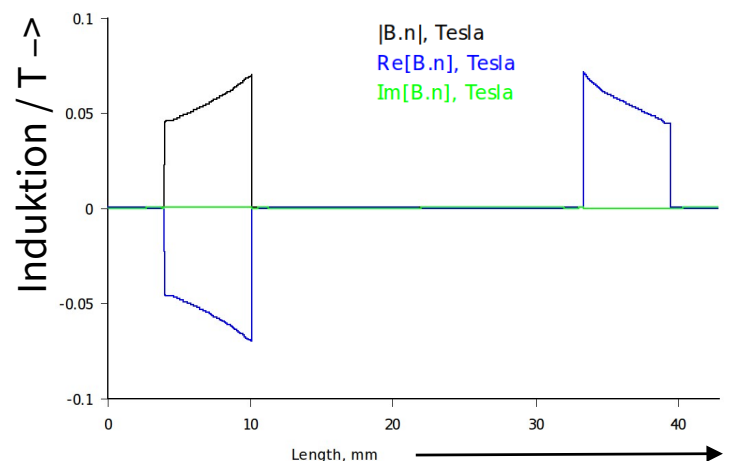
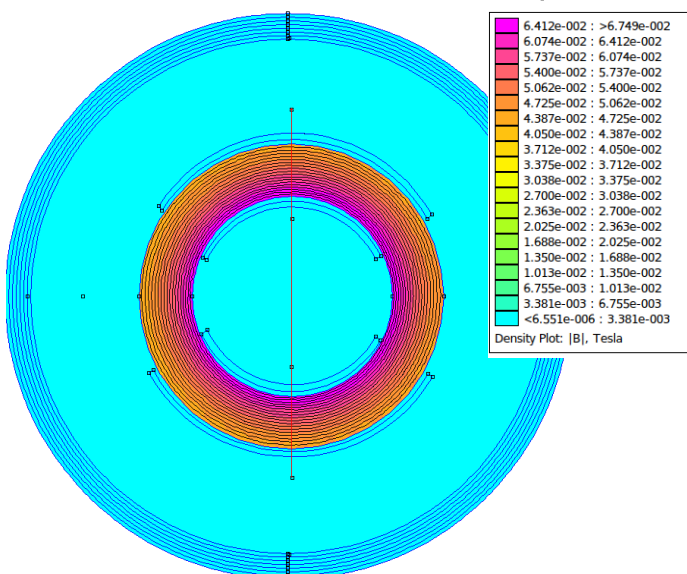
Feldbild 50 Ohm Balun (gegensinnig)

- Induktivität einzeln, Strom in beiden Spulen: **~ 1.9 μH**



Feldbild 1:4 Balun (mitsinnig)

- Induktivität einzeln, Strom in beiden Spulen: **~ 169 μH**



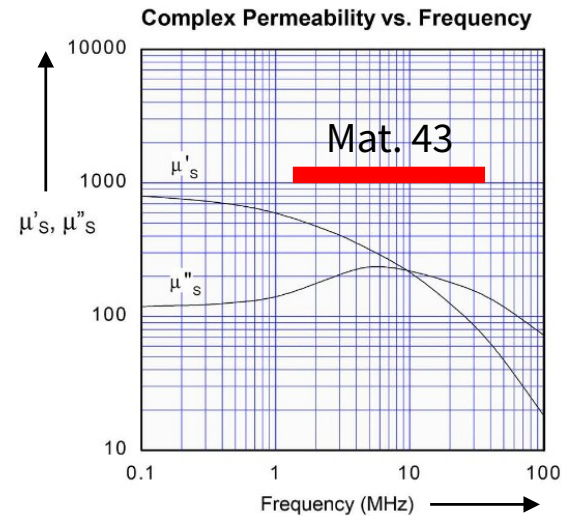
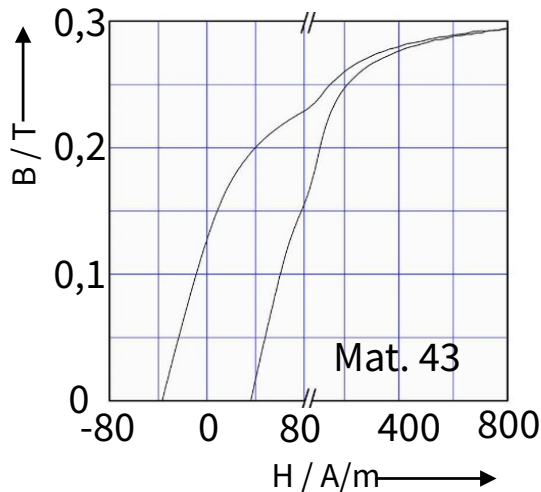
Neuer Ansatz mit anderem Kern

Schwierigkeiten bei Balunen

- Wickelkapazität führt zu Resonanzerscheinung im Betriebsbereich
- Resonanzerscheinung führt zur Sättigung des Kerns
- Sättigung führt zu Überhöhung der Temperatur
- Ziel: keine Eigenresonanzen
- Permeabilität und Kernverluste sind Funktion von f
 - Abnehmendes μ'
 - Zu nächst steigende Verluste μ'' übersteigen fallendes μ'

Betriebsbereiche von Induktivitäten mit Kern

- Linearer Bereich der Induktion
- Powerbereich mit erhöhten Verlusten

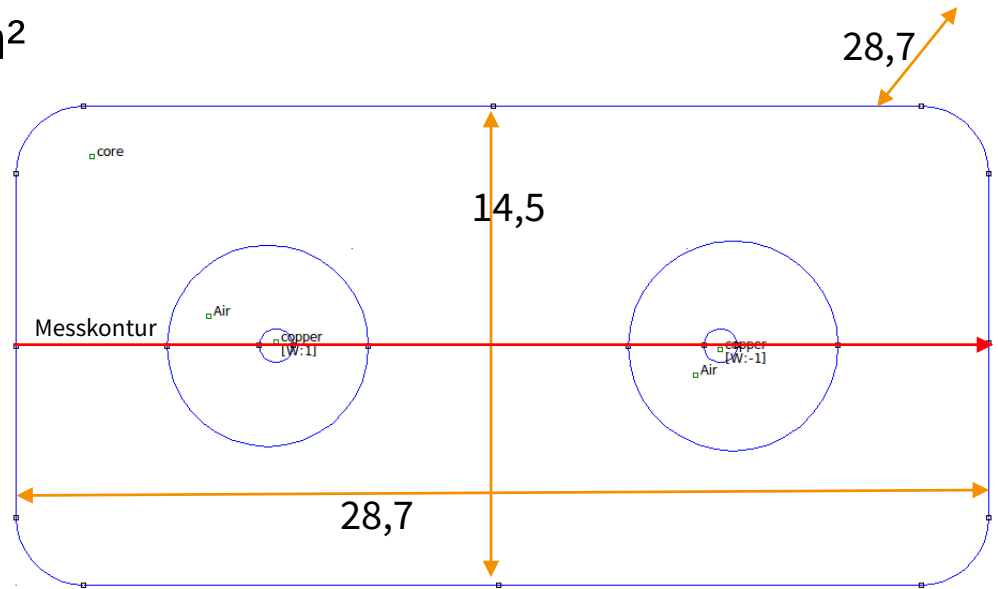


Balun mit Doppellochkern

- zB. Material 43; Permeabilität bei 1 MHz: $\mu' = 850$
- Geringe Leitungslänge
- Geringe innere Wickelkapazität
- Induktivität: $8 \mu\text{H}$ pro Windung²
 Beispiel: 2 Wdg. $\sim 36 \mu\text{H} = 791 \Omega|_{3.5 \text{ MHz}}$
 Mantelwellensperre mit RG316 (W1JR)
 38 cm RG316, 4 Wdg. $\sim 128 \mu\text{H} = 2,81 \text{ k}\Omega|_{3.5 \text{ MHz}}$

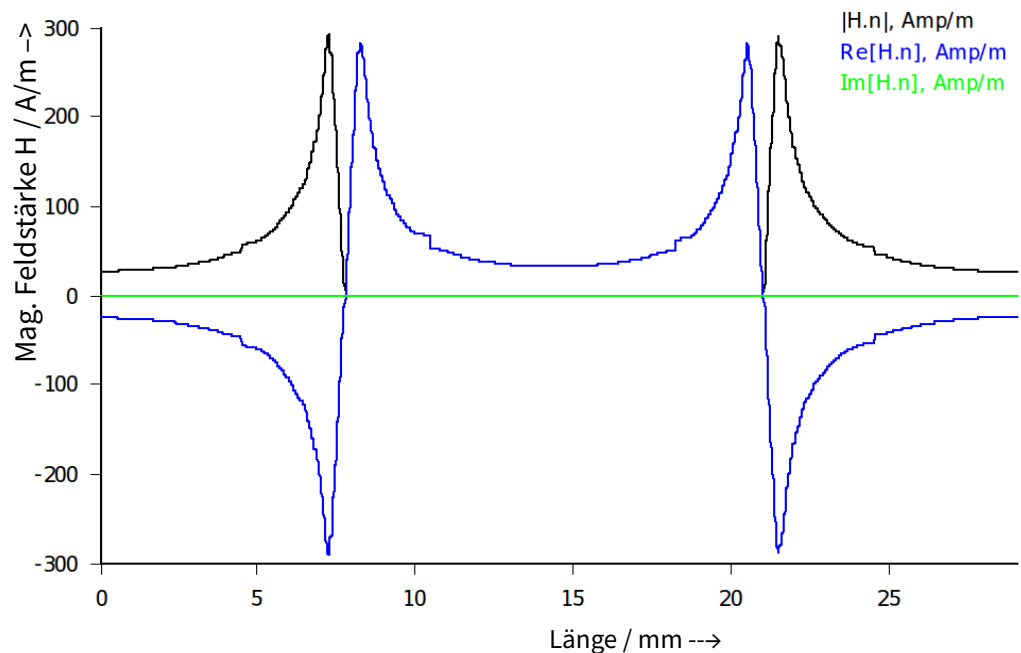
2D-Konstruktion des Doppellochkern

- BN 43 – 7051 Maß: (28,7 · 14,5 · 28,7) mm
- Kupfer: 1 mm²

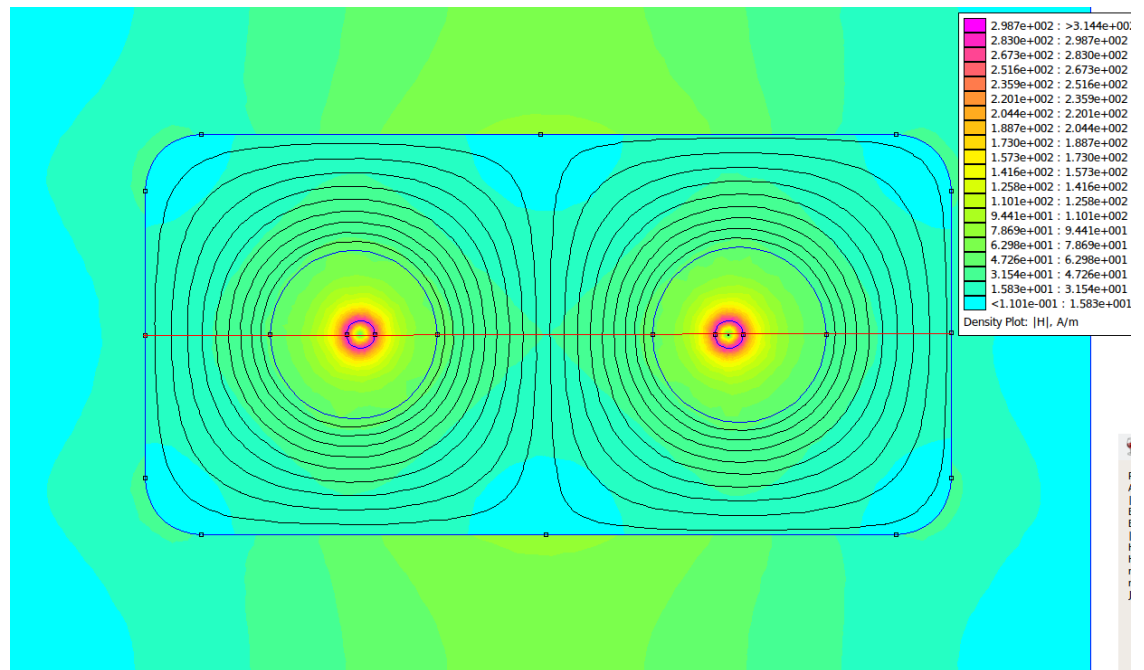


Magnetische Feldstärke H

- 1 Windung
- Erregung mit 1 A ~ 35 W HF

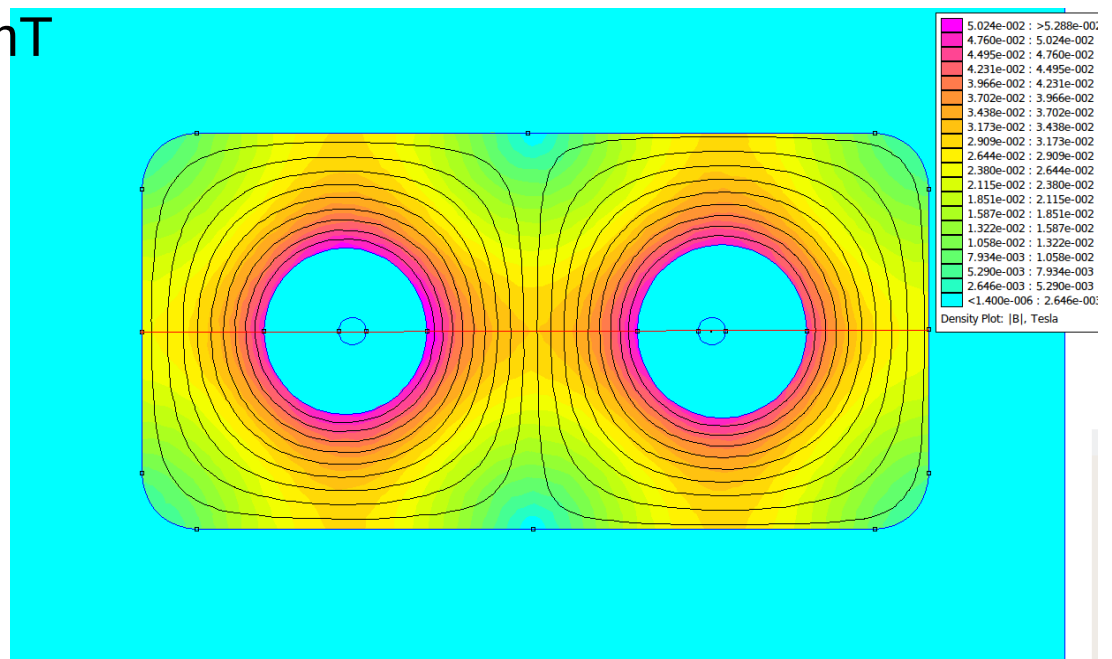


Magnetische Feldstärke H

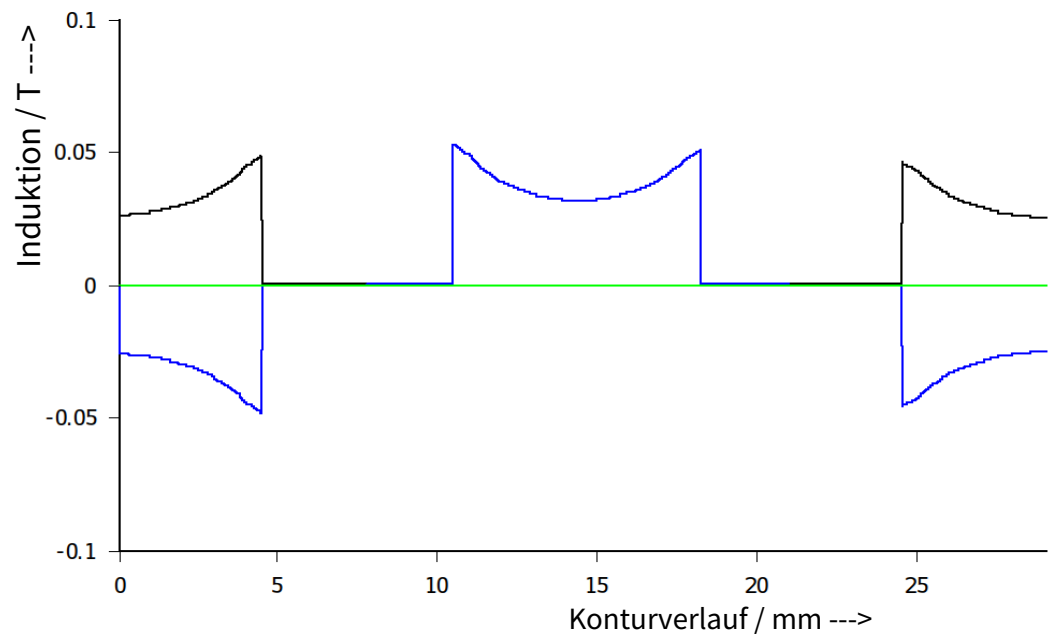


Magnetische Induktion B

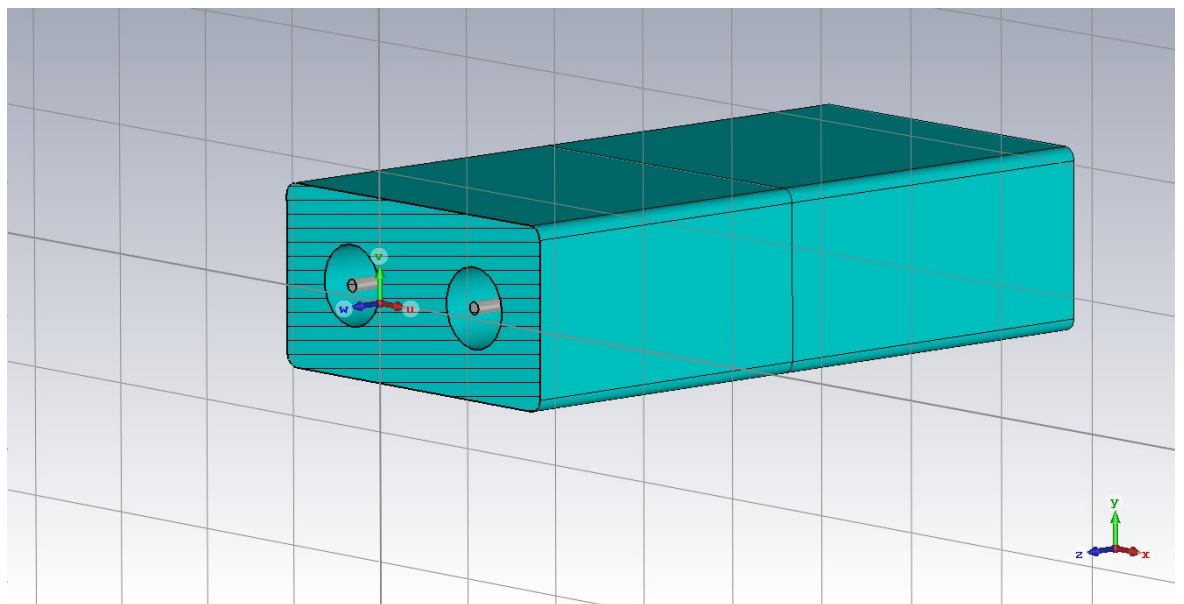
- max: 50 mT



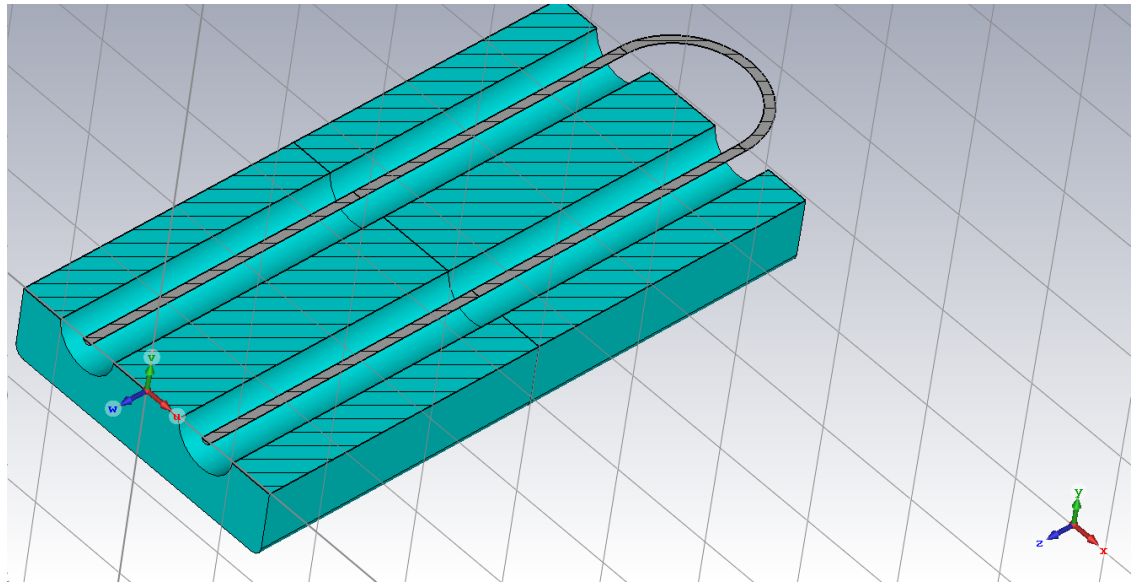
Verlauf der Induktion B



CST-simulation (1)

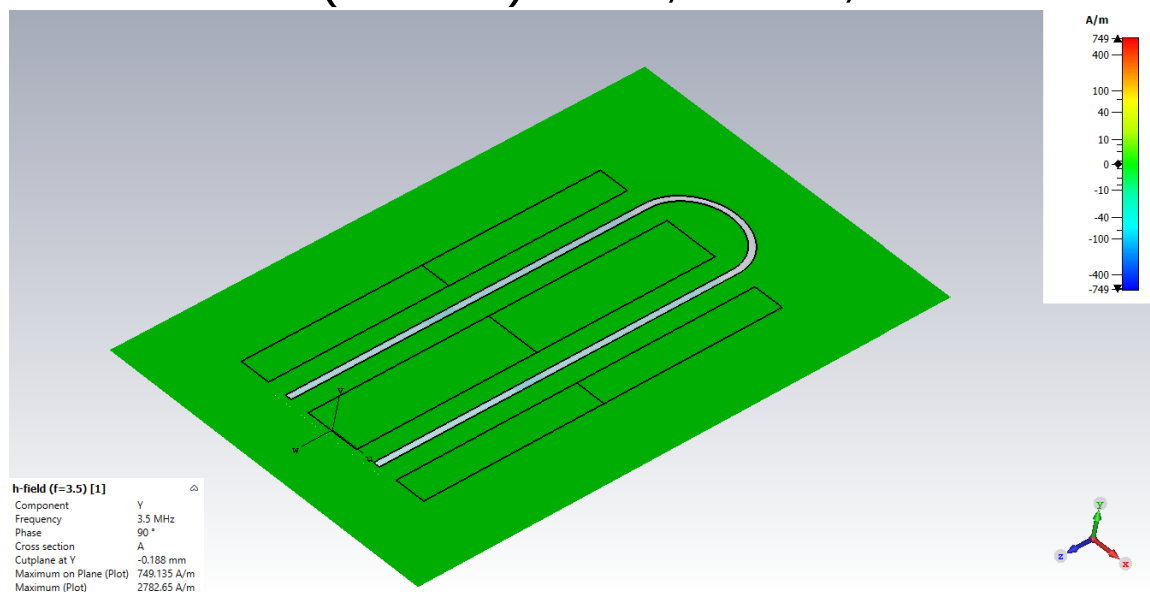


CST-simulation (2)



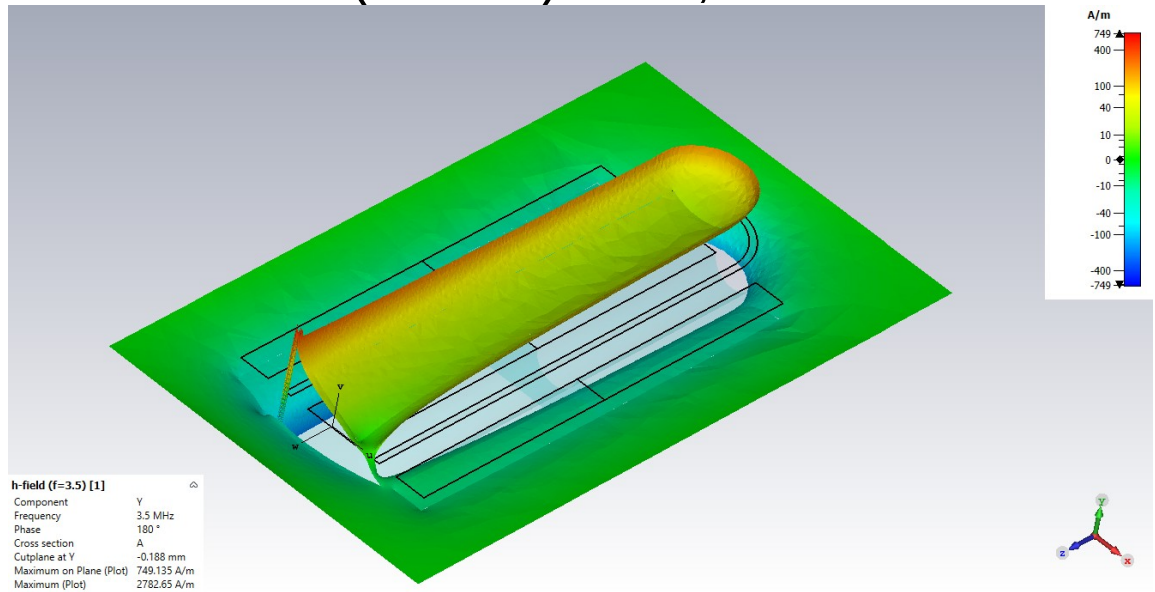
CST-simulation (3)

- Magnetisches Feld H (normal) bei 3,5 MHz, 90°



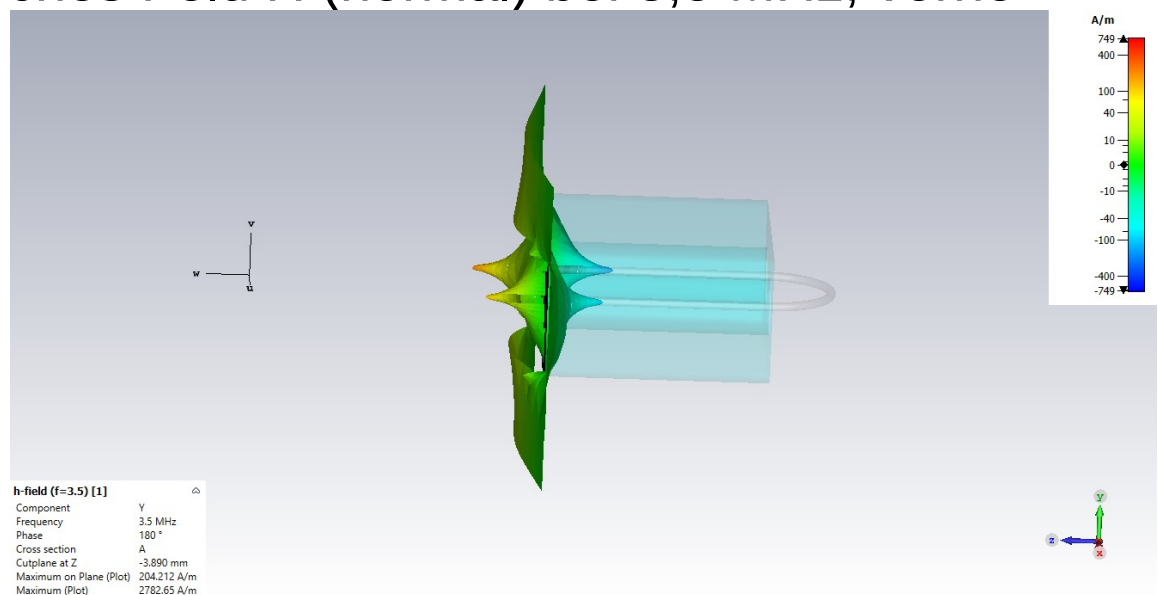
CST-simulation (4)

- Magnetisches Feld H (normal) bei 3,5 MHz 180°

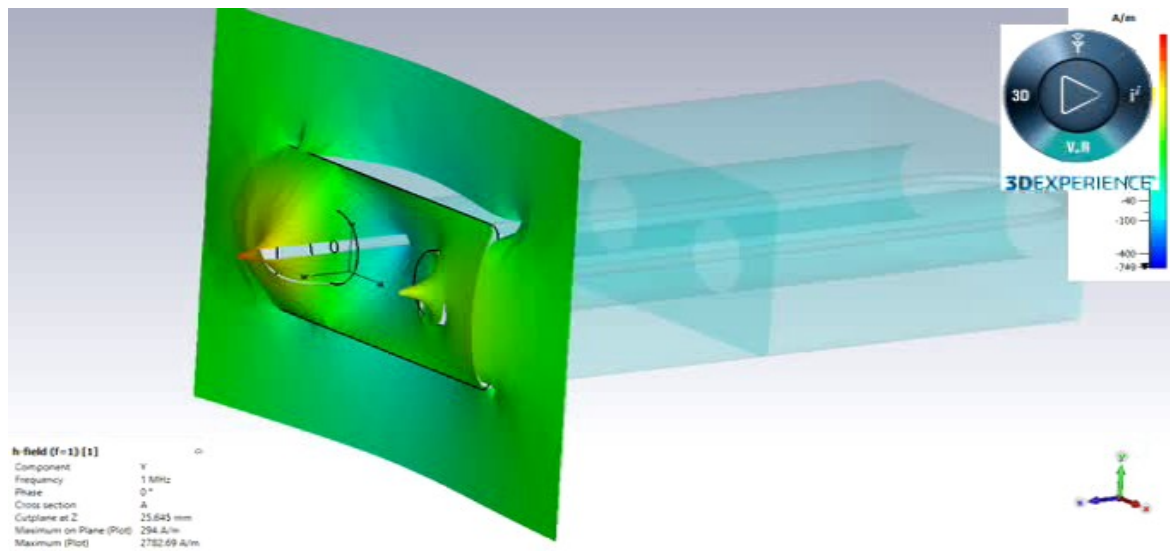


CST-simulation (5)

- Magnetisches Feld H (normal) bei 3,5 MHz, vorne



CST-Simulation 360° H-Feld, 1 MHz



HF-Transformatoren-Balune-Mantenwellensperren/Dr. Ha.



- 47 -

Messung

HF-Transformatoren-Balune-Mantenwellensperren/Dr. Ha.



- 48 -

Messen der Fähigkeiten des Balun

- Unterste und oberste nutzbare Frequenz (Bandbreite)
- Übersetzungsverhältnis (1:1, 1:4, 1:x)
- Leitungswellenwiderstand
 - SWR bei Abschluss mit Z_0
 - Besser: Reflexionsdämpfung
- Durchgangsdämpfung
- Kopplungsfaktor (Leerlauf- und Kurzschlussmessung)

$$k = \sqrt{1 - \frac{L_k}{L_L}}$$

- Gleichtaktunterdrückung CMRR

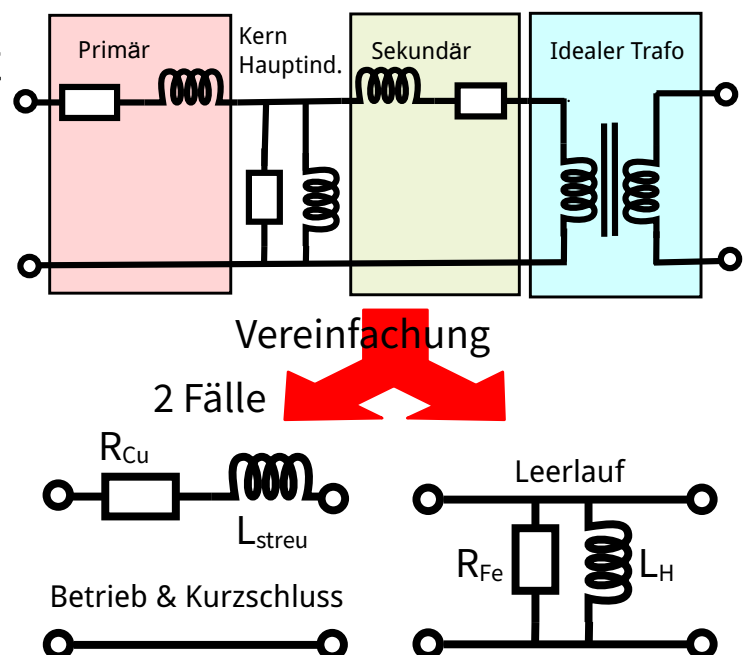
Ersatzschaltbild des Trafo

- Rechnen mit Effektivwert

$$I_{eff} = \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} \approx 0,7 \cdot \hat{I}$$

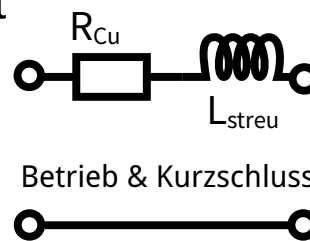
- Bestimmend sind

- Streuung
- Kopplung
- Verluste $f(f)$
 - Leiter
 - Kern

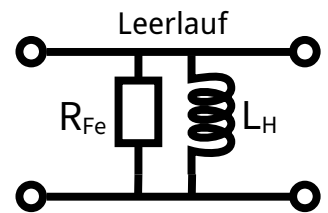


Verlustbetrachtungen

- Auslegung der Hauptinduktivität: $|X_H| > 10 Z_L$ (Netz)
 - Vorsicht: bei hohen Frequenzen
 - R_{Fe} und X_H fallen
 - ist $R_{Fe} < X_H$
- Betrieb
 - Kupferverluste, Skineffekt
 - Nur wenn $X_H \gg Z_L$
- Praxis der HF-Trafo
 - Beide Verluste vorhd.



Betrieb & Kurzschluss



Leerlauf

Anordnung des Baluns

HF-Trafo vor dem ATU?

- zB um den Arbeitsbereich des ATU mit aufwärts transformierendem L-Glied zu erweitern
- Aber: Symmetriertrafo hinter dem asymmetrischen ATU
 - Kontrolle der Strombelastung (Kernverluste)

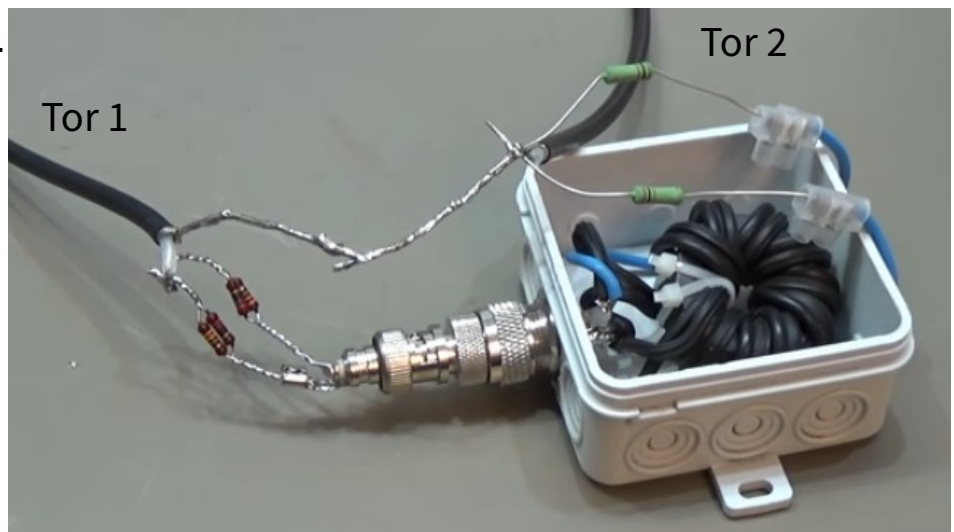
Balun hinter dem asymmetrischen ATU

- Spezieller Balun: zur Symmetrierung (!! Trafo – L_H !!)
- Vorsicht: Sättigung durch hohe Blindleistungsströme vermeiden, wenn L_H zu gering
- Zusätzliche Verluste

Beispiele zur Messung

Messaufbau CMRR (vereinfacht)

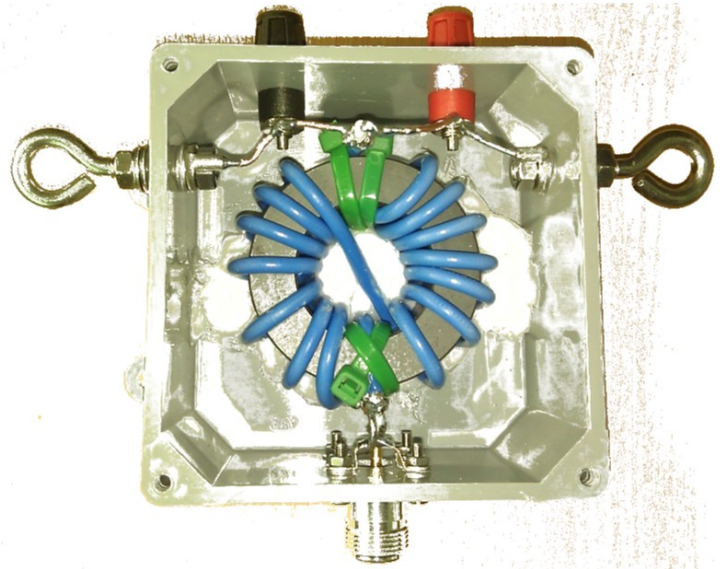
- 4 R, je halber Z_0
- Auch bei $\bar{u} < 1$
- VNA-Messung



Youtube TRX Bench Part #1 bis #5

W1JR-Wicklung

- Thermisch stabiles Koax erforderlich
- Leitung mit Z_0
- Viel Induktivität
- Gute Sperrwirkung CMRR
- Wickelkapazität begrenzt hohe Frequenzen (<50 MHz)



HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 57 -

Messung Leitungseigenschaften

- Abschluss mit Wellenwiderstand (80cm Draht)



Youtube TRX Bench Part #1 bis #5

HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 58 -

Symmetrie + 1:4 Trafo



Youtube TRX Bench Part #1 bis #5

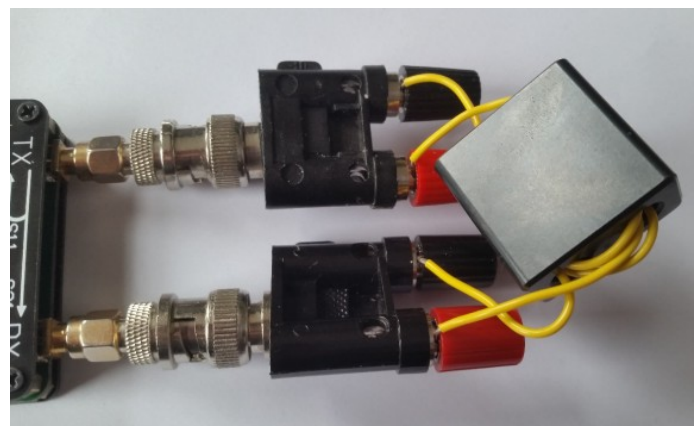
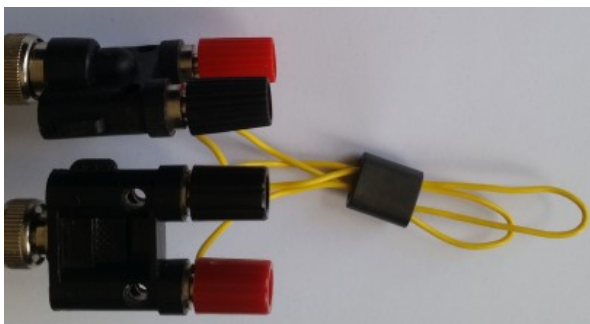
HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 59 -

einfacher Balun

- Wenig Kern
- geringe Wicklungskapazitäten
- hohe Entkopplung (Mantelwellenunterdrückung)
- kurze Drahtlänge



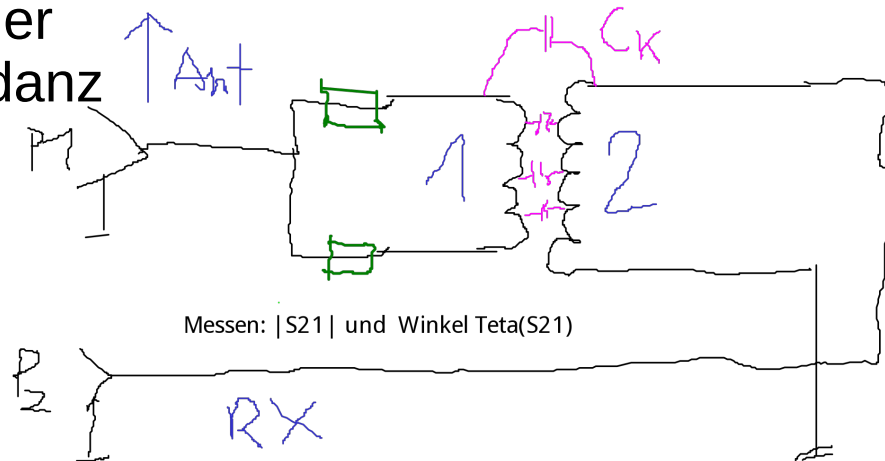
HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 60 -

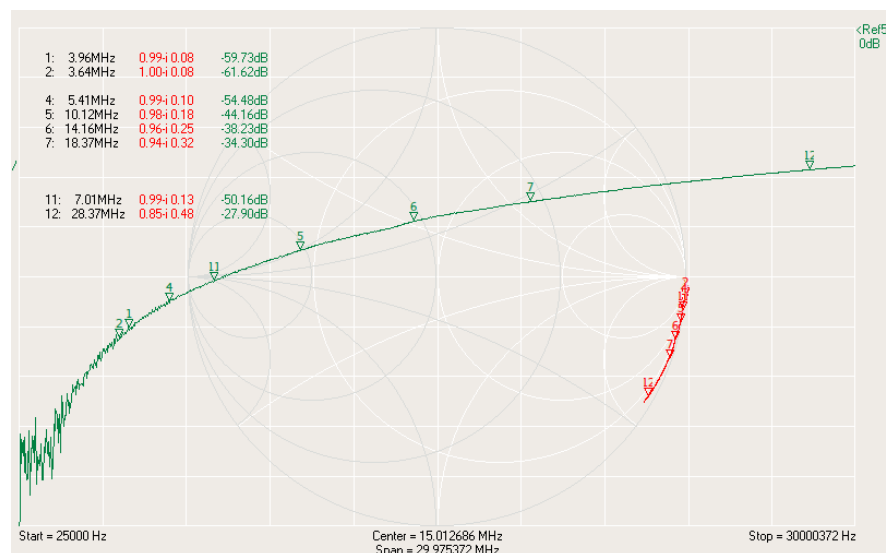
Messung des CMRR (Common Mode Rejection Ratio)

- Messung mit Netzwerkanalysator
- S21 (Betrag, Phase)
- Berechnung der Transferimpedanz



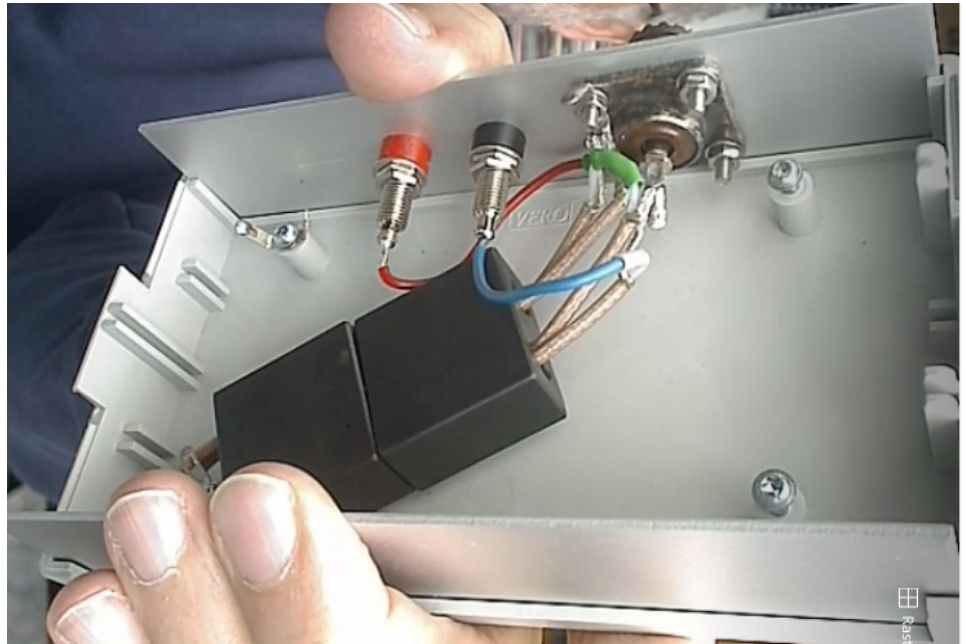
Messergebnisse CMRR

- Messung mit VNA (S11, |S21|)
- 3.64 MHz: -61 dB
- 10.12 MHz: -44 dB
- 28.37 MHz: -28 dB
- Errechnete Koppelkapazität: 1.85 pF



2 Kerne BN 43-7051 (DK6BQ) $\ddot{u}$ = 1:4

- RG316



HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 63 -

Zusammenfassung

- HF-Trafos und deren Designprinzipien
- HF-Trafos dienen der Impedanzübertragung
- Designs mit kurzen Wickeldrähten sind vorteilhaft
- ab einigen MHz treten höhere Kernverluste auf
- Doppellochkerne für HF-Trafos (Balune)
- Mantelwellensperren = leerlaufende Trafowicklung
- Beispiele von Balunen und Trafos

HF-Transformatoren-Balune-Mantelwellensperren/Dr. Ha.



- 64 -

Quellen

In separtem Dokument mit anklickbaren URL

- Quellen wurden so ausgewählt, dass diese überwiegend leicht zugänglich sind