

attempo

Magnetische Bauteile und Baugruppen

Grundlagen, Anwendungsbereiche, Hintergründe und Historie

Attempo

induktive Bauteile,
Feldbustechnik
Testhaus

Steinbruchstr. 15
72108 Rottenburg

Tel.: +49 (0) 7472 9623 90
Fax: +49 (0) 7472 9623 92

eMail: info@attempo.com
www.attempo.com



- Induktive Bauteile
Berechnung, Simulation
und Test
- Kleinserienfertigung
- Filtersysteme
- EMV –Test, Beratung
und Seminare
- Entwicklungsunter-
stützung
- Kommunikationstechnik
- Feldbusanalysen
und Komponententest
- Umweltprüfverfahren
- Information

Version 1.1 25.06.2009

Drosseln und Spulen

Diese Bauteile sind von sehr vielen Faktoren abhängig. Die Betrachtung muss zumindest applikations- und Frequenzabhängig erfolgen. Auch sind einige grundsätzliche Berechnungen nötig.

Die Links sind nicht aktiv, da Auszug aus Vorlesung/Vortrag

Drosseln sind immer eine Kombination von:

- einer Induktivität
- diversen Widerständen
- und diversen Kapazitäten

alle sind jeweils von vielen unterschiedlichen Faktoren abhängig.

Je nach Applikation ist auf folgende Einflüsse zu achten:

Frequenz, Strom, Wicklungsart, Spulendurchmesser, Wicklungslänge, Drahtmaterial, Drahtdurchmesser, Kernmaterial, Permeabilität, Kernform, Position, Umgebung, Ansteuerung, usw.

Drosseln sind:

- Striplines, Laufzeitverzögerungen, Printspulen, Schneckenwindungen, Schneckenspulen,
- Leiterbahnen, Leitungen, Kreisspulen, Spiralspulen, Rahmenspule
- Entstördrosseln, Ferritperlen, Hülsendrosseln, Dämpfungspulver, Ferritbrücke
- Ferritantennen, Siebfaktordrosseln, Eigenkapazitätsspulen,
- Luftspulen - einlagig, mehrlagig
- Resonanzdrossel, NF-Drosseln, HF-Drosseln, Breitband-Drosselwindungen, Keramikdrosseln
- Schutzleiterdrosseln
- Stromkompensierte Drosseln, Stromkompensierte Datenleitungsfilter
- Ringspulen
- Klappferrite, Blockkerne, Flachkerne, Ferritringe, Ferrithülsen, Ferritplatten, SMD-Ferrite
-

Auch hier gelten die Elektrischen Verluste magnetischer Bauteile

Die Verluste sind abgesehen vom ohmschen Widerstand R_{CuDC} des Drahtes **frequenzabhängig**.

Die Kupferverluste werden bestimmt durch:

Draht, Temperatur, Wickeltechnik, Spannung, Strom

Kupferverluste:

Wicklungsverluste ($f = 0$, ohmscher Widerstand R_{CuDC})

Wirbelstromverluste der Wicklung (Skineneffekt, Proximity) $R_{Cu(f)}$

temperaturabhängige Verluste

Die Kernverluste werden bestimmt durch:

Kernmaterial, Kernform, Luftspalt, Temperatur, Lage der Wicklung

Abstand der Wicklung zum Kern, Feldstärke, Induktion, Signalform, Umgebung(Einbauart)

Kernverluste: $R_{K(f)}$

Hystereseverluste

Wirbelstromverluste R_W

temperaturabhängige Verluste

Nachwirkungsverluste

Zusätzliche Verluste

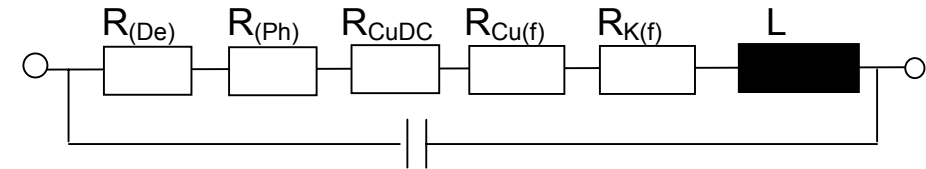
Dielektrische Verluste $R_{(De)}$

Gyromagnetische Verluste

Verluste durch Abschirmung $R_{(As)}$

Verluste durch Peripherie (R_{Ph})

Dielektrische, Verluste, Verluste durch Wirbelströme in der Abschirmung



Ersatzbild

C (Summe)
Parallelresonanzkreis

Der Verlustfaktor $\tan \delta$ für Kernmaterialien in Abhängigkeit von der Frequenz fasst diese Verluste zusammen und stellt einen Anhaltspunkt dar. Mit steigender Temperatur nehmen die Verluste, je niedriger die Curietemperatur ist, stärker zu. Auch müssen bei nicht perfekter Sinus-Welle, die Oberwellen separat betrachtet werden.

Bei einem Rechtecksignal muss noch die 7. Oberwelle (K7) mit relativ geringen Verlusten übertragen werden.

Was ist beim Einsatz von Drosseln zu beachten

Die unterschiedlichen Drosseltypen sind durch die Applikation bedingt.

- Jede Drossel ist ein Energiespeicher $J = \frac{1}{2} LI^2$.
- Bis zur Resonanzfrequenz ist eine Drossel induktiv, darüber kapazitiv. Resonanzfrequenz: $f_0 = 1 / (2 * \pi * (L * C)^{1/2})$
- Eine Drossel besteht aus ohm'schen, induktiven und kapazitiven Komponenten, ist ein gedämpfter Schwingkreis
- Eine Drossel hat einen relativen Real-(induktivitäts-) Anteil μ_s' und einen relativen frequenzabhängigen, ohm'schen imaginär-(Verlust)Anteil μ_s''
- Eine Drosseln erzeugen bauformabhängige, elektromagnetisches Felder

Luftspulen sind für hohe Frequenzen geeignet. Die Belastung durch den Strom ist durch den Draht und die Spannung durch die Isolationsmöglichkeiten begrenzt. Hier sind sehr hohe Güten erreichbar.

Wird vorwiegend im HF-Bereich oder bei großen Strömen eingesetzt.

Ferrite ohne Luftspalt sind für Wechselspannungsanwendungen, wie Filter geeignet.

Können aber bereits bei kleinem DC-Offset, unsymmetrischem Strom/Fluss je nach μ_e , in die Sättigung gehen.

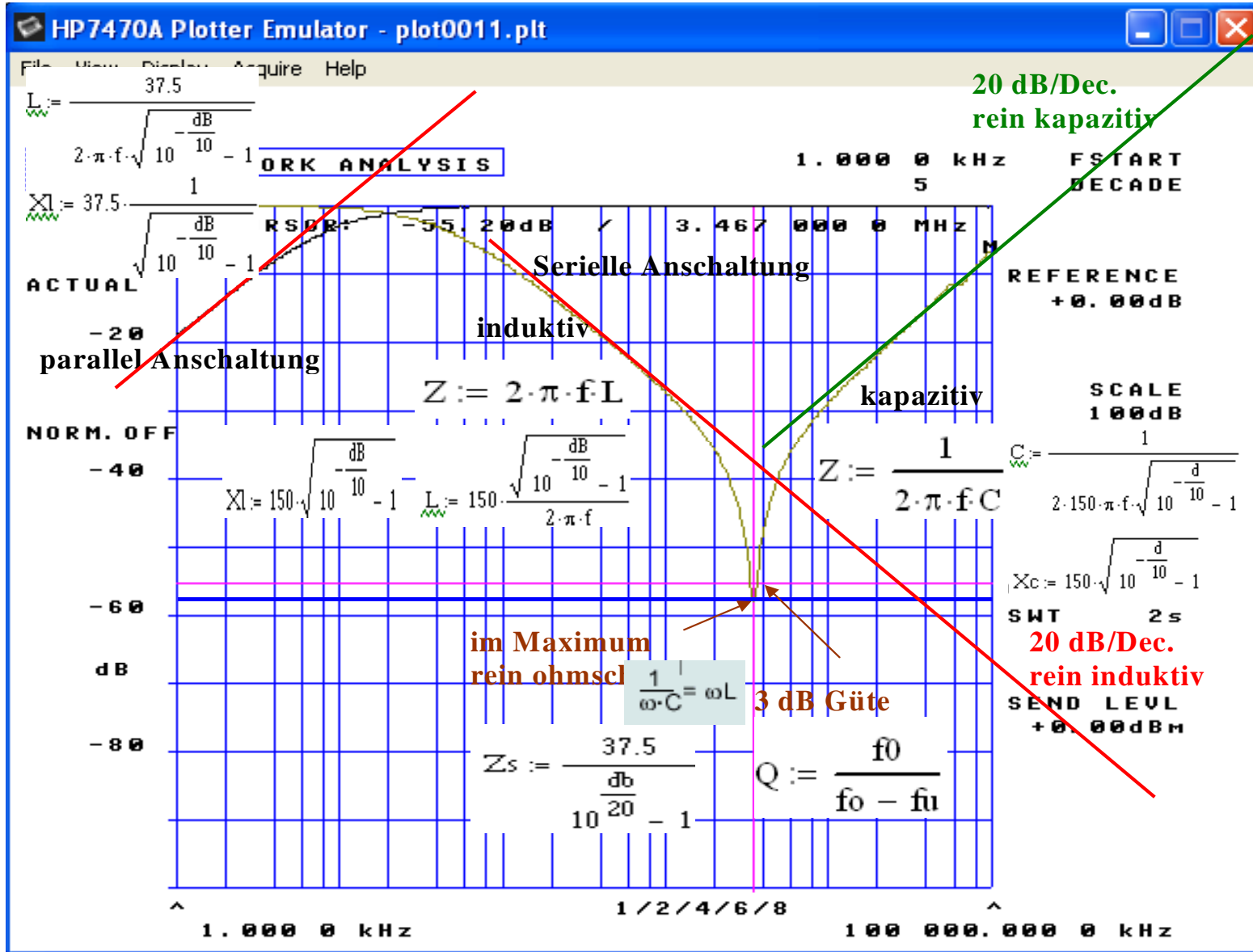
Die untere Grenzfrequenz ist hauptsächlich von der Induktivität abhängig

Die obere Grenzfrequenz ist hauptsächlich vom Kernmaterial, Draht und Wicklungsaufbau abhängig

Ferrite mit Luftspalt müssen richtig dimensioniert werden – Der Luftspalt muss zum DC-Strom (Offset) oder der Unsymmetrie passen. Ein zu großer Luftspalt muss mit erhöhter Windungszahl und den dadurch resultierenden Nachteilen, kompensiert werden.

Eisenpulverkerne dürfen nicht überfahren werden. Durch elektrische Überlastung und Erwärmung wird der Alterungsprozess extrem beschleunigt. Die Drosselverluste beachten. Die Auswahl der Kerne (Material und Geometrie) muss zur Applikation passen.

Auswertungsbeispiel einer Drossel über Netzwerkanalyse



Die genauen Berechnungen, Simulationen und Definitionen sind in den Hyperlinks ersichtlich.

Schwarz:
[Parallele Einfügung](#)

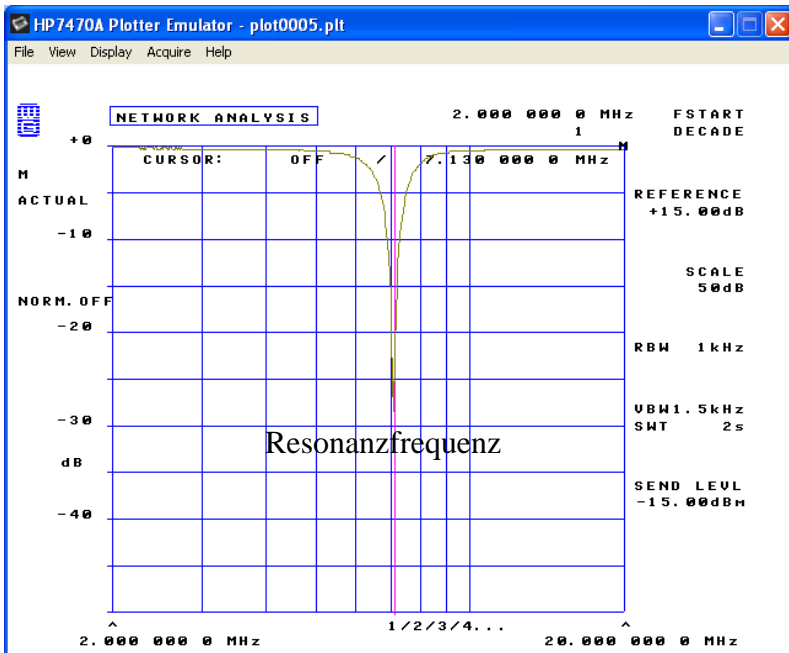
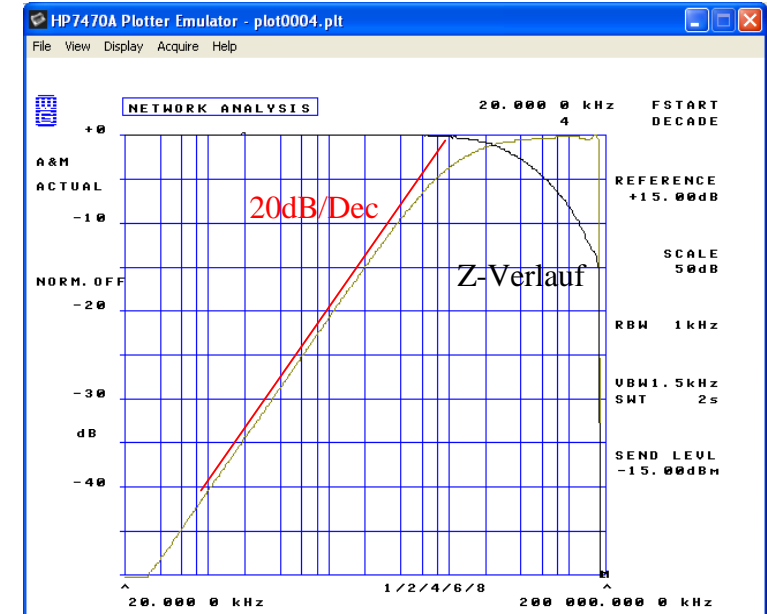
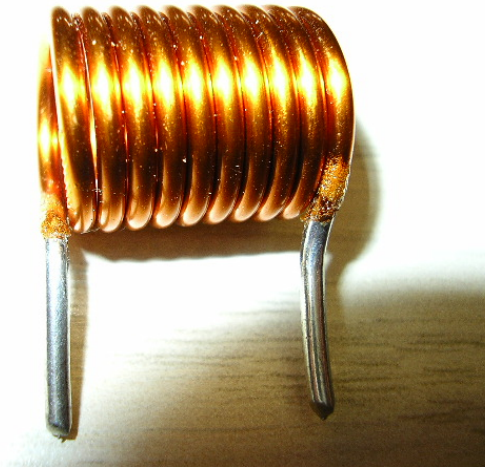
Grau:
[Serielle Einfügung](#)

- [Ohmsche Einfügung](#)
- [Kapazitive Einfügung](#)
- [Die Güte](#)
- [Wirklicher Serienwiderstand](#)

Links sind nicht aktiv!

Die Spule - Luftspule

| | |
|-----------------------|---------|
| Durchmesser außen: | 13,3 mm |
| Durchmesser innen: | 10,1 mm |
| Mittlere Durchmesser: | 11,6 mm |
| Länge | 16 mm |
| Anschluss je | 10 mm: |
| Drahtdurchmesser CuL | 1,5 mm |
| Windungszahl: | 10 |
| DC-Widerstand | 5 mΩ |
| Induktivität be 1 MHz | 532 nH |



Bestimmung der Induktivität

Bestimmung der **Induktivität**
 Über Resonanz bei 7,13 MHz
 C = 935 pF parallel

$$L := \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot C}$$

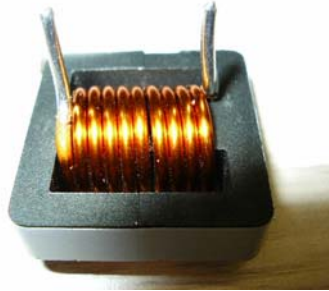
Grundfunktion: Resonanzfrequenz

grau: Eigenresonanz bei 200 MHz
 parallele Messung
 Bestimmung der Induktivität
 Schwarz: serielle Messung
 Bestimmung des Z-Verlaufs
 Angabe in dB

$$L := \frac{37.5}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sqrt{10 \frac{d}{10} - 1}}$$

Vorhergehende Luftspule, jetzt mit Ferrit

Durchmesser außen: 13,3 mm
 Durchmesser innen: 10,1 mm
 Mittlere Durchmesser: 11,6 mm
 Länge: 16 mm
 Anschluss je: 10 mm:
 Drahtdurchmesser CuL: 1,5 mm
 Windungszahl: 10



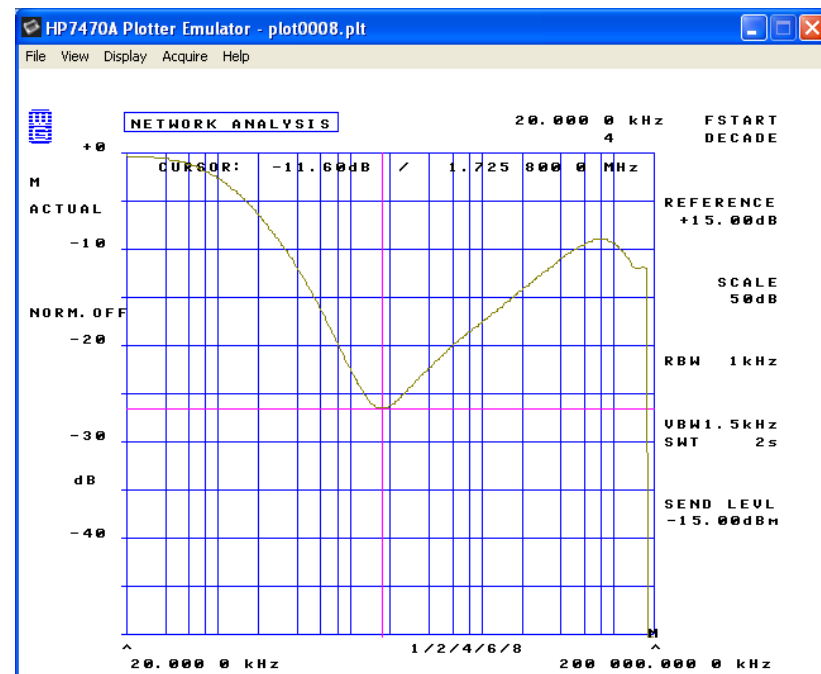
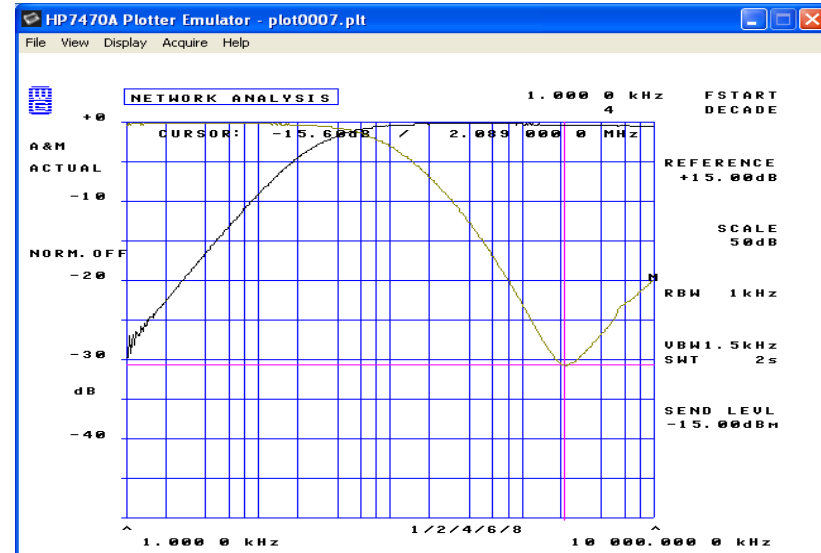
DC-Widerstand: 5 mΩ
 Induktivität bei 1 MHz: 213 μH

Eigenresonanz bei 2.09MHz ergibt eine Eigenkapazität der Spule von

$$C_{\text{eigenresonanz}} := \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_0)^2 \cdot L} = 27 \text{ pF}$$

Geht man von dieser Kapazität aus wäre die Eigenresonanz der Spule ohne Kern bei

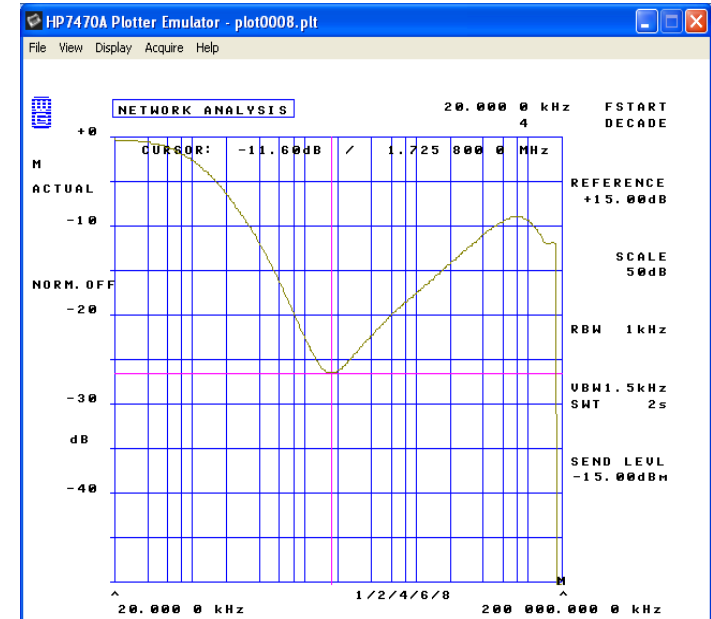
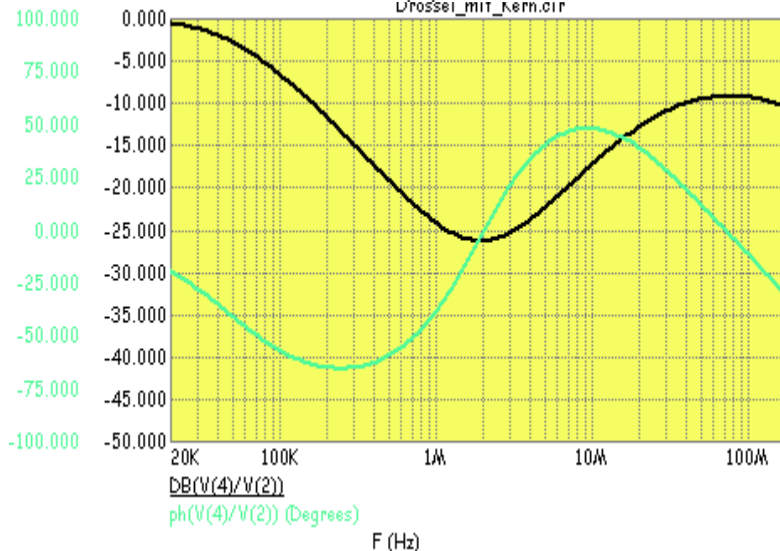
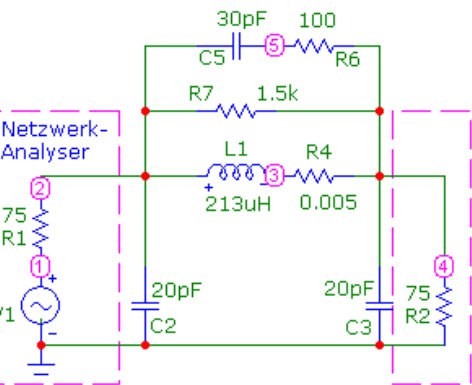
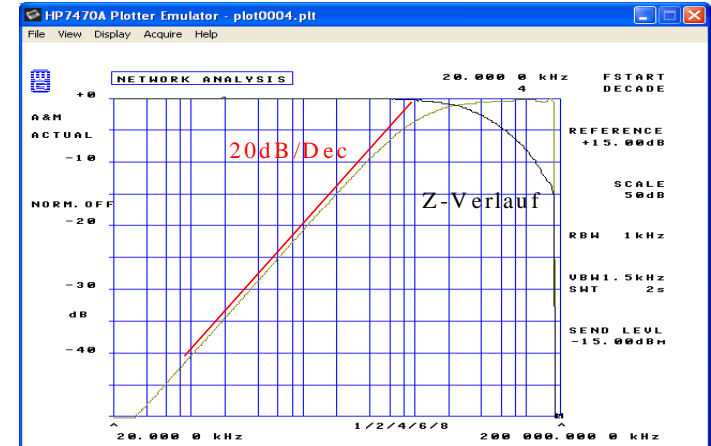
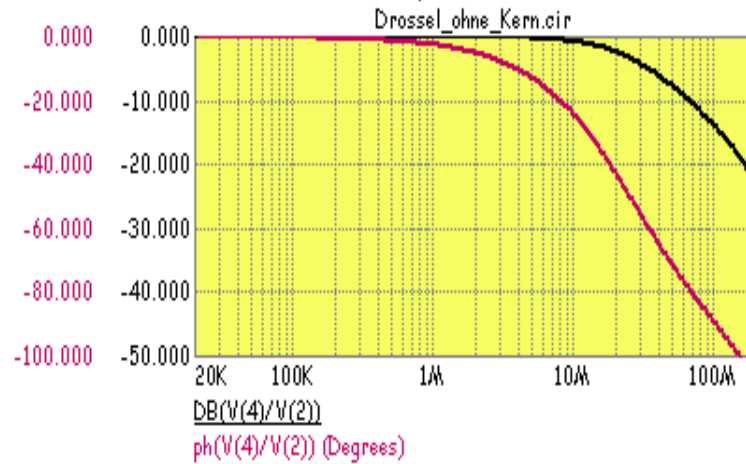
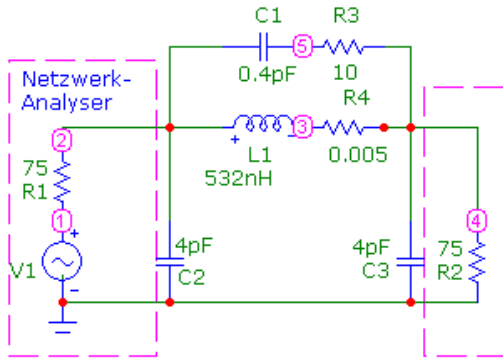
$$f_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}} = 161 \text{ MHz}$$



Simulationen der Drossel mit MicroCap

Genau so wichtig, wie die Ausführung der Messung ist die saubere Trennung des Einflusses der Zuleitung zum Messobjekt. Eine Zuleitung von 1 cm Länge hat bei einer Frequenz von 100 MHz ($\lambda = 3 \text{ m}$) die gleiche induktive oder kapazitive Wirkung, wie bei einer Tonfrequenz von 1 kHz, eine Verbindungsleitung von 1 km Länge.

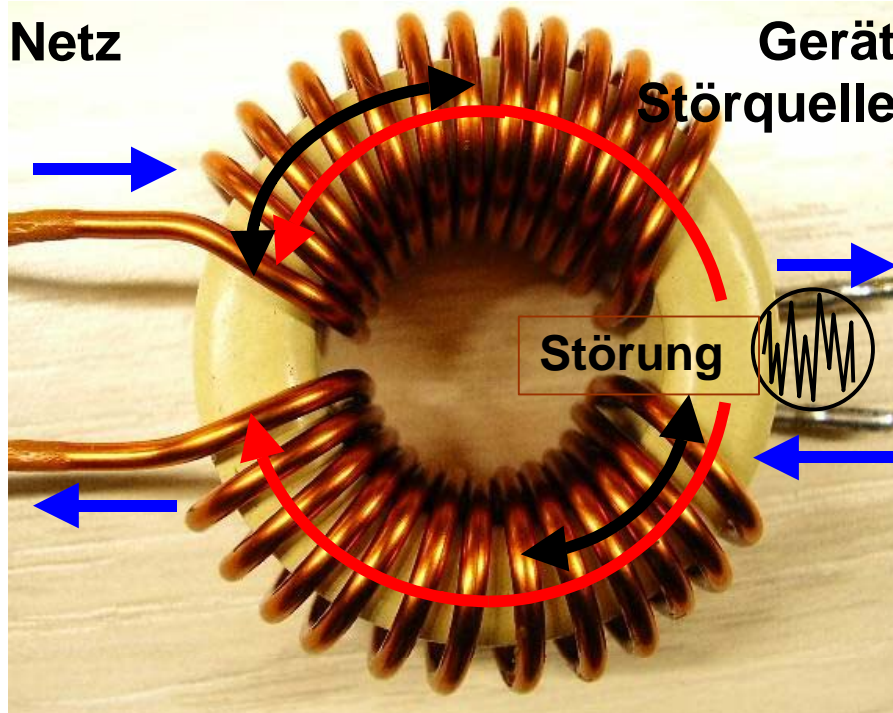
Ohne Kern



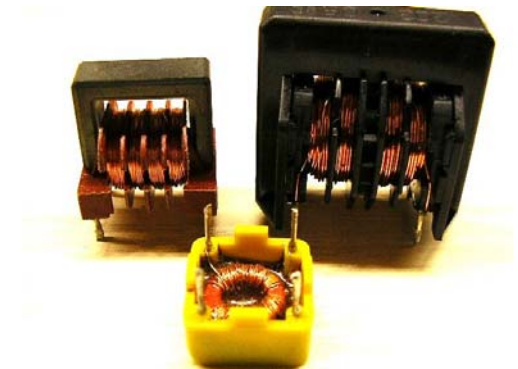
Mit Kern

Die Stromkompensierte Drossel

Elektronische Geräte erzeugen Gleichtakt- und Gegentaktstörungen.
Es sind unterschiedliche Wirkungsweisen nach Material und Beschaltung möglich



Der Magnetischer Fluss kompensiert sich durch die zwei symmetrischen Wicklungen
dadurch führt der Betriebsstrom nicht zur Sättigung der Drossel !
Der asymmetrische Störstrom erzeugt einen zusätzlichen magn. Fluss und wird gedämpft.



Dreiphasia



Die Summe aller Betriebsströme heben sich durch die vorzeichenrichtige Addition auf (Kompensation).
Bei symmetrischen Aufbau kommt es nicht zur Sättigung, dadurch sind hochpermeable Kernmaterialien einsetzbar.

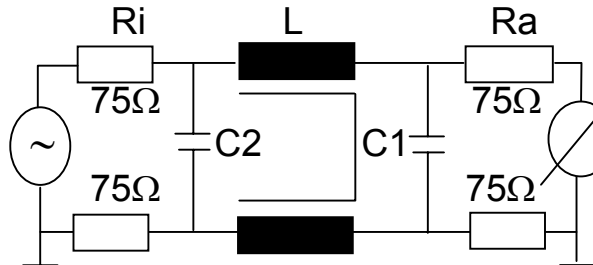
Erklärung in Skript
Simulation

Magnetische Bauteile von G.Schindler

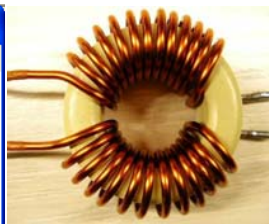
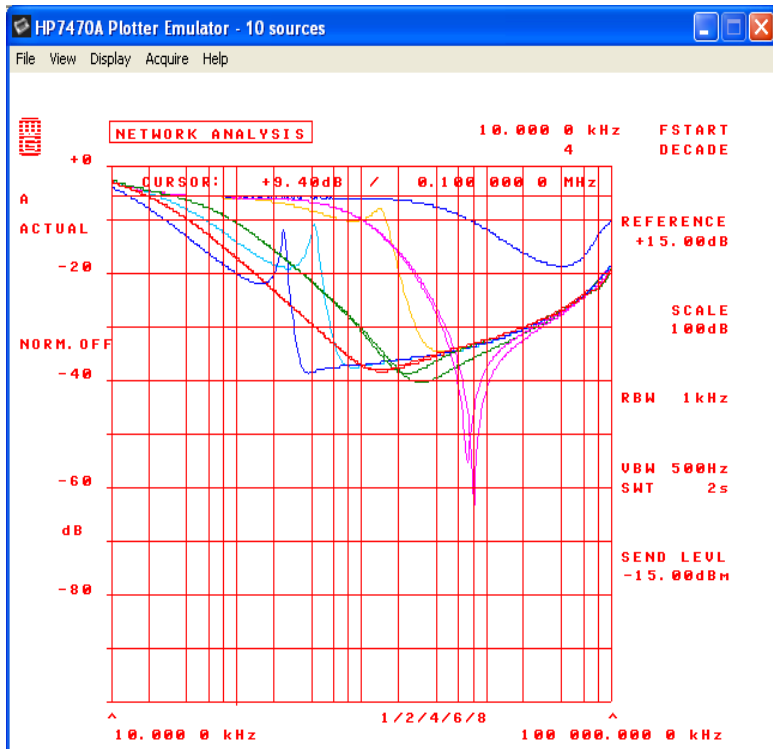
Dämpfungsverlauf zweier Stromkompensierter Drosseln

Symmetrische Messung 150Ω

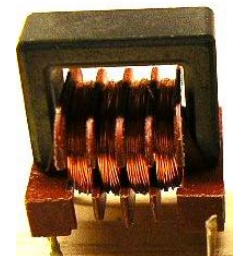
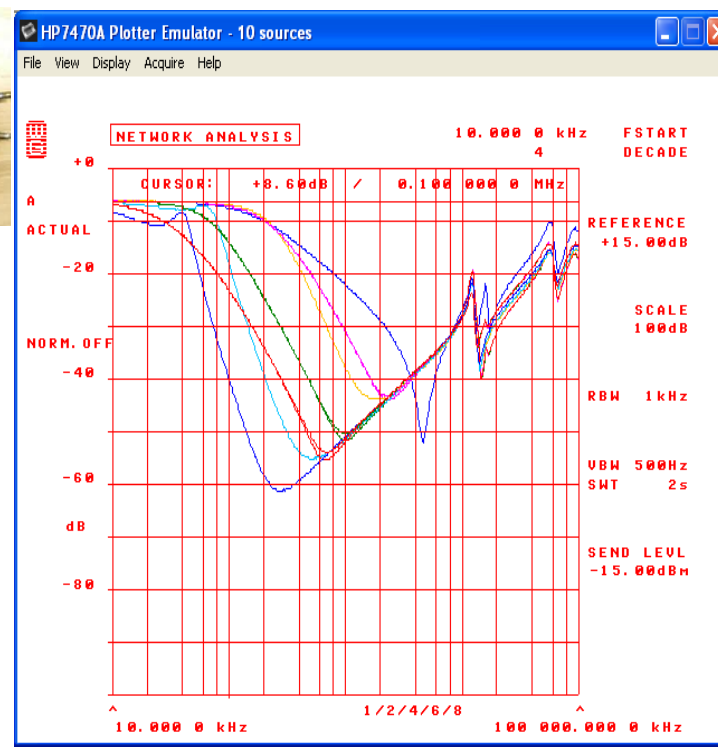
[Auswertung](#) und [Simulation](#)



- Blau: nur Drossel C1/C2 nicht belegt
- Lila: C1= 2,2nF WIMA MP3/X2 C2= 2,2nF WIMA MP3/X2 kleinere Dämpfung
- Grün: C1= 33nF WIMA MP3/X2 C2= 33nF WIMA MP3/X2 kleinere Dämpfung
- Rot: C1= 100nF WIMA MKP C2 = 100nF WIMA MKP kleinere Dämpfung
- Resonanzfrequenz liegt tiefer
- Gelb: 2 Kondensatoren C1= C2 = 2,2nF WIMA MP3/X2
- Hellblau: C1= C2 = 33nF WIMA MP3/X2
- Blau: C1= C2 = 100nF WIMA MKP



$L_p = 2 \text{ mH}$
 $L_s = 9,6\mu$
 $= 0,48\%$
 $R_{DC} = 10\text{m}\Omega$



$L_p = 52 \text{ mH}$
 $L_s = 291\mu\text{H}$
 $= 0,56\%$
 $R_{DC} = 2,48\Omega$

Funktionen der Stromkompensierten Drossel

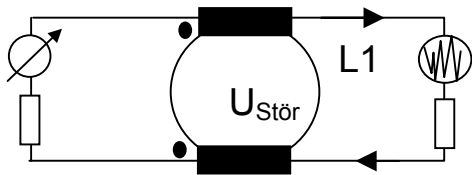
Symmetrische Anordnung der Wicklungen auf hochpermeablem Ferritkern

Unterschiedliche Abstände der Wicklung zum Kern können zur Unsymmetrie und dadurch zum Funktionsausfall führen

Gegentaktstörung – asymmetrische Störungen

Koppelfaktor $K = 1$ – keine Streuung

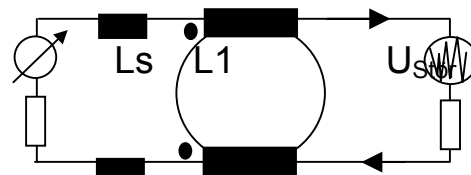
Theoretisch



Wirkt nicht, I sättigt nicht

Koppelfaktor $K < 1$ – mit Streuung

real

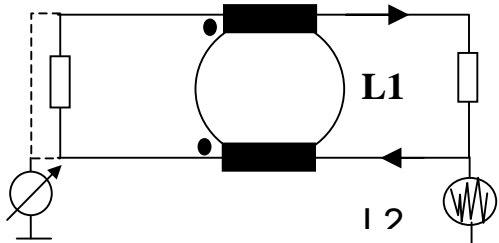


Ls wirkt, I sättigt nicht

Gleichtaktstörungen - symmetrische Störungen

Koppelfaktor $K = 1$ – keine Streuung

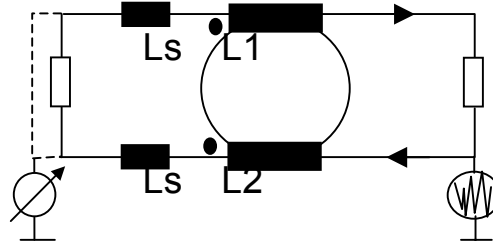
theoretisch



Drosseln wirken, I sättigt nicht

Koppelfaktor $K < 1$ – mit Streuung

real



Ls und Drosseln wirken, I sättigt nicht

Kontext im Skript

Simulation

Funktionalität zweier Drosseln auf einem Kern in Reihe

Nicht stromkompensiert

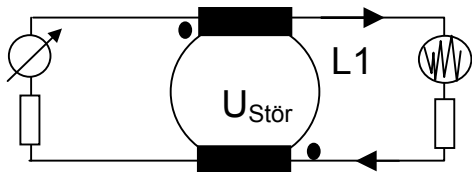
Mit zunehmender Sättigung wirkt L1 und L2 immer geringer

Kann nur mit Luftspalt oder Eisenpulverbasis verwendet werden!

Hochpermeable Ferrite sind hier unbrauchbar, da die Sättigung bereits bei kleinem Fluss einsetzt und der Kern somit die induktive Wirkung verliert. Für diese Anwendung sind allerdings kleinere Permeabilitäten (Induktivitätswerte) verfügbar.

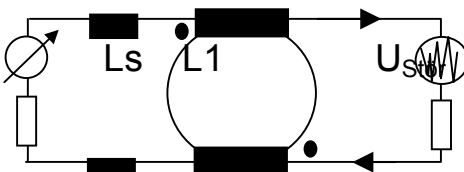
Gegentaktstörung – asymmetrische Störungen

Koppelfaktor $K = 1$ – keine Streuung
theoretisch



L1 + L2 wirken, I sättigt

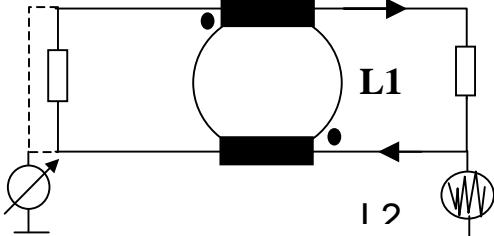
Koppelfaktor $K < 1$ – mit Streuung
real



Ls und L1 + L2 wirken, I sättigt

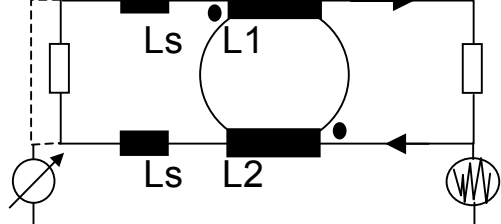
Gleichtaktstörungen - symmetrische Störungen

Koppelfaktor $K = 1$ – keine Streuung
theoretisch



L1 + L2 wirken, I sättigt

Koppelfaktor $K < 1$ – mit Streuung
real

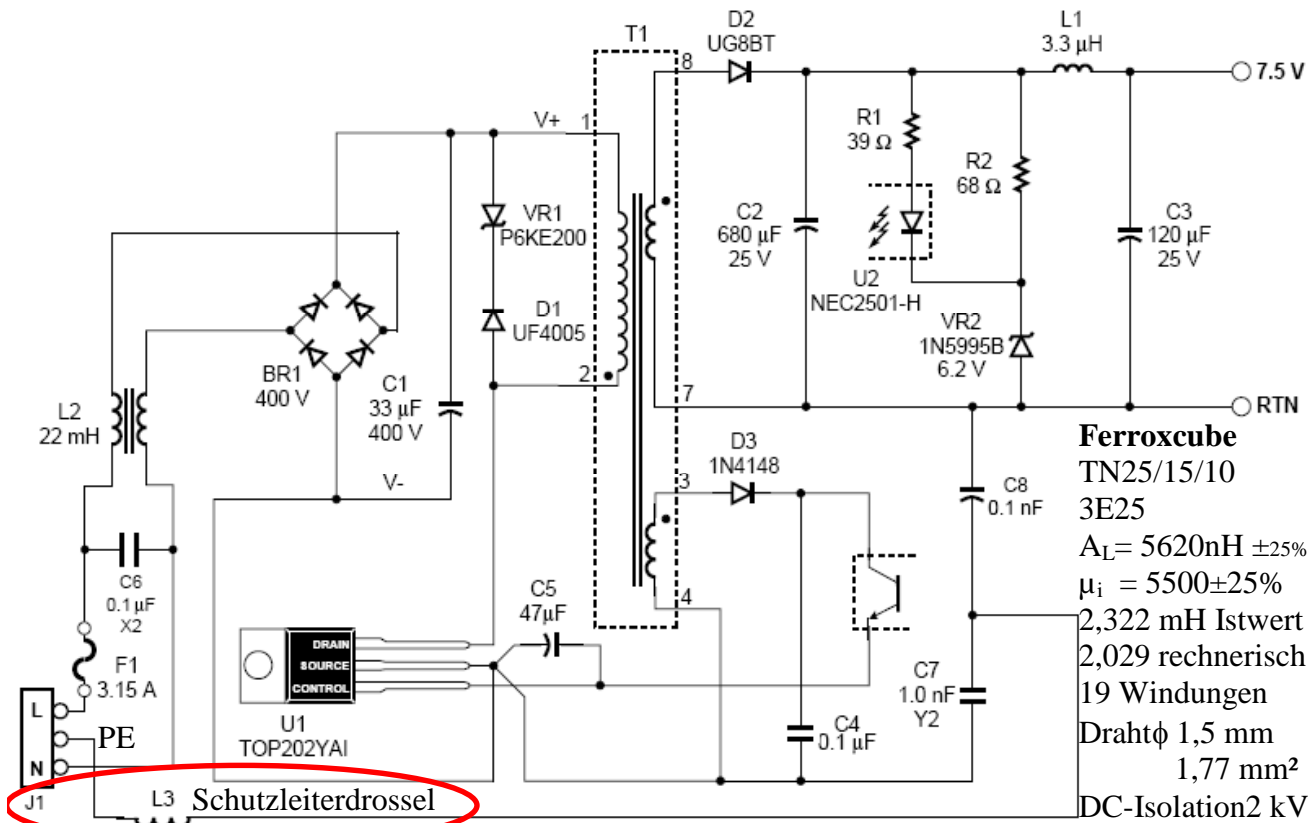


Ls und L1 + L2 wirken, I sättigt

Die Schutzleiterdrossel

Zur Entstörung, bei größeren Leistungen, ist bei geerdetem Betrieb (PE, Schutzleiter) oft eine zusätzliche Schutzleiterdrossel erforderlich. Dadurch wird eine Störspannungsteilung erreicht. Allerdings sollte das Standardnetzfilter nicht nur durch eine Schutzleiterdrossel ersetzt werden - optional. Im Normalfall wird diese Drossel nur vom Ableitstrom $< 3,5\text{mA}$ durchflossen. Dadurch ist es möglich hochpermeable Kerne zu verwenden. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass die Sättigung bereits bei diesen kleinen Strömen beginnt. Nach VDE muss der Drahtquerschnitt der Drossel min. der des Schutzleiters entsprechen. $16\text{A} \Rightarrow 1,0\text{ mm}^2$, $20\text{A} \Rightarrow 1,5\text{ mm}^2$, $27\text{A} \Rightarrow 2,5\text{ mm}^2$, $36\text{A} \Rightarrow 4\text{ mm}^2$ Ferrit Beads sind alternativ manchmal möglich.

Applikationsprinzip von PI Power Integration



Ferroxcube
 TN25/15/10
 3E25
 $A_L = 5620\text{nH} \pm 25\%$
 $\mu_i = 5500 \pm 25\%$
 2,322 mH Istwert
 2,029 rechnerisch
 19 Windungen
 Draht ϕ 1,5 mm
 1,77 mm²
 DC-Isolation 2 kV

