

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 25.06.2010

Der Transformator - Übertrager

Der Begriff Transformator steht eigentlich für die Transformierung von Netzspannungen – Dieses Thema wird hier nicht behandelt. Ich verwende den Begriff Übertrager .

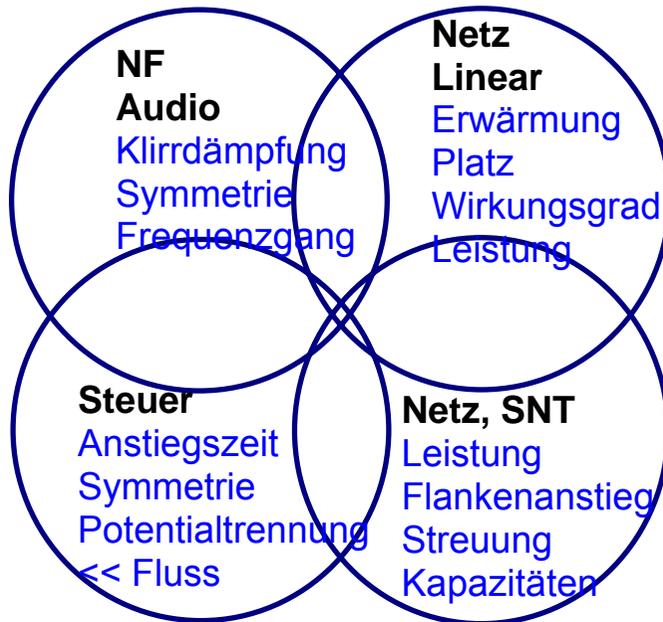
Der Übertrager besteht im Prinzip aus zwei oder mehr miteinander induktiv gekoppelten Wicklungen oder Spulen und ist ein Wechselstrombauteil das Spannungen, Ströme und Impedanzen transformiert.

Je nach Einsatz- und Applikation sind allerdings unterschiedliche Betrachtungsweisen erforderlich:

Folgende Anwendung sind mit Übertragern möglich:

- Transformierung von Wechselspannungen
- Transformierung von Wechselströmen
- Galvanische Trennung zweier Stromkreise
- Widerstandsanpassung
- Signalübertragung

Einteilung:



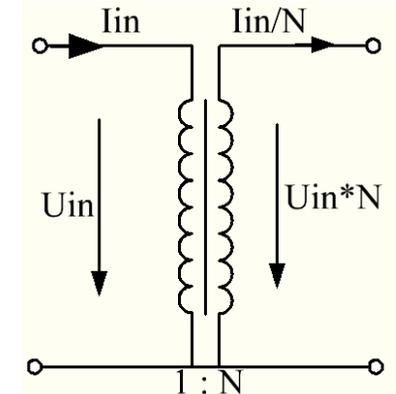
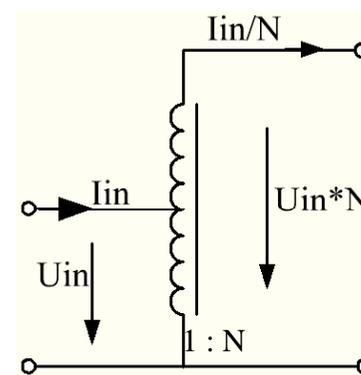
Ein idealer Übertrager oder Übersetzer:

ist ein fest gekoppelter Sparübertrager mit unendlich großer Induktivität und ohne jegliche Art von Verlusten.

$$P_{IN} \Leftrightarrow P_{OUT}$$

$$U_{IN} \cdot I_{IN} \Leftrightarrow U_{OUT} \cdot I_{OUT}$$

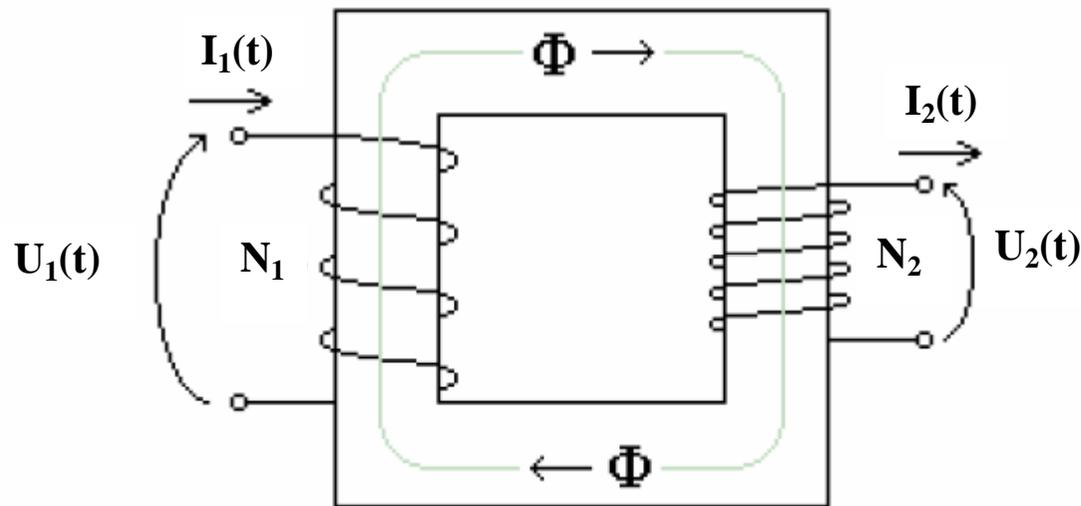
$$U_{IN} \cdot I_{IN} \Leftrightarrow (U_{OUT} \cdot N) \cdot (I_{OUT} / N)$$



Übertrager sind einzelne Induktivitäten, die über einen gemeinsamen magnetischen Fluss gekoppelt sind.

1. Der Eingangsstrom fließt über die Primärwindung,
2. generiert einen zeitabhängigen magnetische Fluss
3. und induziert eine Ausgangsspannung an der Sekundärwindung.

Dieser gemeinsame Fluss kann auf eine oder mehr Sekundärwindungen verteilt werden.



Für den geschlossenen magnetischen Kreis gilt folgende Gesetzmäßigkeit:

$$\begin{aligned} N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 &= \Phi \cdot R_{\text{mag}} \\ &= N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = \Phi \cdot l / (\mu_r \cdot A_e) \end{aligned}$$

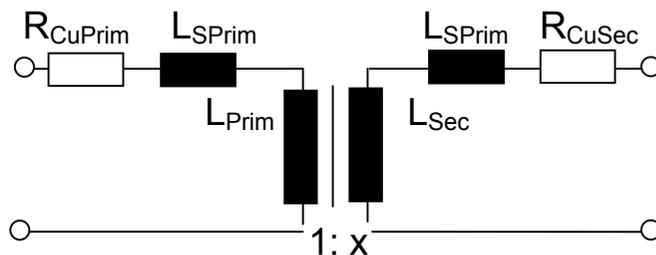
verlustfrei wenn: $\mu_r \rightarrow \infty \rightarrow R_{\text{mag}} = 0$

$$N_1 \cdot I_1 - N_2 \cdot I_2 = 0$$

$$N_1 \cdot I_1 = N_2 \cdot I_2$$

Bedingung für einen verlustfreien, idealen Übertrager

Seite 33 HFTransformer



Magnetische Bauteile von G.Schindler

Die Wicklungen eines Übertagers besitzen Induktivitäten, deren Wert vom Quadrat der Windungszahlen abhängt.

$$L := \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N^2 \cdot A_e}{l_e}$$

L	= Induktivität	H (Henry), Vs/A, Ωs
N	= Windungszahl	
A_e	= magnetische Fläche	$m^2, cm^2, mm^2, inch^2$
l_e	= Länge der Spule	m, cm, mm, inch
μ_0	= Magnetische Feldkonstante von Luft	$1,257 \times 10^{-6} \text{ Vs/Am}; 1,257 \times 10^{-4} \text{ Vs/Acm}$
μ_r	= relative Permeabilität	--
R_m	= magnetische Widerstand	$1/\Omega s; A/Vs$

$$L := \frac{N^2}{R_m}$$

An einem Transformator mit unbekanntem Windungszahlen der Einzelwicklungen ist eine näherungsweise Bestimmung der Windungszahlen auf folgende Weise möglich:

Die Induktivitätswerte der Einzelwicklungen werden bei konstanter Spannung und Frequenz gemessen.

So erhält man z.B. die Werte $L_1, L_2, L_3, \dots, L_x$.

Daraus lassen sich die Verhältnisse der Windungszahlen zueinander berechnen:

$$W_1 : W_2 : W_3 : W_x = \sqrt{L_1} : \sqrt{L_2} : \sqrt{L_3} : \sqrt{L_x}$$

Die tatsächlichen Windungszahlen erhält man, wenn man entweder das Kernmaterial mit seinem A_L -Wert kennt, oder indem man eine kleine Hilfswicklung auf den Transformator aufbringt mit bekannter Windungszahl W_h . Deren Induktivität L_{Hilf} wird wie oben gemessen. Dadurch lassen sich die Windungszahlen direkt berechnen:

$$W_1 : W_h = L_1 : L_h \quad \text{oder} \quad W_1 = W_h \cdot \sqrt{\frac{L_1}{L_h}}$$

Hierbei ist allerdings zu beachten, dass der Abstand zum Kern den gemessenen Induktivitätswert beeinflusst => er wird kleiner.

Magnetische Bauteile von G.Schindler

Auch führt diese Berechnung nur zu exakten Ergebnissen, wenn die Transformatorwicklungen ohne Streuung miteinander verkoppelt wären. Praktisch ist es immer aber so, dass einige Feldlinien des Magnetfeldes nicht durch alle Wicklungen gemeinsam hindurchführen. Hier werden gedanklich unabhängige Induktivitäten, **die Streuinduktivitäten**, hinzugefügt. Diese Induktivitäten sind nicht real vorhanden, die Transformatorwicklungen tun nur so, als ob sie rechnerisch und funktional vorhanden wären.

Besonders in Transformatoren, in denen Schaltimpulse hoher Flankensteilheit übertragen werden, führen Streuinduktivitäten zusammen mit den Wicklungskapazitäten zu überlagerten Überschwingern und verfälschen des Originalsignal oft in unzulässiger Weise. Auch bei Schaltnetzteilen muss die durch die Streuinduktivität gespeicherte Energie durch Löschkreise abgefangen werden, sonst wird der Schalter durch die Induktionsspannung zerstört => $U = L (dI/dt)$

Transformationsverhältnisse

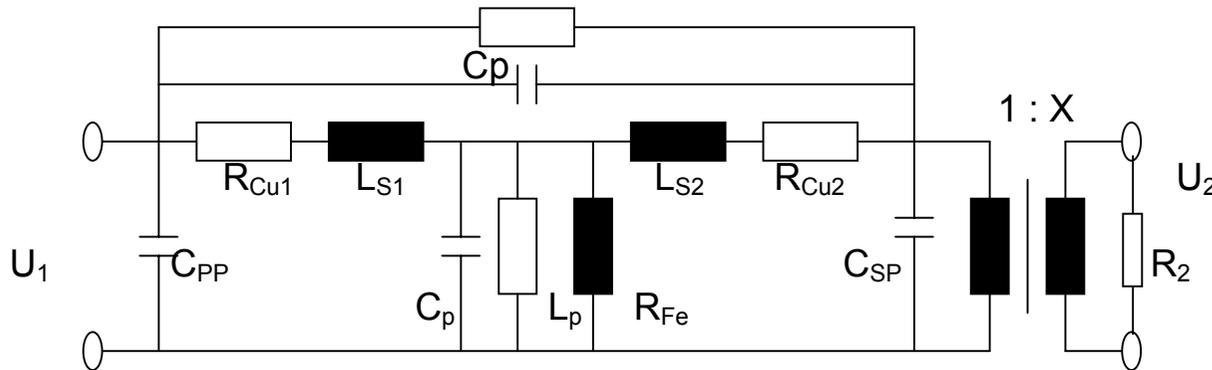
Aus Übersichtsgründen ist der ideale Transformator aufgeführt

	<p>Übersetzungs- verhältnis Windungszahl über den A_L- Faktor</p>	$\dot{u} = N_1 / N_2$ $L_1 = A_L * N_1^2$ $L_2 = A_L * N_2^2$		<p>Widerstands- transformation</p>	$\dot{u} = \sqrt{R_1 / R_2}$ $\dot{u}^2 = R_1 / R_2$
	<p>Spannung</p>	$\dot{u} = U_1 / U_2$		<p>Induktivitäts- transformation</p>	$\dot{u} = \sqrt{L_1 / L_2}$ $\dot{u}^2 = L_1 / L_2$
	<p>Strom</p>	$\dot{u} = I_2 / I_1$		<p>Kapazität- transformation</p>	$\dot{u} = \sqrt{C_2 / C_1}$ $\dot{u}^2 = C_2 / C_1$
	<p>Leistung</p>	$P_1 = P_2$ $U_1 * I_1 = U_2 * I_2$		<p>Spartrafo</p>	$\dot{u} = N_1 / N_2$

Transformator mit Streuinduktivitäten

Das oben erwähnte Netz von Kapazitäten ist in dem vorstehenden Ersatzbild natürlich nicht berücksichtigt. Diese Kapazitäten sind einerseits zwischen den einzelnen Windungen und andererseits zwischen den Wicklungen verteilt vorhanden. Die einzelnen Kapazitätswerte sind vom Ort der „Kondensatorbeläge“ d. h. von den aufbaubedingten, geometrischen Verhältnissen abhängig und ebenso von den die elektrischen Eigenschaften der dazwischenliegenden Materialien. Es gibt streng genommen kein exakt zutreffendes Ersatzbild für das Kondensatornetz. Man muss sich mit Näherungen begnügen und benutzt dabei „konzentrierte“ Kapazitäten, wo doch „verteilte,“ Kapazitäten vorhanden sind. Verteilte Kapazitäten findet man z.B. auch bei Leitungen.

Ersatzschaltbild eines Transformators:



Verhältnis $\ddot{u} = 1 : n$
ohne Streuinduktivität

$$\frac{U_2}{U_1} := n \cdot \frac{R_2}{R_2 + R_{Cu2} + \frac{R_{Cu1}}{n^2}}$$

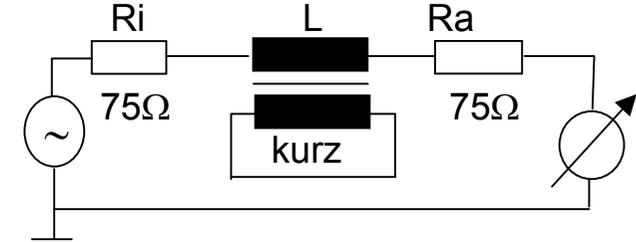
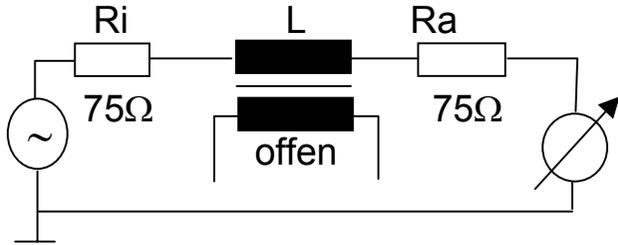
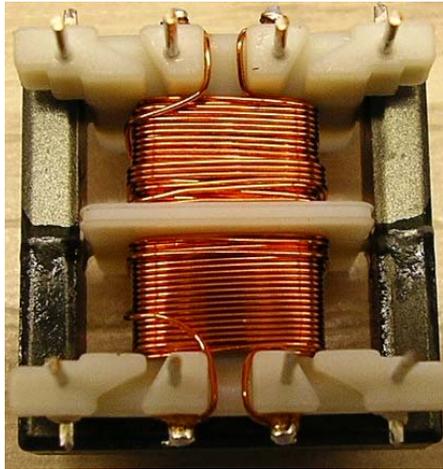
$$\frac{U_2}{U_1} := n \cdot \frac{1}{1 + \frac{R_{Cu2} + \frac{R_{Cu1}}{n^2}}{R_2}}$$

Falls $\frac{R_{Cu2} + \frac{R_{Cu1}}{n^2}}{R_2} \ll 1$, dann gilt

$$\frac{U_2}{U_1} \approx n \cdot \left(1 - \frac{R_{Cu2} + \frac{R_{Cu1}}{n^2}}{R_2} \right)$$

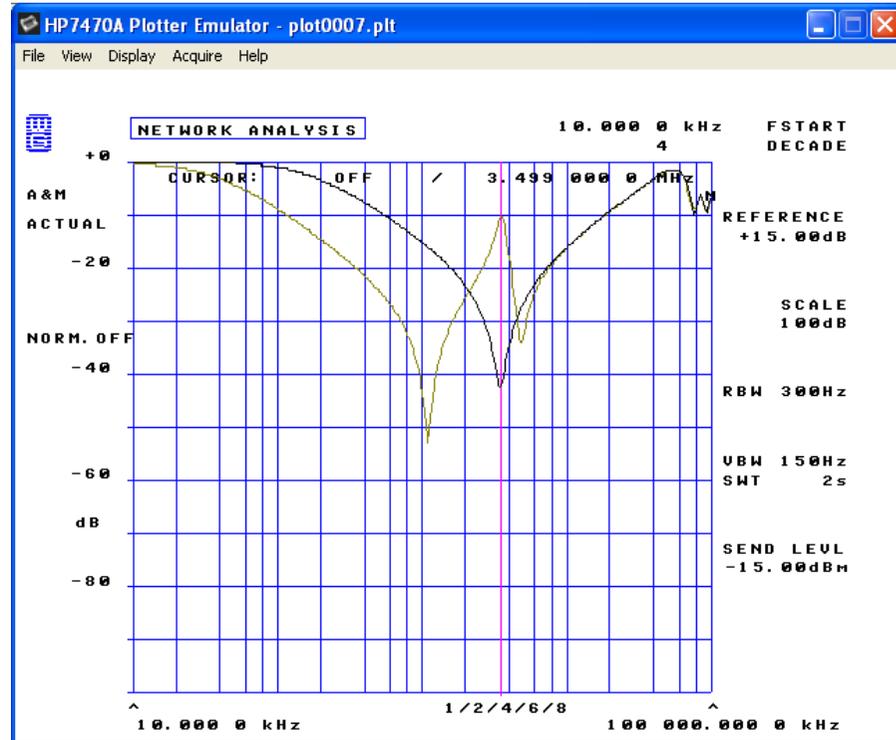
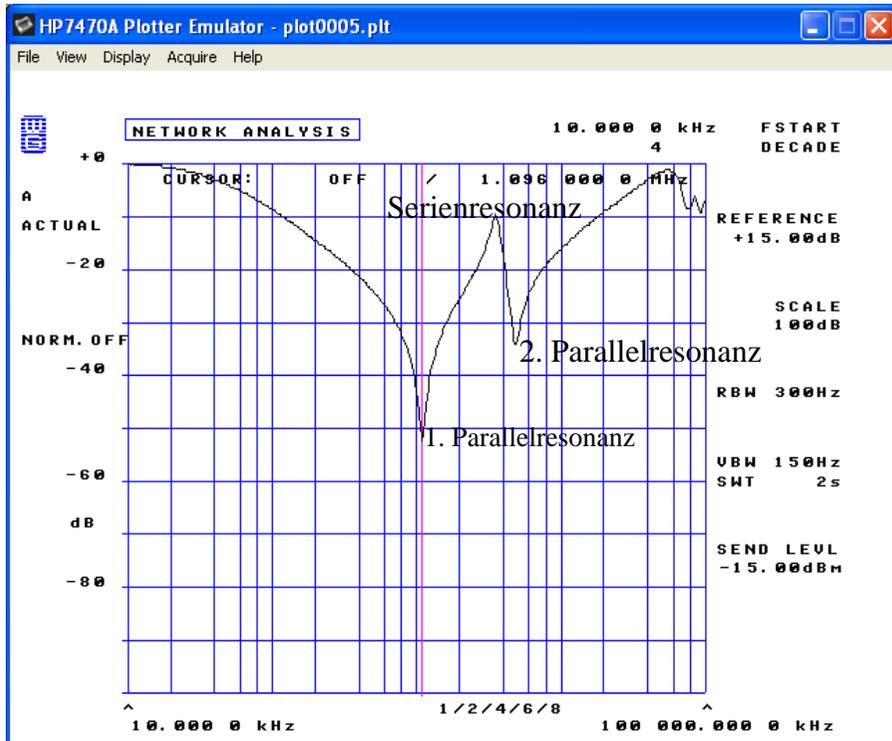
Innerer Spannungsabfall

Der HF-Transformator



Betrachtung mit Netzwerkanalyser
Parallelinduktivität, Sekundärwicklung offen

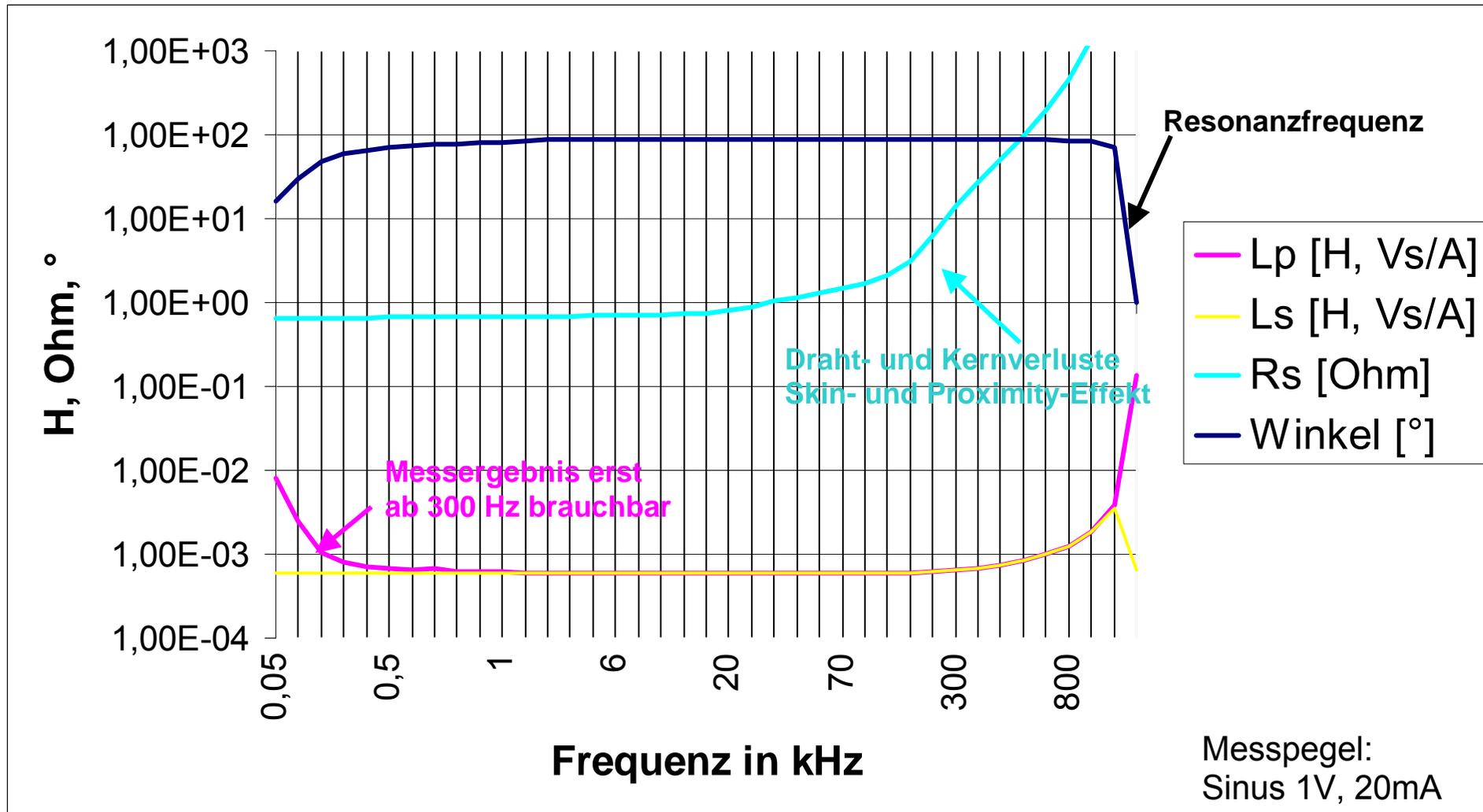
Sekundärwicklung kurzgeschlossen



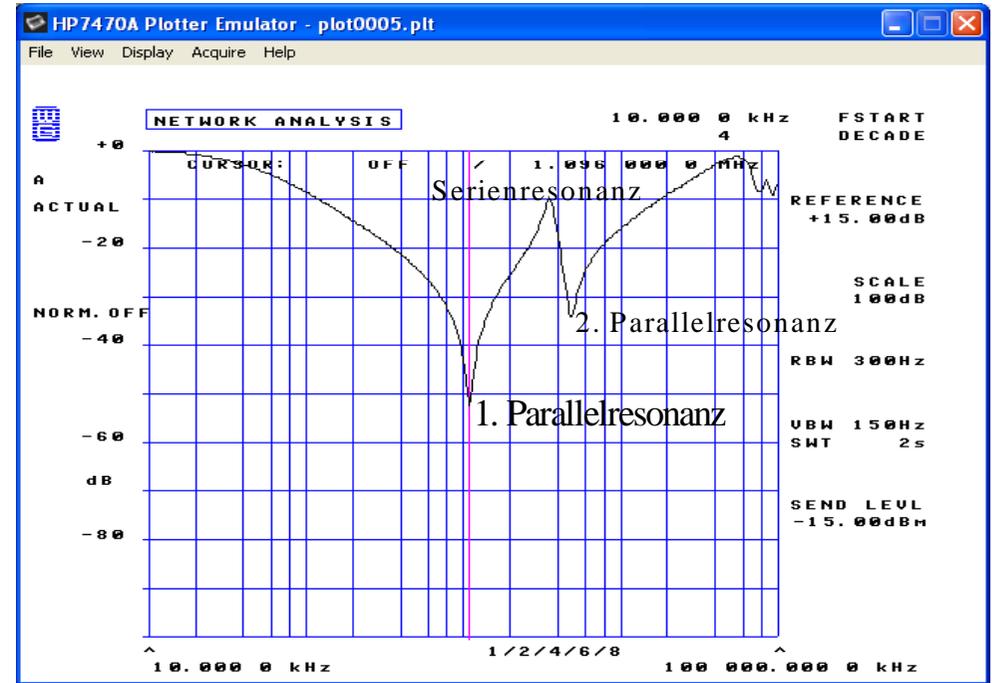
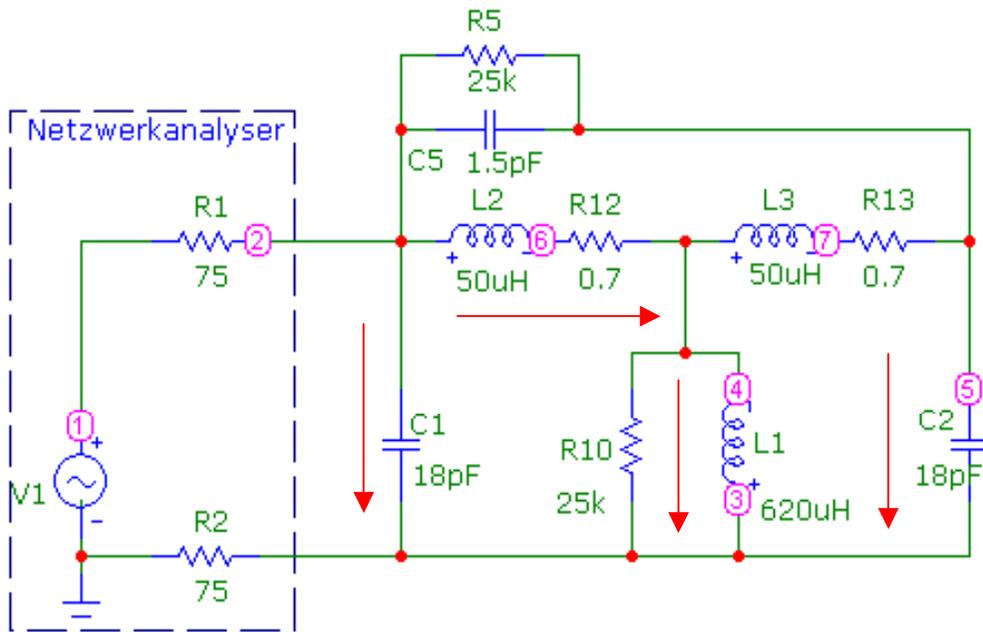
Vermessung des HF-Transformators mit einer LCR-Messbrücke (HIOKI 3532)

Ab 50 Hz bis zur Resonanzfrequenz von 1,08MHz

Verlauf der Parallel- und Serieninduktivität (L_p , L_s) sowie des Serienwiderstandes R_s und des Winkels $^\circ$ über der Frequenz.



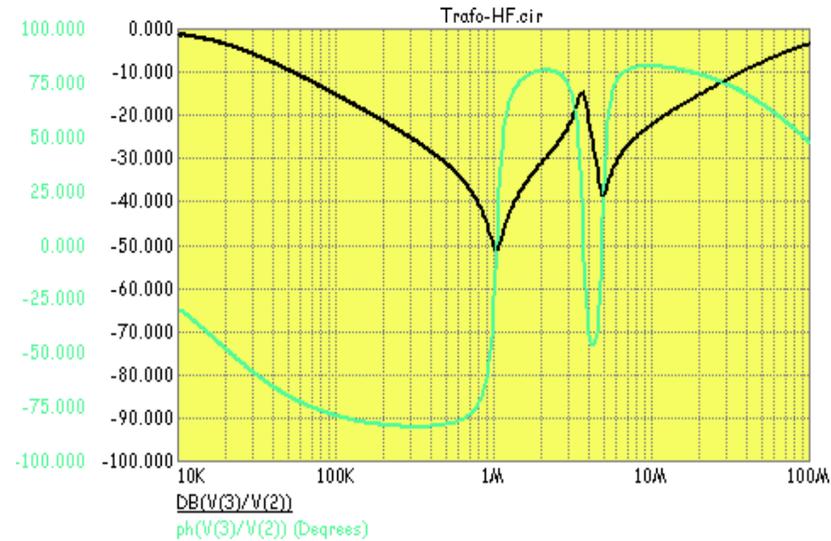
Die Primärinduktivität



Bei der Primärinduktivität sind folgende Werte des Ersatzschaltbildes ausschlaggebend:

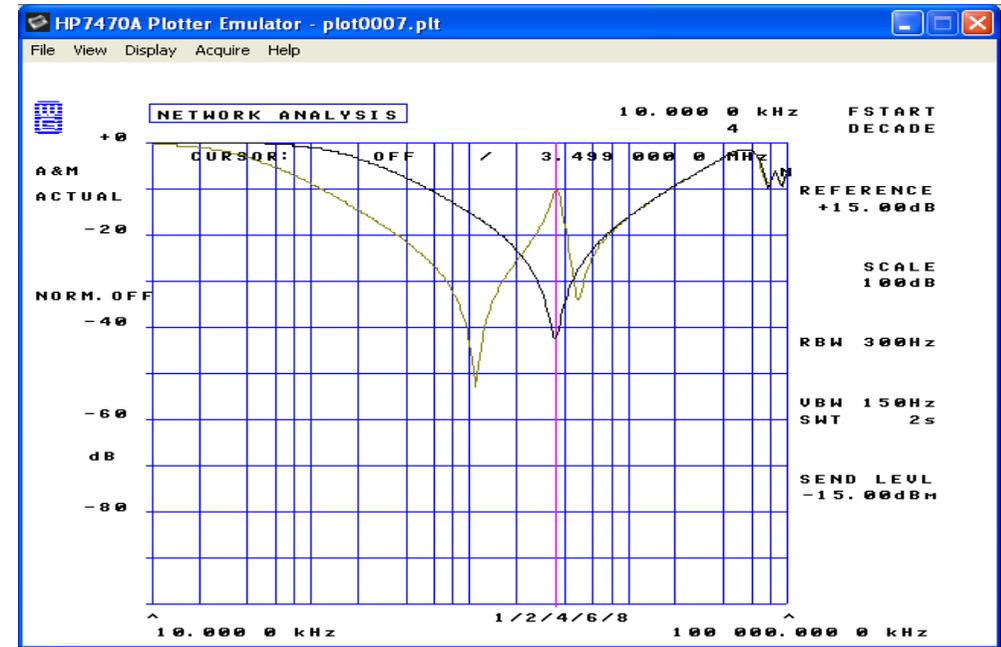
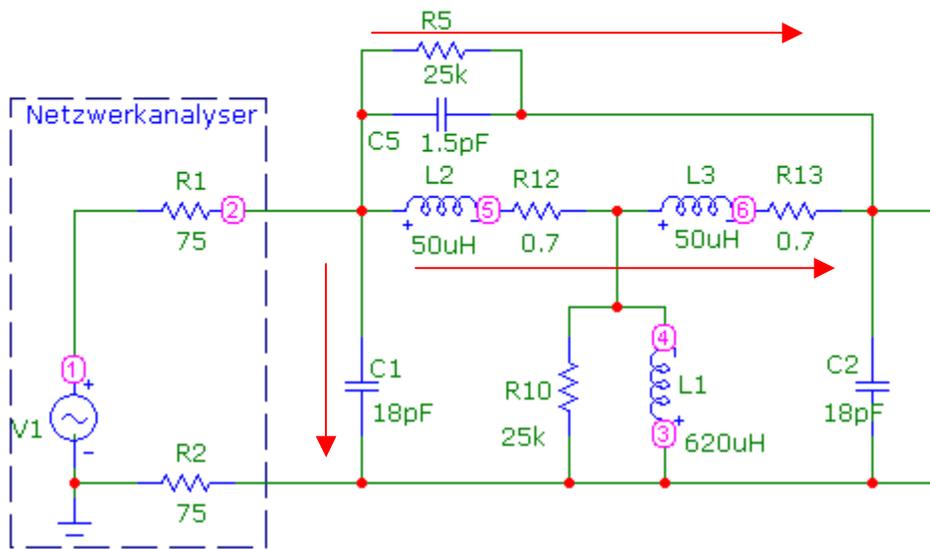
$$f_p \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_1 + L_2) \cdot (C_1 + C_2)}} \quad f_p = 1.025 \times 10^6$$

R_{10} = Eisenverluste ist für die Güte verantwortlich



Magnetische Bauteile von G.Schindler

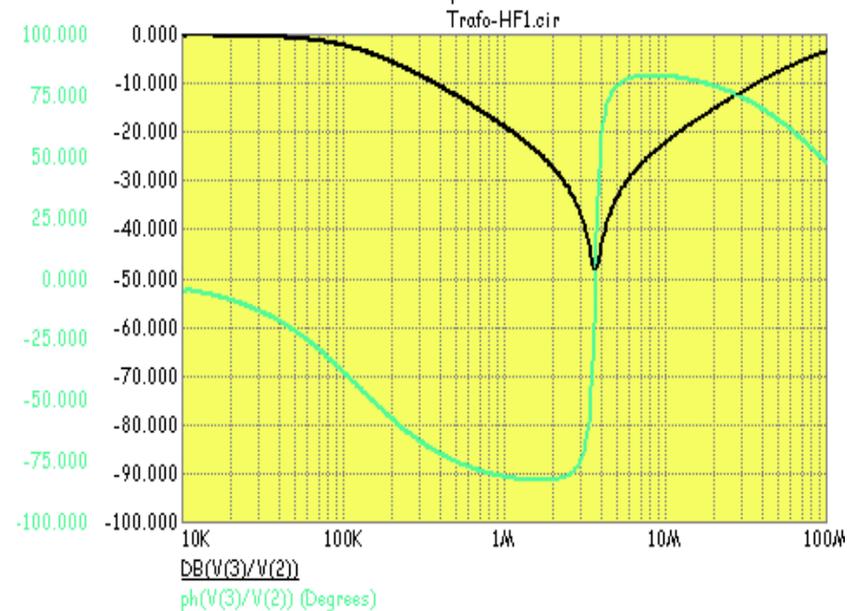
Die Streuinduktivität



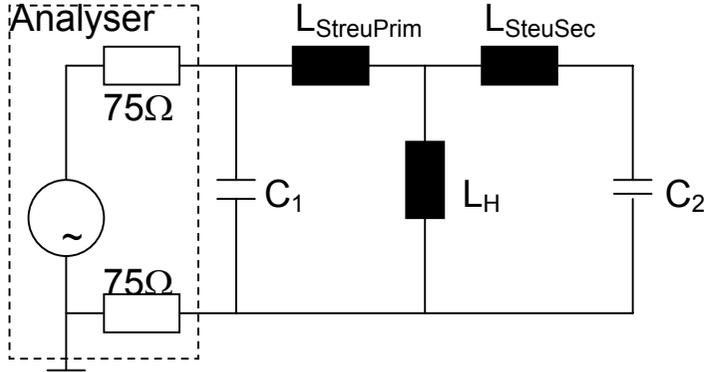
Bei der Streuinduktivität sind folgende Werte des Ersatzschaltbildes ausschlaggebend:

$$f_s \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{\left(\frac{C_1 \cdot C_5}{C_1 + C_5} + C_1\right) \cdot (L_2 + L_3)}} \quad f_s = 3.615 \times 10^6$$

R₅ = ist für die Güte des Schwingkreises verantwortlich



Der Übertrager - mathematische Zusammenhänge



Die 1. Parallelresonanz:

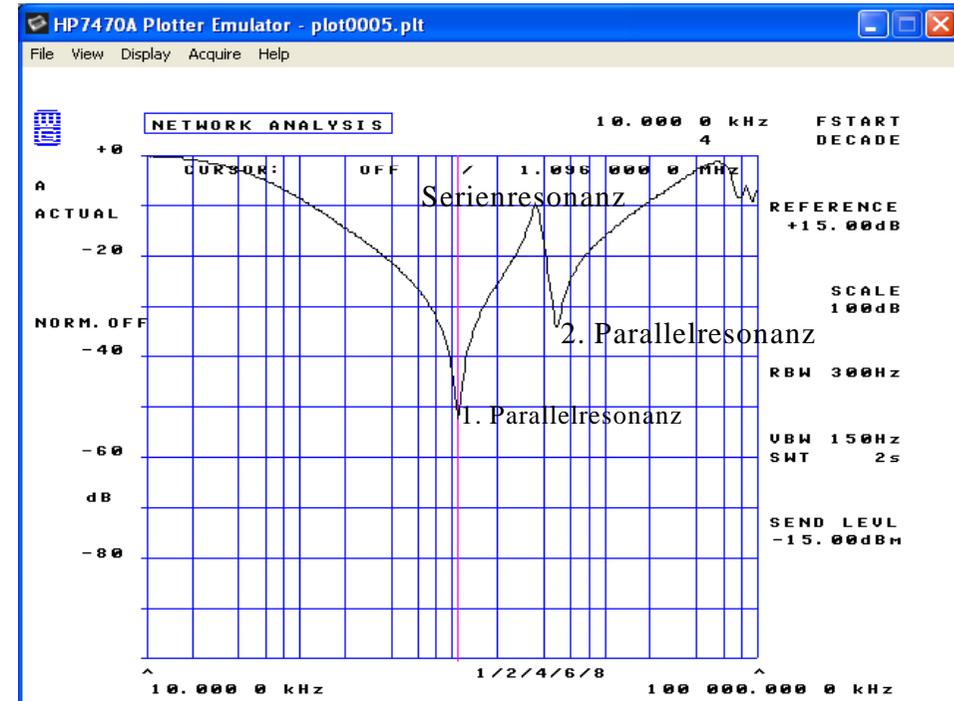
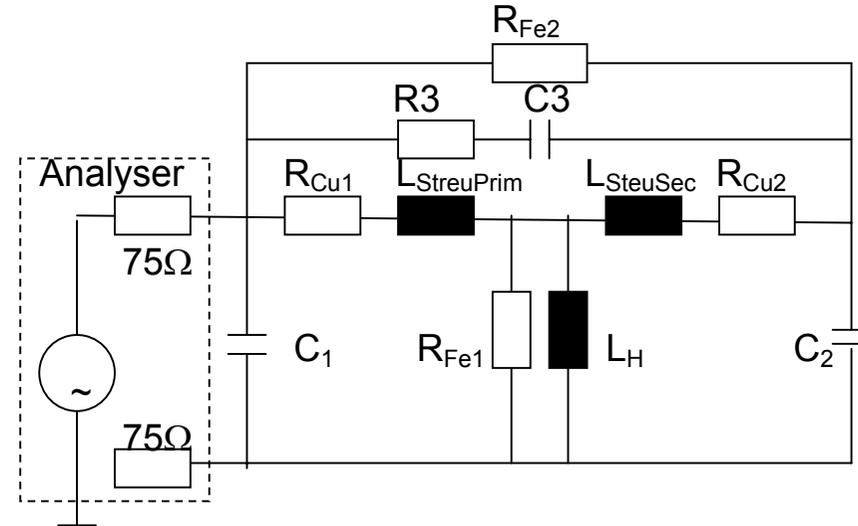
$$f_{P1} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_H \cdot (C_1 + C_2)}}$$

Die Serienresonanz

$$f_{S1} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_{SPrim} + L_{SSec}) \cdot C_2}}$$

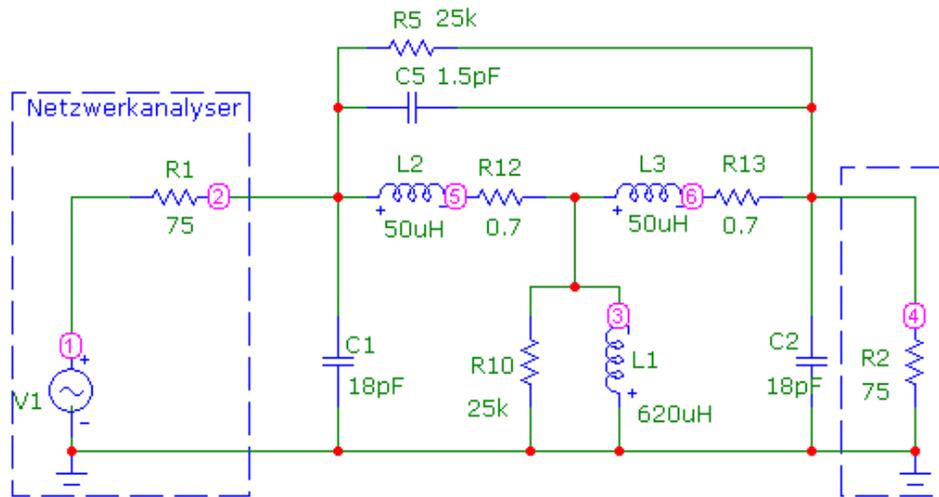
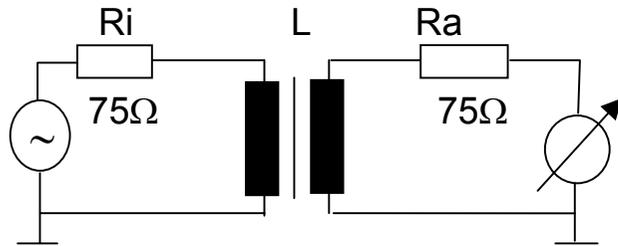
Die 2. Parallelresonanz

$$f_{P2} \approx \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{(L_{SPrim} + L_{SSec}) \cdot \left(\frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} + C_3 \right)}}$$



Magnetische Bauteile von G.Schindler

Die Dämpfung, das Übertragungsverhalten



Beim Frequenzgang ist das gesamte Ersatzschaltbild ausschlaggebend.

Die HF-Resonanzen sind nicht berücksichtigt.

Untere Grenzfrequenz (3dB)

Obere Grenzfrequenz (3dB)

