

Projekt P2– Aufgabestellung vom Auftraggeber (FS 2019)

«DJ» EMI Filter für Schaltnetzteil

Dr. Luca Dalessandro, Schaffner Group, luca.dalessandro@fhnw.ch

Einleitung

Schaltnetzteile sind in Haushaltsgeräten allgegenwärtig. Ein Beispiel von einem Schaltnetzteil ist in Abbildung 1 dargestellt.

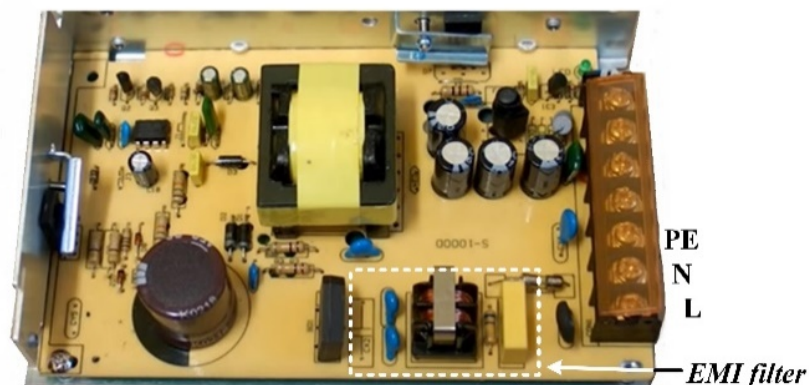


Abb. 1 Schaltnetzteil Schaltung 230V, 50Hz, 12Vout, 10A mit EMI Eingangsfilter [1].

Wenn man den Eingangsstrom eines Netzteils ohne Eingangsfilter in einem Frequenzbereich von der Grundschiwingung von 50 Hz bis 30 MHz misst, wird man feststellen, dass der Strom über das gesamte Spektrum Frequenzkomponenten aufweist. Eine praktische Methode, die Frequenzkomponenten der Signale in einem breiten Frequenzbereich darzustellen, ist die Verwendung von logarithmischen Skalen [4]. Insbesondere belastet das Schaltnetzteil das Netz mit der Grundfrequenz (=Netzfrequenz), erzeugt jedoch bei höheren Frequenzen, insbesondere im Frequenzbereich von 150 kHz bis 30 MHz, leitungsgebundene Störungen.

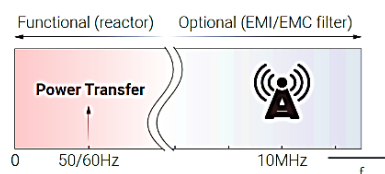


Bild 2. Die Leistungsübertragung zwischen Netz und Schaltnetzteil erfolgt bei Netzfrequenz. Filterkomponenten werden nach dem Frequenzbereich klassifiziert, in dem sie arbeiten. Wesentliche Komponenten in Bezug auf die Wirkleistungsübertragung können als funktional bezeichnet werden, während die übrigen als «optional» betrachtet werden können.

Die Aufgabe eines EMI-Filters besteht darin, zu verhindern, dass elektromagnetische Interferenzen, die von Schaltelementen erzeugt werden, die Netzleitung erreichen und andere Geräte stören, die an dasselbe Netzwerk angeschlossen sind. Ein typisches Filter für 1-Phasen- Schaltnetzteile ist in Abbildung 3 dargestellt.

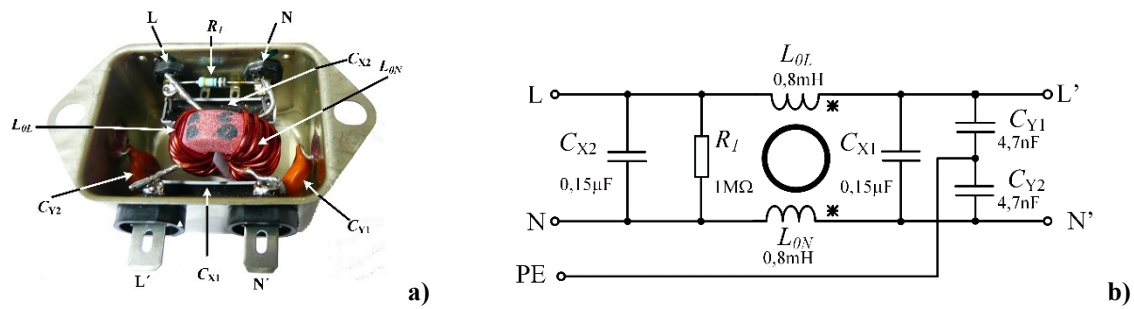


Abb. 3 a) Aufbau und b) Schaltung eines einphasigen Schaffner EMI-Filters FN2030 [2].

Nebst den Spezifikationen und Anforderungen an ein Schaltnetzteil, die normalerweise in seinem Datenblatt aufgeführt sind, muss das Gerät den technischen Normen entsprechen, die EM-Emissionen einschränken. Die Emissionswerte werden durch technische Normen geregelt, wie beispielsweise die EN 55022 für IT-Ausrüstung [5]. Um das Normniveau zu erreichen, muss normalerweise ein EMI-Filter am Terminal des an das Netzwerk angeschlossenen Geräts installiert werden. Ein Filter sorgt für die Entstörung in der Zielfrequenzbandbreite.

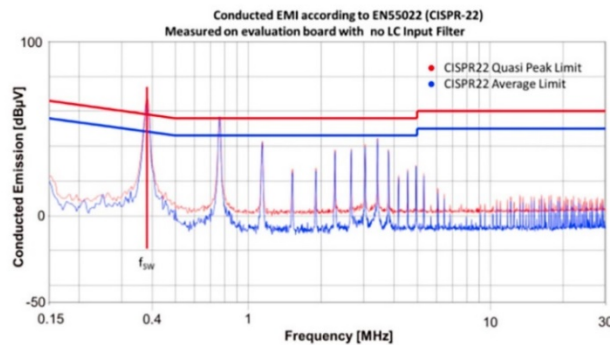


Abb. 4. Beispiel für ein Emissionsspektrum eines SMPS ohne Filter, f_{sw} ist die Schaltfrequenz. Die von der EN55022 vorgeschriebenen Emissionsgrenzwerte werden auch über den Frequenzbereich angegeben.

Normen schreiben Einschränkungen für das Gesamttrauschen vor. In der Praxis ist dies ein bequemer Ansatz, um das Gesamttrauschen in zwei Komponententeile zu unterscheiden und zu trennen: Gegen- (=Differential Mode=DM) und Gleichtaktrauschen (=Common Mode=CM). Im DM-Rauschäquivalent tritt die Störspannung über der Stromversorgungsleitungen auf, während der DM-Störstrom auf demselben Weg wie der Netzwerkstrom fließt (siehe Abb. 5a). Für das CM-Rauschäquivalent tritt die CM-Störspannung über der Netzwerkleitungen und der Bezugsmasse auf, während die CM-Störströme in die gleiche Richtung der Netzwerkleiter fließen (siehe Abb. 5b).

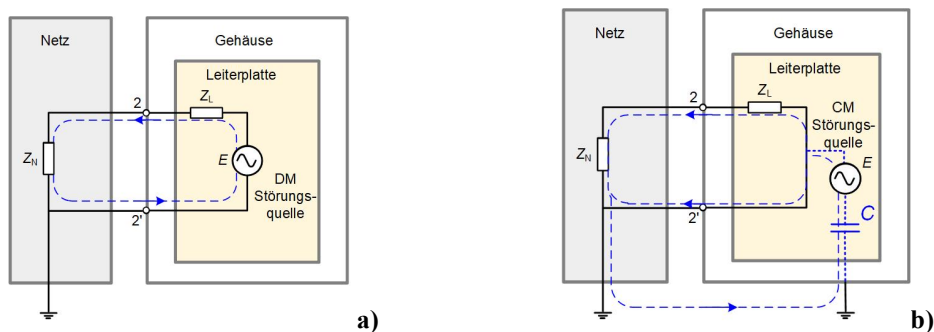


Abb. 5: Darstellung der Spannungsquellen- und Zirkulationsströme für ein an das Netz angeschlossenes Gerät bei: a) DM-Rauschen und b) CM-Modus-Rauschen.

Filterentwurf

Die Amplitude der EM-Emissionen wird durch die Wirkung der Filterimpedanz in einem bestimmten Frequenzbereich verringert. Um die Leistung eines EMI-Filters zu charakterisieren, werden die "Einfügungsverluste" des Filters normalerweise als Funktion der Frequenz angezeigt und sie sind definiert als:

$$|H(j\omega)| = 20 \log \frac{|U_{20}|}{|U_2|}$$

wobei die beiden Spannungen, wie in Abb. 6 dargestellt, gegeben sind durch:

U_{20} , Lastspannung gemessen ohne Filter mit einer Last, die typischerweise 50Ω beträgt;

U_2 , Lastspannung mit Filter gemessen.

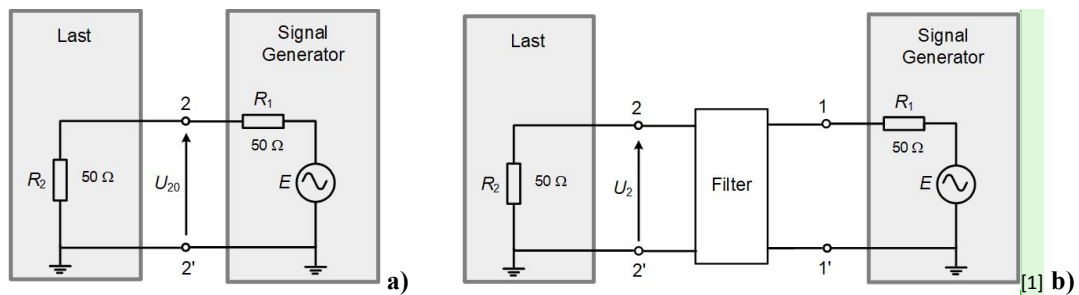


Abb. 6. Definition der Einfügungsdämpfung eines Filters: a) Lastspannung ohne Filter; b) mit eingesetztem Filter.

Die CM- und DM-äquivalenten Schaltungen des EMI-Filters von Schaffner FN2030 sind in den Abbildungen 7 a) und 7 b) dargestellt. Die entsprechenden Einfügungsdämpfungen sind in Abb. 7 c) dargestellt.

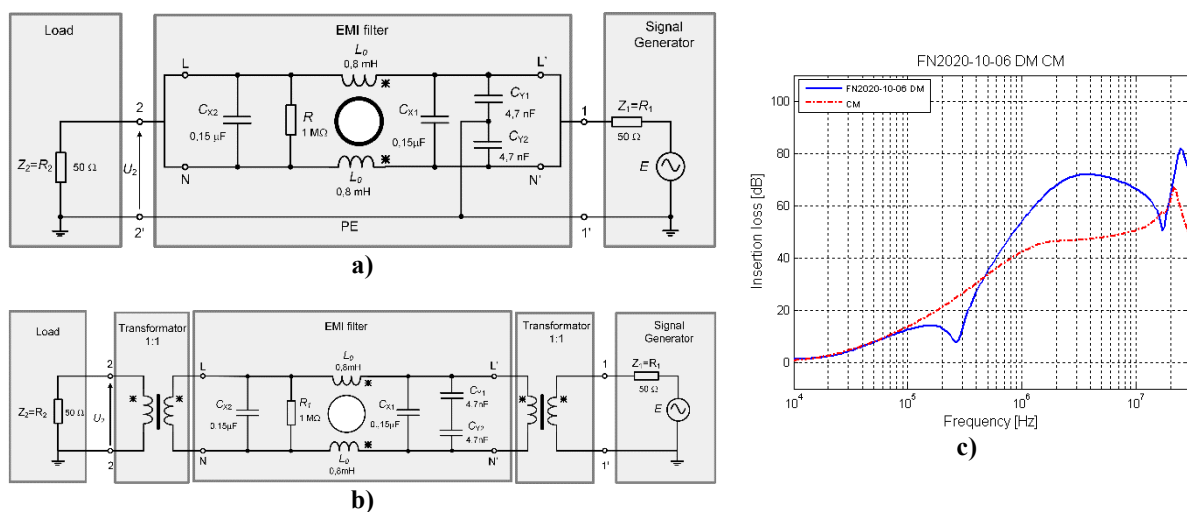


Abb. 7. a) CM-Ersatzschaltung und b) DM-Ersatzschaltung des EMI-Filters gemäß CISPR17 und c) jeweilige Einfügungsdämpfungen.

Die Einfügungsdämpfung des Filters wird über eine Frequenzbandbreite von mehreren Dekaden ermittelt. Das Frequenzverhalten bei höheren Frequenzen wird durch die parasitären Parameter der Filterkomponenten, der Induktivität und der Kondensatoren bestimmt [6, 7, 8], wie in Abb. 8 dargestellt.

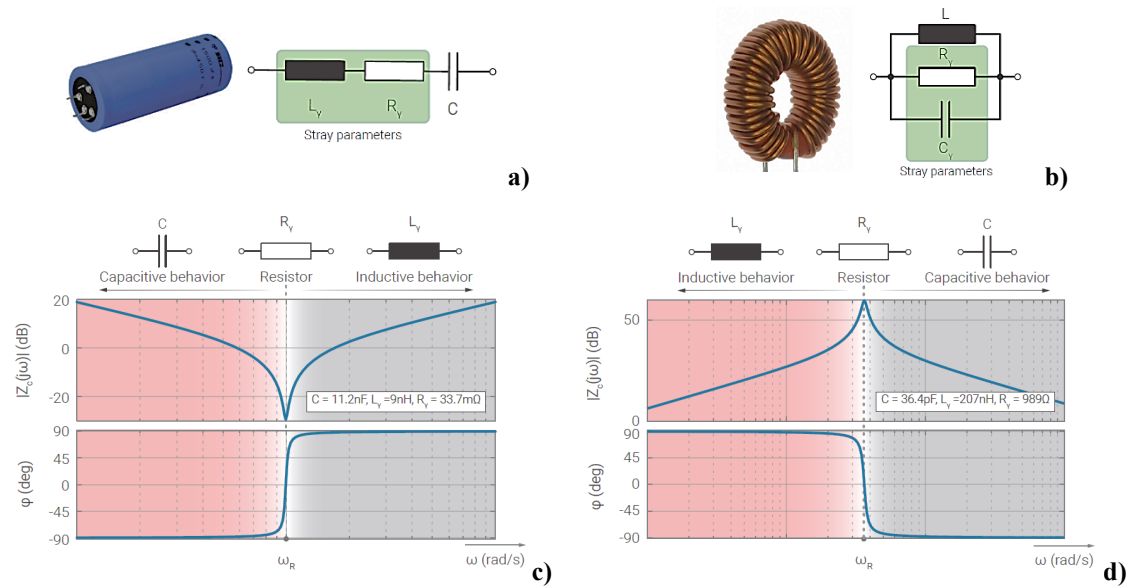


Abb. 8. a) Realkondensator und Ersatzschaltbild, b) Bode-Diagramm eines Realkondensators. c) reale Induktivität und ihre äquivalente elektrische Schaltung, b) Bode-Diagramm einer realen Induktivität.

Die äquivalenten CM- und DM-Schaltungen mit parasitären Parametern sind in Abb. 9 bzw. Abb. 10 dargestellt.

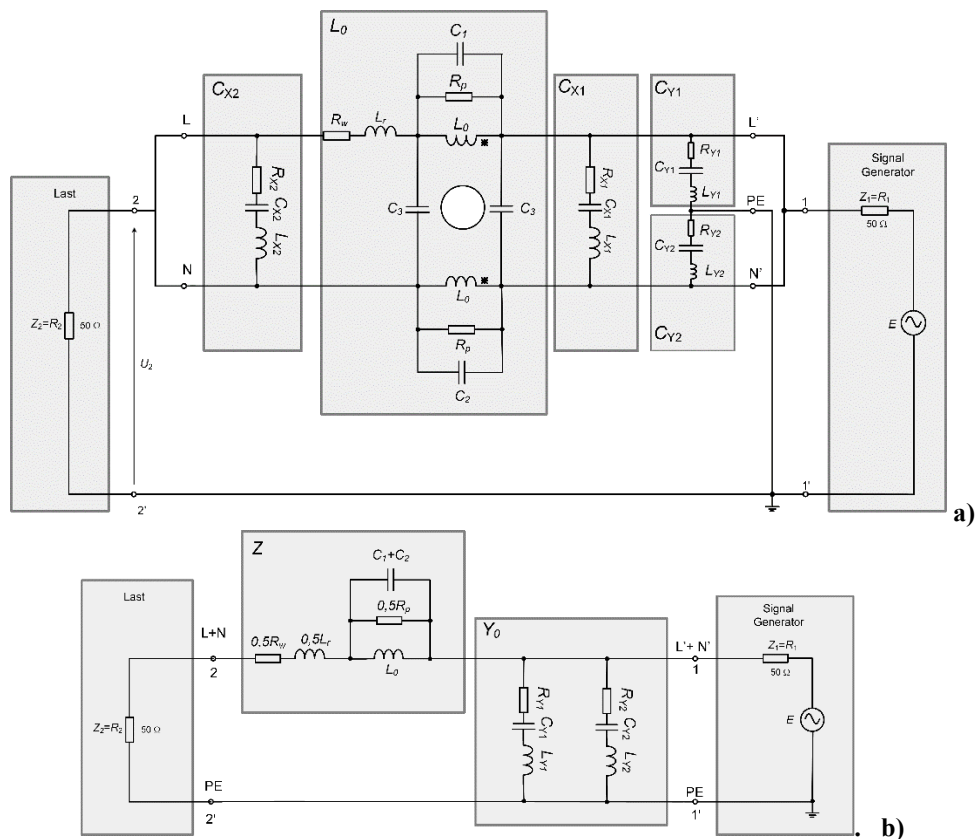


Fig.9. a) CM-Ersatzschaltung mit parasitären Parametern und c) jeweilige vereinfachte Schaltung.

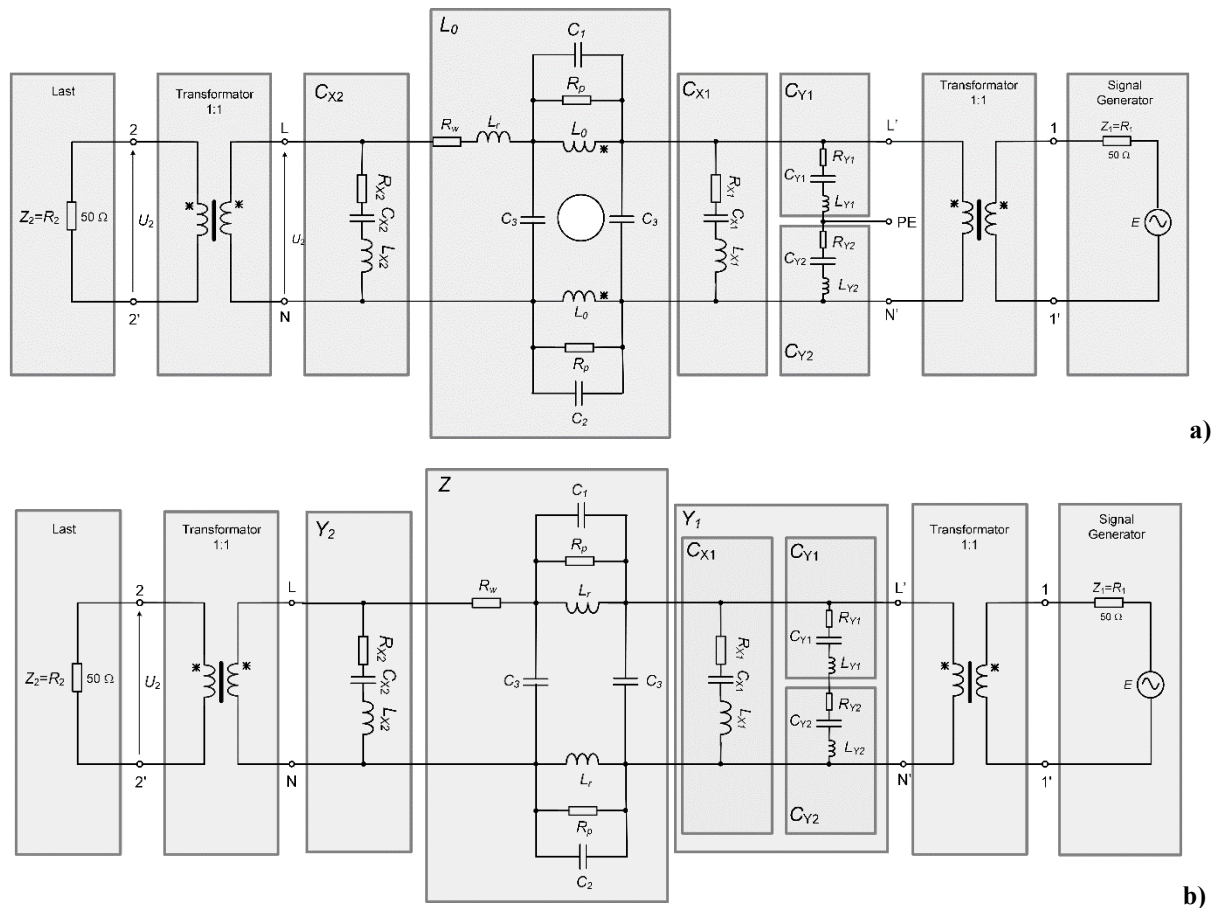


Fig.10. a) DM-Ersatzschaltung mit parasitären Parametern und c) jeweilige vereinfachte Schaltung.

Aufgaben/Anforderungen an Tool

Entwickeln und realisieren Sie ein benutzerfreundliches Tool / Programm / GUI usw., mit dem Sie das Frequenzverhalten und die Einfügungsverluste von CM und DM des EMI-Filters vorhersagen können. Das Werkzeug muss insbesondere die Anzeige der Auswirkungen parasitärer Parameter auf die Einfügungsverluste des Filters ermöglichen (Empfindlichkeitsanalyse). Die Arbeit soll eine abschließende Empfehlung unter den zwei Filterdesigns hinsichtlich der Leistung geben. Fakultativ, eine Empfehlung in Bezug auf Fußabdruck und Kosten.

Eine mögliche Realisierung der GUI als "DJ-Controller" ist in Abb. 11 dargestellt. Insbesondere ermöglicht die dargestellte GUI, den Einfluss der Hauptparameter der CM-Ersatzschaltung auf die CM-Einfügungsverluste und auf die DM-Einfügungsverluste anzuzeigen. Eine ähnliche GUI soll erstellt werden, um die Auswirkung auf die Einfügungsdämpfung der Hauptparameter der DM-Ersatzschaltung zu überprüfen.

Hinweis: Implementieren Sie die CM- und DM-äquivalenten Schaltungsmodelle des Filters einschließlich parasitärer Parameter. Sie können einen analytischen oder einen Simulationsansatz wählen. Um die Auswirkungen der Parametervariation besser sichtbar zu machen, können Sie den Frequenzbereich des Filters in 3 Sektoren aufteilen: 0 kHz bis 500 kHz, 500 kHz bis 5 MHz und 5 MHz bis 30 MHz. Die parasitären Filterparameter können in einem Bereich von $\pm 30\%$ variieren. Berücksichtigen Sie mindestens 2 Filterlayouts für den Vergleich.

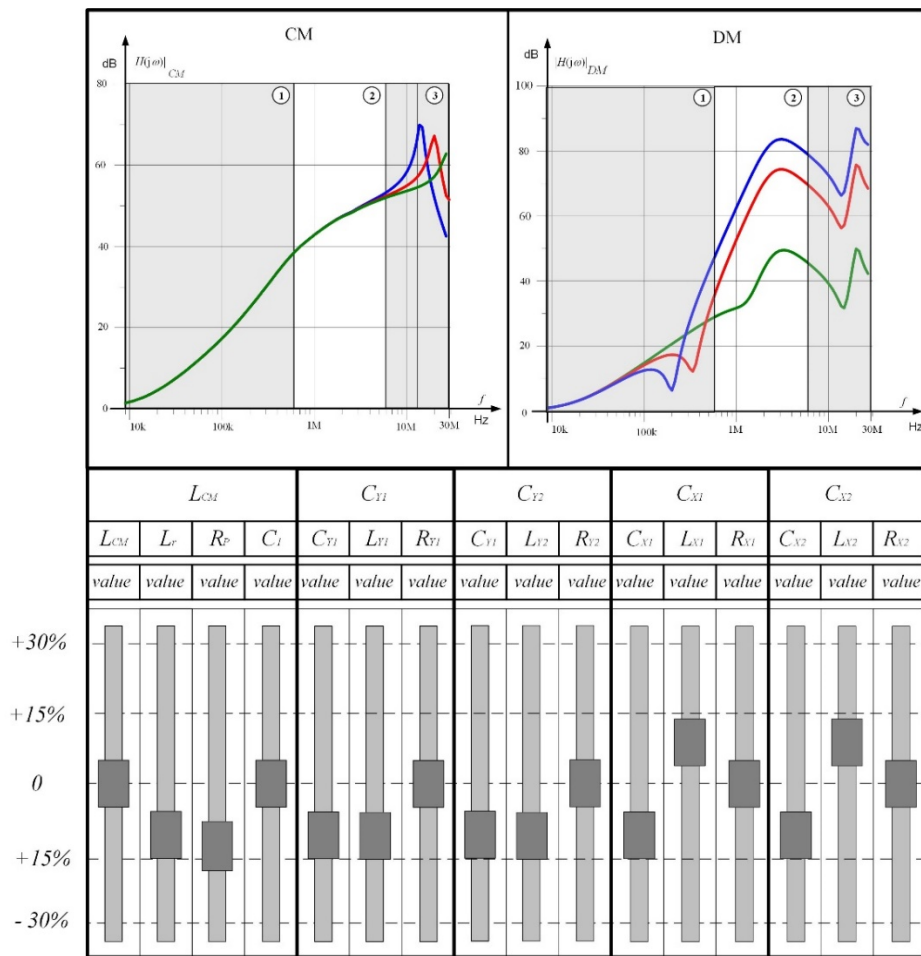


Abb.11. Mögliche Realisierung der GUI als DJ-Controller. Insbesondere ermöglicht die dargestellte GUI die Anzeige der Auswirkungen der Hauptparameter der CM-Ersatzschaltung auf die CM-Einfügungsverluste und auf die DM-Einfügungsverluste. Eine ähnliche GUI soll durchgeführt werden, um die Auswirkung auf die Einfügungsverluste der Hauptparameter der DM-Ersatzschaltung zu überprüfen.

Literatur

- [1] Youtube: 12V 10A switching power supply (with schematic and explanation) https://www.youtube.com/watch?v=B19rB_FR5Mk
- [2] FN2030 - Netzfilter – Schaffner <https://www.schaffner.com/products/emcemi/>
- [3] 36W AC-DC High Reliability Industrial Adaptor https://www.distrelec.ch/Web/Downloads/t/ds/gst36b_eng_tds.pdf
- [4] Clayton R. Paul, Introduction to electromagnetic compatibility, Wiley, 2006.
- [5] EN 55022 CISPR 22 Information Technology Equipment - Radio disturbance characteristics - Limits and methods of measurement. EN 55022 is a modified derivative of CISPR 22 and applies to information technology equipment (ITE). Procedures are given for the measurement of the levels of noise signals generated by the ITE and limits are specified within the standard for protection of radio services in industrial, commercial or residential environments.
- [6] Shuo Wang et al. "Effect of Parasitic Parameters on EMI Filter Performance". IEEE Trans. Power Electronics, 2004.
- [7] S. Pasko, "High frequency model of EMI filter", ELECTRONICS, 2012.
- [8] M. Heldwein, L. Dalessandro, J. Kolar, "The three-phase common-mode inductor: Modeling and design issues", IEEE Trans. Industrial Electronics, 2011.

Appendix

1) CM Induktor # 1: Ferrite MnZn

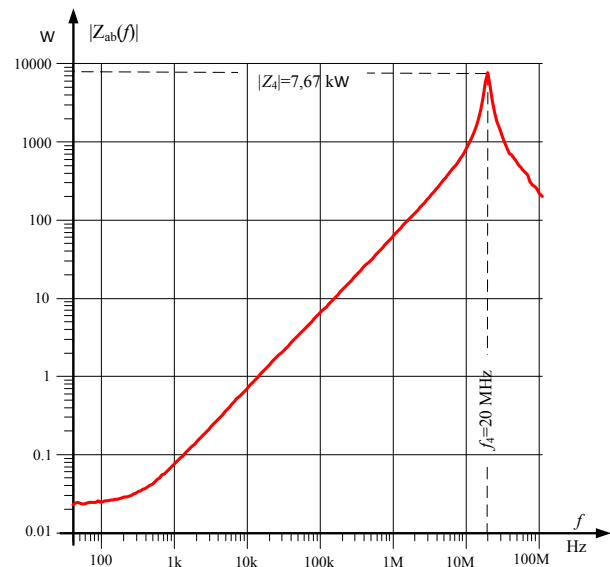
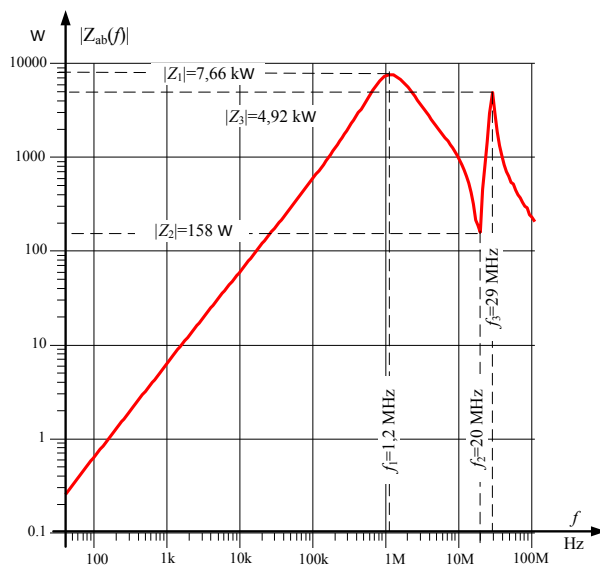


Abb. 12. Gemessene Eigenschaften des Ferrit Chokes: a) Impedanzmodul $|Z_{ab}|$ von ab-Terminals aus gesehen, wenn die cd-Terminals offen sind, b) Impedanzmodul $|Z_{ab}|$ von ab-Terminals aus gesehen, wenn die cd-Terminals kurzgeschlossen sind.

Parameter	Einheit	Wert
f_1	MHz	1,2
μ'_s	-	1990
μ''_s	-	2580
S	m^2	$3,94 \cdot 10^{-5}$
N	-	17
l_{sr}	m	$56 \cdot 10^{-3}$
$R_s(f_1)$	$\text{k}\Omega$	4,95
$L_0(f_1)=L_s(f_1)$	mH	0,50
$R_p(f_1)$	$\text{k}\Omega$	7,92
$L_p(f_1)$	mH	1,36
C_1+C_2	pF	12,93
$f_2=f_4$	MHz	20
L_r	μH	9,2
$C_1=C_2$	pF	6,46
C_3	pF	0,4

R_w	m Ω	11,3
-------	------------	------

2) CM Induktor # 2: Nanokristallin

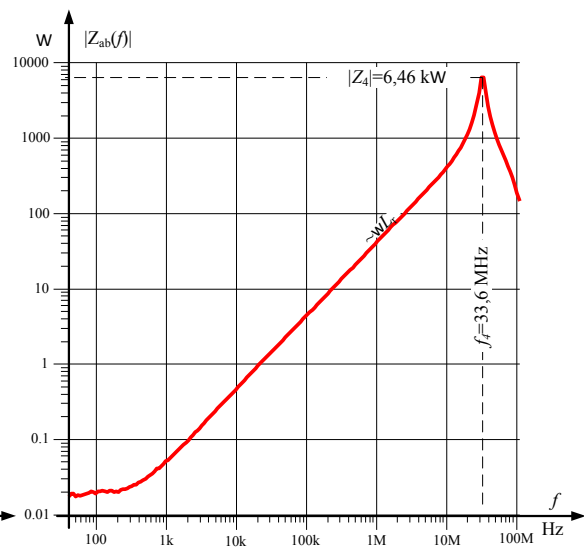
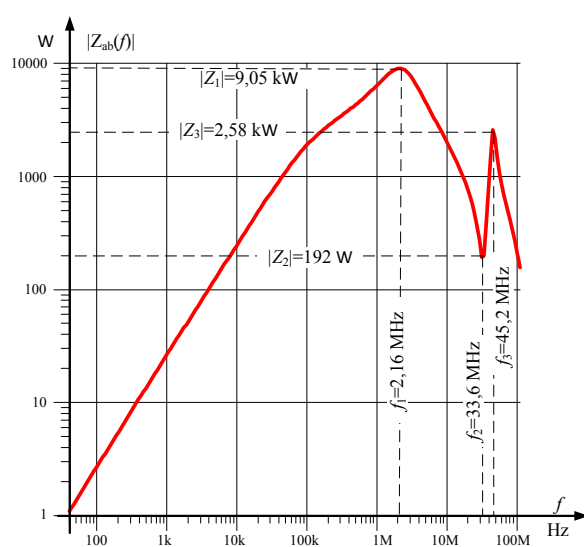
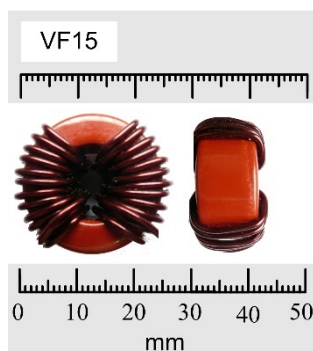


Abb. 13. Gemessene Eigenschaften des Chokes: a) Impedanzmodul $|Z_{ab}|$ von ab-Terminals aus gesehen, wenn die cd-Terminals offen sind, b) Impedanzmodul $|Z_{ab}|$ von ab-Terminals aus gesehen, wenn die cd-Terminals kurzgeschlossen sind.

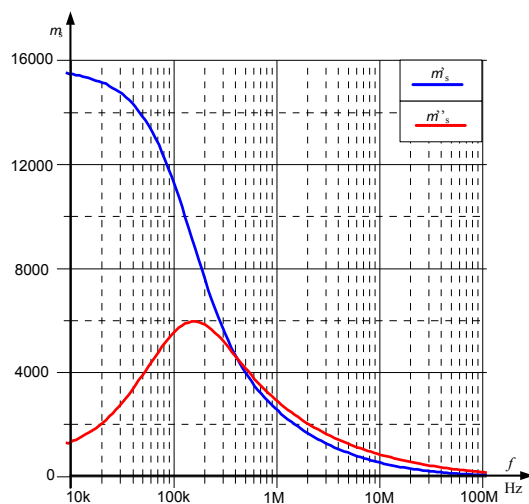
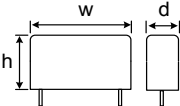
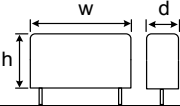


Abb.14. Gemessene Eigenschaften der Permeabilitätsänderungen μ'_s und μ''_s für den VF15-Kern mit den Abmessungen 21,98 mm x 11,67 mm x 11,11 mm.

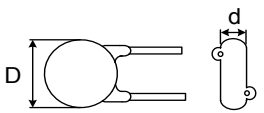
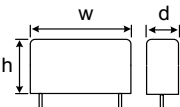
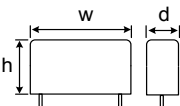
Parameter	Einheit	Wert
f_1	MHz	2,16
μ'_s	-	1590
μ''_s	-	1960
S	m^2	$5,73 \cdot 10^{-5}$
N	-	13
l_{sr}	m	$53 \cdot 10^{-3}$
$R_s(f_1)$	k Ω	6,10
$L_0(f_1)=L_s(f_1)$	mH	0,36
$R_p(f_1)$	k Ω	10,12
$L_p(f_1)$	mH	0,92
C_1+C_2	pF	5,89
$f_2=f_4$	MHz	33,6
L_r	μH	7,2
$C_1=C_2$	pF	2,94
C_3	pF	0,17
R_w	m Ω	8,8

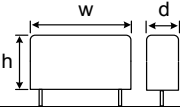
3) Kondensatoren Cx

Kondensator C_X – polyester Kondensator WXE-154K			
Parameter	Einheit	Wert	Dimensionen
w	mm	26,1	
h	mm	14,9	
d	mm	7,1	
C_{X1}	nF	146,7	
R_{X1}	m Ω	47,4	
L_{X1}	nH	15,2	
f_c	MHz	3,37	
Kondensator C_X – polypropylene Kondensator r WXPc 154E			

	mm	17,6	
h	mm	13,9	
d	mm	8,2	
C_{X1}	nF	161,8	
R_{X1}	m Ω	40,1	
L_{X1}	nH	14,3	
f_c	MHz	3,37	
<i>Kondensator C_X – Metallisierte Polyester Kondensator PME 271 M</i>			
w	mm	23,2	
h	mm	14,5	
d	mm	8,8	
C_X	nF	146,3	
R_{X1}	m Ω	55,4	
L_{X1}	nH	18,2	
f_c	MHz	3,13	

4) Kondensatoren Cy

<i>Kondensator C_Y – Keramik Kondensator 30LV</i>			
Parameter	Einheit	Wert	Dimensionen
D	mm	13,1	
d	mm	3,5	
C_{Y1}	nF	3,85	
R_{Y1}	m Ω	246	
L_{Y1}	nH	8	
f_c	MHz	29	
<i>Kondensator C_Y – polyester Kondensator WYE-472M</i>			
w	mm	12,9	
h	mm	12,9	
D	mm	5,3	
C_{Y1}	nF	4,75	
R_{Y1}	m Ω	165	
L_{Y1}	nH	11,5	
f_c	MHz	21,5	
<i>Kondensator C_Y – polypropylene Kondensator MKP Y2</i>			
w	mm	12,9	
h	mm	10,5	
d	mm	4,9	
C_{Y1}	nF	4,67	
R_{Y1}	m Ω	100,1	
L_{Y1}	nH	10,1	
f_c	MHz	23,2	
<i>Kondensator C_Y – Metallisierte Polyester Kondensator PME 271MY</i>			

w	mm	13,1	
h	mm	10	
d	mm	4,9	
C_{Y1}	nF	4,85	
R_{Y1}	m Ω	251,53	
L_{Y1}	nH	11,2	
f_c	MHz	21,5	