

Entwicklung eines Simulationsmodells für einen passiven Netzfilters

Jannis Carstens
Helmut Schmidt Universität
Helmut Schmidt Universität
Hamburg, Deutschland
janniscarstens@hsu-hh.de

Abstract—Im Rahmen des Student Contest 2017/2018 des deutschen Chapters der IEEE EMC Society wurde für einen passiven Netzfilter auf Basis von Messergebnissen ein Simulationsmodell in QucsStudio¹ erstellt und bewertet.

I. EINLEITUNG

Für den in der Ausschreibung angegebenen Netzfilter soll ein Simulationsmodell mit möglichst wenig Knoten und der bestmöglichen Abdeckung der gegebenen Impedanzen entwickelt werden. Zur Simulation wurde QucsStudio verwendet. Das Modell liegt in Form eines Paketes für QucsStudio bei. Dieses kann per *Projekt* → *Paket auspacken* importiert werden. Bei Tests auf anderen Rechnern gab QucsStudio zum Abschluss des Vorgangs eine Fehlermeldung aus, obwohl das Paket korrekt entpackt wurde.

II. VORGEHEN

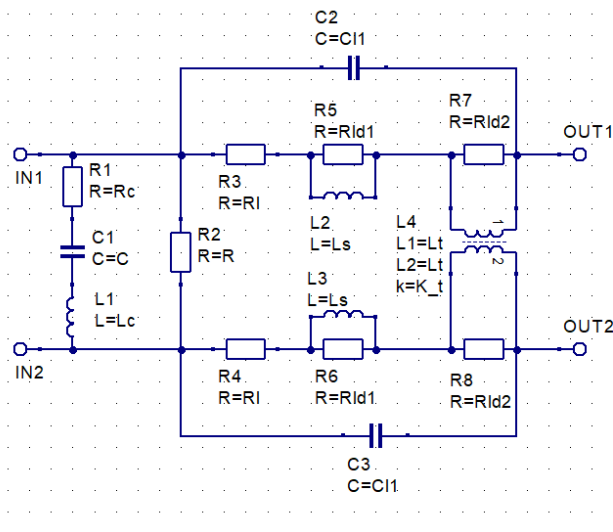


Abb. 1. Aufbau des Simulationsmodells

A. Aufbau der Simulation

Das Modell des Netzfilters ist in der Datei **Modell** abgelegt. Für die Simulationen wurde das Modell als eine Komponente definiert und in der Datei **Messungen und Diagramme** für

jede Messung instanziiert. Der Inhalt der Datei ist am Ende dieser Beschreibung abgebildet. Die Eingabe der Werte für das Modell erfolgt somit für alle Messungen zentral (über die Gleichung *Werte*). Kopier- oder Eintragefehler bei einer einzelnen Messung sind damit ausgeschlossen. Gleichzeitig kann der Effekt der Veränderung eines Parameters auf alle Messungen sofort erkannt werden. Zusätzlich ist neben dem Diagramm der jeweiligen Messung die Messschaltung dargestellt. Für die Simulation wurde der Frequenzbereich der Messungen mit der gleichen Anzahl von Messpunkten verwendet:

- Frequenz: 40 Hz bis 110 MHz
- Messpunkte: 801

Es wurde eine AC-Analyse für das Ermitteln der Kennlinien verwendet.

B. Aufbau des Modells

Abbildung 1 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells. Für die Bezeichnung der Bauelemente wird der im Modell als Wert eingetragene Bezeichner verwendet. Dies sichert die Konsistenz zu den Werten in der Datei **Messungen und Diagramme**.

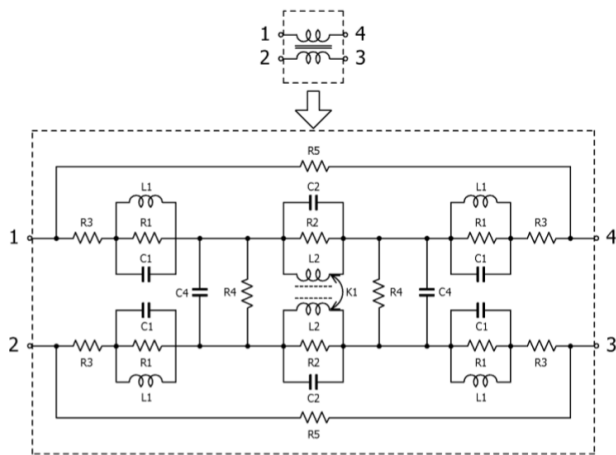
Die Bauteile R_C , C und L_C bilden das Verhalten der Eingangskapazität des Netzfilters ab. Die Kapazität wurde auf die Nennkapazität von 100 nF angenommen. R ist äquivalent zur Reihenschaltung der Widerstände parallel zur Eingangskapazität.

Die Modellierung der Spule stellte die Schlüsselstelle innerhalb der Aufgabenstellung dar. Es wurden dazu mehrere Ansätze probiert, die bis auf die nun vorliegende unzureichende Abdeckung mit den Messergebnissen boten.

- T-Ersatzschaltbild für Transformatoren
- Gekoppelte Induktivität mit variabler Kopplung
- Gekoppelte Induktivität mit variabler Kopplung und Serieninduktivität

Nachdem diese Ansätze keine brauchbaren Ergebnisse brachten, wurde durch Internetrecherche ein Ersatzschaltbild einer von der Anwendung identischen Spule gefunden. Abbildung 2 zeigt das Modell. Durch die Simulation wurde festgestellt, dass dieses Modell weiter vereinfacht werden konnte und damit die Anzahl der Knoten reduziert wurde. Dazu wurde die Symmetrie des Ersatzschaltbildes aufgegeben und die zwei Parallelschwingkreise pro Pfad zu einem zusammen gefasst.

¹<http://dd6um.darc.de/QucsStudio/index.html>



https://product.tdk.com/info/tvcl/ecm/cmf_acx_acm2012_ecm.pdf
 Abgerufen am 11.01.2018 21:30MEZ

Abb. 2. Modell von TDK für eine funktionell identische Spule

Zusätzlich stellte sich heraus, dass die parasitären Kapazitäten weitestgehend keinen Einfluss auf die Simulationsergebnisse haben. Aus diesem Grund wurden diese in eine parallele Kapazität zusammengefasst. Weiterhin konnten die Widerstände R_5 und R_4 vernachlässigt werden.

Die Werte der Komponenten wurden meist experimentell bestimmt, indem der vermutete Einfluss eines Bauteils durch extreme Werte visualisiert wurde. Bestätigte sich die Annahme wurde im Anschluss durch Versuche die Kurvenverläufe der Messungen genähert. Dieses Vorgehen soll exemplarisch an der Nachbildung der fünften und der ersten Messung erläutert werden:

Durch die Funktionsweise der Spule war ersichtlich, dass für die Gleichaktmessung die Koppelinduktivität, welche die konstruktive Überlagerung der Felder im Kern der Spule abbilden, die Hauptrolle spielen. Alle Bauelemente, die zwischen den Zweigen der Schaltung liegen, haben aufgrund der Kurzschlüsse von Ein- und Ausgang keinen Einfluss. Für große Frequenzen ist die Koppelinduktivität im Betrag sehr hochohmig. Der Betrag der Impedanz wird dann vom Widerstand R_{ld} dominiert, wodurch der Wert von 1200 Ohm aus den Messdaten abgeleitet werden konnte. Die Induktivität der Koppelinduktivität zeigte Einfluss auf die Verschiebung des Betrages entlang der Frequenz-Achse. Mit Hilfe dieser Information wurde die Induktivität erhöht, bis der Schnittpunkt des Betrages mit der Betrages-Achse mit der Messung übereinstimmte. Anders konnte bei der Nachbildung der Eingangskapazität vorgegangen werden: Durch den lastseitigen Leerlauf in Messung Eins spielt die Spule keine Rolle. Die Kapazität war bekannt, wie auch der Eingangswiderstand der Konfiguration. Aus der Resonanzfrequenz der Konfiguration konnten R_C und L_C aus den Messdaten analytisch bestimmt werden.

C. Bewertung der Ergebnisse

Auf der folgenden Seite ist der Inhalt der Datei **Messungen und Diagramme** abgebildet.

Von den fünf gegebenen Messungen konnten die ersten beiden nahezu identisch nachgebildet werden. Für die dritte und vierte Messung ergeben sich deutlich sichtbare Abweichungen der Phase für Frequenzen ab ungefähr 2 MHz. Der Betrag weicht ab etwa 50 MHz sichtbar von den Messungen ab. Es wurde darauf verzichtet, diese Effekte mit weiteren Komponenten zu versuchen abzubilden, da eine geringere Knotenanzahl einem besseren Modell für den betreffenden Frequenzbereich vorgezogen wurde. Der vorgegebene Netzfilter ist mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht für Frequenzen größer als 1 MHz ausgelegt worden, weshalb die Bedeutung des Modells für Frequenzen größer 1 MHz in Frage zu stellen ist. Für Frequenzen kleiner als 1 MHz ist die Deckungsgleichheit mit den Messungen gegeben.

Als Ursache für die Abweichungen kommen ein frequenzabhängiges Kernmaterial der Spule als auch Effekte der Zuleitungen in Frage. In der Ausschreibung wurden dazu zur Kalibrierung des Impedanzanalysators keine Angaben gemacht.

Bei der Gleichaktmessung besteht die einzige Abweichung im Bereich der Phase. Diese sollte für Frequenzen im Bereich von 10 kHz und kleiner im Bereich von 76° liegen. In der Simulation liegt die Phase bei etwa 86° .

AC-Simulation

AC1
Type=log
Start=40Hz
Stop=110 MHz
Points=801

Phase in Rot und gestrichelt

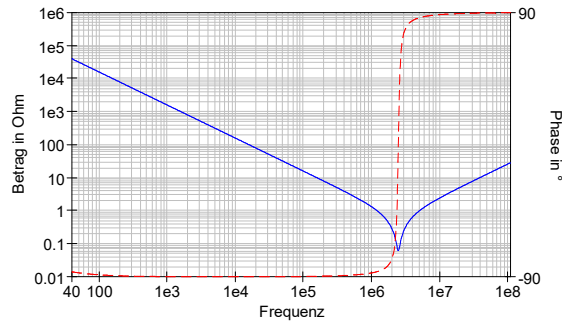
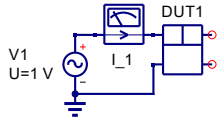
Betrag in Blau

Festlegung aller Komponenten.
Um für alle Simulationen die gleichen Werte zu verwenden, ist ein Sub-Modul erstellt worden. Über die Gleichung Werte werden die Werte der Bauelemente festgelegt

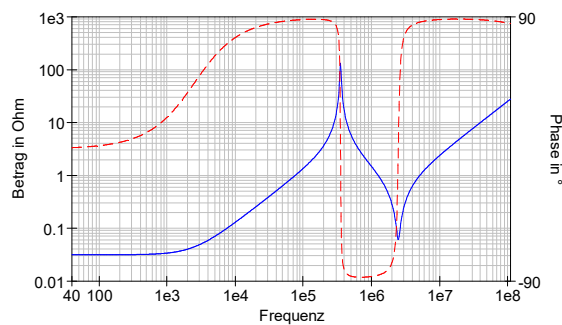
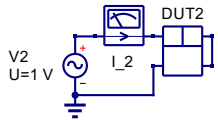
Gleichung

Werte
R=665 kOhm
C=100 nF
Rc=61 mOhm
Lc=41 nH
Lt= 450 uH
Rl=15.8 mOhm
Cl1=0.4 pF
K_t=1
Ls=1 uH
Rld1=180 Ohm
Rld2=1200 Ohm

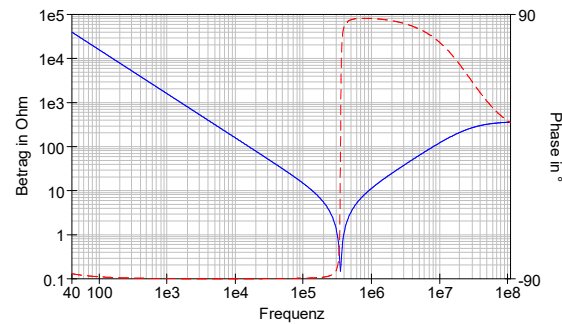
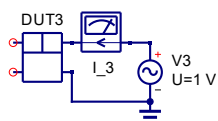
Messung der Gegentaktimpedanz auf der Netzseite mit lastseitigem Leerlauf:



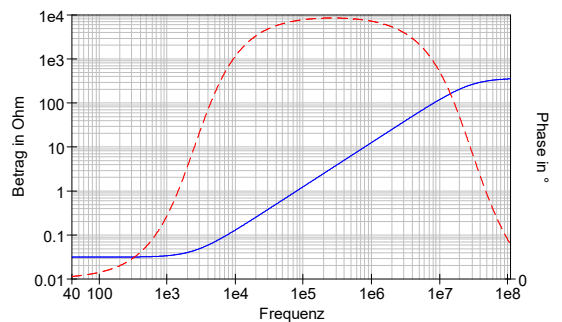
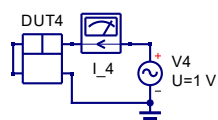
Messung der Gegentaktimpedanz auf der Netzseite mit lastseitigem Kurzschluss:



Messung der Gegentaktimpedanz auf der Lastseite mit netzseitigem Leerlauf:



Messung der Gegentaktimpedanz auf der Lastseite mit netzseitigem Kurzschluss



Messung der Gleichtaktimpedanz zwischen Netz- und Lastseite:

