EMV-Filter: Berechnung per Computer

von Prof. C. Dirks

Spulenarme EMV-Filter und Entkopplungen mit realen Bauelementen können schnell und einfach auf einem PC mit Hilfe des Softwarepaketes „SILENT" berechnet werden.

Allgemeines

Die Anforderungen an ein EMV-gerechtes Schaltungsdesign sind vor dem Hintergrund neuerer Gesetzgebung von ausschlaggebender Bedeutung. So reicht es schon lange nicht mehr aus, daß ein neu entwickeltes Gerät die ihm zugedachten Funktionen in einem störungsfreien Raum ausführt. Vielmehr muß das Gerät ebenfalls einwandfrei funktionieren, wenn bestimmte äußere Störeinflüsse darauf einwirken. Darüber hinaus darf dieses Gerät seinerseits andere Geräte nicht störend beeinflussen.

Um die entsprechenden Vorschriften zur Störaussendung und zur Störfestigkeit zu erfüllen, sind bereits während der Entwicklung entsprechende Maßnahmen zu ergreifen.

Um das Gerät vor Störungen, die aus dem 230 V-Wechselspannungsnetz eingekoppelt werden, zu unterdrücken, sind entsprechende EMV-Filter mit hinreichender Entkopplungswirkung an geeigneter Stelle in die Stromversorgung einzufügen. Dies kann im Anschluß an die Gleichrichtung im Bereich der Spannungsregler erfolgen oder aber im Bereich des Netztransformators. Die hier eingesetzten Filter können dann in ähnlicher Weise auch zur Unterdrückung der Störaussendungen dienen, d. h. daß die vom Gerät produzierten Störungen möglichst nicht in die 230 V-Netzversorgung einstreuen.

Werden die zugelassenen Höchstwerte überschritten, dürfen die betreffenden Geräte nicht mehr verkauft werden. Die hochfrequenten Störaussendungen eines Gerätes, wie auch die Unempfindlichkeit gegenüber hochfrequenten Einstreuungen spielen bei der Betrachtung des EMV-gerechten Schaltungsdesigns ebenfalls eine wesentliche Rolle. Auch hier können durch geeignete EMV-Filter und Entkopplungsmaßnahmen z. B. durch den Einbau von Kondensatorgruppen die Störaussendungen drastisch reduziert werden, bei gleichzeitiger Erhöhung der Störfestigkeit.

Das Ganze spielt sich in einem Frequenzbereich ab, der bis hinaus zu 1 GHz und darüber reicht, so daß experimentelle Maßnahmen in der Praxis kaum mehr Bedeutung besitzen, da sie in der Regel von vornherein zum Scheitern verurteilt sind. Induktivitäten besitzen bei den in Frage kommenden Frequenzen einen nennenswerten kapazitiven Anteil, während Kondensatoren einen nicht zu unterschätzenden induktiven Anteil aufweisen. Die auftretenden Resonanzstellen der daraus resultierenden Schwingkreise sind ohne fundierte Berechnungsmethoden kaum mehr in den Griff zu bekommen.

Hier setzt nun ein neues Softwarepaket mit der Bezeichnung „SILENT" ein. Unter Berücksichtigung des tatsächlichen Verhaltens realer Bauelemente ist es mit „SILENT" auf höchst einfache Weise möglich, EMV-Filter und Entkopplungen schnell und zuverlässig zu berechnen.

Erläuterung des Grundansatzes im EMV-Programm „SILENT"

Wie bereits in dem EMV-Artikel im „ELVjournal" 1/94 gezeigt, sind Kondensatoren für einen breitbandigen Einsatz leider wenig geeignet. Sie verhalten sich wie Serienresonanzkreise, die nur in einem schmalen Frequenzbereich niederohmig sind. Deshalb muß man für breitbandige Entkopplungen von Versorgungsspannungen sauber selektierte Kondensatorgruppen einsetzen, die man zweckmäßig mit dem Programm „SILENT" berechnet. So kann man zuverlässig vermeiden, daß die Kondensatorgruppen unzulässig hochohmige Parallelresonanzen aufweisen, die die Wirkung der Entkopplung in bestimmten Frequenzbereichen wieder zunichte machen können.

Spulen und Drosseln sind auch keine idealen Induktivitäten. Vielmehr weisen sie Eigenschaften auf, die ihren Nutzen auch auf bestimmte Frequenzbereiche begrenzen. Ein einfaches Ersatzbild einer Spule ist in Abbildung 12 gezeigt. Als parasitäre Komponenten erscheinen der Verlustwiderstand und eine Kapazität, die sich aus Windungs- und Lagenkapazitäten zusammensetzt.

In Abbildung 13 ist der Impedanzverlauf einer Drossel von 390µH dargestellt. Man sieht den Vergleich von Messung und Modell. Die beiden Kurven stimmen fast perfekt überein.

Man erkennt, daß bei 3MHz der Betrag der Impedanz mit 95 k relativ hoch ist. Eine hohe Impedanz findet man aber nur in einem sehr schmalen Frequenzbereich. Da die Störspektren, die in der EMV-Technik vorliegen, meist sehr breitbandig sind, ist dieses schmalbandige Impedanzverhalten, wie man es hier sieht, sehr ungünstig.

Die für EMV-Filter übliche Struktur ist eine Kettenschaltung, wie sie Abbildung 14 darstellt. Die Längszweige, hier durch Drosseln gebildet, sollen breitbandig möglichst hochohmig sein, die Querzweige, hier Kondensatoren, möglichst niederohmig. Beide Bauelemente haben die gewünschten Eigenschaften nur in der Um-

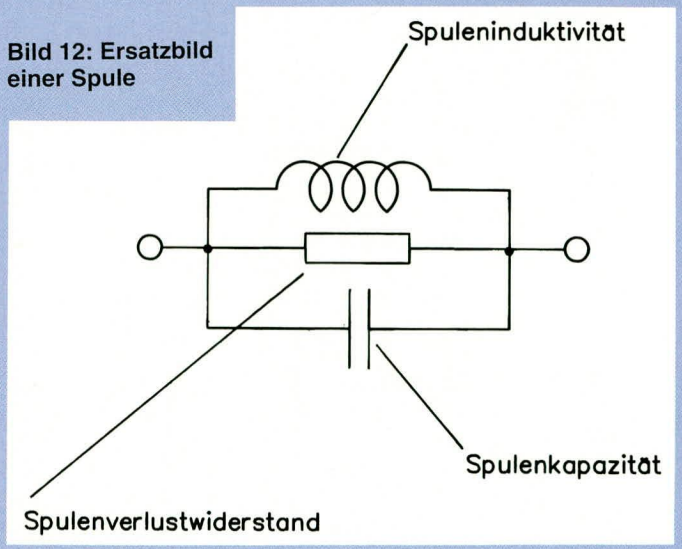

Bild 12: Ersatzbild einer Spule

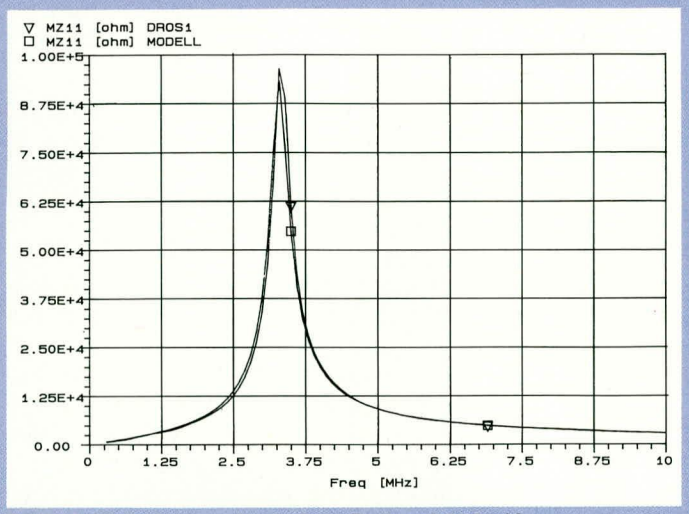

Bild 13:Impedanzverlauf einer Drossel 390 µH

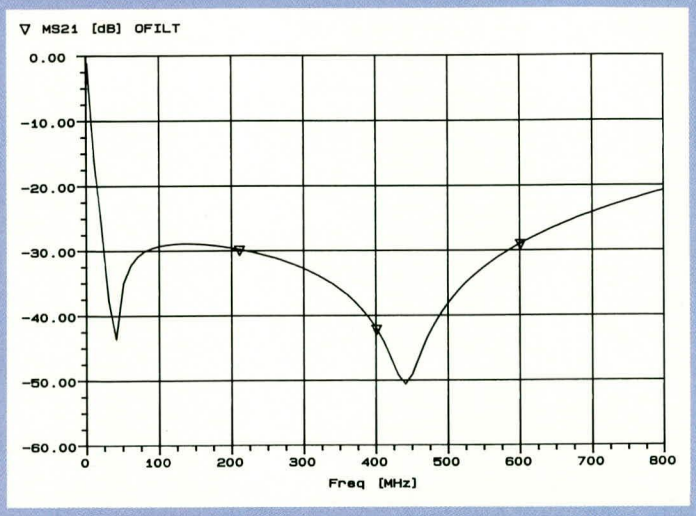

Bild 16: Dämpfungsverlauf des SMD-Filters

gebung ihrer Resonanzstellen: Die Drossel ist nur in der Nähe ihrer Parallelresonanz hochohmig und der Kondensator ist nur in der Umgebung seiner Serienresonanz niederohmig.

Man muß daher solche EMV-Filter, die als Kettenschaltung - wie in Abbildung 14 dargestellt - gestaltet sind, so dimensionieren, daß die Resonanzstellen der Bauelemente möglichst gleichmäßig über den geforderten Frequenzbereich verteilt sind. Damit läßt sich ein recht brauchbarer Dämpfungsverlauf erzielen.

Als Beispiel soll ein Filter dienen, wie er in Abbildung 15 gezeigt ist. Er besteht aus zwei Bauelementen in SMD-Technik und ist daher für den Einbau in Leiterplatten besonders geeignet. Dieser Filter hat eine unregelmäßig verteilte Dämpfung, wie man dies im Dämpfungsverlauf in Abbildung 16 sieht, aber er hält eine geforderte Mindestdämpfung (-30 dB) über einen breiten Frequenzbereich ein. Man erkennt sehr deutlich die Resonanzstellen der zwei Bauelemente als zwei Dämpfungsmaxima.

Zwischen diesen Maxima gibt die Dämpfung erheblich nach, und zwar umso mehr, je weiter sie auseinanderliegen. Die Staffelung der Resonanzstellen der Bauelemente im Frequenzbereich richtet sich also nach der minimal zulässigen Dämpfung in dem betreffenden Bereich. Damit ist auch die Menge und Art der erforderlichen Bauelemente festgelegt.

Dieser Ansatz führt zwar zum Erfolg, hat aber einen erheblichen Nachteil: Die Kettenschaltung nach Abbildung 14 enthält gleichviel Spulen und Kondensatoren. Vor dem Hintergrund, daß Spulen meist wesentlich teurer als Kondensatoren sind, ist dies negativ zu bewerten.

Man kann versuchen, die Wirkung der Drosseln über einen größeren Frequenzbereich auszudehnen, indem man schmalbandige Resonanzen derselben vermeidet. Tatsächlich gibt es solche Bauformen, die

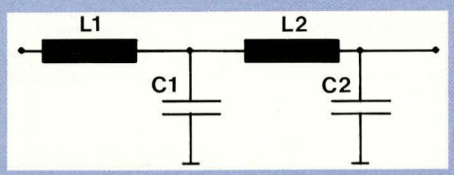

Bild 14: Kettenschaltung für EMV-Filter

deshalb in der EMV-Technik breite Anwendung finden. Es sind dies Ferrit-Drosseln mit vorzugsweise geschlossenem Magnetkreis, die in dem Frequenzbereich, in dem sie genutzt werden sollen, hohe Verluste im Ferritwerkstoff aufweisen. Ferner haben sie sehr kleine parasitäre Kapazitäten.

Es sind dies zum Beispiel Drosseln mit Rohrkern, Doppellochkern, Sechslochkern,

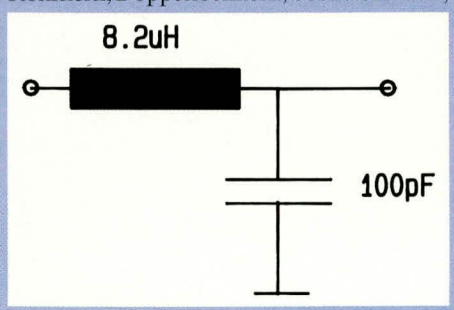

Bild 15: SMD-EMV-Filter

Ferritperlen oder ähnliche Bauformen. In SMD-Technik sind Drosseln mit entsprechenden Eigenschaften ebenfalls erhältlich. Die hohen, im vorliegenden Anwendungsfall günstig zu bewertenden Verluste verursachen eine breitbandige Resonanz, und damit einen weiten Frequenzbereich, in dem die Drosseln relativ hochohmig sind.

Der Impedanzverlauf einer Sechslochkern-Drossel ist in Abbildung 17 nach Betrag und Phase dargestellt. Der eine Verlauf zeigt die Meßergebnisse, der andere das Verhalten eines optimierten Parallelresonanz-Modells. Man erkennt eine relativ schlechte Übereinstimmung zwischen Meßergebnis und Simulationsergebnis. Dies hat seine Ursache darin, daß der Ferritwerkstoff seine magnetischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der Frequenz drastisch verändert.

Mit wachsender Frequenz nimmt die Permeabilität ab, die Verluste nehmen zu. Beide Funktionen sind nichtlinear. Deshalb kann man Ferrit-Drosseln mit einfachen Modellen nicht korrekt beschreiben.

Dies steht einer rechnergestützten Entwicklung von EMV-Filtern entgegen. Reine Simulationsverfahren würden relativ praxisferne Resultate liefern.

In dem EMV-Programm „SILENT" wird daher zur Beschreibung von Drosseln ein grundsätzlich anderer Weg beschritten:

Es werden nur Meßwerte verwendet. Jede Drossel in der Datenbank von „SILENT" wird mit insgesamt 808 Meßwerten im Frequenzbereich von 300 kHz bis 1000 MHz beschrieben. Hierdurch wird eine sehr praxisnahe Beschreibung der Drosseln möglich. Kundenspezifische Drosseln können gemessen und an „SILENT" angeschlossen werden.

Wenngleich es breitbandige Drosseln gibt, die über größere Frequenzbereiche hochohmige Längszweige der EMV-Filter bilden können, so fehlen immer noch die breitbandigen Querzweige. Kondensator-Resonanzen sind schmalbandig. Wollte man Kondensatoren mit so hohen Verlusten bauen, daß ihre Resonanzen breitbandig würden, wären sie nicht mehr niederohmig und damit für die Querzweige in EMV-Filtern unbrauchbar.

Die Lösung dieses Problems kennen wir bereits aus dem „ELVjournal" 1/94: Es sind die Kondensatorgruppen, die „SILENT" zur Entkopplung von Versorgungsspannungen einsetzt. Diese sind mit ihren Kapazitätswerten so ausgelegt, daß sie breitbandig niederohmig sind. Daher bilden sie ideale Querzweige für breitbandige EMV-Filter.

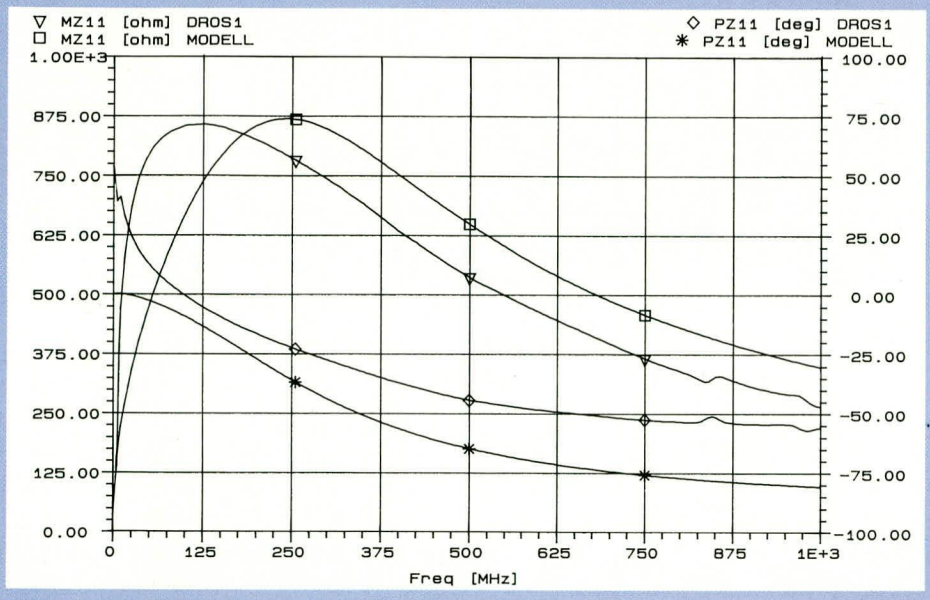

Bild 17: Impedanzverlauf einer Sechslochkern-Drossel

Der Verlauf der Berechnung von EMV-Filtern in „SILENT" ist also sehr einfach: Es wird zunächst eine Kondensatorgruppe errechnet, die in dem Frequenzbereich niederohmig ist, den der EMV-Filter abdekken soll. Danach werden all´e Drosseln aus der Drossel-Datenbank ausgesucht, die mit der Kondensatorgruppe die geforderte Dämpfung einhalten oder übertreffen. Der Benutzer sucht dann aus dieser Drosselliste das Exemplar, das ihm am geeignesten erscheint, nach Gesichtspunkten wie Bauform, Abmessungen, Preis, Lieferant und Strombelastbarkeit aus.

An einem Beispiel soll der Entwurf von solchen EMV-Filtern erläutert werden. In Abbildung 18 sieht man die Schaltung, die auf einer Leiterplatte aufgebaut werden soll. Sie besteht aus einer Breitbanddrossel und einer Kondensatorgruppe. Die Anzahl der Kondensatoren liegt zunächst noch nicht fest, da sie während der Optimierungsläufe von „SILENT" festgelegt wird. Hierdurch wird erreicht, daß man mit einer minimalen Menge von Kondensatoren aus kommt.

Zum Entwurf der Kondensatorgruppe werden in „SILENT" die Daten der verwendeten Leiterplatte, wie zum Beispiel Substratdicke, Epsilon-r und die Abmessungen der zu entkoppelnden Fläche eingegeben. Ferner muß der Frequenzbereich spezifiziert werden, für den die Entkopplung wirken soll. Es werden dann zunächst die Anzahl der Kondensatoren und die optimalen Kapazitätswerte ermittelt. Hiernach können Normwerte von Hand eingegeben werden, wobei man den Einfluß dieses Eingriffs in das Rechenergebnis im Impedanzverlauf der Kondensatorgruppe beobachten kann.

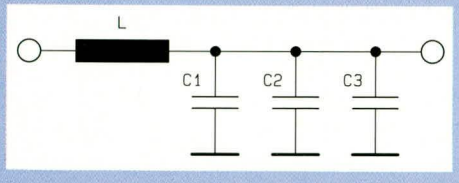

Bild 18: Breitbanddrossel mit Kondensatorgruppe

Die Ausgabe dieser Resultate für das vorliegende Beispiel ist in Bild 19 zu sehen. Die Entkopplung ist bis 380 MHz ausgelegt worden. Die angegebenen Kapazitätswerte sind bereits Normwerte. Abbildung 20 zeigt den zugehörigen Impedanzverlauf, der wegen der verwendeten Normwerte etwas unregelmäßig ist.

Diese Kondensatorgruppe wird dann gespeichert. Danach springt man in den Menüpunkt „Filter" und spezifiziert den Frequenzbereich, den Gleichstrom, der über die Drossel fließt und die geforderte Mindestdämpfung des EMV-Filters.

„SILENT" stellt danach eine Liste aller Drosseln zusammen, die den angegebenen Forderungen genügen. Der Benutzer kann sich nacheinander diese Drosseln präsentieren lassen (Abbildung 21). Zu jeder dieser Drosseln kann er sich den Dämpfungsverlauf zeigen lassen, den diese zusammen mit der gespeicherten Kondensatorgruppe ergibt (Abbildung 22).

```
                    SILENT V.2.00 - Data - Printout

                 Fri Nov 26 15:32:27 1993

Width of Layer       = 0.50 cm
Length of Layer      = 0.50 cm
Substrate Height     = 1.50 mm
Substrate Epsilon-r  = 4.33

Parasitic Cap. - L   = 1.3315 nH
Parasitic Cap. - R   = 0.500 ö

Max. Decoupl. Freq.  = 380.000 MHz
Decoup.- Area - r    = 0.10 cm


C1= 0.150 nF            Class-2 Ceramic SMD
C2= 0.330 nF            Class-2 Ceramic SMD
C3= 1.000 nF            Class-2 Ceramic SMD
C4= 1000.000 nF         Tantal - Chip
```

Bild 19: Entwurf der Kondensatorgruppe

Zum Vergleich zeigt Abbildung 23 den gemessenen Dämpfungsverlauf. Es sind etwas geringere Dämpfungen erreicht als der Berechnung entspricht. Dieses hat seine Ursache im wesentlichen darin, daß der praktische Aufbau des EMV-Filters völlig ohne Abschirmung, allerdings mit einer Masse-Fläche, ausgeführt wurde.

Die erreichten Dämpfungswerte sind trotzdem bemerkenswert: von 30 MHz bis

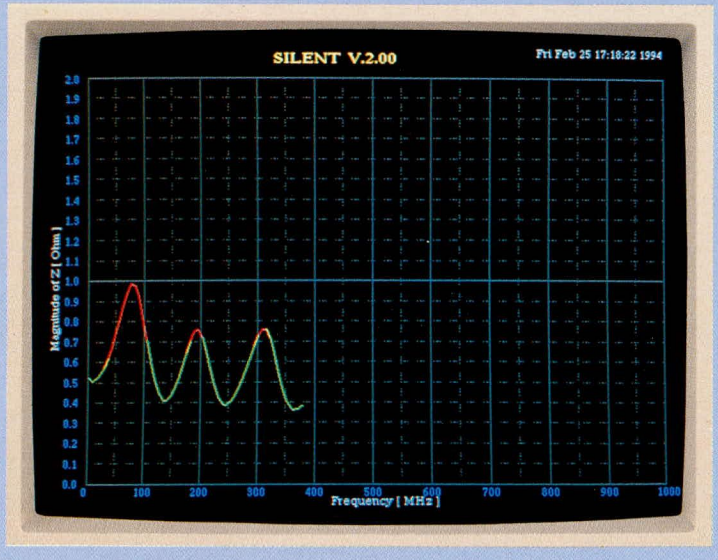

Bild 20: Impedanz der Kondensatorgruppe

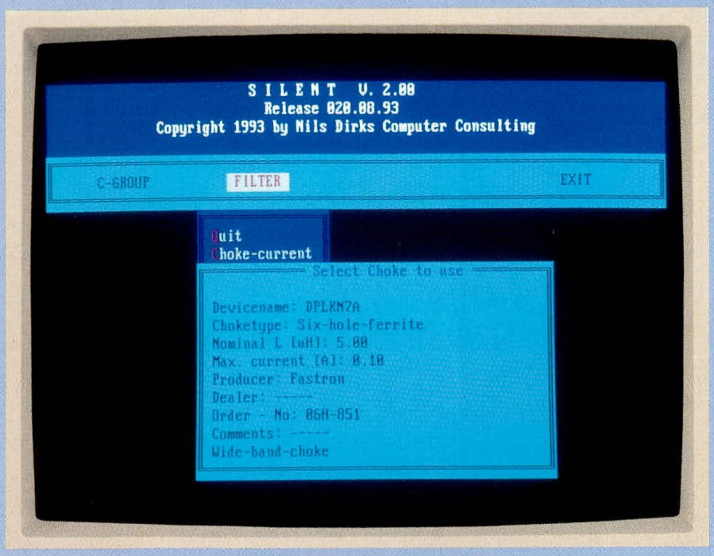

Bild 21: Drossel-Präsentation aus „SILENT"

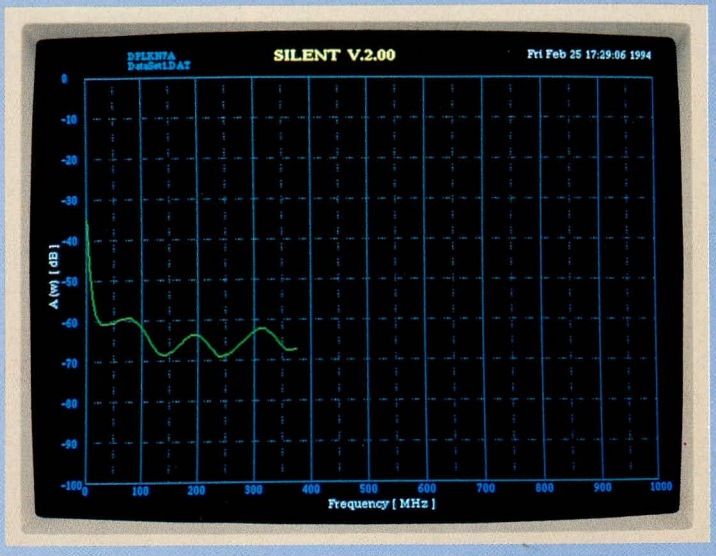

Bild 22: Dämpfungsverlauf eines Filterzweiges

380 MHz besser als 50dB mit nur einer Drossel und 4 SMD - Kondensatoren. Hier ist der Vorteil des Ansatzes in „SILENT" zur Entwicklung von spulenarmen Filtern erkennbar.

Ist die gewünschte Dämpfung nicht mit einem L-Glied zu erreichen, so kann man mehrere hintereinanderschalten. Da der einzelne Aufbau bereits breitbandig ausgelegt ist, können einfach gleichartige Abschnitte hintereinander geschaltet werden (siehe Abbildung 24). Die Dämpfung erreicht nicht ganz den doppelten Wert in dB wie der einzelne Abschnitt, weil bei so hohen Werten Nebensprecheffekte zunehmend zum Tragen kommen (Abbildung 25). Immerhin, mit nur 2 Drosseln und 8 Kondensatoren mehr als 90db von 30 MHz bis 380MHz!

Mit dem Softwarepaket „SILENT" können EMV-Filter und Entkopplungen in einem Frequenzbereich bis hinauf zu 1 GHz berechnet werden. Die Handhabung des Programms ist außerordentlich einfach, bei weitestgehend automatischem Berechnungsablauf.

Im Zusammenhang mit Festspannungsreglern in Netzteilen kann man auch EMV-Filter bauen, die gar keine Drossel benötigen. In diesem Falle übernimmt der Spannungsregler die Funktion der Drossel. Die erforderlichen Berechnungen können ebenfalls auf „SILENT" durchgeführt werden. Dies soll im folgenden Artikel der EMV-Serie im „ELVjournal„ 3/94 gezeigt werden.

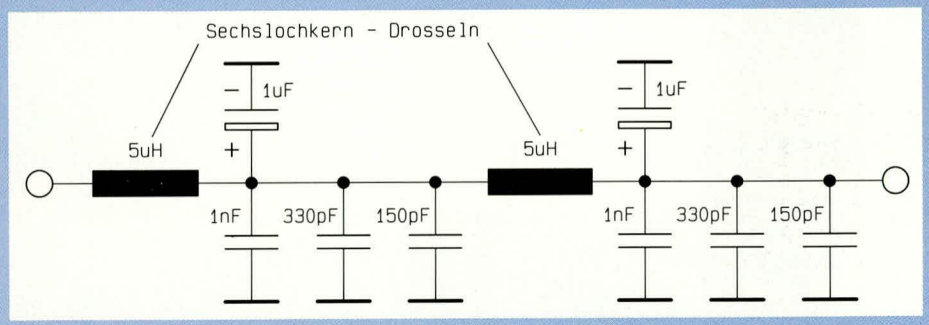

Bild 24: Zweigliedriger Filter

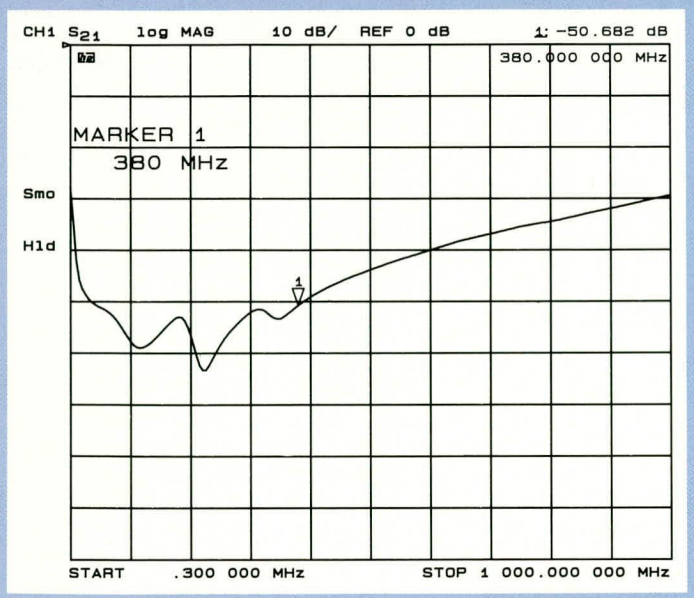

Bild 23: Dämpfungsverlauf eines Filterzweiges (Messung)

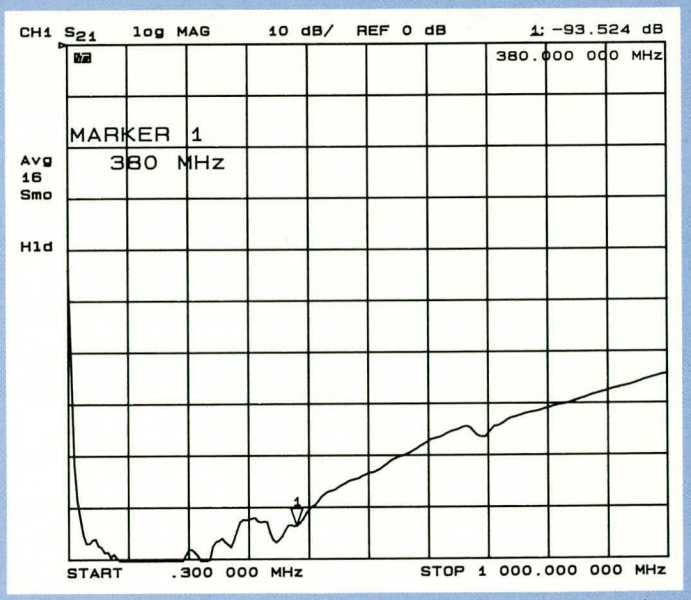

Bild 25: Dämpfungsverlauf zweier Filterzweige (Messung)