

EMV von Leiterplatten und Geräten,

Theorie und Praxis

Inhalt

1. Was bedeutet EMV	4
2. Kopplung.....	6
3. Koaxialkabel	16
4. Stromverteilung in Leitern	22
5. EMV bei Platinen.....	26
6. EMV von Stromversorgungssystemen.....	28
7. HF-Dichtes Gehäuse	34

Nur in den wenigsten Fällen wird sich ein EMV-gerechtes
Design „von selber“ ergeben.
Wir müssen EMV-gerecht konstruieren.

Wir müssen gezielte Maßnahmen zur Beherrschung der EMV
setzen.

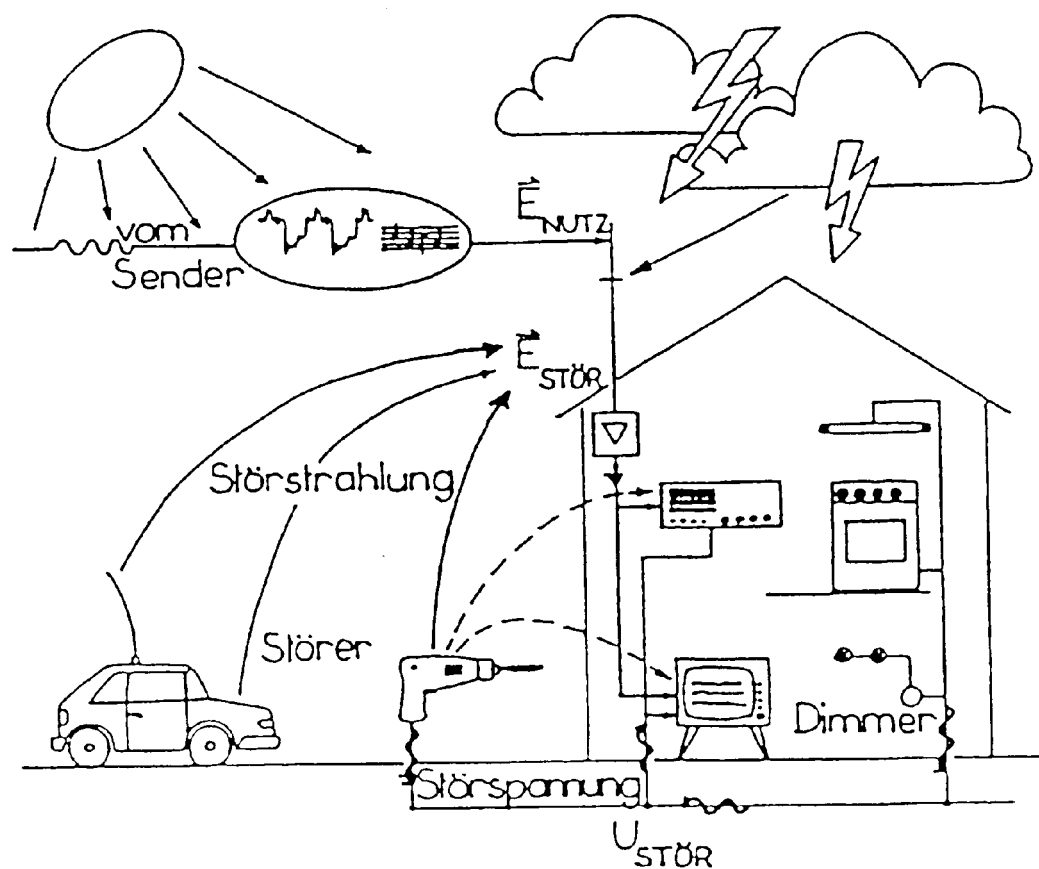
Diese werden zusätzliche Kosten verursachen, die wir
aufbringen müssen.

Wie überall sind wir gefordert, diese Kosten auf Minimum zu
halten.

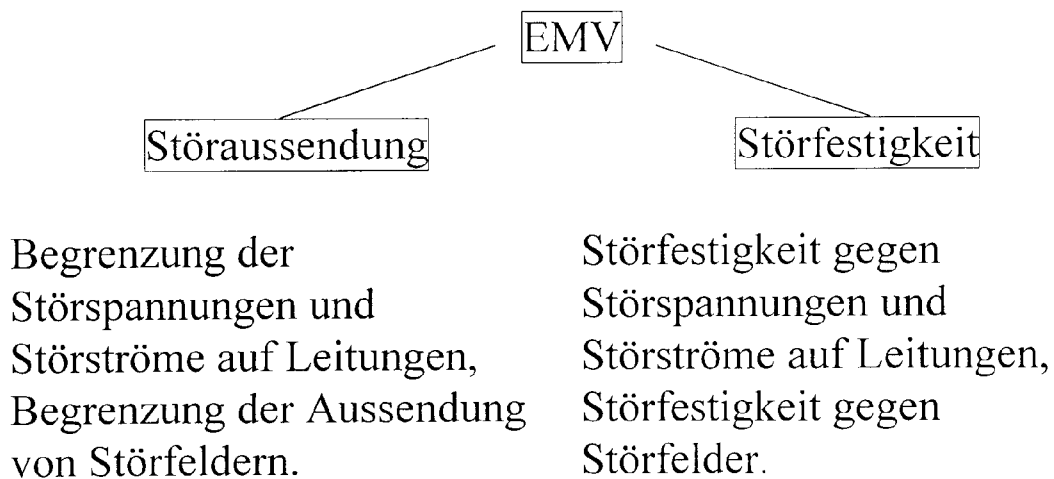
1. Was bedeutet EMV

Definition:

ElektroMagnetische Verträglichkeit ist die Fähigkeit eines elektrischen oder elektronischen Gerätes oder einer Anlage in seiner elektromagnetischen Umgebung bestimmungsgemäß zu funktionieren, ohne dabei andere Geräte und Anlagen zu beeinflussen.



Daraus erkennt man zwei Hauptbetrachtungsrichtungen:



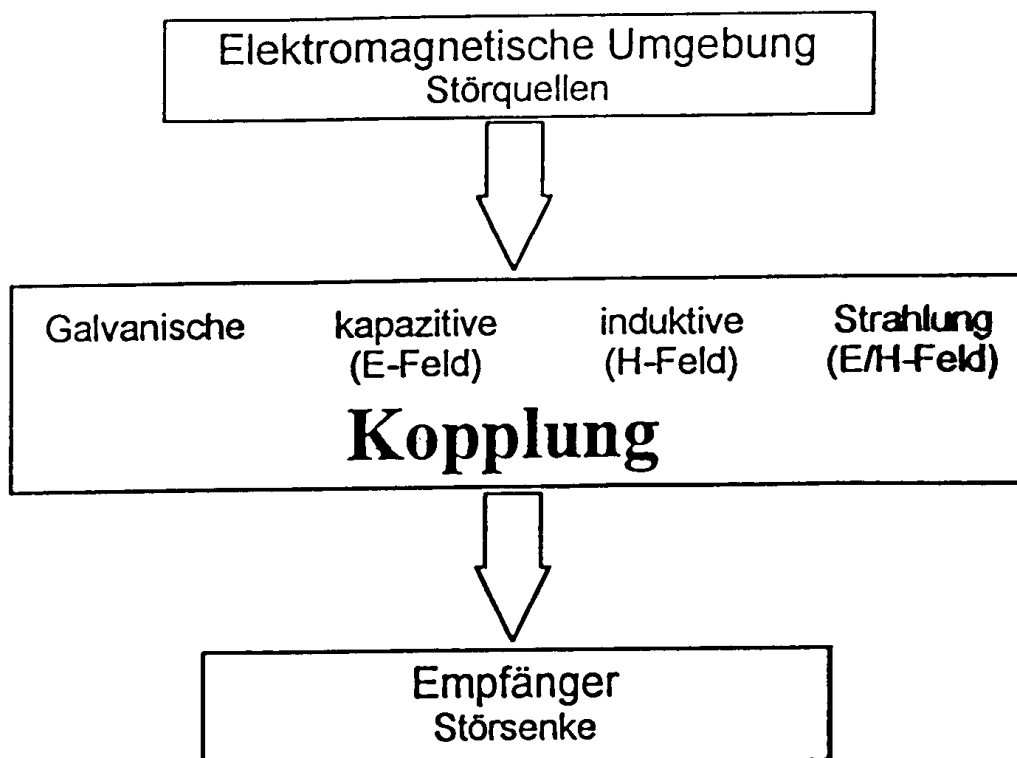
Aus physikalischer Sicht sind Störaussendung und Störfestigkeit gleichwertig. Der Unterschied besteht im Standpunkt, den wir bei der Bewertung der EMV einnehmen.

2. Kopplung

Der einzige Grund, warum es EMV-Probleme gibt, besteht darin, daß alle Wechselstromkreise miteinander verkoppelt sind.

Es ist nur eine Frage des Ausmaßes!

Kopplungsarten



Oft wird versucht, die Störenergie durch Kurzschlüsse unschädlich zu machen.

Dabei ist zu beachten, daß diese meist nur reflektiert wird und die Probleme können anderenorts auftreten.

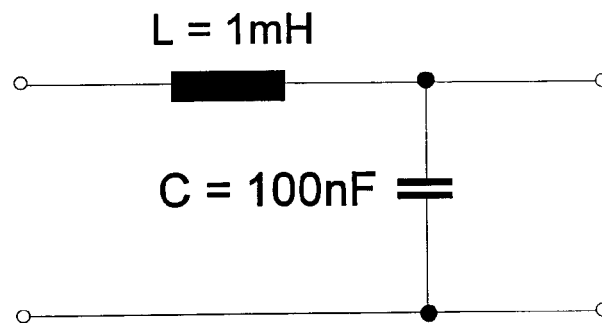
Um die Störenergie wirklich unschädlich zu machen,
muß sie **absorbiert** werden.
(...in Widerständen in Wärme umgesetzt werden.)

Als Absorber können wirken:

- Reelle Widerstände, die bewußt vorgesehen sind, z. B. Abschlußwiderstände,
- Verlustbehaftetes Dielektrikum, z. B. Entstörkondensatoren,
- Verlustbehaftete Ferrite, z. B. Absorberdrosseln,
- Leitungswiderstände, z. B. Tastkopfkabel.

Bauteile zur Bekämpfung der EMV:

Beispiel:



? Dämpfung bei 100MHz.

Theoretisch:

$$Z_L = \omega L = 2 * \pi * 10^8 * 10^{-3} = 628 \text{ k}\Omega$$

$$Z_C = 1/(\omega C) = 1 / (2 * \pi * 10^8 * 10^{-7}) = 15,92\text{m}\Omega$$

Überschlägig, ohne Rücksicht auf die Phasenlage:

$$15,92 * 10^{-3} / 628 * 10^3 = 25,35 * 10^{-9}, \text{ das sind } -151,92\text{db.}$$

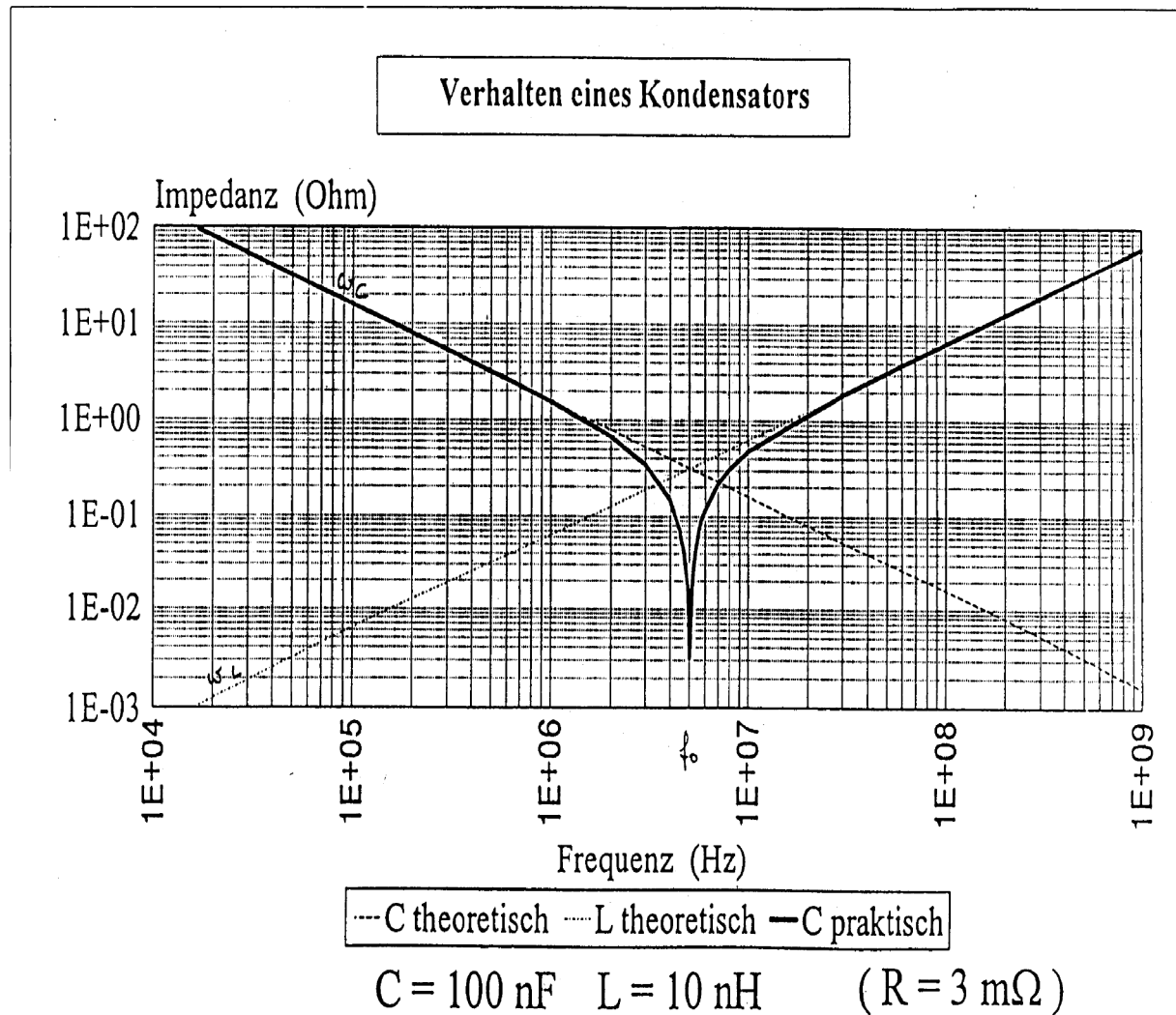
In der Realität:

$$Z_L = 16\Omega$$

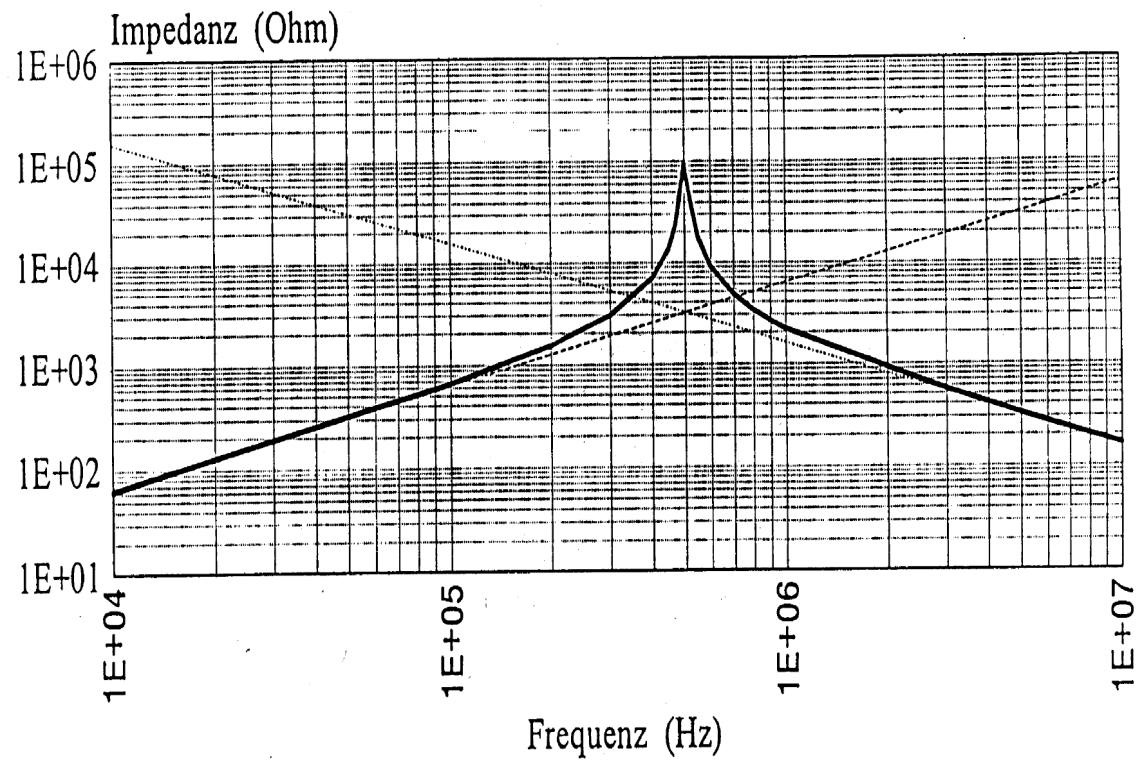
$$Z_C = 6\Omega$$

Überschlägig, ohne Rücksicht auf die Phasenlage:

$$1 / (16+6) * 6 = 0,273, \text{ das sind } -11,3\text{db.}$$



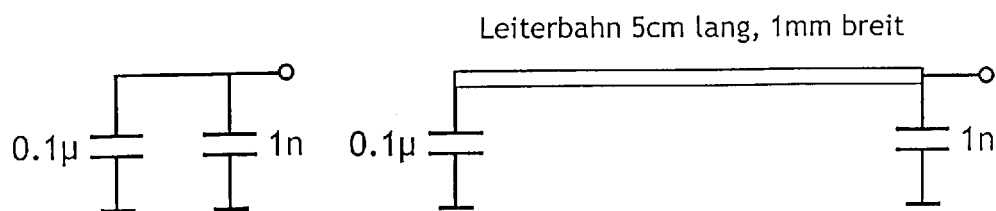
Verhalten einer Drossel



--- L theoretisch --- C theoretisch — L praktisch

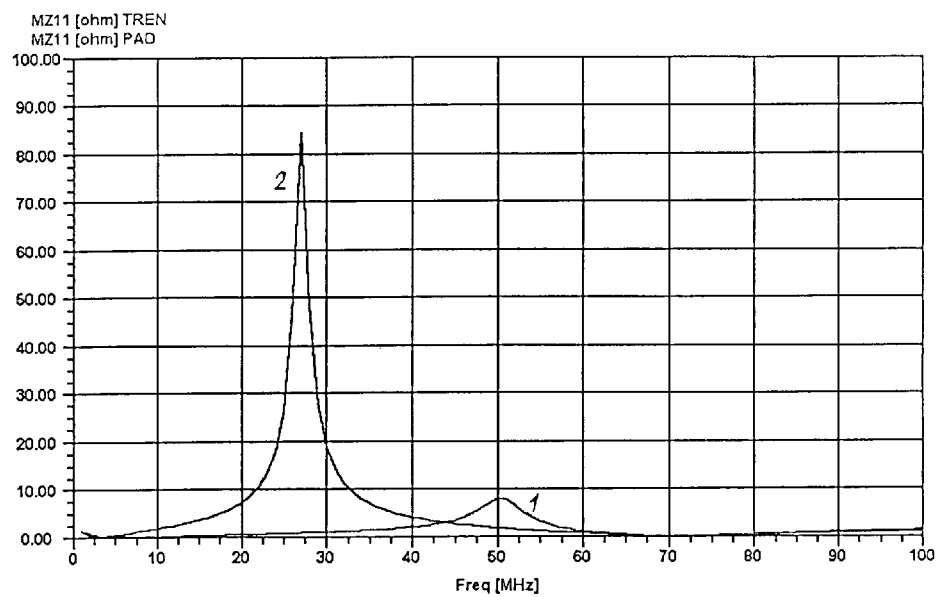
$L = 1 \text{ mH}$ $C = 100 \text{ pF}$ ($R_s = 100 \Omega$)

Verschiedene Placierungen von Abblock-Kondensatoren



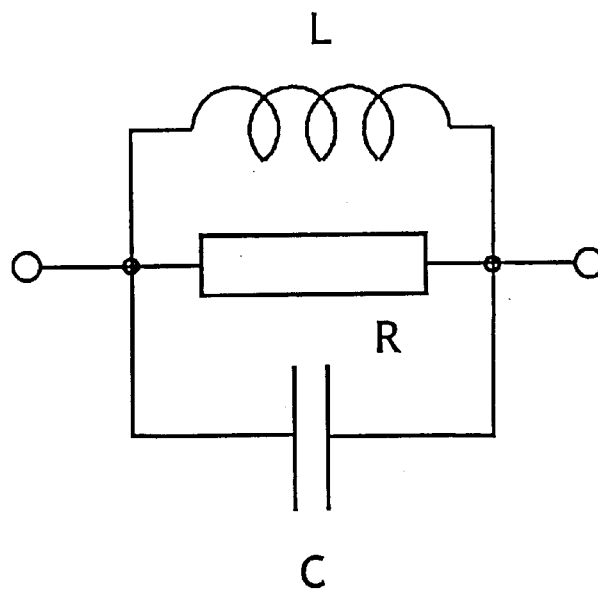
Im linken Fall sind die Kondensatoren unmittelbar nebeneinander placiert. Im rechten Fall sind sie durch eine 5 cm lange und 1 mm breite Leiterbahn, die 1,5 mm Substratdicke über der Massefläche führt, getrennt.

Verschiedene Placierungen von Abblock-Kondensatoren



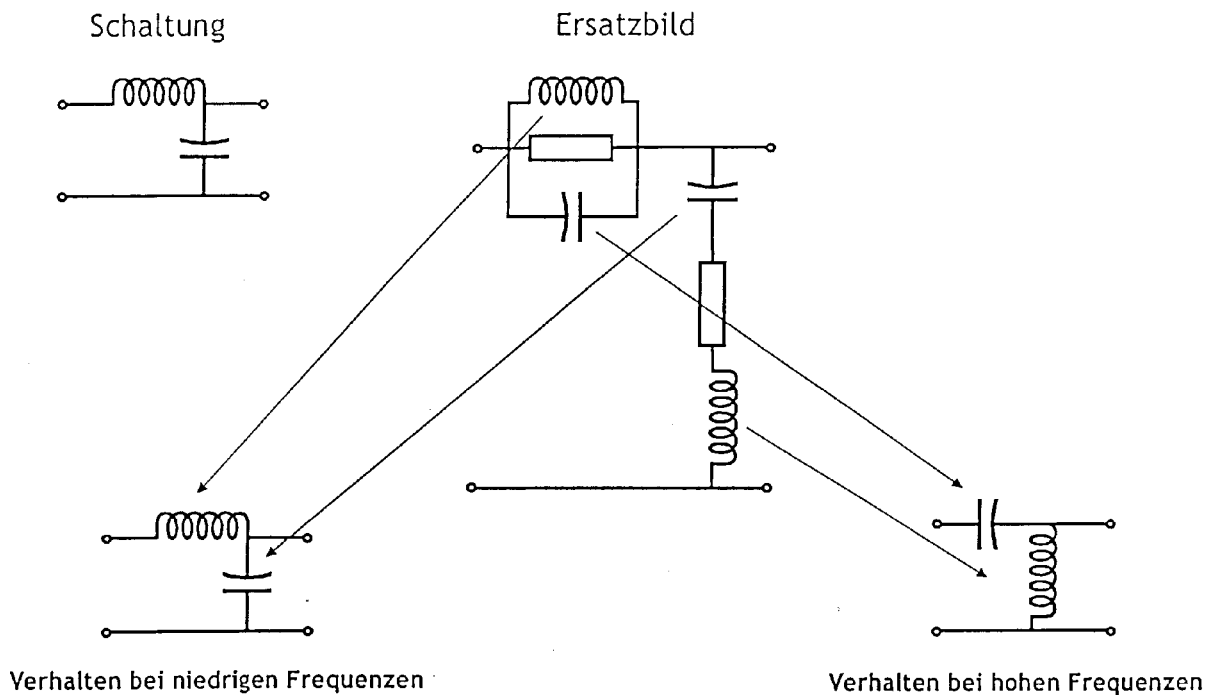
Die Kurve Nr.1 zeigt den Impedanzverlauf von 100nF//1nF, die unmittelbar nebeneinander placiert sind. Die Kurve Nr.2 zeigt den Verlauf für die Kondensatoren, die durch die Leiterbahn getrennt sind.

Ersatzschaltbild einer Spule



Das Spulenersatzschaltbild stellt die Komponenten einer Spule als konzentrierte Bauelemente dar. Das Modell ist nicht nur deshalb problematisch, sondern bei allen Ferritspulen ist außer R auch noch L frequenzabhängig.

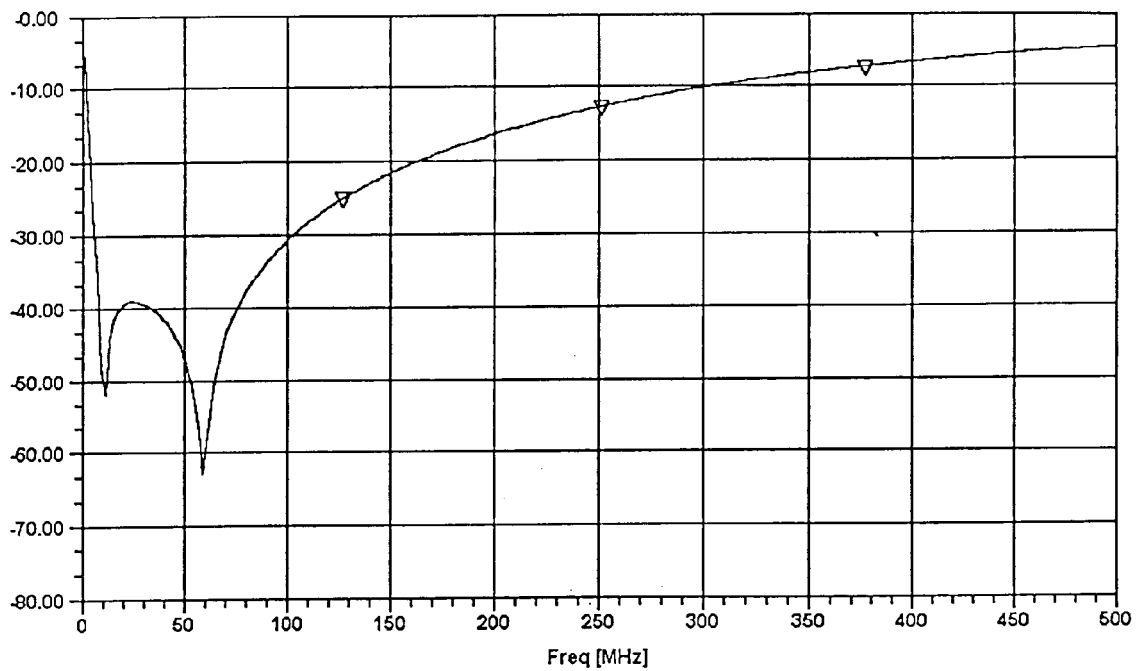
Frequenzabhängigkeit des realen Tiefpasses



Bei Frequenzen unterhalb der Bauelementeresonanzen ist die Spule induktiv und der Kondensator kapazitiv. Oberhalb der Resonanzen ist es umgekehrt. Mit der Überschreitung der Bauelementeresonanzen ändert die Schaltung ihren Charakter total.

Frequenzabhängigkeit des realen Tiefpasses

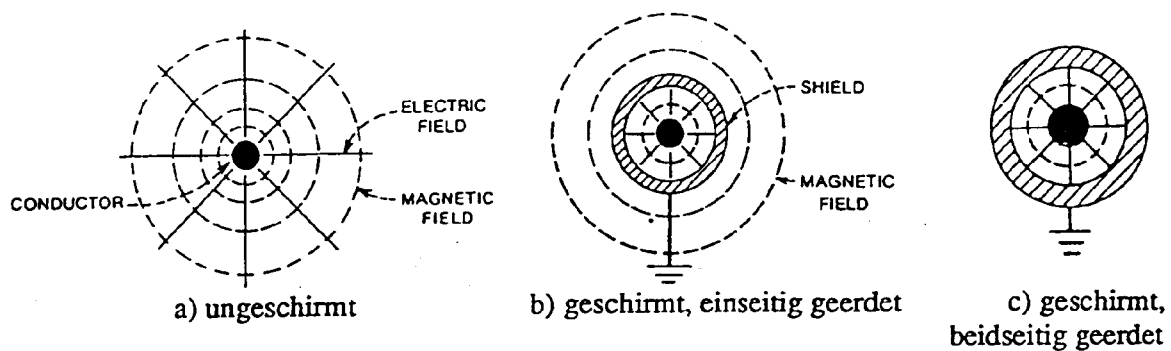
▽ MS21 [dB] TIEFP



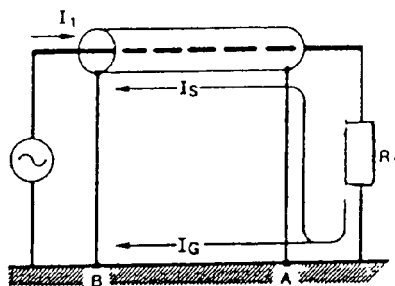
Das Verhalten des realen Tiefpasses ist das einer Bandsperre. Dies hat seine Ursache in den Bauteilresonanzen. Allerdings werden gerade im Bereich der Resonanzen besonders hohe Dämpfungen erreicht. Das kann man in der Praxis nutzen.

3. Koaxialkabel

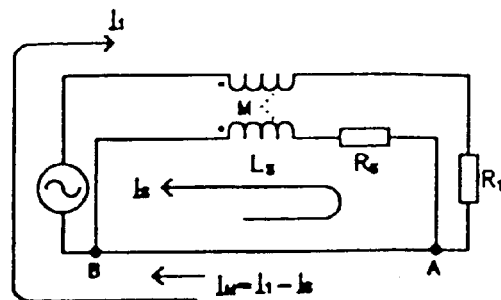
Wirkung gegen Emission magnetischer Felder:



Das Bild zeigt die elektrischen und magnetischen Feldlinien eines geschirmten und eines ungeschirmten Einzelleiters im freien Raum. Bei einem beidseitig nicht aufgelegtem Schirm würde das Feldbild genau wie in Bild a) aussehen. Legt man den Schirm an einem Ende an Masse, so enden die elektrischen Feldlinien auf dem Schirm. Die magnetischen Feldlinien bleiben weitgehend unverändert. Bei beidseitig aufgelegtem Schirm erhält man (oberhalb der **Grenzfrequenz** des Koaxialkabels) das Feldbild c).



Schematische Darstellung



Ersatzschaltbild

Diese Frequenzabhängigkeit kann man aus dem Ersatzschaltbild herleiten. Um ein Austreten magnetischer Feldlinien aus dem Koaxialkabel zu verhindern, muß der Strom im Kabelmantel gleich groß, jedoch entgegengesetzt orientiert sein wie der Strom im Mittelleiter. Daher darf kein Strom über die Masse von A nach B zurückfließen. Die Maschengleichung für die Masseschleife über den Kabelmantel lautet:

$$I_S (j\omega L_s + R_s) - I_1 j\omega M = 0$$

wobei

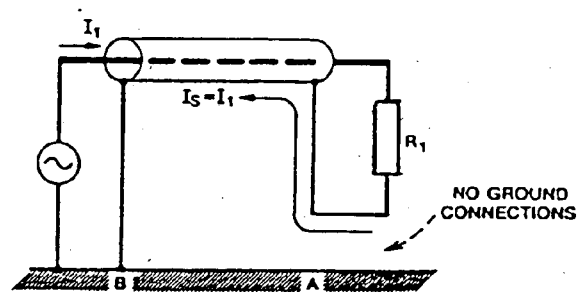
M....Gegeninduktivität zwischen Schirm und Innenleiter des Koaxialkabels.

Mit $M = L_s$ erhält man für den Strom am Schirm

$$I_S = I_1 j\omega / (j\omega + R_s / L_s) = I_1 j\omega / (j\omega + \omega_{GM})$$

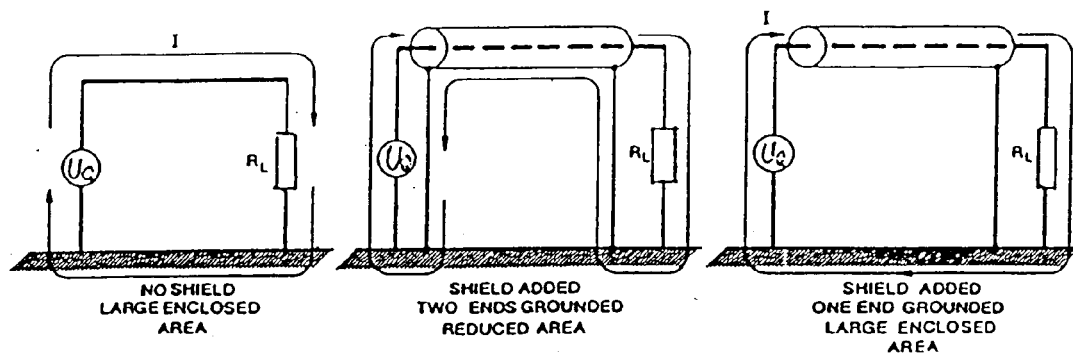
Für Frequenzen weit oberhalb der Grenzfrequenz ω_{GM} wird wegen der Gegeninduktivität zwischen Schirm und Mittelleiter $I_S = I_1$. Unterhalb von etwa $5\omega_{GM}$ verschlechtert sich die Schirmwirkung für das Magnetfeld, weil ein Teil des Stromes über Masse zurückfließt.

Um bei **sehr niedrigen Frequenzen** die Emission magnetischer Felder zu vermindern, kann man die Masseverbindung an einem Ende der Leitung auftrennen. Dies erzwingt, daß der gesamte Strom durch den Schirm zurückfließt.

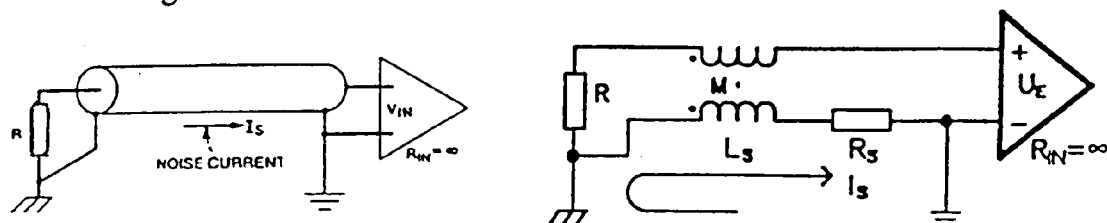


Wirkung gegen magnetische Einstreuung

Die beste Schutzmaßnahme gegen magnetische Einstreuung in eine geschirmte Leitung ist die Verringerung der wirksamen Schleifenfläche.



Schleifenfläche bei unsymmetrischer Signalübertragung über eine geschirmte Leitung



Schematische Darstellung

Ersatzschaltbild

Die magnetische Einstreuung läßt sich jedoch nicht auf null reduzieren. In der Masseschleife aus Schirm und Masse wird ein Störstrom I_S induziert. Dieser erzeugt einen Spannungsabfall am Widerstand des Kabelmantels. Weiters wird über die Gegeninduktivität zum Mittelleiter in diesem eine Spannung induziert.

Am Eingang des Verstärkers liegen somit die folgenden Störspannungen:

$$U_E = -j\omega M I_S + j\omega L_S I_S + R_S I_S$$

Da $L_S = M$ wird $U_E = R_S I_S$

Immer, wenn im Kabelschirm Strom fließt, entsteht infolge Spannungsabfall am Widerstand des Schirmes eine Störspannung an der Last.

Sogar bei nur einseitig aufgelegtem Schirm können infolge kapazitiver Kopplung Ströme am Schirm fließen.

Höchstmögliche Störsicherheit erhält man daher bei niedrigen Frequenzen nur dann, wenn

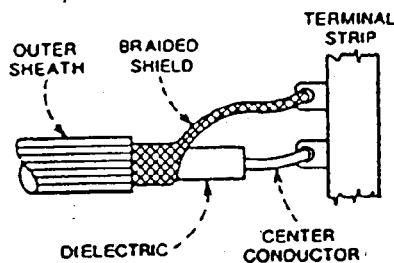
- der Schirm nicht Teil des Signalstromes ist,
- ein Ende des Stromkreises potentialfrei (ohne Masseverbindung) arbeitet.

Wirkung gegen Einstrahlung bei hohen Frequenzen:

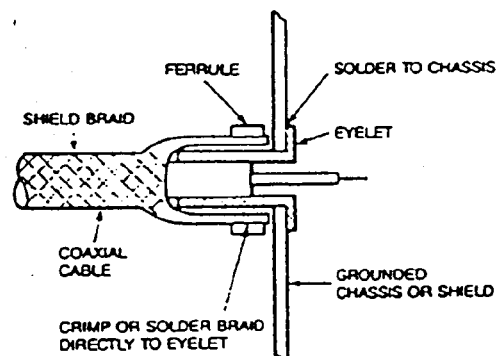
Bei hohen Frequenzen besteht ein Koaxialkabel praktisch aus drei voneinander isolierten Leitern:

- Mittelleiter
- Innenfläche des Schirmes
- Außenfläche des Schirmes.

Innen- und Außenfläche sind durch den Skineffekt separiert. Der, im vorigen Kapitel diskutierte Einkoppelmechanismus für Störspannungen tritt daher bei hohen Frequenzen nicht auf. Signalstrom und Strom im Außenleiter fließen über keinen gemeinsamen Widerstand.



falsch ("Pigtail")

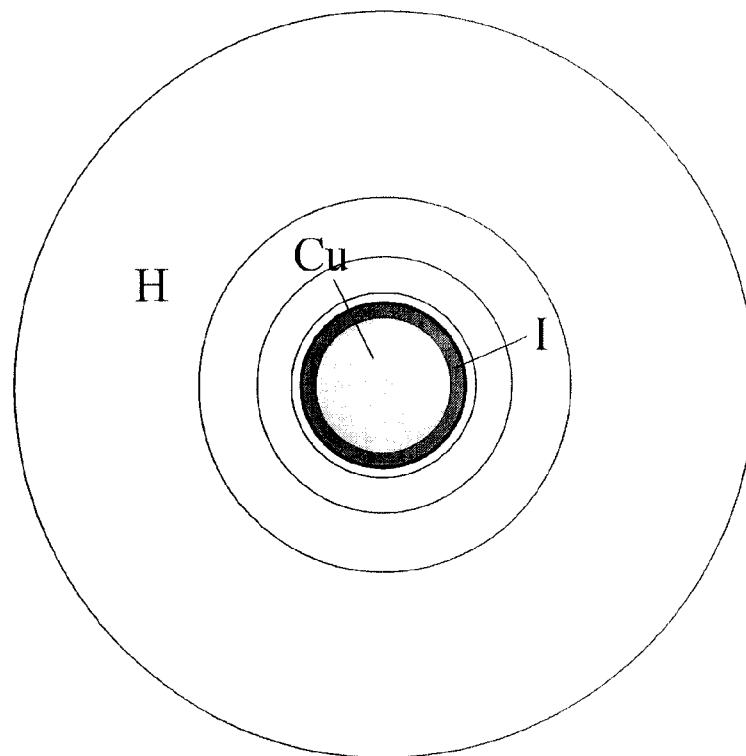


richtig

Grundsätzlich sollte man davon ausgehen, daß der Schirm eines Koaxialkabels immer beidseitig aufgelegt werden muß. Nur in speziellen, berechtigten Fällen, sollte man davon abweichen.

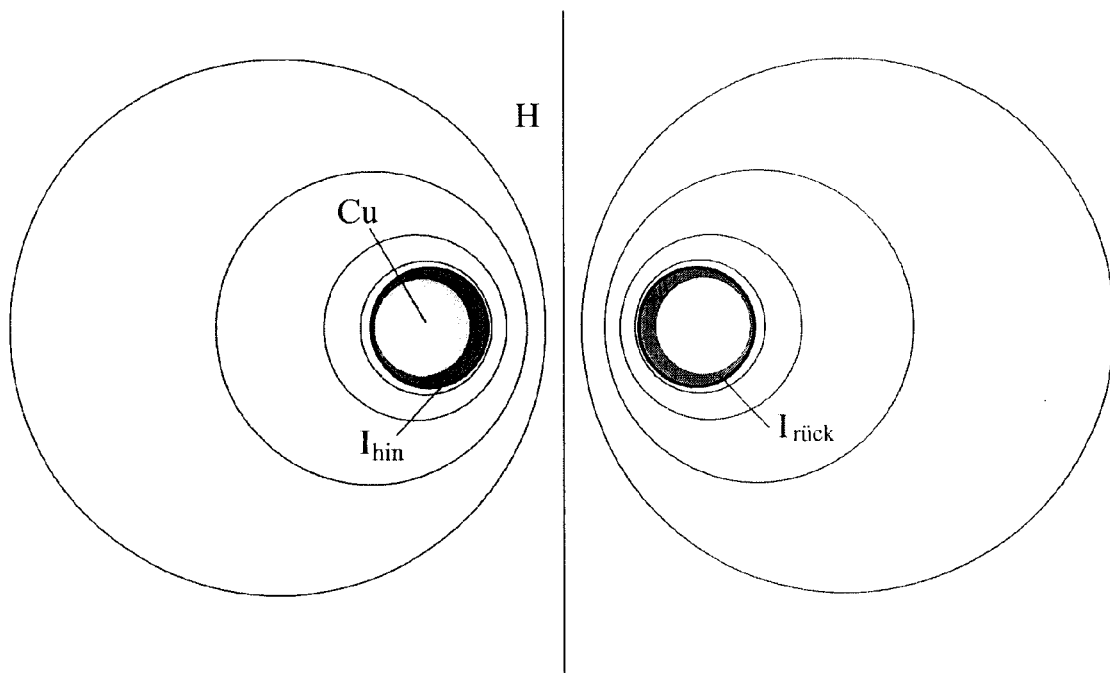
4. Stromverteilung in Leitern

Stromverteilung in runden Leitern



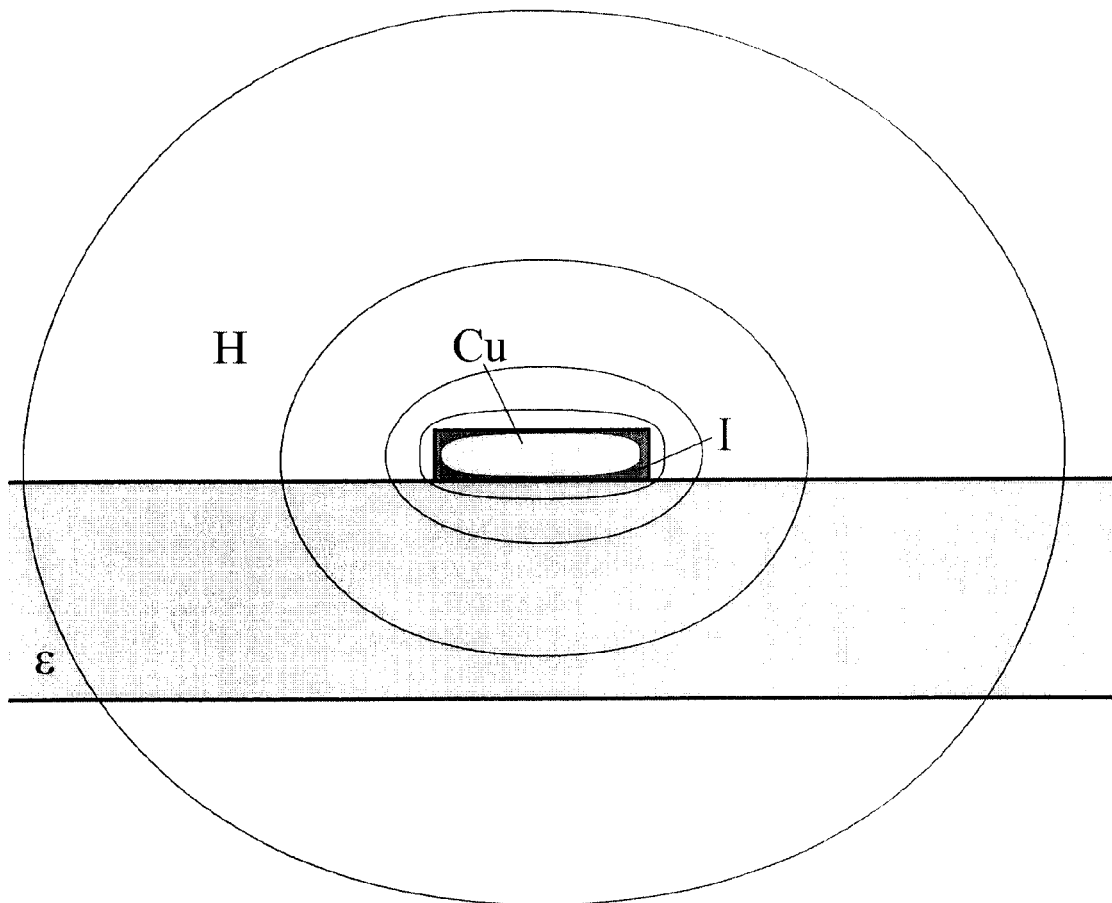
Der Strom wird infolge des Skineffektes an die Außenhaut gedrängt.

Stromverteilung in Zwillingsleitungen



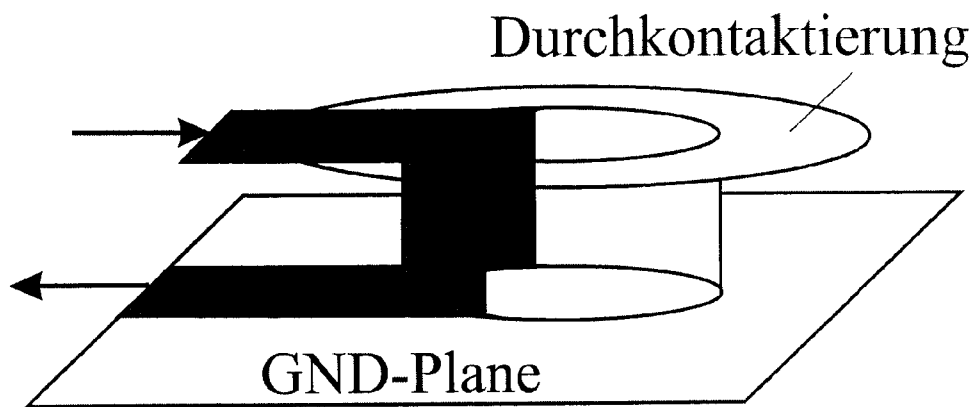
Der Strom wird in Richtung höchste Feldstärke gedrängt. Er fließt vorwiegend an der, dem Rückleiter zugewandten Seite.

Stromverteilung in Flachleitungen



Der Strom wird aufgrund des Skineffektes an die Stirnseiten und in den Bereich der Ecken gedrängt. (Gebiete größter H - Feldstärke.)

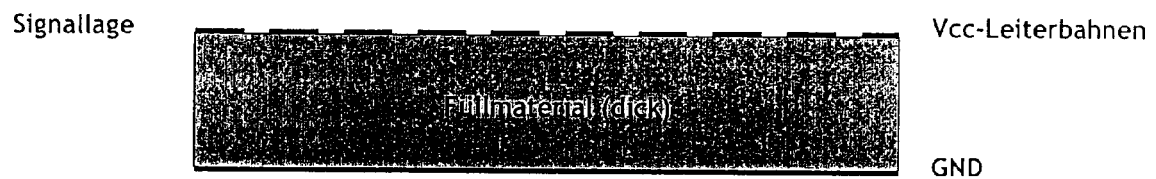
Stromverteilung an der Durchkontaktierung



Der Strom fließt an der Leiterbahnunterseite. Von hier aus läuft er über die vordere Unterkante des Lötauges auf die Vorderseite der Durchkontaktierung. Die Rückseite der Durchkontaktierung ist praktisch stromlos.

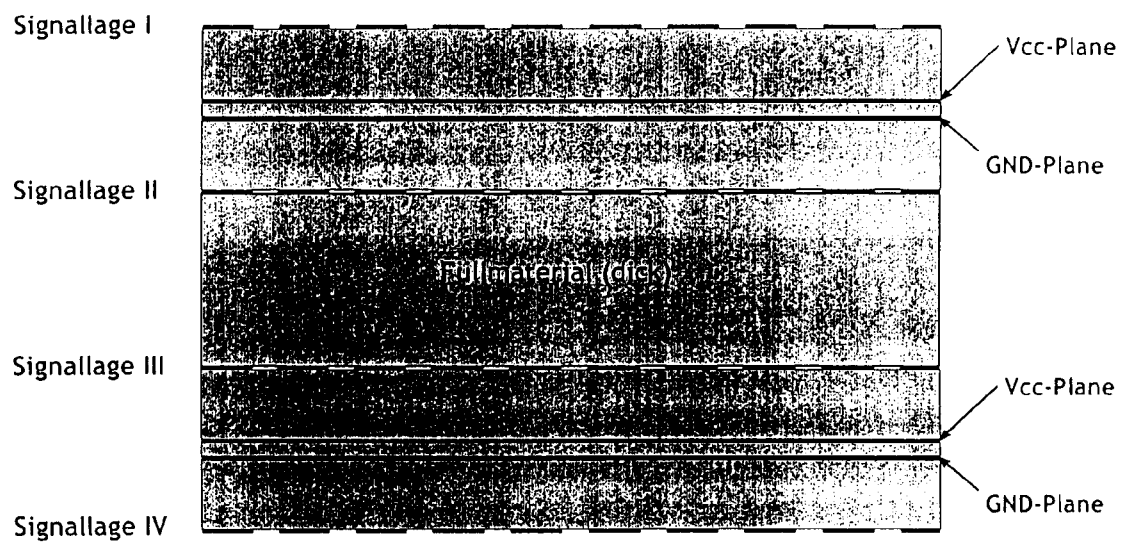
5. EMV bei Platinen

2 - Lagen'- Platine



Die Platine ist in bezug auf die richtige Führung der EM-Energie korrekt ausgelegt. Eine breitbandige Entkopplung des Versorgungssystems ist nicht möglich.
Man wird selten mit nur zwei Lagen auskommen.

8 – Lagen - Multilayer



Dieser Aufbau setzt sich aus zwei getrennten 4-Lagen-Systemen zusammen. Wegen der Gesamtdicke der Platte werden schon Kompromisse beim gewünschten Abstand der Signallage von den Flächen nötig.

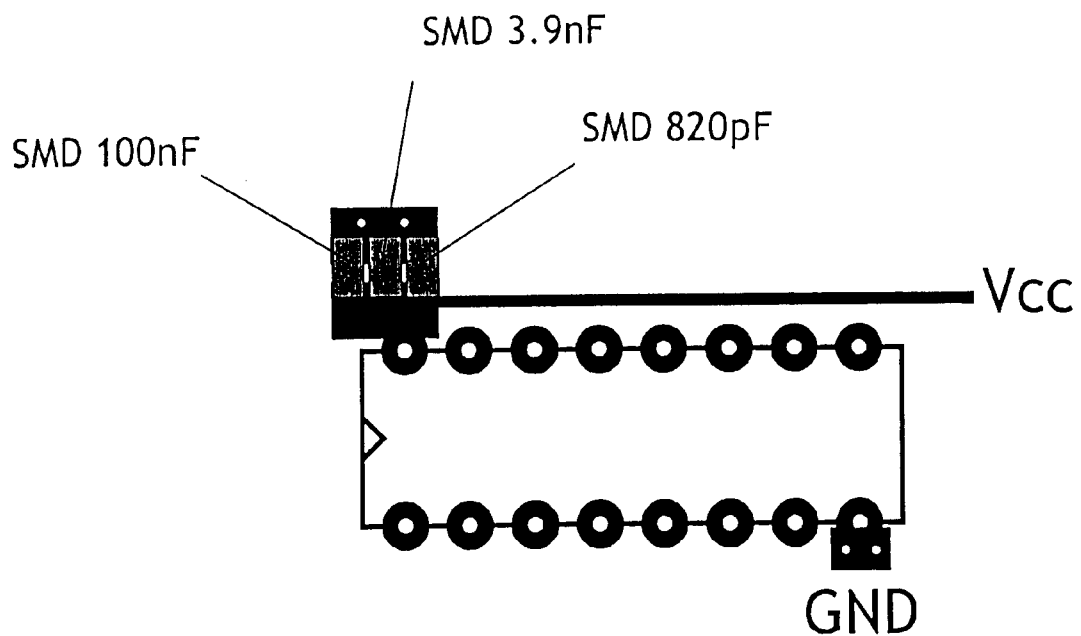
6. EMV von Stromversorgungssystemen

Die 4 Aufgaben der Abblockung der Stromversorgung:

- Welligkeit auf der Versorgungsspannung des einzelnen Bausteins mindern. (Minimale Spannung sicherstellen)
- Störpegel, den ein IC erzeugt, von anderen fernhalten. (Unterbrechung des Störpfades „Versorgungsspannungsleitung“)
- Abstrahlung aus dem Versorgungssystem mindern.
- Vcc-Fläche zur brauchbaren Signalmasse machen.

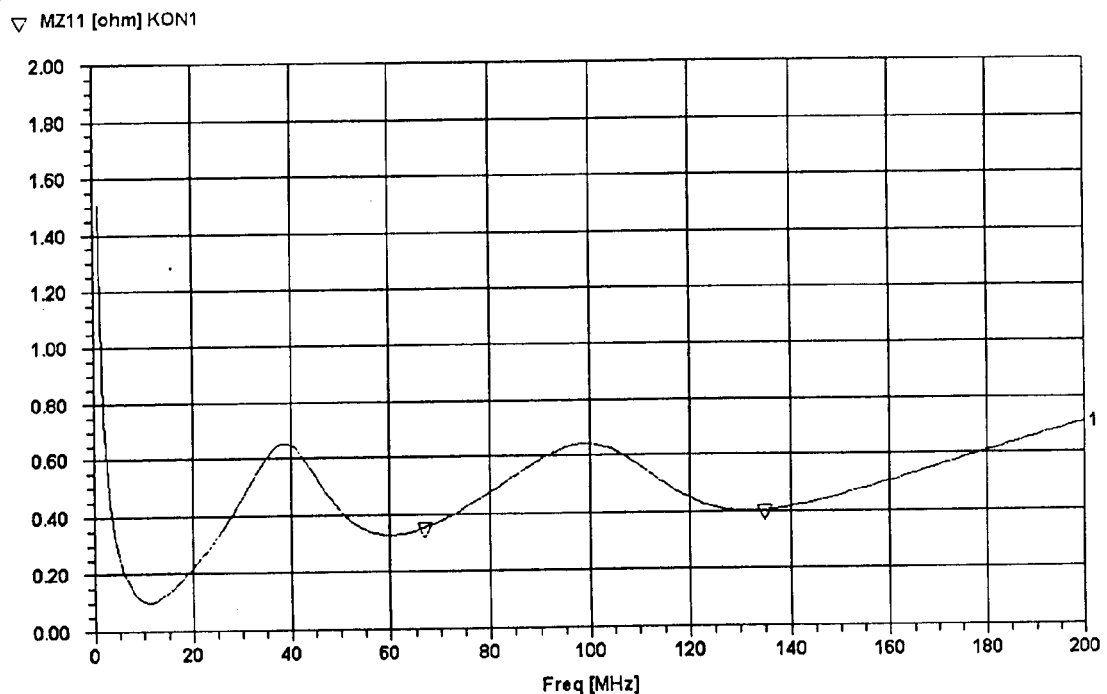
Es wird leicht übersehen, daß die Abblockung des Versorgungssystems nicht nur die Betriebsspannung stützen soll.

Breitbandentkopplung mit Kondensatorgruppe



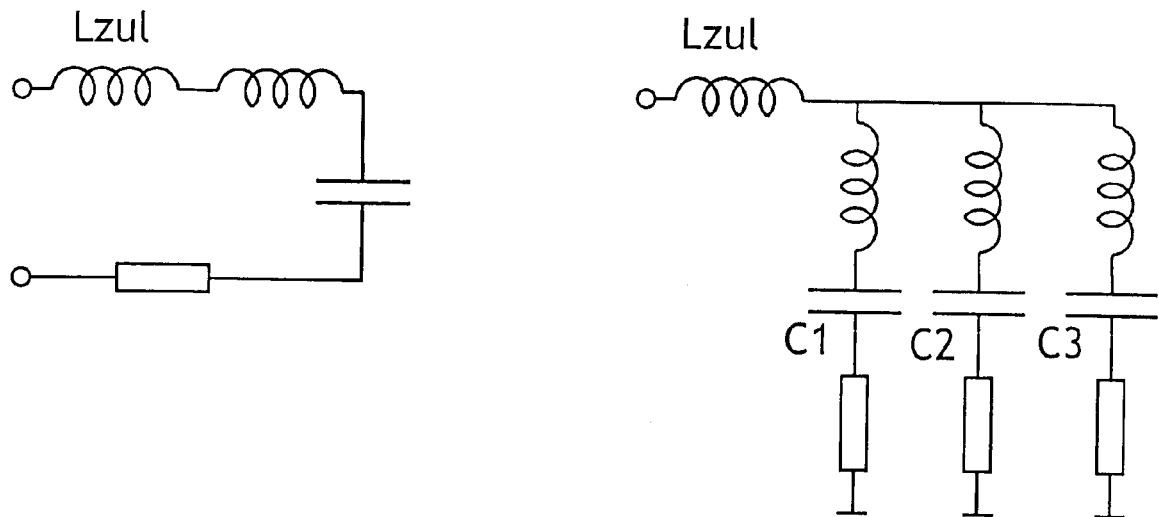
Die 3 Kondensatoren sind hinsichtlich ihrer Kapazitätswerte so ausgesucht, daß sie eine Gruppe bilden, deren Parallelresonanzen nicht mehr störend sind. Sie liegen alle unter 1 Ohm. (Material: X7R)

Impedanzverlauf der Breitband – Entkopplung (Simulation)



Die Kondensatorgruppe bleibt mit ihrer Impedanz bis 200MHz innerhalb von 0,8 Ohm. Allerdings verbietet der wachsende Aufwand die Verwendung dieses Verfahrens für größere Bandbreiten.

Problematik der Kondensatoranbindung



- Beide Konstruktionen leiden unter dem Problem der induktiven Zuleitung. Sie müsste kleiner als 1nH sein, um bis 1000MHz wirksame Entkopplungen zu erreichen.

Insbesondere Kondensatorgruppen müssten wegen ihres hohen Aufwandes für möglichst viele Baugruppen wirksam sein. Dies ginge aber nur bei einer extrem geringen Impedanz der Anbindung.

Leiterbahnen als Leitungen

Elektrische Länge von Leiterbahnen:

- Eine 4 cm lange Leiterbahn hat bei 375MHz bereits eine elektrische Länge von 1/10 der Wellenlänge.
- Bei 1000MHz ist diese Leiterbahn schon länger als $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge.

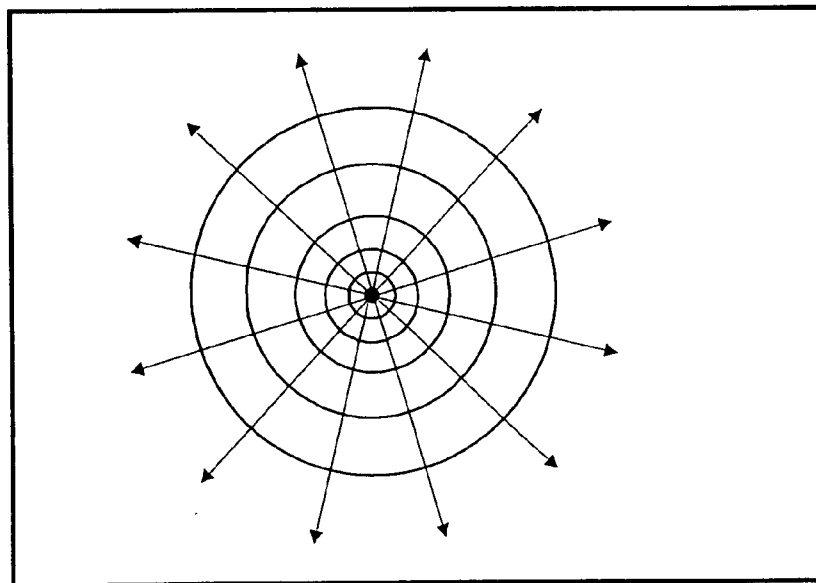
Bei den breitbandigen Störspektren, die von heutigen, digitalen integrierten Schaltungen ausgehen, können selbst kurze Leiterbahnen nicht mehr als reine Induktivitäten angesehen werden.

Absorption

Wellenausbreitung im Vcc/GND System

Absorptives Flächensystem

- Was an der Kante nicht ankommt, wird dort nicht abgestrahlt.
- Absorption verhindert die Entstehung von Resonatoren im Flächensystem.

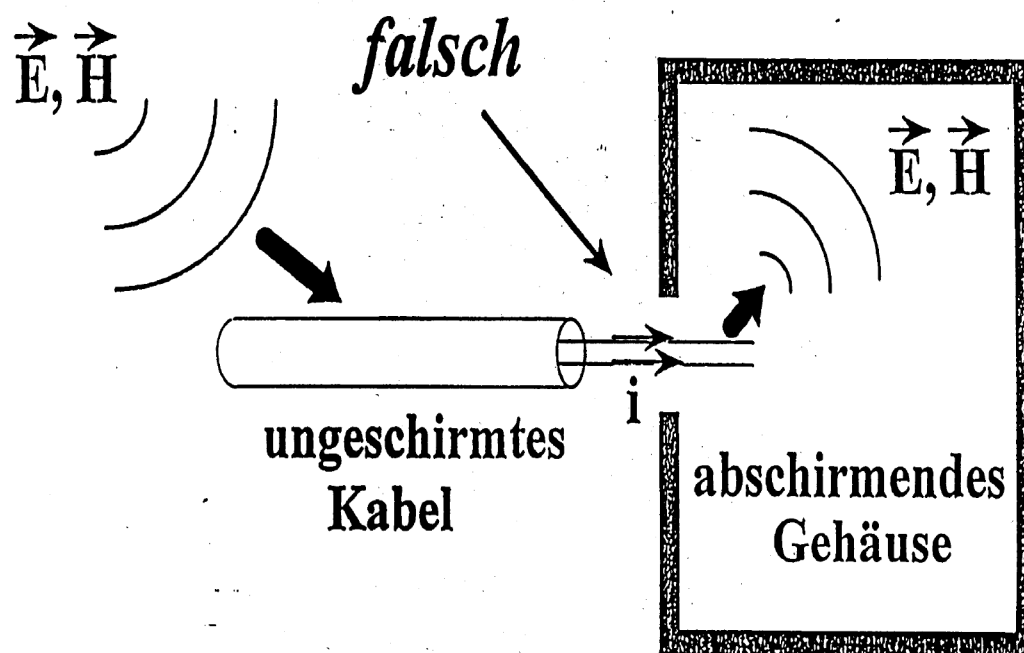


Punktförmige Absorption gelingt nur bei Ausbreitung entlang dünner Leitungen. Flächige und räumliche Absorption ist komplizierter. Zur Zeit sind nur wenig brauchbare Konzepte verfügbar.

7. HF-Dichtes Gehäuse

- Gehäuseteile bestehen aus gut leitenden Materialien. (Alu, Messing...)
- Gehäuseteile besitzen gut leitende Oberflächen. (Frontplatten!) z. B. zinkchromatiert.
- Die Gehäuseteile sind mit Kontaktfedern, Kontaktstreifen oder mit mehreren Schrauben miteinander verbunden um großflächige Kontaktstellen zu erhalten um so Schlitzantennen zu verhindern.
- Das Gehäuse ist allseits geschlossen, Durchbrüche und Durchführungen sind auf das notwendige Mindestmaß beschränkt, um Aperturstrahlung zu verhindern.

**Fehlerhafte Einführung eines Kabels in einen
Faraday-Käfig oder ein Gerätegehäuse**



Richtige Einführung eines Kabels in einen Faraday-Käfig oder ein Gerätegehäuse

