

Labor I zur EMV

**Schirmung
(Block II)**

Fakultät IV
ELEKTROTECHNIK
UND INFORMATIK

Institut für Energie- und
Automatisierungstechnik

Fachgebiet
Hochspannungstechnik

Überblick

Dieser Block befasst sich mit Schirmung elektrischer und magnetischer Felder. Die Darstellung wird sich auf lineare Vorgänge beziehen. Dies erlaubt eine Betrachtung im Frequenzbereich. Nach dem Kennenlernen der Messgeräte und Sonden (Teil 0) sollen im Teil A die direkte Schirmung elektrischer und magnetischer Felder betrachtet werden. Thema des Teils B ist die Schirmwirkung koaxialer Leitungen.

Es sollen **drei kurze Referate** gehalten werden:

- Teil 0: Spektrum-Analysator und seine Simulation
- Teil A: Schirmung elektrischer und magnetischer Felder
- Teil B: Schirmwirkung von Koaxkabeln.

Die Referate sollen auch die Ergebnisse der Vorbereitungsaufgaben wiedergeben.

Für die Vorbereitung erarbeiten Sie sich bitte auch die Anleitung für den Spektrum-Analyser.

Problemstellung

Ziel jeder Schirmung ist das Verhindern ungewollter Einkopplungen oder Abstrahlungen. Als Schirme dienen z.B. Gehäuse, Kabelschirme, geschlossene Metallwände o.ä. Für die Beurteilung notwendiger Schirme ist die zumindest ungefähre Kenntnis der Störquellen erforderlich. Im Nahfeld muß zwischen dem magnetischen und dem elektrischen Feld unterschieden werden. Ein für das elektrische Feld voll wirksamer Schirm kann für das magnetische Feld durchaus völlig durchsichtig sein.

Eine Auswahl von Störquellen ist in der nachstehenden Tabelle wiedergegeben.

Quelle	Frequenz	E_{\max} od. H_{\max}	Abstand zur Quelle
CB-Funk	27 MHz	bis 0.2 A/m	in 5 cm
Kurzwellen	3 - 30 MHz	120 V/m	in 50 m
Mittelwellen	500 - 1500 kHz	500 V/m	in 50 m
induktives Löten	300 - 600 kHz	1000 V/m	wenige cm
Dielektr. Erwärmung	27.12 MHz	bis 1 A/m	
Elektrisches Feld unter einer 400 kV Freileitung	50 Hz	5 kV/m	am Boden
Magnetfeld im Haushalt	50 Hz	1 μ T	mehr als 10 cm
Magnetfeld unter einer 400 kV Freileitung	50 Hz	30 μ T	am Boden
Schließen eines Trenners in einer SF-6 Anlage	Impuls	14 kV/m	5m
Blitzschlag	Impuls	10 kV/m	100 m
Elektrostatische Entladung	Impuls	10 kV/m	10 cm

Tabelle 1: Ungefähre Feldstärkewerte verschiedener Störquellen

Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß die impulshaften Störer weit größere Feldstärken erreichen. Die meisten impulshaften Störer werden durch Hochspannungsentladungen verursacht. Während harmonische Signale (z.B. ein Funktelefon) nur in Ausnahmen einen PC stören kann, so ist dies bei z.B. Elektrostatische Entladungen oft der Fall.

Teil 0: Messgeräte und Sonden

Spektrum-Analyser

Signal in dBm

Beim Spektrum-Analyser ist die Ausgangsspannung nicht in Volt einzustellen. Hier wird eine bezogene Ausgangsleistung in dBm angegeben. Dabei entspricht 0dBm 1mW an 50Ω Last (bei ebenfalls 50Ω Innenwiderstand der Quelle!). Des weiteren entsprechen 10dBm 10mW, sowie -10dBm 0,1mW.

Grundfunktionen

Die Grundfunktionen sind in dem Beiblatt "Der Spektrum-Analyser" erklärt.

Mathematische Funktionen

Der Spektrum-Analyser kann mit einer Form von BASIC programmiert werden, so daß sich die gemessenen Werte durch vorgegebene mathematische Funktionen beliebig darstellen lassen. Da in den vorgesehenen Versuchen nur Kanal A benötigt wird, ist es sinnvoll, das Ergebnis der Berechnungen auf Kanal B auszugeben.

Datensicherung

Der Gesamtstatus, sowie einzelne Programme können auf einer 3 1/2 " Diskette gespeichert werden.

TEM-Zelle

Zur Erzeugung von relativ homogenen Feldern wird eine TEM-Zelle eingesetzt. Die E-Feld-Linien verlaufen senkrecht von der Zellenwand zur geerdeten Metallplatte, die H-Feld-Linien dazu senkrecht (Rechtsschraubensystem E-Feld, H-Feld, Ausbreitungsrichtung).

Prinzip

Spannung und Strom des Generators breiten sich bei geeignetem Abschluß als E- und H-Feld-Welle aus. Die Wellen werden im Dielektrikum eines Koax-Kabels zur TEM-Zelle geführt. In der Zelle muß nun das radiale E-Feld in ein paralleles Umgewandelt werden. Der Mittelleiter wird dabei abgeflacht und als Bandleiter weitergeführt, der Mantel wird mit einer leitenden Bodenplatte verbunden. Leiter und Mantel können nun so weit voneinander entfernt werden, daß Testobjekte in die Zelle eingebracht werden können.

Um während der Aufweitung keine Veränderung des Wellenwiderstandes zu vollziehen, muß das Verhältnis L'/C' konstant gehalten werden, hier durch die konstruktive Ausführung als Stripline erzielt.

Selbstintegrierende Sensoren

E- und H-Feld können mit Feldsensoren gemessen werden. Die Sensoren geben dabei eine Spannung aus, die in Relation zum Feld steht. In diesem Labor sollen selbstintegrierende Feldsensoren eingesetzt werden.

Prinzip E-Feld-Sensor

Der E-Feld-Sensor besteht aus einer Antenne (Drahtstück) und einem Lastwiderstand. Zwischen Antenne und Bodenplatte (Masse) entsteht eine parasitäre Kapazität.

Der Sensor kann also mit folgenden Elementen modelliert werden:

- Stromquelle
- Kapazität
- Lastwiderstand

Das System stellt einen Tiefpass dar, die Sonde integriert oberhalb ihrer Grenzfrequenz.

In die Sonde wird durch das Feld ein Strom eingepreßt, der zur Ableitung des Feldes proportional ist. Zusammen mit der integrierenden Sonde entsteht also ein Frequenzbereich, in der die Sonden­spannung proportional zum Feld ist (HP und TP kompensieren sich).

Zur Nutzung bei hohen Frequenzen muss der Sensor an die Leitung angepasst werden.

Prinzip H-Feld-Sensor

Die Sonde besteht aus einer Schleife, welche vom magnetischen Feld durchflutet wird. Das elektrische Feld wird dabei durch einen Schirm abgehalten, welcher geerdet und einmal quer geschlitzt ist. Ein Widerstand vervollständigt den Sensor zum Tiefpass, ab hier funktioniert die Sonde analog zum E-Feld-Sensor.

Vorbereitungs-Aufgaben Teil 0:

Die mit (*) gekennzeichneten Aufgaben sind zu Hause zu lösen, alle anderen sind vorzubereiten.

Das Prinzip des E-Feld-Sensors ist als Referat vorzutragen (Stichpunkte: Maxwell, Raumladungsdichte, Grenzfrequenz, Kalibrationsfaktor, Anpassung, ...).

Simulation mit PSpice

(*) Leiten Sie eine Formel für die Umrechnung von dBm in Volt her.

(*) Simulieren Sie den Generator-Teil des Spektrum-Analysers für eine feste Frequenz. Benutzen Sie dabei die mathematische Datenbank von PSpice (EXP-Funktion, Multiplikation, ..).

Nach Eingabe der Ausgangsleistung in dBm soll am Lastwiderstand die erwartete Spannung abfallen.

(*) Simulieren Sie einen E-Feld-Sensor.

Wie groß sollte die Grenzfrequenz sein?

Wie kann man bei fester Kapazität und 50Ω -Ausgang die Grenzfrequenz ändern?

(*) Leiten Sie die Zusammenhänge zwischen der Ausgangsspannung, den Feldgrößen der TEM-Zelle und den in den Sensor eingepprägten GröÙen her.

Kombinieren Sie alle Teilsimulationen:

- Ein Generator mit XdBm als Ausgangsleistung
- Eine 50Ω Zuleitung
- Eine 50Ω TEM-Zelle mit Anpassung
- Umwandlung der Zellenspannung in ein E-Feld
- Einprägen eines Stromes in den Sensor
- Integration durch den Sensor (hier KEINE mathematische Funktion einbauen!)
- Eine 50Ω Zuleitung zum Messgerät
- Umwandlung in dBm

Praktischer Teil

Überprüfen Sie den erwarteten Zusammenhang von Ausgangsleistung in dBm und Klemmenspannung des Spektrum-Analysers.

Messen Sie mit dem Spektrum-Analyser das Verhalten einer Black-Box im Frequenzbereich.

Programmieren Sie auf Kanal B ein Darstellung, die um den Faktor 3 größer und um 42 gegenüber dem Original verschoben ist.

Speichern Sie das Programm.

Programmieren Sie auf Kanal B die Ausgabe der Messwerte in Volt.

Messen Sie mit dem Oszilloskop das Verhalten eines TE-Kalibrators im Zeitbereich. Bestimmen Sie Pulsbreite, Anstiegszeit, Ladungsmenge, ...

Teil A : Schirmung von Feldern

Zum Verständnis der Schirmwirkung sind Feld- und Stromvorstellungen notwendig. Diese können durch Vereinfachungen wesentlich erleichtert werden. Je nach Vereinfachung wird zwischen

- statischen bzw. quasistatischen Feldern
- stationären Feldern
- und Elektromagnetischen Wellen

unterschieden.

Einteilung der Felder

Statische Felder

Statische Felder werden von Gleichstrom bzw. von statischen Ladungen verursacht. Typische Beispiele sind das Erdmagnetfeld oder das elektrische Feld eines Bandgenerators.

Quasistatische Felder

Quasistatische Felder sind Wechselfelder. Ein Feld wird als quasistatisch bezeichnet, wenn das Feld zu jedem Zeitpunkt dem statischen Feld nahezu entspricht, welches durch die in dem Moment vorhandenen Ladungen und Ströme verursacht werden würde. Sowohl das magnetische, als auch das elektrische Feld in einem Koax-Kabel sind quasistatisch.

Stationäre Felder

Fließt ein Wechselstrom in einem Leiter, so erzeugt das den Strom umgebende wechselnde Magnetfeld ein elektrisches Wechselfeld. Dieses überlagert sich dem elektrischen Feld, welches den ursprünglichen Strom getrieben hat und verändert die ursprünglichen Strombahnen. Dieser Effekt wird Skineneffekt genannt. Im Gegensatz zum quasistatischen Feld wird das vom wechselnden Magnetfeld verursachte elektrische Feld nicht mehr vernachlässigt.

Der Praktikumsversuch beschäftigt sich nur mit der Schirmung quasistatischer oder stationärer Felder. Die Schirmung ebener Wellen wird nicht behandelt.

Elektromagnetische Wellen

Mit zunehmender Frequenz verliert die quasistatische und die stationäre Betrachtungsweise ihre Gültigkeit: Die induzierende Wirkung des Verschiebestroms kann nicht mehr vernachlässigt werden.

Die Verkopplung führt dazu, daß im Fernfeld das elektrische und das magnetische Feld senkrecht zueinander stehen, die Zeitverläufe in Phase sind und die Beträge in Luft im Verhältnis von 377Ω stehen. In der im Versuch verwendeten TEM-Zelle herrschen diese sog. Fernfeldbedingungen.

Schirmmaß

Unter Schirmung versteht man die Schwächung des elektrischen oder des magnetischen Feldes durch Gehäuse o.ä.. Schirmungswirkung wird normalerweise in dB angegeben:

$$A[dB]=20\log\left|\frac{E_{schirm}}{E}\right|$$

bzw.

$$A[dB]=20\log\left|\frac{H_{schirm}}{H}\right|$$

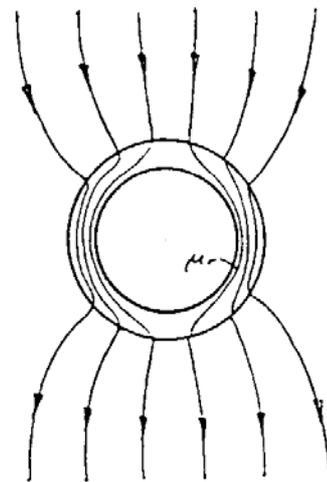
Der Index 'schirm' bezeichnet das Feld im geschirmten Fall, die nicht indizierten Felder bezeichnen das Feld an der selben Stelle aber ohne Schirmung.

Prinzipien der Schirmung

Schirmung beruht grundsätzlich auf zwei Prinzipien:

Feldführung

Feldlinien werden beim Übergang von Gebieten unterschiedlicher Permeabilität bzw. Dielektrizitätskonstante gebrochen. Hierdurch ist es möglich das Feld durch Materialien hoher Permeabilität bzw. hoher Dielektrizitätskonstante zu führen. Dieses Schirmprinzip kann auch bei statischen Feldern angewendet werden.



magnetostatische Schirmung

Abb. 1: Magnetische Feldlinien an einem hochpermeablen Zylinder.

Kompensation

Dieses Schirmprinzip beruht darauf, daß das anregende Feld im Schirmmaterial Ladungen verschiebt, bzw. Ströme induziert. Das Eigenfeld dieser Ladungen oder Ströme überlagert sich dem anregenden Feld und schwächt dieses in bestimmten Bereichen. In anderen Bereichen führt es zur Verstärkung des originalen Feldes. Ein Beispiel hierfür ist die Wirbelstromschirmung des Magnetfeldes.

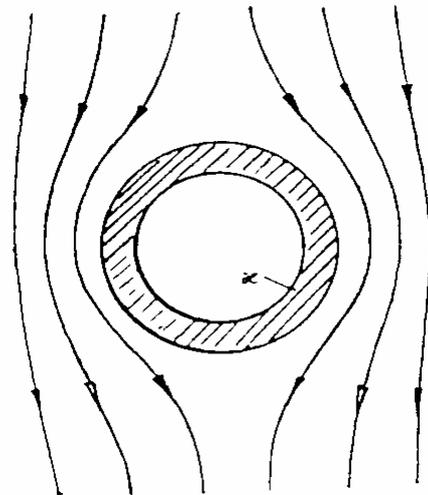


Abb. 2: Magnetfeldlinien bei Wirbelstromschirmung an einem Zylinder.

Wirbelstromschirmung

Da das magnetische Gleichfeld keinen Strom induziert, ein elektrostatisches Feld während des Einschaltens jedoch Ladungen bewegen und später 'festhalten' kann, können magnetostatische Felder im Gegensatz zu elektrostatischen Feldern nicht per Kompensation geschwächt werden. Für die Wirbelstromschirmung sind geschlossene homogene Strukturen notwendig. Deren Verbindungen müssen sehr niederohmig sein.

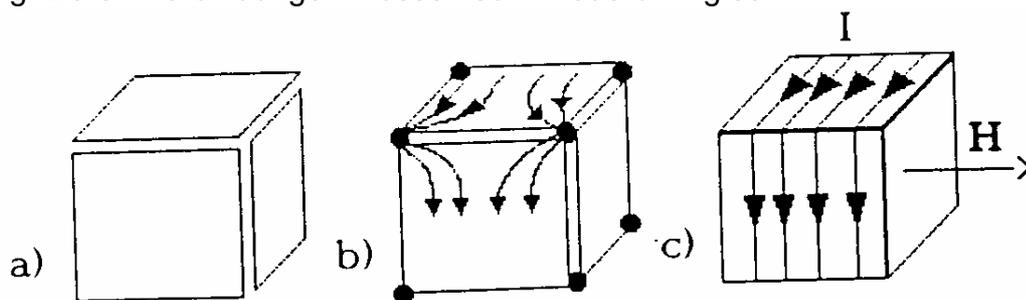


Abb. 3: a) nahezu wirkungsloser Schirm
b) für magnetische Wechselfelder mäßiger Schirm
c) optimaler Schirm

Da die Schirmwirkung gegen magnetische Felder von den Strömen in der Schirmwand verursacht wird, ist das Vermeiden von Fugen besonders wichtig. Fugen die quer zu den Schirmströmen liegen, reduzieren die magnetische Schirmwirkung erheblich. Während in der Praxis quasistatische elektrische Felder nahezu perfekt geschirmt werden können, stellt sich bei der Schirmung magnetischer Felder regelmäßig die Frage nach der Schirmdämpfung. Diese muss im Einzelfall ermittelt werden. Sie wird von

- der Frequenz,
- der Wandstärke
- der Leitfähigkeit
- der Permeabilität und Permittivität
- und der Schirmgeometrie

bestimmt.

Schirmung am Zylinder

Wesentliche Eigenschaften der Schirmung von Magnetfeldern bei tiefen Frequenzen können anhand eines Zylinderschirms untersucht werden. Obwohl er an beiden Enden offen ist, besitzt der Zylinder sowohl im longitudinalen, als auch im transversalen Feld eine gute Schirmwirkung magnetischer Wechselfelder.

Ein Zylinderschirm sei einem parallel zur Achse verlaufenden Magnetfeld ausgesetzt.

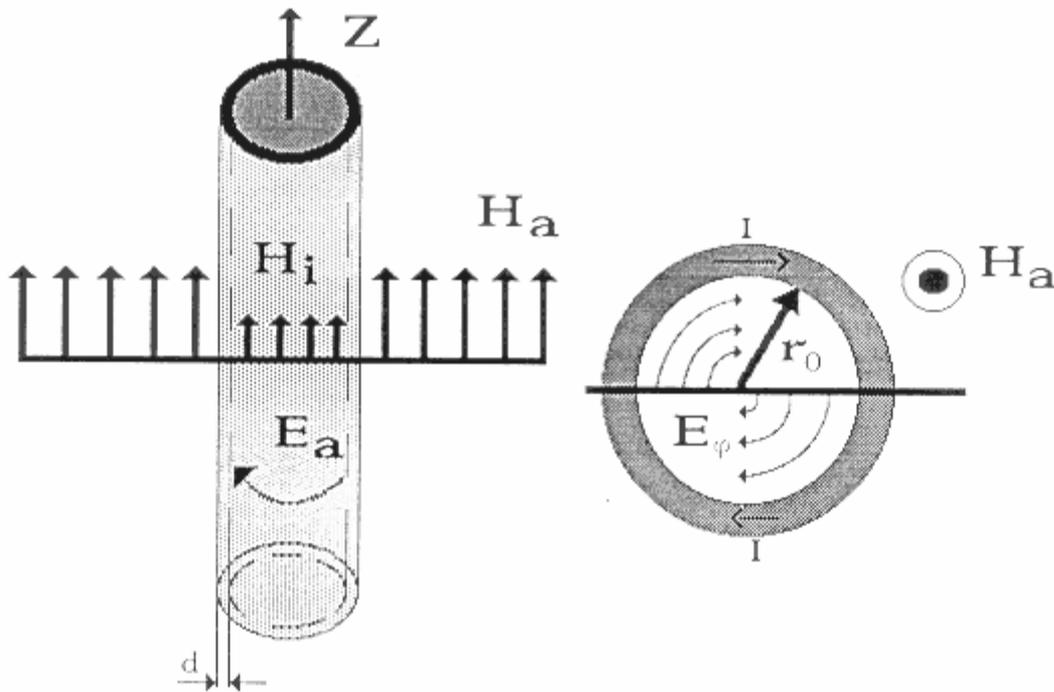


Abb. 4: Zylinderschirm im longitudinalen Magnetfeld

Das mit dem äußeren Magnetfeld H_a (Störfeld) verknüpfte elektrische Wirbelfeld E_a bewirkt gemäß $J = \sigma E$ in der leitenden Schirmwand Kreisströme. Diese erzeugen ein ebenfalls zum Zylinder longitudinales Feld $H_{rück}$ und schwächen das äußere Feld im Innern des Zylinders. Übrig bleibt das im Innenraum geschwächte Feld $H_i = H_a - H_{rück}$. Der Schirmfaktor kann wie folgt berechnet werden:

$$Q = \frac{H_i}{H_a} = \frac{1}{\cosh(kd) + 1/2 \cdot K \sinh(kd)}$$

mit

$$K = k \frac{\mu_0}{\mu} r_0$$

$$k^2 = j\omega\sigma\mu$$

r_0 dem Innenradius

d der Wandstärke

Aufbau und Messtechnik

Zur Versuchsdurchführung stehen folgende Geräte zur Verfügung:

TEM-Zelle

Die TEM-Zelle erzeugt elektrische und magnetische Felder. Im Labor wird die Form Stripline verwendet. Sie führt ein TEM-Feld, d.h. es sind keine longitudinalen Feldkomponenten innerhalb der Zelle anzutreffen. Innerhalb des nutzbaren Frequenzbereiches entsprechen die Felder den statischen Feldern. Das elektrische Feld kann näherungsweise durch:

$$E = \frac{V}{d}$$

bestimmt werden (V : Zellenspannung, d : Zellenhöhe). Da die Zelle eine ebene Welle führt, stehen das elektrische und das magnetische Feld senkrecht und im Verhältnis von 377 Ohm zueinander. Somit gilt:

$$H = \frac{E}{377}$$

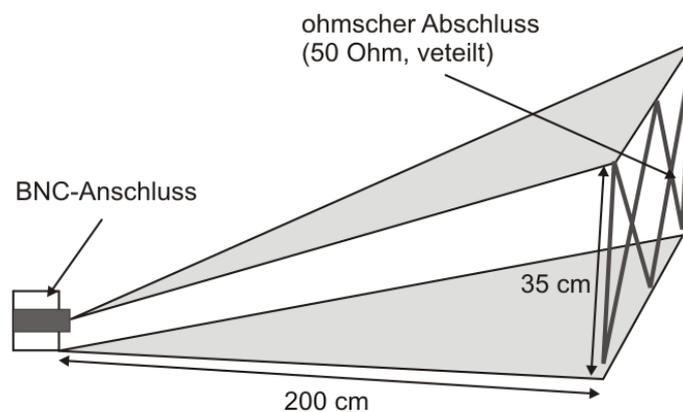


Abb. 5: Aufbau der TEM-Zelle (vereinfacht)

$R_{ab} = \infty$, $H = 0$, da kein Strom fließt.

$R_{ab} = 50 \Omega$, $H = 377 \cdot E$, da die Zelle reflektionsfrei abgeschlossen ist.

$R_{ab} = 0 \Omega$, $E = 0$, da keine Spannung an der Zelle anliegt.

Feldsonden

- Magnetfeldsonde: 10 Hz - 10 kHz
- Magnetfeldsonde: 1 kHz - 2 MHz
- Elektrische Feldsonde: 5 kHz - 400 MHz
- Elektrische Feldsonde: 20MHz - 50MHz

Schirmanordnungen

- Rohr 1: Eisen, Durchmesser = 18.8 cm, Wandstärke = 0.55 cm, $\mu_r \cong 200$
 $\sigma = 10 \cdot 10^4 \text{ S/cm}$
- Rohr 2: Messing, Durchmesser = 16.4 cm, Wandstärke = 0.3 cm, $\sigma = 13.3 \cdot 10^4 \text{ s/cm}$

Signalgeneratoren

- Netzwerkanalysator 10 Hz - 500 MHz
- Sinusgenerator 1 mHz - 10 MHz

Aufgabenstellung, Teil A

Die Empfindlichkeit der Sonden soll ermittelt werden.

Die Schirmdämpfung der Rohre soll in folgenden Fällen gemessen und mit den Berechnungen überprüft werden:

- Eisenrohr, transversales E-Feld
- Messingrohr, transversales E-Feld
- Eisenrohr, longitudinales H-Feld

Vorbereitungsaufgaben, Teil A

Die Wirkung der Schirmung lässt sich am besten anhand der Lage der Felder und Ströme verstehen.

1. Skizzieren Sie die Feldlinien und die Lage der Wirbelströme für den Zylinder im transversalen und im longitudinalen Feld.
2. Welche Unterschiede der Schirmwirkung erwarten Sie für Wirbelstromschirmung und für magnetostatische Schirmung zwischen der transversalen und der longitudinalen Anordnung ?
3. Werten Sie die Schirmdämpfungsformel für longitudinales Magnetfeld für beide Rohre im Frequenzbereich von 10 Hz - 1 kHz und 1 kHz bis 100 kHz aus.
4. Am Anfang des Skriptes wurde erwähnt, dass eine Schirmanordnung für das elektrische Feld zwar voll wirksam, für das Magnetfeld völlig durchsichtig sein kann. Skizzieren Sie eine solche Anordnung.

Teil B : Schirmung von Koaxkabeln

Einleitung

Ein großer Teil der Datenübertragung in analogen und digitalen Systemen erfolgt über geschirmte Leitungen. Dies geschieht in der Absicht, durch die Schirmung eine ungestörte Datenübertragung sicherzustellen. Leider ist die Schirmwirkung keineswegs unendlich gut, sondern wird von einer Vielzahl von Parametern, wie z.B. Kompromissen in der Kabelkonstruktion wegen der gewünschten Biegsamkeit von Kabeln, beeinflusst. Aber auch Leitungen mit massivem Schirm haben nur eine begrenzte Schirmwirkung. Neben der direkten Einkopplung durch den Schirm, ist die fehlerhafte Montage oder Konstruktion von Steckern, oder eine falsche Behandlung der Masselegung an den Schirmenden¹ oft für starke Einkopplungen verantwortlich. Dieser Versuch beschäftigt sich mit der Schirmung und der dazugehörigen Meßtechnik, wobei folgende Fragen beantwortet werden sollen:

- Warum schirmt ein Koax-Kabel überhaupt ?
- Welche Mechanismen begrenzen die Schirmwirkung ?
- Wie kann ein Maß für die Schirmwirkung definiert werden ?
- Wie kann die Schirmwirkung gemessen werden ?

Definition der Koppelimpedanz

Die Koppelimpedanz ist eine meßbare Größe, die die Schirmwirkung eines Kabels beschreibt.

Durch eine äußere Störung z.B. ein sich änderndes Magnetfeld wird ein Störstrom in die Schirmung der Leitung eingeprägt. Dieser Störstrom hat eine Störspannung zwischen der Seele der geschirmten Leitung und dem Schirm zur Folge, die sich zu der Signalspannung addiert. Die Koppelimpedanz ist durch

$$Z_{koppel}(f) = \frac{U_{stör}(f)}{I_{stör}(f)} \quad [\Omega / m]$$

definiert. Sie ist eine komplexe, frequenzabhängige Größe, wobei in diesem Versuch nur der Betrag gemessen werden wird.

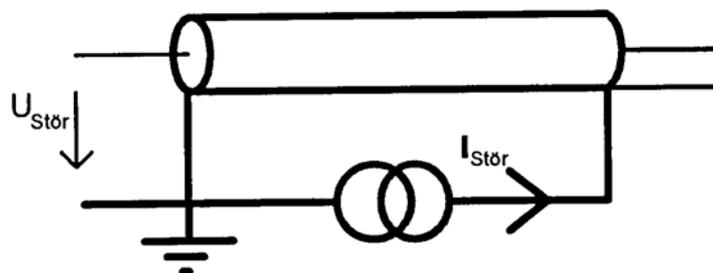


Abb. 6: Prinzipschaltung zur Definition der Koppelimpedanz

¹ z.B. werden die Schirmdrähte am Ende der geschirmten Leitung zu einem Strang verdrillt und einseitig neben den Adern an Masse geschraubt, so daß ein kurzes Stück der Adern ungeschirmt bleibt und die Trennung zwischen den Strömen auf der Innenseite des Schirms (Signalstrom) und der Außenseite des Schirmes (Störstrom) aufgehoben wird.

Prinzip der Schirmwirkung eines Koax-Kabels

Die Schirmwirkung beruht darauf, dass die äußere Schicht des Schirmes den inneren Bereich feldfrei hält. Ein ideal leitfähiger Schirm würde das Eindringen sämtlicher Felder, bis auf das magnetische Gleichfeld verhindern. Der Störstrom würde auch keinen Längsspannungsabfall über die Kabellänge zur Folge haben, der sich ansonsten direkt zur Signalspannung addieren würde.

Werden gut-, aber nicht ideal-, leitfähige massive Schirme verwendet, so verursacht der Störstrom schon bei Gleichspannung einen Längsspannungsabfall, der eine Störspannung von $U_{\text{Stör}} = R_{\text{DC}} \cdot I_{\text{Stör}}$ zur Folge hat. Der Gleichstromwiderstand wird durch die Geometrie und Leitfähigkeit des Schirmes bestimmt und weist Werte zwischen $1\text{m}\Omega$ - $20\text{m}\Omega$ pro Meter Kabellänge auf.

Mit steigender Frequenz treten nachstehende Veränderungen auf:

- Durch den Skineneffekt nimmt der ohmsche Widerstand proportional zur Wurzel der Frequenz zu (Skineneffekt). Dies erhöht den ohmschen Längsspannungsabfall.
- Eine zusätzliche Längsspannung fällt über die Längsinduktivität des Kabels ab. Sie ist proportional zur Frequenz; die Längsinduktivität hat einen Wert von ca. 10nH pro Meter.
- Als Folge des Skineneffektes ist die Stromdichte und damit der Längsspannungsabfall auf der Außenseite des Schirmes nicht mehr gleich der Stromdichte und damit dem Längsspannungsabfall auf der Innenseite des Schirmes.

Der wesentliche Effekt hiervon ist die Entkopplung der inneren und der äußeren Spannung. Da sich nur der innere Spannungsabfall zur Signalspannung addiert, reduziert sich die eingekoppelte Störspannung mit steigender Frequenz. Die Koppelimpedanz entspricht also bei Gleichspannung dem Gleichstromwert und beginnt zu sinken, als bald die Frequenz Werte erreicht, für die die Eindringtiefe Werte annimmt, die kleiner als die Dicke des Kabelschirmes sind.

Einkopplung durch nicht perfekte Schirme

Nur in wenigen praktischen Anwendungen können Kabel mit massiven Schirmen, die einem idealen Schirm am nächsten kommen, verwendet werden. Geflechtschirme weisen bei höheren Frequenzen eine schlechtere Schirmung auf. Dies beruht auf vielen Effekten, die hier in zwei Ursachengruppen unterteilt werden sollen.

Kapazitive Verkopplung

Neben dem Störstrom im Kabelmantel existiert meist ein äußeres elektrisches Feld. Ist der Schirm frei von Löchern, so gelangen keine Feldlinien durch den Schirm auf die Seele des Kabels. Flexible Kabel weisen aber nur Bedeckungsgrade von z.T. unter 90% auf. Somit kann das äußere elektrische Feld einen inneren Strom influenzieren. Dies wird durch eine Koppelkapazität beschrieben. Da aber die Störquelle kein Störstrom ist - sondern ein elektrisches Feld - und keine Spannung induziert wird, - sondern ein Störstrom - kann diese Art der Einkopplung nicht über die Koppelimpedanz direkt beschrieben werden. Der eingekoppelte Strom steigt proportional zur Frequenz an, wobei der Wert der Koppelkapazität meist deutlich unter 1pF pro Meter liegt. Zur Berechnung der resultierenden Störspannung muß aber der Lastwiderstand des Empfängers, der Innenwiderstand der Signalquelle und die Kapazität zwischen der Seele und dem Schirm berücksichtigt werden.

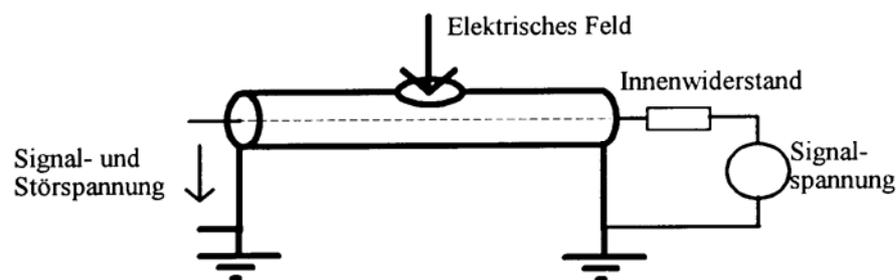


Abb. 7: Kapazitive Kopplung durch Löcher im Schirm

Induktive Verkopplung

Unter dem Begriff der induktiven Verkopplung werden hier eine Reihe von Störungen des Schirmes zusammengefaßt, die dafür sorgen, daß die Koppelimpedanz mit steigender Frequenz wieder zunimmt, also die Störspannung wächst.

Der klassische Fall der induktiven Kopplung ist im nächsten Bild dargestellt. Dies könnte z.B. bei einem Kabel der Fall sein, welches aus zwei auf sehr ungünstige Weise miteinander verbundenen Stücken besteht. An der Induktivität L fällt eine Spannung deren Betrag $U_L(f) = 2 \pi f I_{\text{Stör}} L$ ab. Im Gegensatz zu der Spannung, die an der normalen Längsinduktivität des Kabelschirmes abfällt, erfolgt an der die Induktivität L keine Trennung zwischen den Spannungen auf der inneren und der äußeren Oberfläche des Schirmes. Die Spannung U_L addiert sich also direkt zu der Signalspannung, wobei der von der Induktivität L verursachte Anteil der Koppelimpedanz proportional der Frequenz ansteigt.

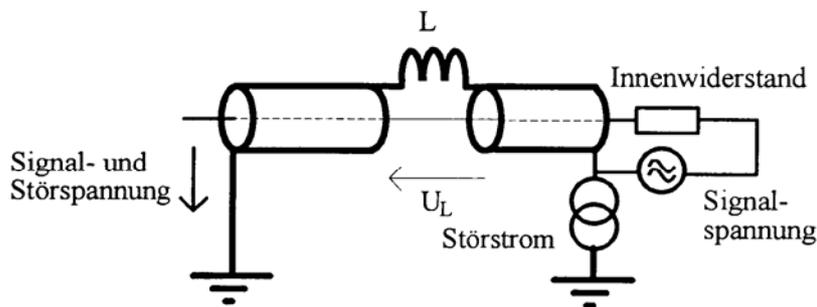


Abb. 8: Durch gemeinsame Längsinduktivität verursachte Verkopplung des äußeren und des inneren Strombelages des Kabelschirmes

Eine Vielzahl von Störungen des Kabelmantels können so beschrieben werden; z.B. wenn der Kabelmantel aus einzelnen Bündeln von Drähten besteht, die geflochten sind. Durch die Flechtung wird der äußere Strom nach innen getragen, wobei hier die Kontaktierung an den Kreuzungspunkten eine wesentliche Rolle spielt. Da aber alle diese Störungen der Schirmwirkung einen Anstieg der Koppelimpedanz mit 20dB pro Dekade verursachen, werden sie hier nicht genauer getrennt und als induktive Verkopplung bezeichnet.

Wird die Koppelimpedanz mehrerer Kabeltypen als Funktion der Frequenz aufgetragen, so sind Frequenzbereiche zu erkennen, in denen einzelne der aufgelisteten Mechanismen dominieren (s. Vorbereitungsaufgaben).

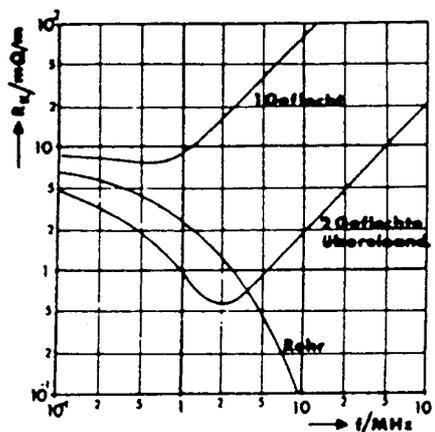


Abb. 9: Messwerte der Koppelimpedanz für verschiedene Kabel

Methoden zum Teil B

Bestimmung des Gleichstromwiderstandes

Mit einer geeigneten Methode (s. Vorbereitungsaufgaben) ist der Gleichstromwiderstand der zu untersuchenden Kabel zu bestimmen. Er dient als Vergleichswert zur Absicherung der bei Wechselspannung gemessenen Koppelimpedanzen, die bei niedrigen Frequenzen dem Gleichstromwert entsprechen.

Wechselspannungsmessungen

Zur Bestimmung der Koppelimpedanz muß ein bekannter Strom auf dem Schirm eingepreßt werden und die Störspannung zwischen Seele und Schirm gemessen werden. Für diesen Zweck existieren eine Reihe von Meßverfahren. Sie unterscheiden sich darin, ob das zu messende Kabel mit seinem Wellenwiderstand abgeschlossen wird und in welcher Weise der äußere Strom eingepreßt wird.

Das hier verwendete Verfahren zur Messung der frequenzabhängigen Koppelimpedanz wird 'Line injection method' genannt, da der äußere Strom durch einen Wellenleiter (reflektionsfrei abgeschlossen) eingepreßt wird. Dieser Wellenleiter besteht aus einem auf dem Isoliermantel des zu untersuchenden Kabels aufgeklebten Leiter und dem Schirm. Der Rückstrom des aufgeklebten Leiters fließt im Schirm des zu untersuchenden Kabels.

Zur Messung wird hier ein Netzwerkanalysator verwendet, der als Sender (für den äußeren Strom) und als Empfänger (für die Störspannung) dient. Bild 5 zeigt den Aufbau.

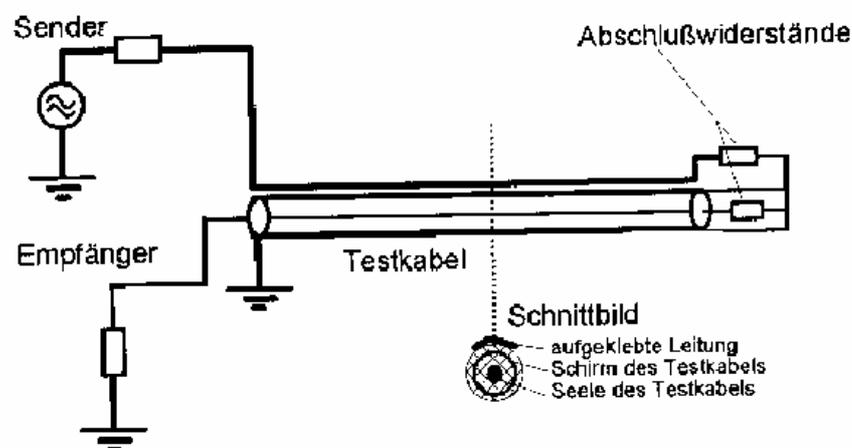


Abb. 10: Aufbau zur Messung der Koppelimpedanz

Wirkungsweise der 'Line injection method'

Zur Erzeugung des äußeren Störstromes wird eine Leitung auf die Oberfläche des zu untersuchenden Kabels geklebt. Diese bildet zusammen mit dem Kabelschirm einen Wellenleiter, der impedanzrichtig abgeschlossen wird (die Breite des aufgeklebten Leiters wird solange variiert, bis dieser Wellenleiter 50Ω Wellenwiderstand aufweist). Die durch den Störstrom erzeugte Störspannung im zu untersuchenden Kabel wird mit dem Empfänger gemessen. Aus den eingespeisten und gemessenen Spannungen, kann über ein Ersatzschaltbild, welches die Innen- und Wellenwiderstände der Anordnung enthält, aus der angezeigten Empfänger- und Senderspannung die Koppelimpedanz berechnet werden.

Die Messung erfolgt hier im Frequenzbereich von 10 kHz bis 200 MHz, wobei die Werte der Abschlusswiderstände auch variiert werden können. Hierdurch ist es möglich, die kapazitive Verkopplung (bei $I_{\text{Stör}} = 0$) und die Koppelimpedanz (ohne kapazitive Verkopplung) voneinander unabhängig zu messen. Voraussetzung ist aber, dass die Kabellänge oder Frequenz noch so gering sind, daß die Wellenlänge wesentlich größer als die Kabellänge ist. Wird dies nicht eingehalten, so entstehen Stehwellen auf den Leitungen.

Aufgabenstellung, Teil B

- Lösung der Vorbereitungsaufgaben (Kap. 3.7, bitte vorher!)
- Messung des Gleichstromwiderstandes verschiedener Kabeltypen
- Bestimmung der Koppelkapazität verschiedener Kabel
- Bestimmung der Koppelimpedanz verschiedener Kabel

Vorbereitungsaufgaben, Teil B

1. Wie groß ist der Gleichstromwert der Koppelimpedanz für ein Kabel mit einem Kupferschirm von 3mm Radius und 0.1mm Wandstärke ?
2. Welcher Messaufbau ist geeignet, die Gleichstromwiderstände zu messen (kleine Werte !)?
3. Skizzieren Sie die Stromverteilung und das Magnetfeld im Querschnitt eines Koax-Kabel bei tiefen und bei hohen Frequenzen.
4. Bezeichnen Sie die Bereiche in Abb. 9, in denen einzelne Koppelmechanismen wirken. Woher kommen die Unterschiede zwischen den drei dargestellten Kabeltypen ?
5. Warum werden das zu prüfende Kabel und die Leitung, welche den Störstrom trägt, impedanzrichtig abgeschlossen ?
6. Wie ist das Ersatzschaltbild für die kapazitive Kopplung gemäß Bild 7 ?
7. Wie müssen die Abschlusswiderstände im Aufbau gemäß Abb. 10 gewählt werden, wenn nur die kapazitive Einkopplung bzw. nur die Koppelimpedanz gemessen werden soll ? Welche Ersatzschaltbilder ergeben sich ?, Wie hoch darf die Frequenz maximal sein, soll die kapazitive Einkopplung für ein Polyethylenkabel mit 1m Länge gemessen werden ?
8. Wie sieht das Ersatzschaltbild für den Messaufbau gemäß Abb. 10 aus? Wie kann die Koppelimpedanz aus den angezeigten Werten berechnet werden (Hinweis: Die Ein- und die Ausgangsimpedanz des Senders bzw. des Empfängers beträgt 50Ω , die Anzeige erfolgt in dBm, wobei 0 dBm 1mW an 50Ω entsprechen). ?