

Elektromagnetische Verträglichkeit (2): Störemissionen (EMI), Messtechnik

Prof. Dr. sc. nat. Manfred Schmidt
Vorlesung im WS 2010 / 2011
an der
Fachhochschule Jena
Fachbereich Elektrotechnik / Informationstechnik



Dieses Material wurde ausschließlich für Lehrveranstaltungen am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Fachhochschule Jena im WS 2003/04 konzipiert und zusammengestellt. Modifikation erfolgte im WS 2008/2009 und für das WS 2009/2010.
Die verwendeten Abbildungen sind zum Teil aus den angegebenen Literaturstellen im Sinne von Zitaten entnommen.

Grobgliederung Stand WS 2003/2004

1. Einführung in die Probleme der Elektromagnetischen Verträglichkeit
2. EMV-Richtlinie und Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit, Normen (allgemein)
3. Störquellen, Störgrößen, Störsignale
4. Modelle und Koppelmechanismen
- 5. Emissionsmeßtechnik**
6. Störfestigkeitstechnik
7. Theorie und Praxis elektromagnetischer Schirme
8. Entstörkomponenten und Entstörmitelmessung
9. EMV-gerechter Leiterplatten-Entwurf
10. Schutz von Personen in elektrischen, magnetischen und elektromagnetischen Feldern (DIN VDE 0548)

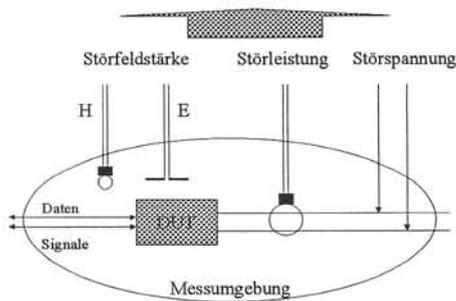


Störemissionsmessungen

- Allgemeine Forderungen: Messumgebung
- geleitete - gestrahlte Störemission
- geleitet: Störspannung, Störstromstärke, Störleistung
- gestrahlt: (elektrische) Feldstärke
- Eigenschaften Messumgebung
- Eigenschaften Messempfänger

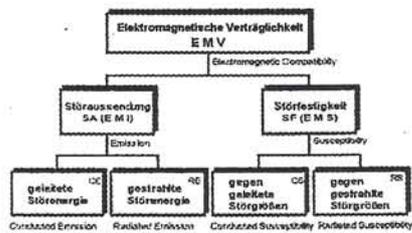
EMD

Störemissionsmessung



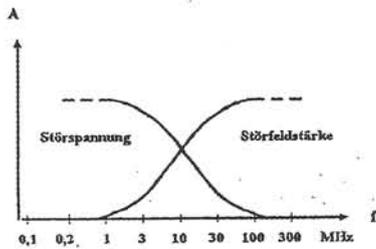
EMD

Störemission: geleitet - gestrahlt



EMD

Störemission: geleitet - gestrahlt



EMD

Störemissionsmessung

Electromagnetic Interference, EMI

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Geleitete Störgrößen (Spannung, Leistung) • bis 30 MHz für Störspannungen (LISN) • bis 300 MHz für Störleistungen (Absorberzange) | <ul style="list-style-type: none"> • Gestrahlte Störgrößen (Feldstärke) • Freifeld • $30 \text{ MHz} \leq f \leq 1 \text{ GHz}$ • über 1 GHz • Alternative Meßumgebung: GTEM-Zelle |
|---|--|

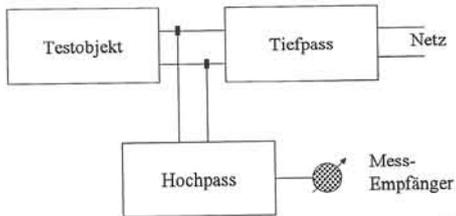
EMD

Störemissionsmessung - Geleitete Störgrößen -

- Physikalische /elektrische Größen
 - Störspannung
 - Störstrom
 - Störleistung
- Problem Meßumgebung
 - Geschirmter Raum
 - Netznachbildung, Line Impedance Stabilisation Network (LISN)
- Normen

EMD

Messung geleiteter Störgrößen: Störspannungsmessung



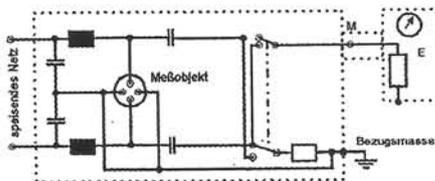
EMD

Netznachbildungen (allg.)

| Art der Störspannung | Netznachbildung | Einsatz |
|-----------------------------|------------------------------------|---|
| Unsymmetrische Störspannung | V-Netznachbildung | allg. Geräte |
| Asymmetrische Störspannung | T-Netznachbildung | Fernmeldeeinrichtungen |
| Symmetrische Störspannung | Delta-(Δ)-Netznachbildung | ohne Bedeutung, keine Meßvorschrift vorhanden |

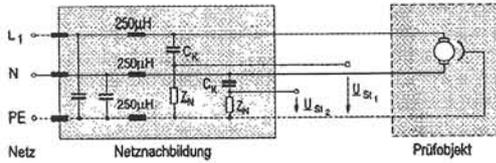
EMD

V-Netznachbildungen (Prinzip)



EMD

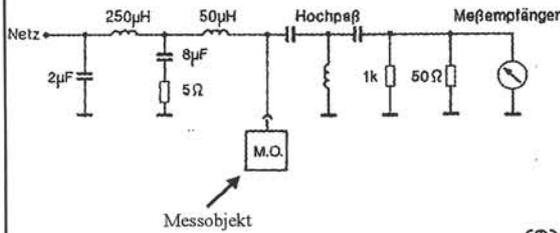
V-Netznachbildung (unsymmetrische Störspannungen)



Bezugsleiter: N für energetische Betrachtungen, Knotenspannungen
PE für Störspannungsbetrachtungen

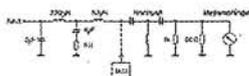
EMD

V - Netznachbildung ($50 \mu\text{H} + 5 \Omega$) \parallel 50Ω

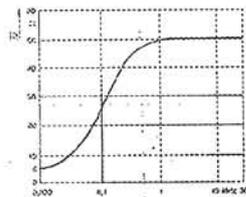


EMD

Netznachbildung, Impedanzverlauf

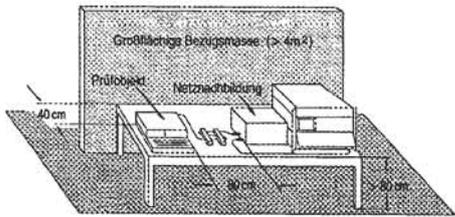


($50 \mu\text{H} + 5 \Omega$) \parallel 50Ω

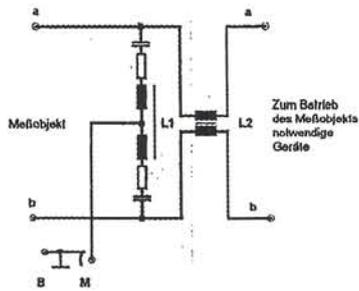


EMD

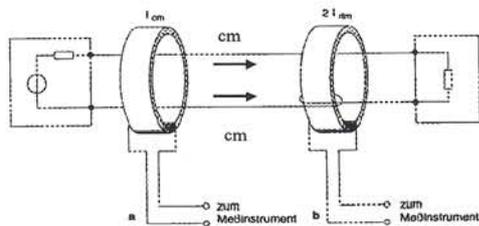
Störspannungsmessung Messaufbau



T-Netznachbildungen (Prinzip)

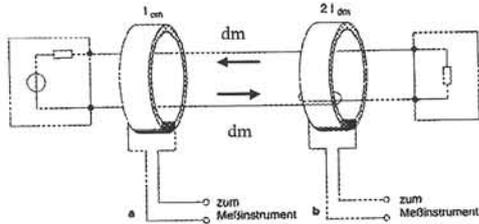


Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung



cm - Gleichtaktsignal

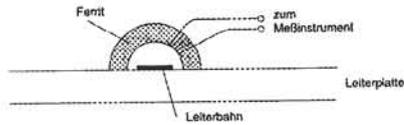
Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung



dm - Gegentaktsignal

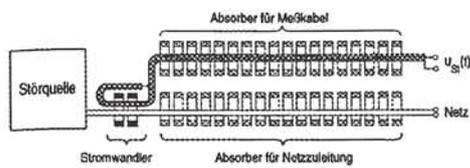
EMD

Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung auf Leiterplatte



EMD

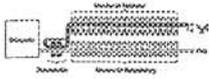
Messung geleiteter Störgrößen: Störleistungsmessung



nach MEYER DE STADELHOFEN

EMD

Messung geleiteter Störgrößen: Störleistungsmessung



Einfügedämpfung von
17 dB bei 50 Ω,
Messwert der Störspannung in dB_{μV} ist
gleich dem Zahlenwert der Störleistung
am Eingang der Zange

1 pW entspricht 7,07 μV an 50 Ω
0 dB_{pW} entspricht 17 dB_{μV} an 50 Ω

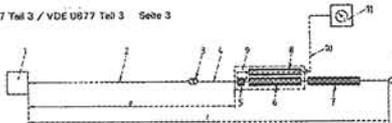
$$P = U + K$$

in dB_{pW} in dB_{μV} Korrekturwert in dB

EMD

Störleistungsmessung

DIN 57 877 Teil 3 / VDE 0877 Teil 3 Seite 3



- 1 Prüfling
- 2 Leitung, auf der zu messen ist
- 3 Steckverbindung (falls benötigt)
- 4 Verlängerung der Leitung 2 (falls benötigt)
- 5 Stromwandler
- 6 Absorber auf Leitung 2 oder 4 als Nachbildwiderstand
- 7 eventuell erforderlicher Zusatzabsorber für 6
- 8 Absorber auf dem Verbindungskabel zwischen Stromwandler und Funkstörmeßempfänger zur Dämpfung von Mantelströmen
- 9 Absorptions-Meßwandlerslange (bestehend aus 2, 6 und 8)
- 10 Verbindungskabel zwischen Absorptions-Meßwandlerslange und Funkstörmeßempfänger
- 11 Funkstörmeßempfänger
- 12 Abstand der Absorptions-Meßwandlerslange vom Prüfling
- 13 Länge der Leitung mindestens 5 m für $f = 30$ MHz ($\lambda/2$) zuzüglich der Länge der Absorptions-Meßwandlerslange und des eventuell erforderlichen Zusatzabsorbers

EMD

Störemissionsmessung EMI

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Geleitete Störgrößen (Spannung, Leistung) • bis 30 MHz für Störspannungen (LISN) • bis 300 MHz für Störleistungen (Absorberzange) | <ul style="list-style-type: none"> • Gestrahlte Störgrößen (Feldstärke) • Freifeld • $30 \text{ MHz} \leq f \leq 1 \text{ GHz}$ • über 1 GHz • Alternative Meßumgebungen |
|---|--|

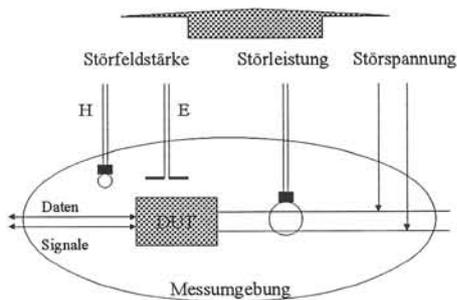
EMD

Messung gestrahlter Störgrößen: Störfeldstärkemessung

- Theoretische Grundlagen
- Messumgebung Freifeld
- Antennen
- Messempfänger
- Alternative Messumgebungen
 - Absorberräume
 - TEM - Wellenleiter
- Ergänzungen

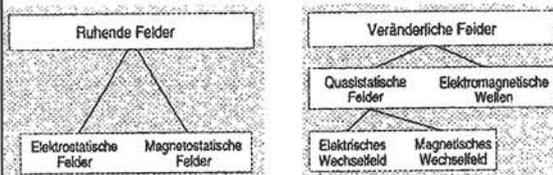
EMD

Störemissionsmessung



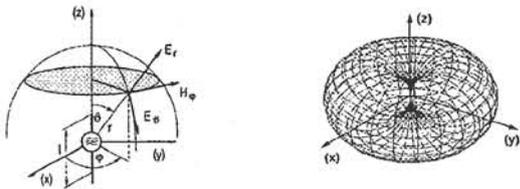
EMD

Theoretische Grundlagen: Felder



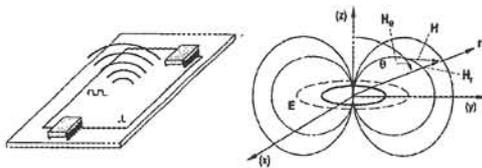
EMD

Theoretische Grundlagen:
Hertzscher Dipol



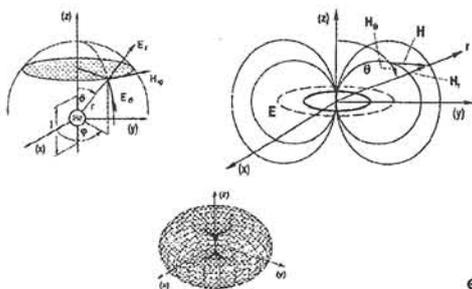
EMD

Theoretische Grundlagen:
Stromschleife



EMD

Theoretische Grundlagen



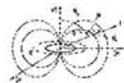
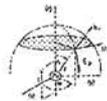
EMD

Theoretische Grundlagen: Lösung der Maxwell'schen Gleichungen

$$E_\theta = \frac{jI Z_0 \lambda \sin \vartheta}{8\pi^2 r^3} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r + \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)^2 \right] e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$E_r = \frac{jI Z_0 \lambda \cos \vartheta}{4\pi^2 r^3} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r \right] e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$H_\varphi = \frac{jI \sin \vartheta}{4\pi r^2} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r \right] e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$



$$H_\theta = \frac{jI \lambda \sin \theta}{4\pi r^2} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r + \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)^2 \right] \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)$$

$$E_r = \frac{jI Z_0 \lambda \cos \theta}{4\pi r^3} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r \right] \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)$$

$$H_\varphi = \frac{jI Z_0 \lambda \sin \theta}{4\pi r^2} \left[1 + j \frac{2\pi}{\lambda} r \right] \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)$$

©

Theoretische Grundlagen: Fernfeld

$r \gg \lambda / 2\pi$, nur Terme mit höchsten Potenzen:

$$E_\theta = \frac{jI Z_0 \lambda \sin \vartheta}{8\pi^2 r^3} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \right)^2 e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$E_r = \frac{jI Z_0 \lambda \cos \vartheta}{4\pi^2 r^3} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \right) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$H_\varphi = \frac{jI \sin \vartheta}{4\pi r^2} \left(j \frac{2\pi}{\lambda} r \right) e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

©

Theoretische Grundlagen: Feldwellenwiderstand Z_0

$$\frac{E_\theta}{H_\varphi} = Z_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 377 \Omega$$

©

Theoretische Grundlagen: Nahfeld

$$r \ll \lambda / 2\pi$$



$$\underline{E}_\theta = \frac{\hat{I} Z_0 \lambda \sin \nu}{j 8 \pi^2 r^3} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$\underline{E}_r = \frac{\hat{I} Z_0 \lambda \cos \nu}{j 4 \pi^2 r^3} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

$$\underline{H}_\phi = \frac{\hat{I} \sin \nu}{4 \pi r^2} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r}$$

ε(3)

Theoretische Grundlagen

Babinet - Dualität zwischen Hertzschem und Fitzgeraldschem Dipol

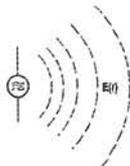
Fernfeld

$$\underline{E}_\phi^F = Z_0 \underline{H}_\theta^H \quad \text{und} \quad \underline{H}_\theta^F = -\frac{1}{Z_0} \cdot \underline{E}_\theta^H$$

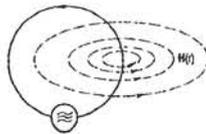
ε(3)

Theoretische Grundlagen

Babinet - Dualität zwischen Hertzschem und Fitzgeraldschem Dipol



Quasistatisches elektrisches
Nahfeld einer Stabantenne
(Hertzscher Dipol)



Quasistatisches magnetisches
Nahfeld einer Rahmenantenne
(Fitzgeraldscher Dipol)

ε(3)

Theoretische Grundlagen

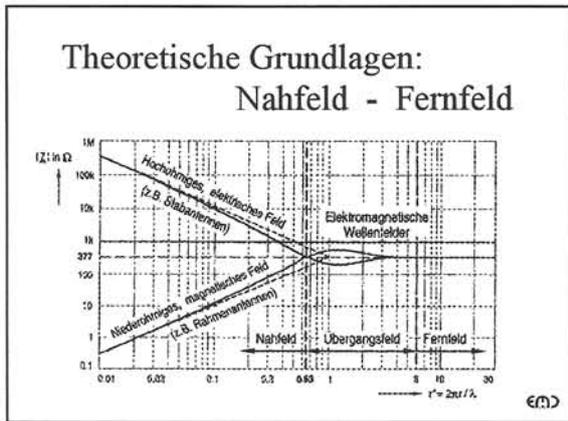
Babinet - Dualität zwischen Hertzischem und Fitzgeraldschem Dipol

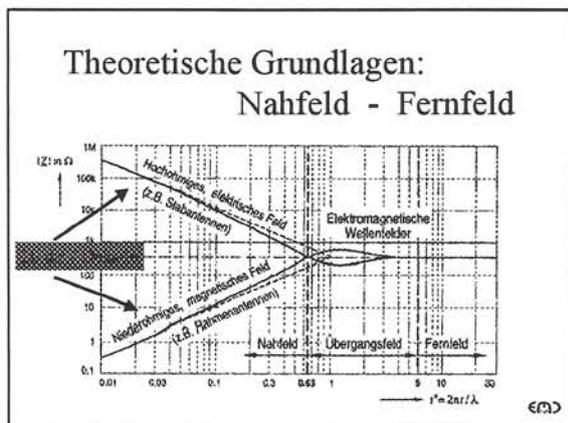
Nahfeld

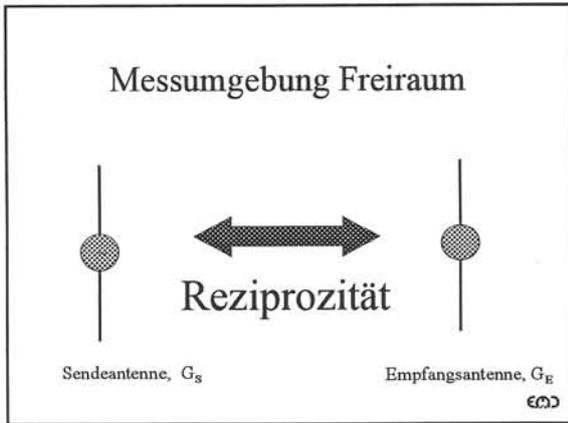
elektrischer Dipol magnetischer Dipol

Schematische Darstellung je eines quasistatischen und magnetischen Nahfeldes

EMD







- ### Messumgebung Freifeld
- Freiraum - theoretisches Modell, war technisch nicht realisierbar
 - Halbraum, realisierbar auf Erdoberfläche, aber Einflüsse durch Leitfähigkeit des Erdbodens
 - Freifeld - leitfähige Fläche (ground plane)
- EMD

Simple Visualisation of Fields on EMC test sites

David Mawdsley
 Managing Director
 Laplace Instruments Ltd

Introduction

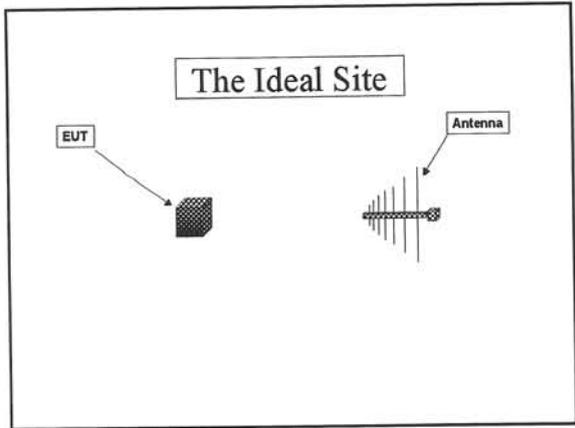
- Radiated emissions measurement for most standards require use of an OATS or equivalent.
- This presentation presents a simple overview of what actually happens to the emissions on an OATS.
- It visually demonstrates the errors that will occur if the correct technique is not used.
- We also look at implications of using test chambers.

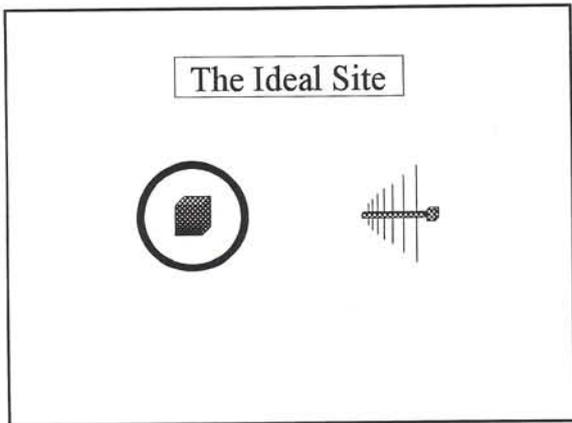
Background

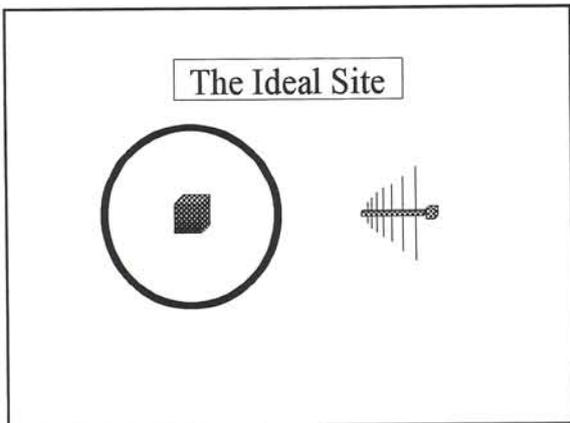
- The purpose in creating these visualisations was as a training aid for our customers.
- They were created some 5 years ago from first principles on relatively simple Excel spreadsheets.
- Some approximations are assumed. These will be explained at the appropriate time.

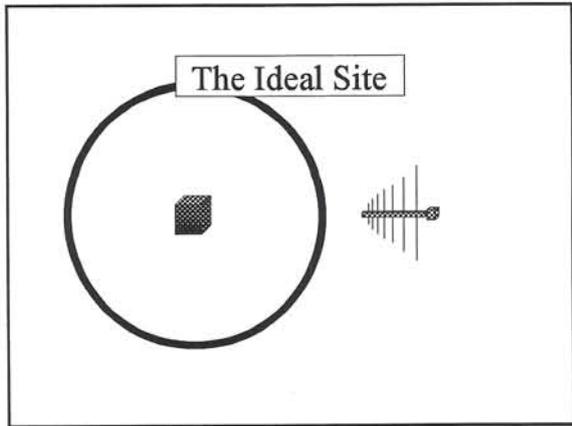
The Ideal Site

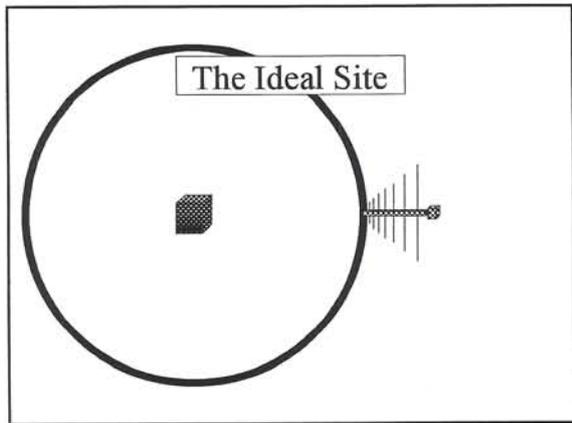
- One which will enable the measurement of the emissions from the EUT....
 - unaffected by the site.
 - free of external 'interference'.

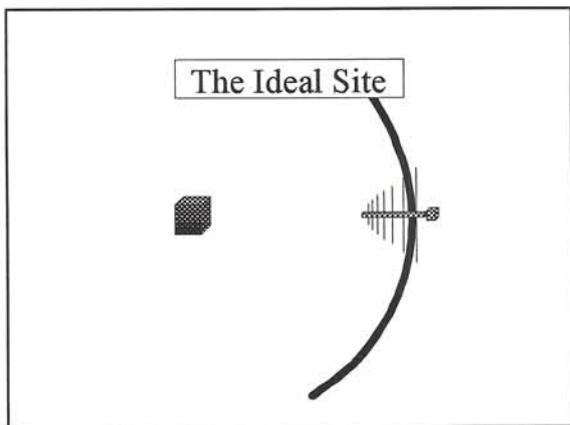


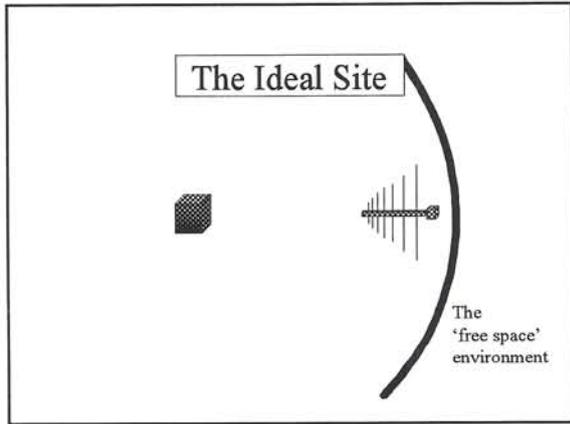


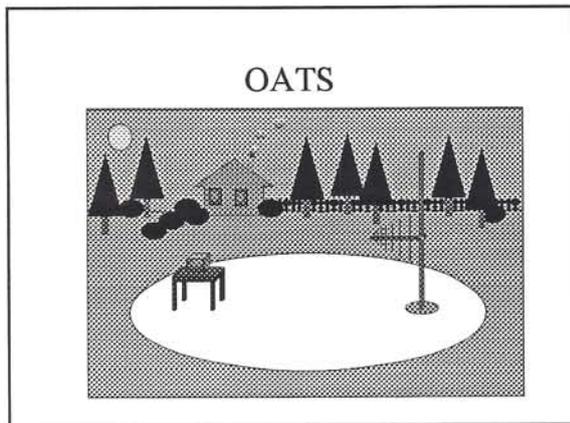


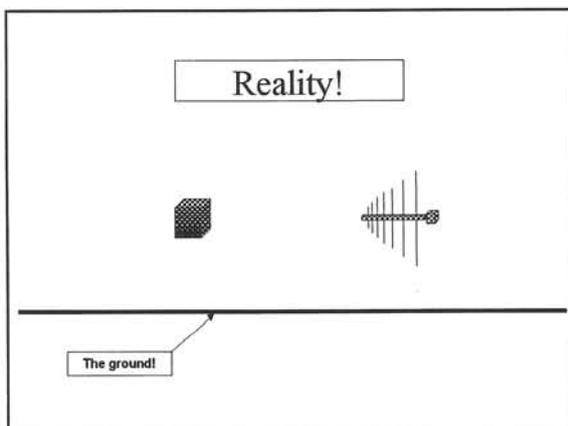


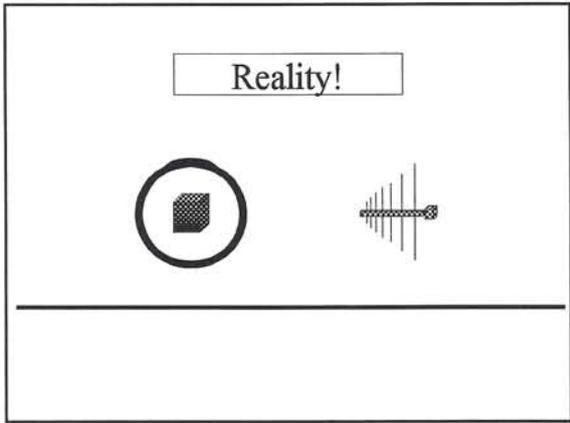


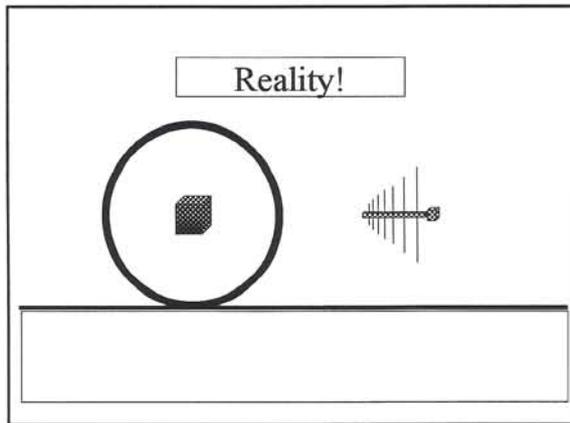


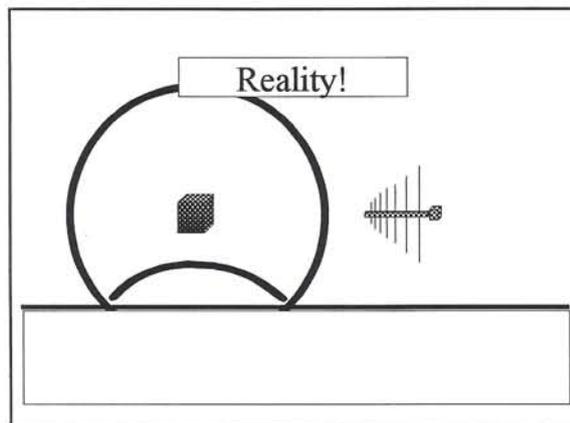


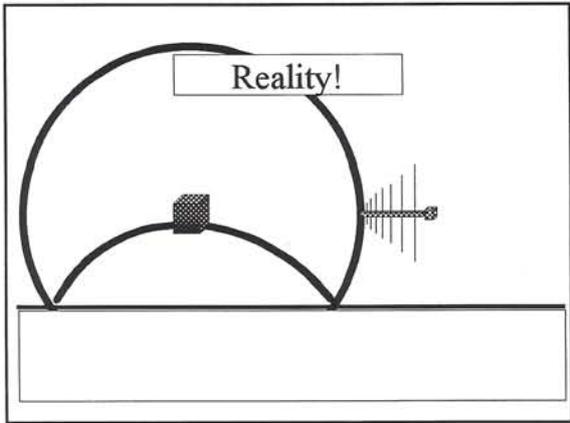


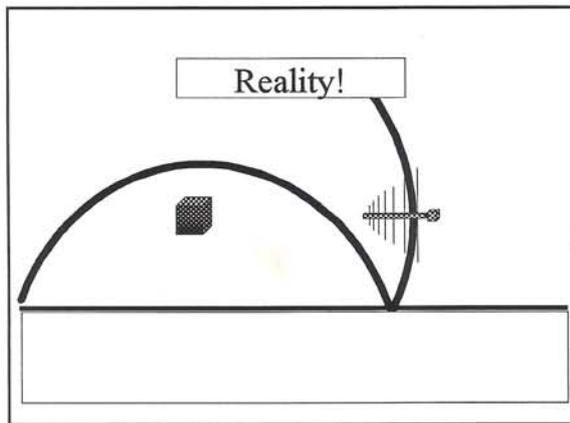


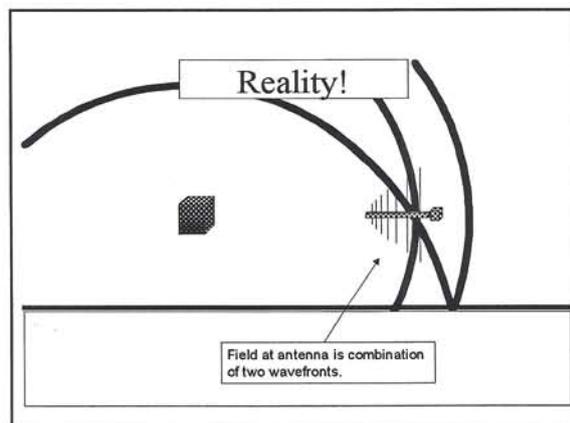




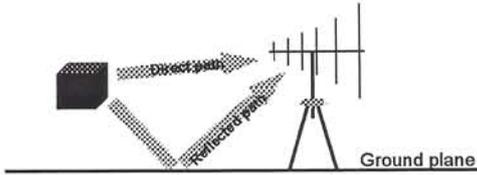








Ground plane reflection

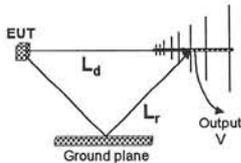


Signal strength at antenna = sum of direct and reflected signals.
Sum depends on phase difference.
If direct and reflected signals are in phase, result is an increased signal.
If out of phase, signals will cancel and result is reduction.

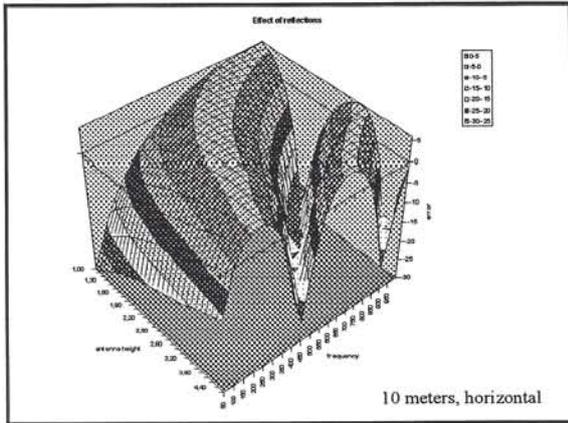
Ground plane?

- If reflections are such a problem, why have a ground plane?
- Any ground will have an indeterminate and variable reflection coefficient
- A metal ground plane is consistent and will provide repeatability.

On reflection.... Signals mutually interfere!



Path length difference
(DP) = $L_r - L_d$
If DP = integer x (wavelength)
then signals are in phase and V
increases.
At other values of DP the signals
are out of phase and V
decreases.

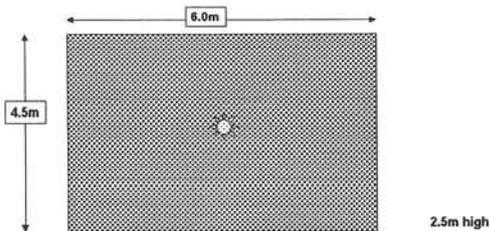


Screened rooms, the hall of mirrors

- If just one reflection causes such a problem, what happens in a screened room?
- Screened rooms are reflective on all 6 faces.
- The following visualisations are calculated using the 9 most prominent reflection paths to give an approximate solution.

Example

Screened room, source located centrally.

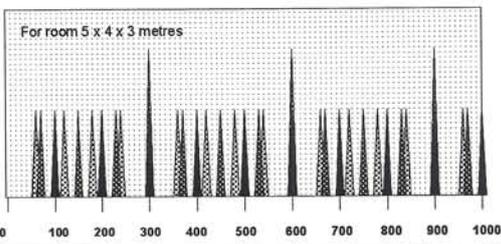


Resonances

- Effect of resonances is NOT included.
- In practice, these resonances will make the situation (in terms of measurement uncertainty) much worse than shown.
- Resonance frequencies will occur when the wavelength equals the distance between opposing faces.

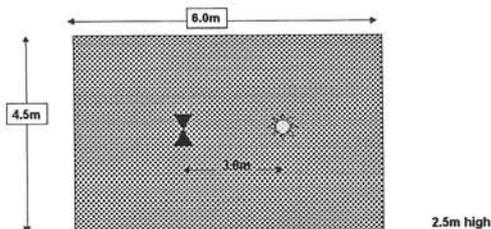
Resonances

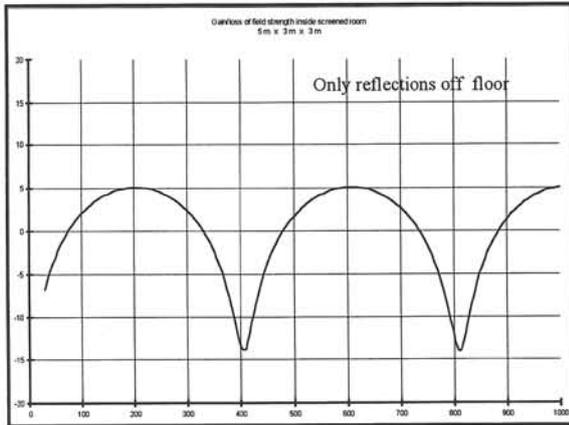
PLUS all the harmonic frequencies!

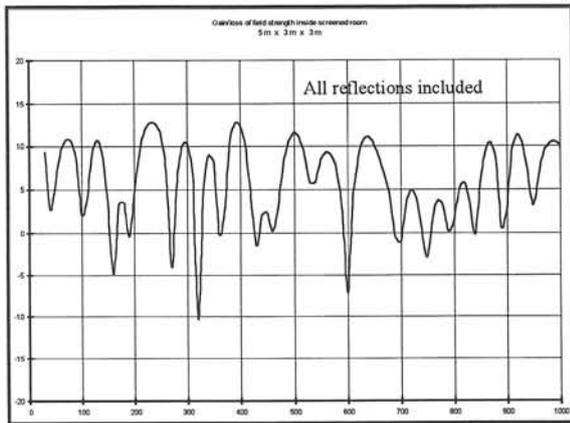


Example

Screened room, 3m test site installed centrally.







Finally

- If you would like a copy of the Excel spreadsheets used here today, just let me have your e-mail address and they will be sent to you.
- You can contact me on the Laplace Instruments booth, no.723, or at tech@laplace.co.uk

**Friis - Formeln:
Dämpfung im Freiraum bzw. Freifeld**

- Freiraum - theoretisches Modell, war technisch nicht realisierbar
- Halbraum, realisierbar auf Erdoberfläche, aber Einflüsse durch Leitfähigkeit des Erdbodens
- Freifeld - leitfähige Fläche (ground plane)

EMD

**Friis - Formeln:
Dämpfung im Freiraum bzw. Freifeld**

$$P_E / P_S = G_E G_S (\lambda / 4\pi r)^2$$

Dämpfungsmass

| Freiraum | Freifeld | |
|------------------------------------|---|----------------------|
| $D = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f$ | $D' = 40 \log r - 20 \log h' - 20 \log h''$ | |
| Abstand in km | Abstand Sende- und Empfangsdipol | Höhe Empfangsantenne |
| Frequenz in MHz | Höhe Sendeantenne | |

**Friis - Formeln:
Dämpfung im Freiraum bzw. Freifeld**

$$P_E / P_S = G_E G_S (\lambda / 4\pi r)^2$$

Dämpfungsmass

| Freiraum | Freifeld | |
|------------------------------------|---|----------------------|
| $D = 32,4 + 20 \log R + 20 \log f$ | $D' = 40 \log r - 20 \log h' - 20 \log h''$ | |
| Abstand in km | Abstand Sende- und Empfangsdipol | Höhe Empfangsantenne |
| Frequenz in MHz | Höhe Sendeantenne | |

EMD

Friis - Formeln:
Dämpfung im Freiraum bzw. Freifeld

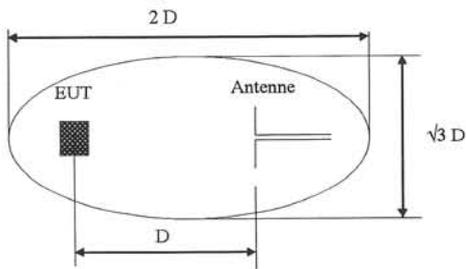
$$P_E / P_S = G_E G_S (\lambda / 4\pi r)^2$$

Dämpfungsmass

| Freiraum | Freifeld |
|---|--|
| 6 dB bei Verdopplung der Frequenz oder des Abstandes, 20 dB /Dekade | 12 dB bei Verdopplung des Abstandes, frequenzunabhängig, + 40 dB / Dekade |

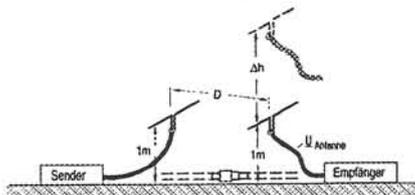
EMD

Abmessungen für Freifelder



EMD

Freifelddämpfung



$A = \frac{U_S}{U_E}$
 bzw.
 $A_{dB} = 20 \lg U_S - 20 \lg U_E$

EMD

Einfügungsdämpfung

- Einfluss der Antennenzuleitungen wird eliminiert
- bei direkt verbundenen Antennenleitungen
- mit dem Empfänger gemessene Senderspannung
- anstelle der am Sender angezeigten Spannung

επ)

Vergleich Einfügungsdämpfung und theoretische Messgeländedämpfung (FRÄNZ)

$$A = \frac{D \cdot f_m}{G_s G_e \cdot R \cdot 23,9}$$

$$A_{dB} = 20 \lg D + 20 \lg f_m - 27,6 - G_{s_{dB}} - G_{e_{dB}} - R_{dB} .$$

D : Antennenabstand in m f_m : Meßfrequenz in MHz
 G_s : Sendantennengewinn G_e : Empfangantennengewinn
 R : Einfluß der vom Boden reflektierten Welle.

επ)

Vergleich Einfügungsdämpfung und theoretische Messgeländedämpfung

$$A_{dB} = 20 \lg D + 20 \lg f_m - 27,6 - G_{s_{dB}} - G_{e_{dB}} - R_{dB}$$

D = 3 m : R_{dB} = 3,74...4,84 dB (Mittelwert 4,3 dB)
 D = 10 m : R_{dB} = 5,46...5,86 dB (Mittelwert 5,7 dB)
 D = 30 m : R_{dB} = 5,91...5,98 dB (Mittelwert 5,9 dB)

επ)

Freifelddämpfung

Für Halbwellendipole:

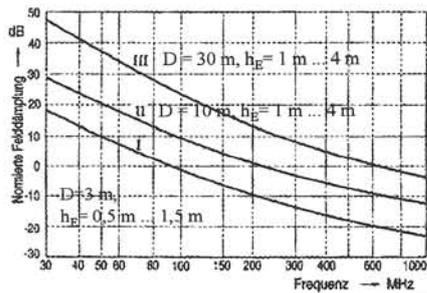
$$A = \frac{279,1 A_{F_S} A_{F_E}}{f_m E_{D_{max}}}$$

$$A_{dB} = -20 \lg f_m - 20 \lg E_{D_{max}} + 48,92_{dB} + A_{F_{S_{dB}}} + A_{F_{E_{dB}}}$$

A_{F_S} : Antennenfaktor der Empfangsantenne
 A_{F_E} : Antennenfaktor der Sendeantenne
 $E_{D_{max}}$: Maximale elektrische Feldstärke im Höhenbereich der Empfangsantenne, erzeugt durch 1 pW Strahlungsleistung der Sendeantenne.

EMD

Normierte theoretische Felddämpfung nach VDE 0877



EMD

Normierte Messgeländedämpfung nach VDE 0877

Antennenfaktoren beider Antennen werden von der gemessenen und der theoretischen Messgeländedämpfung subtrahiert.

VDE 0877 Teil 2

Bei der Messung der Einfügungsdämpfung erfolgt diese Subtraktion automatisch, wenn die Antennenüberträger („leitungsbundene“ Messung) von den Antennen gelöst und die Koaxialkabel in Reihe geschaltet werden.

EMD

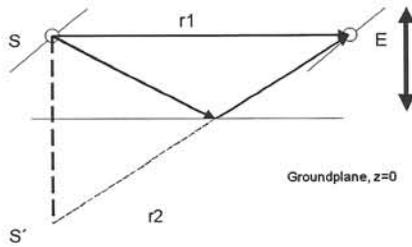
Eignung des Messgeländes als Freifeld

Abweichungen < 3 dB zwischen gemessener normierter Messgeländedämpfung und theoretischem Verlauf werden dem Ergebnis einer Störfeldstärkemessung hinzugefügt.

Abweichungen > 10 dB: Messgelände als Freifeld ungeeignet!

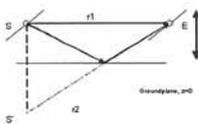
EMD

Störstrahlung: direkter Weg und reflektierter Strahl



EMD

Störstrahlung: direkter Weg und reflektierter Strahl



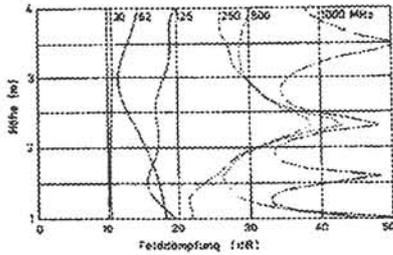
Laufzeitunterschiede führen zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz

Antennenscan

Ermittlung des höchsten Maximums

EMD

Strahlenoptik: Empfangsverhältnisse über einer Groundplane



Nach KOHLING, Siemens Firmenbuchdruck

EMD

Störemissionsmessungen (Störfeldstärkemessungen)

DIN-VDE 0877, CISPR 16 Teil 2 ANSI C 63.4

| Inhalt | Messung von Funkstörfeldstärken | Messmethoden und -geräte | Messmethoden für Funkstörungen an elektronischen Geräten |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Frequenzbereich | 10 kHz - 1 GHz | 10 kHz - 18 GHz | 10 kHz - 1 GHz |
| Messgenauigkeit | ± 3 dB | ± 3 dB, ohne Messgelände-fehler | spez. Forderungen bzgl. Eignung des Messgeländes |

EMD

Messung der elektrischen Feldstärke

Antennen als Sonden bzw. Wandler:
Elektrisches Feld influenziert Ladungsverschiebung in Leitern.

Zusammenhang zwischen
Feldstärke und Leerlaufklemmspannung:

$$h_{\text{eff}} = \frac{|U_0|}{|E_{\text{St}}|}$$

effektive Antennenlänge

EMD

Charakterisierung von Antennen

Antennenfaktor

$$AF = \frac{|E_{St}|}{|U_{St}|}$$

Übertragungsmass,
Umwandlungsmass

$$AF_{dB} = 20 \lg \frac{|E_{St}|}{|U_{St}|}$$

(messtechnisch im Fernfeld ermittelt, Kalibrierkurven)

EMD

Bestimmung der Störfeldstärken

$$E_{St_{dB\mu V/m}} = U_{St_{dB\mu V}} + AF_{dB}$$

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

$$H_{St_{dB\mu A/m}} = E_{St_{dB\mu V/m}} + 52 \text{ dB}$$

Antennenfaktor liegt typisch zwischen 0 dB ... 60 dB

empfindliche Antenne

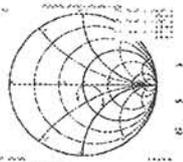
unempfindliche Antenne EMD

Messdipol für 433 MHz

EMD
EMD
EMD

Meßdipol
Typ DP-433

Der Meßdipol DP-433 ist für die Feldstärkemessung im ISM-Bereich 433 MHz vorgesehen. Mit einer Länge kleiner als die Wellenlänge sind Fraunhoferbedingungen von 100m Entfernung gemessen werden. Die Antenne darf nicht über der Halbleitung positioniert und verschoben gehalten werden, dies bedingt eine entsprechende Schirmung. Schutzkleidung mit einem Schutz der Hände zu tragen, um einen Kontakt zu vermeiden.



Technische Daten:

| | |
|------------------|---------------------|
| Empfänger | 100 MHz ... 433 MHz |
| Leistung | 100 mW |
| Antennenlänge | 20 cm |
| Antennenbreite | 20 cm |
| Antennenhöhe | 20 cm |
| Antennenmaterial | Aluminium |
| Antennenfarbe | Silber |
| Antennenmodell | DP-433 |

EMD

Breitband-Hybridantenne

20 MHz ... 1000 MHz

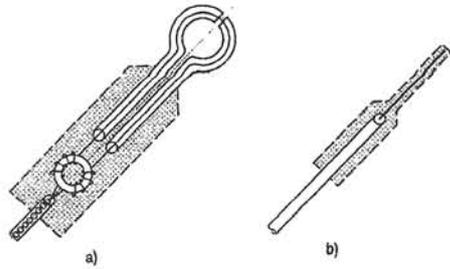
Antennenfaktor, Übertragungsmass

Antennenfaktor (dB/m) vs. Frequenz (MHz)

H-Feld-Antennen

- 11,5 mm Sägezahnrohr
- 10 mm Außenmaß
- Halbleitende Keramiksubstrat
- Ø 30 mm (ET 341)
- Innenleiter
- 30 x 4 Chip-Whisker
- Ring Keramische
- zum 30 Ω Mobilsystem

Schnüffelantennen, sniffer probes



a) H-Feld

b) E-Feld

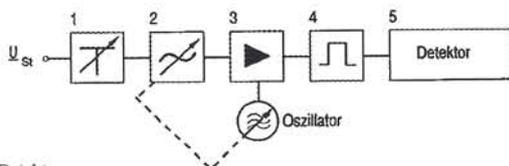
EMD

Selektive Messung

- Meßempfänger
 - CISPR 16
 - Vorgegebene Meßbandbreiten (-6dB)
 - Quasipeak-Detektor
 - Vorselektion
 - großer Dynamikbereich
- Spektrumsanalysator
 - Überblicksmessung
 - geringer Dynamikbereich

EMD

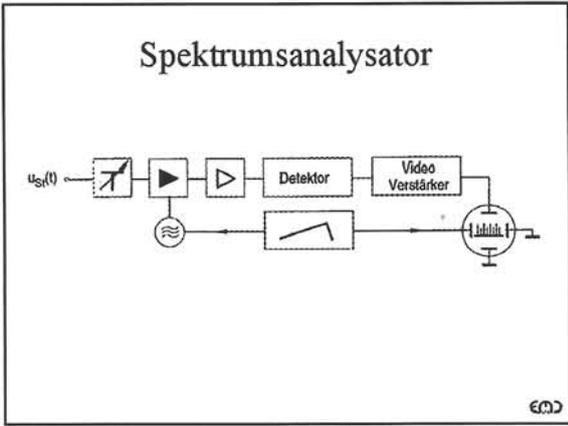
Messempfänger

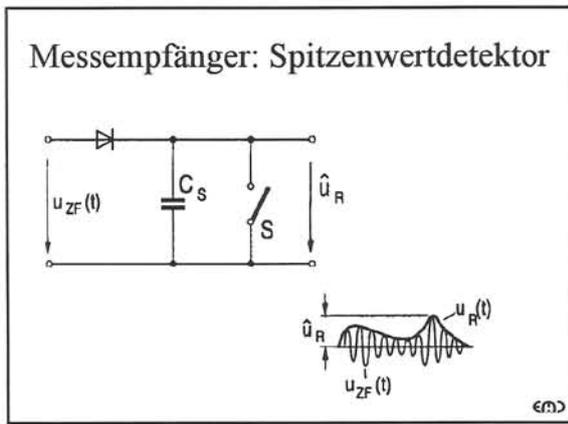


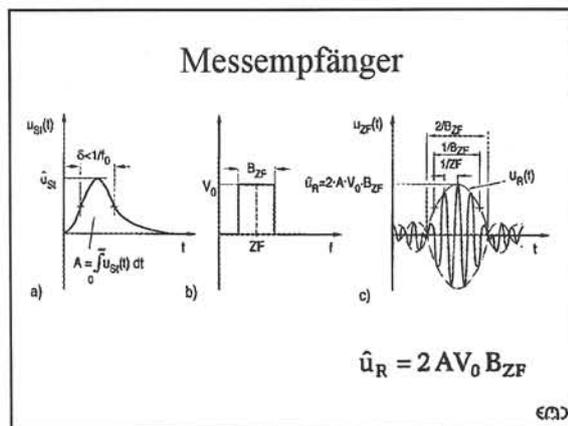
Detektoren:

- Spitzenwert,
- Quasi-Spitzenwert (Bewerteter Spitzenwert),
- Arithmetische Mittelwert oder
- Effektivwert

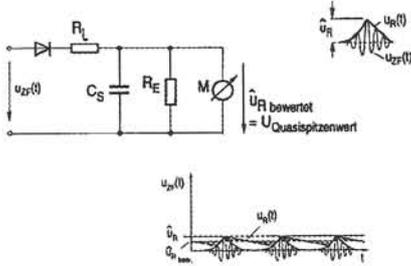
EMD



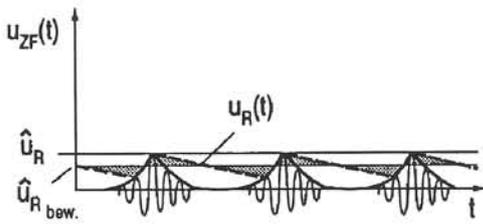




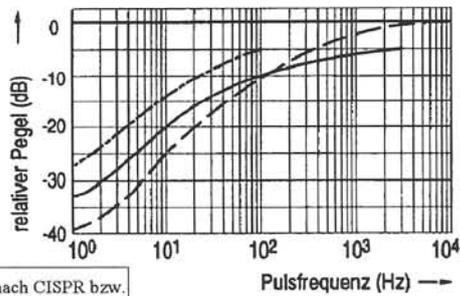
Mesempfänger:
Quasipeak-Detektor



Mesempfänger: QP-Detektor



Mesempfänger: QP-Detektor

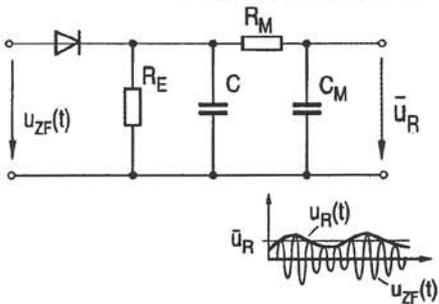


Zeitkonstanten QP-Detektor

| Spektralbereich | 10 kHz ... 150 kHz | 150 kHz ... 30 MHz | 30 MHz ... 1000 MHz |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| ZF-Bandbreite | 200 Hz | 9 kHz | 120 kHz |
| Aufladezeitkonstante $R_E C_E$ | 45 ms | 1 ms | 1 ms |
| Entladezeitkonstante $R_M C_M$ | 500 ms | 160 ms | 550 ms |
| Mechanische Zeitkonstante | 160 ms | 160 ms | 100 ms |

€M)

Messem Empfänger: Mittelwertdetektor



€M)

Vergleich der Detektoren

| Anzeigeart: | Spitzenwert | Quasi-Spitzenwert | Arithmeth. Mittelwert |
|--|--|--|--|
| Störgröße: $u(t) = \hat{u} \sin \omega t$ | $\hat{u} / \sqrt{2}$ | $\hat{u} / \sqrt{2}$ | $\hat{u} / \sqrt{2}$ |
| Amplitudendichte $U(f)$ | $\frac{2}{\sqrt{2}} U(f) B_{\text{imp}}$ | $\frac{2}{\sqrt{2}} U(f) B_{\text{imp}} \cdot g(f_{\text{rep}})$ | $\frac{2}{\sqrt{2}} U(f) \cdot f_{\text{rep}}$ |

➔ Anzeige von Störmeßempfängern in den verschiedenen Anzeigearten für diskrete Frequenzen f_s und für Amplitudendichten $U(f)$. f_{rep} : Impuls wiederholungs-frequenz; $g(f_{\text{rep}})$: Bewertungsfunktion; B_{imp} : effektive ZF-Bandbreite für Impulse (s. nachstehende Erläuterung).

€M)

Bemerkungen zur Bandbreite

B_{imp} - Impulsbandbreite,
Bandbreite eines idealen Bandfilters
(rechteckiger Durchlasskurve) gleicher Sprungantwort

CISPR-Bandbreiten sind bei 6dB Abfall definiert,
Unterschied zum Gauß-Filter beträgt ca. 5%, d. h.
 B_{imp} ca. $1,05 B_{6dB}$

übliche Bandbreitendefinition bei 3 dB Abfall
Unterschied beträgt ca. 50 %
 B_{imp} ca. $1,5 B_{3dB}$

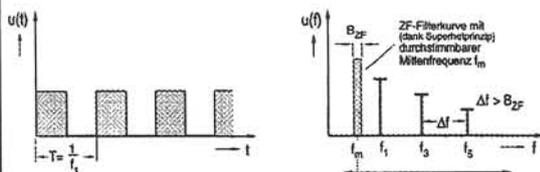
EMD

Signaleigenschaften

- Schmalbandige Signale (Linienspektrum)
 - Diskrete Frequenzen
 - Periodische Impulse ($f_1 > B_{ZF}$)
- Breitbandige Signale (Amplitudendichte)
 - Einmalige Impulse (Transienten)
 - Periodische Impulse ($f_1 < B_{ZF}$)
 - Nichtperiodische Impulse, Inkohärentes Spektrum

EMD

Schmalbandstörungen



Grundfrequenz bzw. Spektrallinienabstand \gg ZF-Filterbandbreite

EMD

Schmalbandstörungen

Grundfrequenz bzw. Spektrallinienabstand \gg ZF-Filterbandbreite

- auch AM- und FM- Trägerfrequenzen, wenn die wichtigen Modulationsprodukte innerhalb der ZF-Bandbreite liegen
- fällt jeweils nur eine Spektrallinie in die ZF-Bandbreite, so zeigt der Messempfänger unabhängig von der Bandbreite den durch $2^{1/2}$ geteilten Scheitelwert der sinusförmigen ZF-Spannung an - die Anzeige ist demnach in Effektivwerten kalibriert

EMD

Schmalbandstörungen

Grundfrequenz bzw. Spektrallinienabstand \gg ZF-Filterbandbreite

- Identifikation durch Verstimmung der Mittenfrequenz des Empfängers um $\pm B_{ZF}$:
Anzeige geht um mehr als 3 dB zurück
- konstante Anzeige bei Umschaltung auf größere ZF - Bandbreiten (Änderung $< 3\text{dB}$ zulässig)
- gleiche Anzeige sowohl bei Mittelwert als auch bei Spitzenwertmessung

EMD

Breitbandstörungen

Grundfrequenz bzw. Spektrallinienabstand \gg ZF-Filterbandbreite

- Anzeige hängt von der Empfängerbandbreite ab

$$\hat{u}_R = U(f) B_{ZF} = 2 \hat{u} B_{ZF}$$

physikalische Amplitudendichte (Messwert)

EMD

Kohärente / Inkohärente Breitbandstörungen

Kohärente Störungen

$$\Delta U = 20 \lg \frac{B_{ZF1}}{B_{ZF2}} \text{ dB}$$

Inkohärente Störungen (random noise)

$$\Delta U = 10 \lg \frac{B_{ZF1}}{B_{ZF2}} \text{ dB}$$

EMD

Genormte ZF - Bandbreiten

| Spektralbereich | ZF-Bandbreite |
|---------------------|---------------|
| 10 kHz ... 150 kHz | 200 Hz |
| 150 kHz ... 30 MHz | 9 kHz |
| 30 MHz ... 1000 MHz | 120 kHz |

EMD

Amplitudendichte

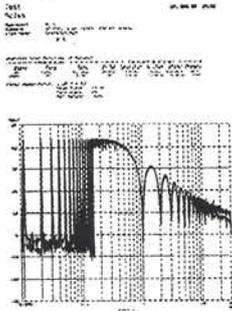
$$U(f) = \frac{\hat{u}_R}{B_{ZF}} = 2 A V_0 = 2 \hat{u} \tau V_0$$

Bezug auf Bandbreite, häufig 1 MHz
gemessene (physikalische) Amplitudendichte in

$$\mu\text{V/Hz bzw. dB}_{\mu\text{V/Hz}}$$

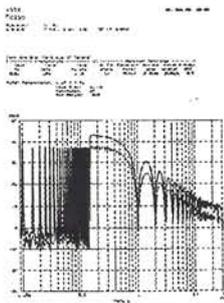
EMD

Vergleich von Detektoren (1)



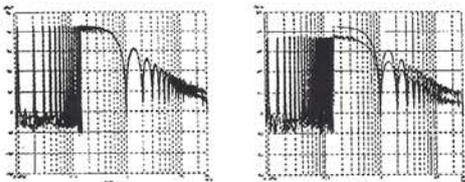
EMD

Vergleich von Detektoren (2)



EMD

Vergleich von Detektoren (3)



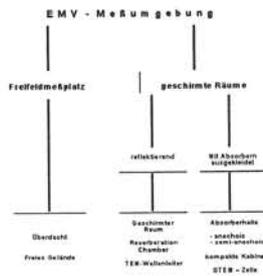
EMD

Störemissionsmessung EMI

- Referenz: Freifeld
- Normen: Gegenwärtige Situation (CISPR 16, ANSI C 63-4, DIN VDE 0876 und 0877)
- Alternative Möglichkeiten:
 - Absorberraum mit Groundplane
 - Absorberraum
 - GTEM - Zelle

EMD

Meßumgebungen



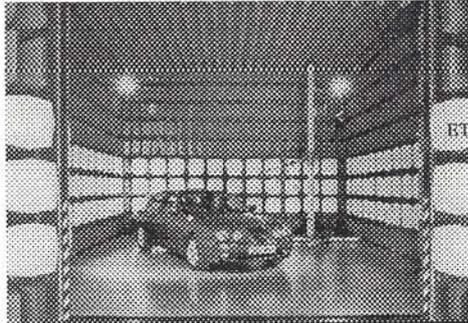
EMD

Messumgebung: Normen

- Freifeld mit leitender Erdpotentialfläche (Groundplane)
- Referenz: Theoretische Freifelddämpfung
- Absorberraum mit Groundplane (semi-anechoic)
- Absorberraum (fully anechoic)
- GTEM - Zelle (Spezieller Wellenleiter)

EMD

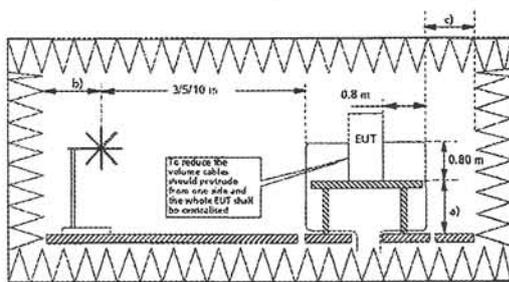
Absorberraum (semi-anechoic)



ETS, Austin,
TX



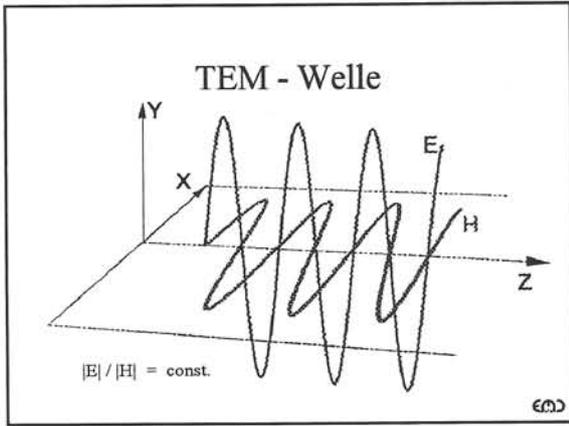
Absorberraum (fully anechoic)

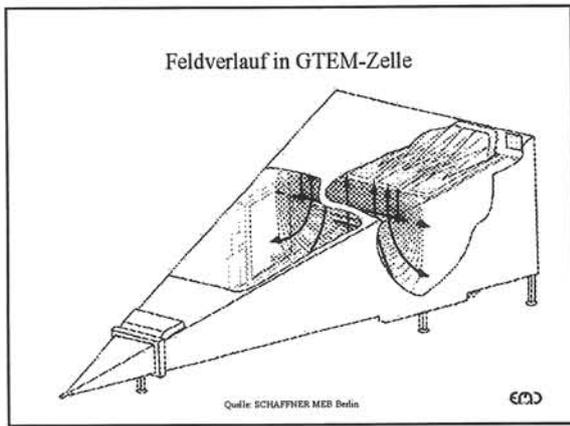


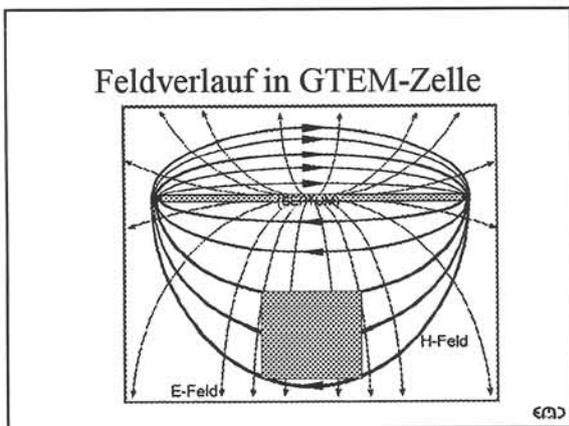
Messumgebung: Normen

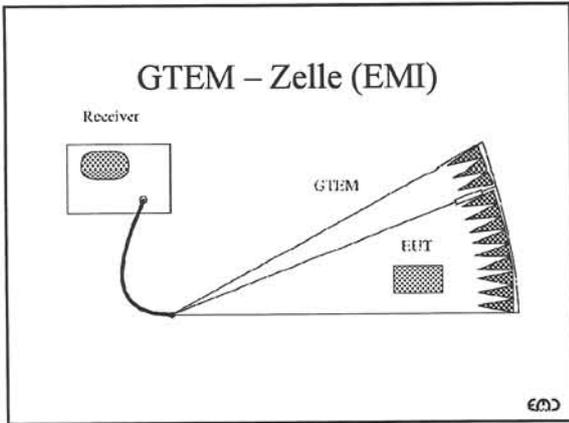
- Freifeld mit leitender Erdpotentialfläche (Grounplane)
- Referenz: Theoretische Freifelddämpfung
- Absorberraum mit Groundplane (semi-anechoic)
- Absorberraum (fully anechoic)
- GTEM - Zelle (Spezieller Wellenleiter)

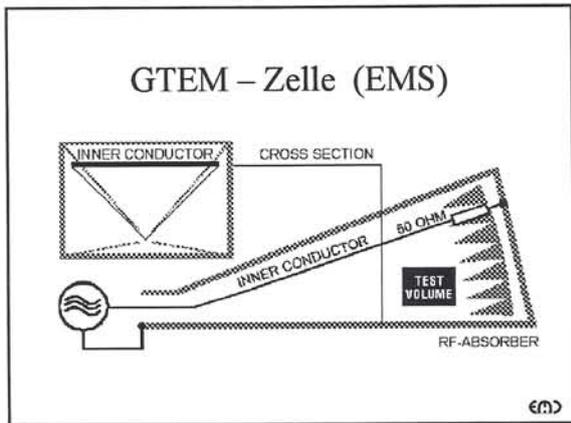


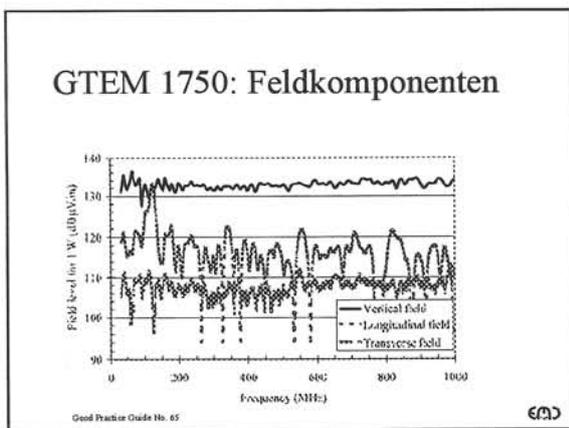




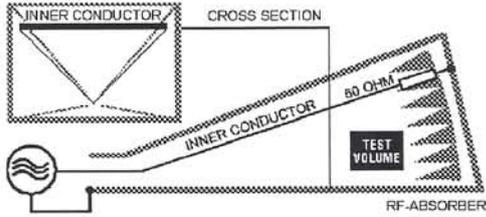






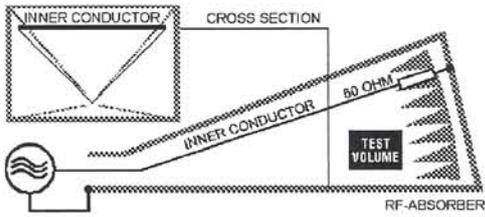


GTEM - Zelle

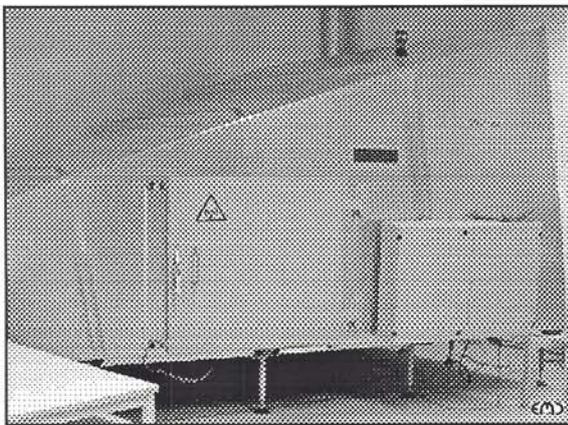


EMD

GTEM - Zelle



EMD

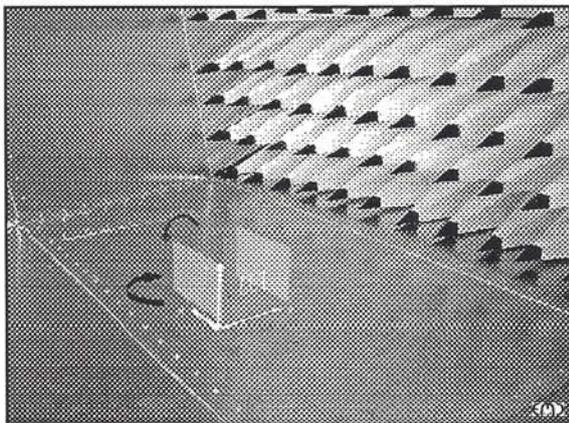


1. Messung: $|V_1|^2 = P_y^2 + k_0^2 M_x^2$
 2. Messung: $|V_2|^2 = P_z^2 + k_0^2 M_x^2$
 3. Messung: $|V_3|^2 = P_z^2 + k_0^2 M_y^2$

(M)

1. Messung: $|U_1|^2 = P_y^2 = b_{11}$
 2. Messung: $|U_2|^2 = P_z^2 = b_{22}$
 3. Messung: $|U_3|^2 = P_x^2 = b_{33}$

(M)

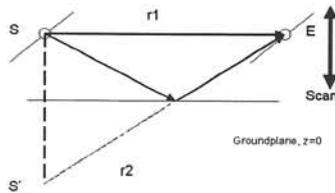


Korrelationsalgorithmus nach P. WILSON (1995)

- Bestimmung der elektrischen und / oder magnetischen Momente aus unterschiedlichen Orientierungen des Prüflings
 - 3 Orientierungen: 3-Dipol-Modell
 - 9 Orientierungen: allgemeiner Fall
- Berechnung der abgestrahlten Gesamtleistung
 $P_0 \sim b_{11} + b_{21} + b_{31}$
- Berechnung der Freifeldmeßwerte
 (Simulation Antennenscan)

EMD

Abstrahlung des Prüflings für ein dominantes
(elektrisches) Dipolmoment, maximale Kopplung



$$E \sim (P_0)^{1/2} \cdot g_{\max}(r_1, r_2)$$

Simulation Antennenscan im Freifeld
(für horizontale und vertikale Polarisation)
durch
Maximierung des Geometriefaktors

EMD

Literatur

- Schwab, A. J.: Elektromagnetische Verträglichkeit
Berlin,...; Tokio: Springer 1996
- Henning, L. H. Electromagnetic Anechoic Chambers
IEEE Press 2002
- E DIN EN 61000 - 20 Prüfung und Messverfahren –
Messung der Störaussendung und
Störfestigkeit in transversal-elektro-
magnetischen (TEM-)Wellenleitern.
Juni 2003
Berlin: Beuth 2003

EMD
