

# 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

---

---

---

---

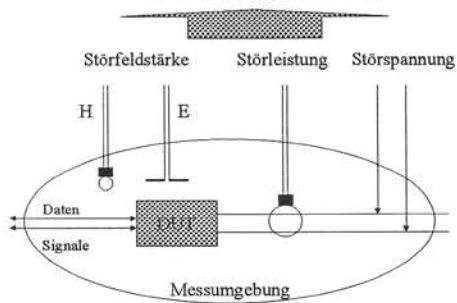
---

---

---

---

## Störemissionsmessung



EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Störemission: geleitet - gestrahlt



EMD

---

---

---

---

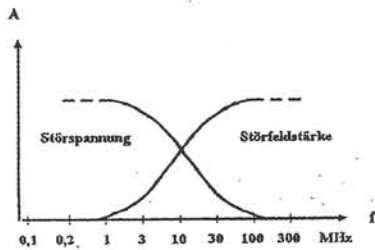
---

---

---

---

## Störemission: geleitet - gestrahlt



EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Störemissionsmessung

Electromagnetic Interference, EMI

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

EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Störemissionsmessung - Geleitete Störgrößen -

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

EMD

---

---

---

---

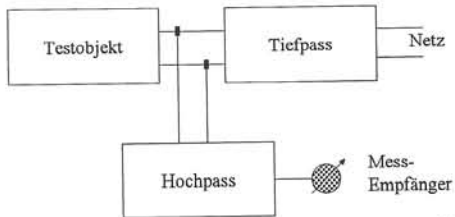
---

---

---

---

## 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-( $\Delta$ )-Netznachbildung	ohne Bedeutung, keine Meßvorschrift vorhanden

EMD

---

---

---

---

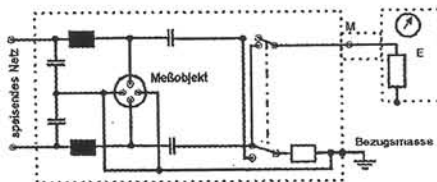
---

---

---

---

## V-Netznachbildungen (Prinzip)



EMD

---

---

---

---

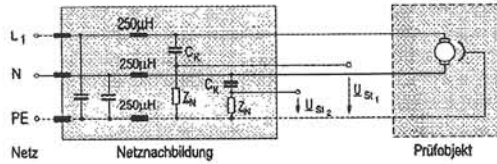
---

---

---

---

## V-Netznachbildung (unsymmetrische Störspannungen)



Bezugsleiter: N für energetische Betrachtungen, Knotenspannungen  
PE für Störspannungsbetrachtungen

EMD

---

---

---

---

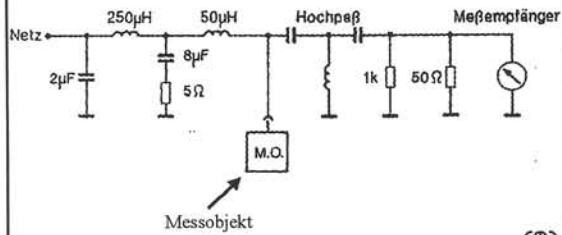
---

---

---

---

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



EMD

---

---

---

---

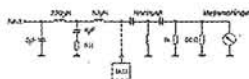
---

---

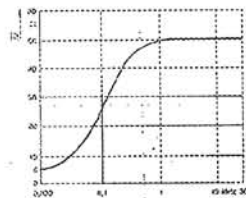
---

---

## Netznachbildung, Impedanzverlauf



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



EMD

---

---

---

---

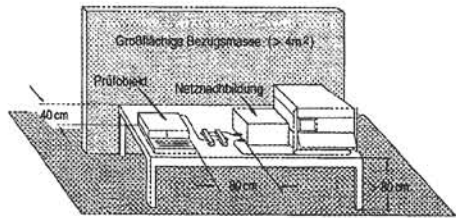
---

---

---

---

## Störspannungsmessung Messaufbau



EMD

---

---

---

---

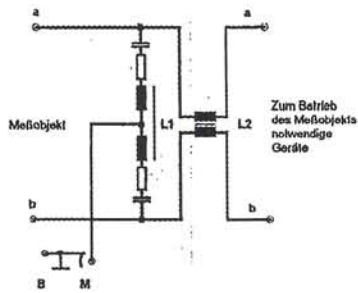
---

---

---

---

## T-Netznachbildungen (Prinzip)



EMD

---

---

---

---

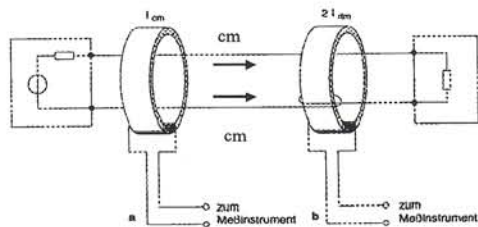
---

---

---

---

## Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung



cm - Gleichtaktsignal

EMD

---

---

---

---

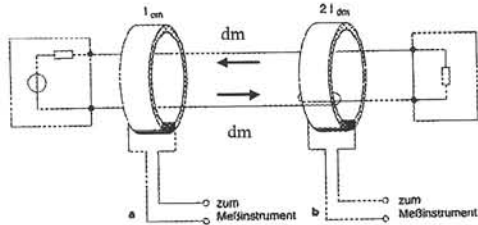
---

---

---

---

### Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung



dm - Gegentaktsignal




---

---

---

---

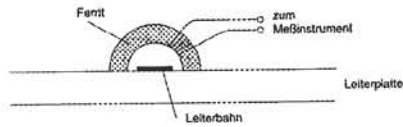
---

---

---

---

### Messung geleiteter Störgrößen: Störstrommessung auf Leiterplatte




---

---

---

---

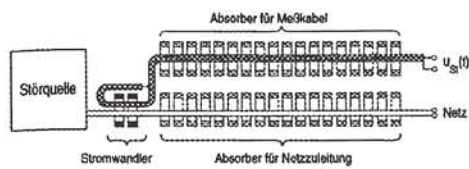
---

---

---

---

### Messung geleiteter Störgrößen: Störleistungsmessung



nach MEYER DE STADELHOFEN




---

---

---

---

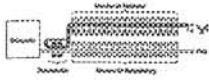
---

---

---

---

## Messung geleiteter Störgrößen: Störleistungsmessung



Einfügedämpfung von  
17 dB bei 50  $\Omega$ ,  
Messwert der Störspannung in dB $_{\mu V}$  ist  
gleich dem Zahlenwert der Störleistung  
am Eingang der Zange

1 pW entspricht 7,07  $\mu V$  an 50  $\Omega$   
0 dB $_{pW}$  entspricht 17 dB $_{\mu V}$  an 50  $\Omega$

$$P = U + K$$

in dB $_{pW}$             in dB $_{\mu V}$             Korrekturwert in dB

EMD

---

---

---

---

---

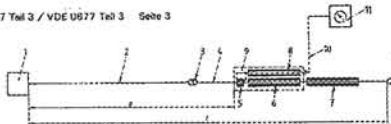
---

---

---

## 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

- |  |   |
|--|---|
| • Geleitete Störgrößen<br>(Spannung, Leistung)         | • Gestrahlte Störgrößen<br>(Feldstärke) |
| • bis 30 MHz für<br>Störspannungen<br>(LISN)           | • Freifeld                              |
| • bis 300 MHz für<br>Störleistungen<br>(Absorberzange) | • 30 MHz $\leq f \leq$ 1GHz             |
|  | • über 1 GHz                            |
|  | • Alternative<br>Meßumgebungen          |

EMD

---

---

---

---

---

---

---

---



## Messung gestrahlter Störgrößen: Störfeldstärkemessung

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

EMD

---

---

---

---

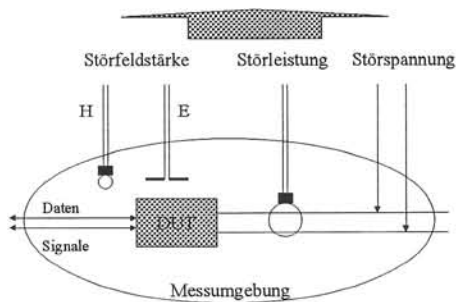
---

---

---

---

## Störemissionsmessung



EMD

---

---

---

---

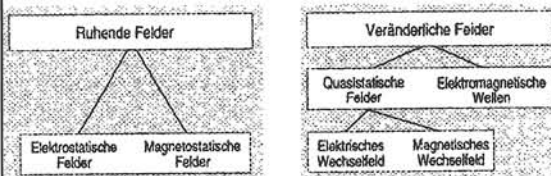
---

---

---

---

## Theoretische Grundlagen: Felder



EMD

---

---

---

---

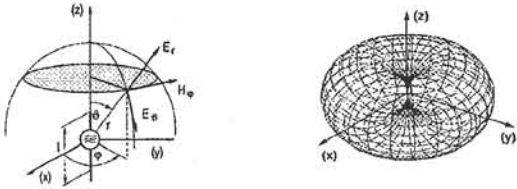
---

---

---

---

Theoretische Grundlagen:  
Hertzscher Dipol



EMD

---

---

---

---

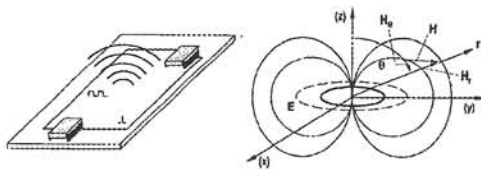
---

---

---

---

Theoretische Grundlagen:  
Stromschleife



EMD

---

---

---

---

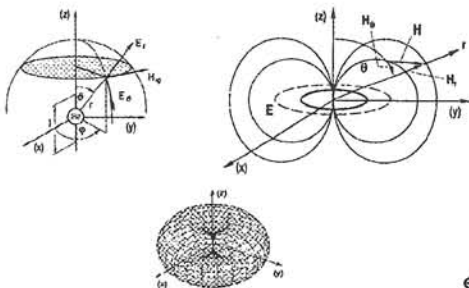
---

---

---

---

Theoretische Grundlagen



EMD

---

---

---

---

---

---

---

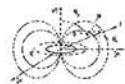
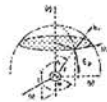
---

### 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 $Z_0$

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

◀▶

---

---

---

---

---

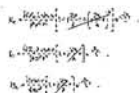
---

---

---

## 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)

---

---

---

---

---

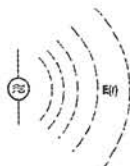
---

---

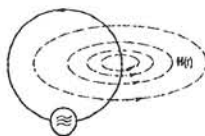
---

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)

---

---

---

---

---

---

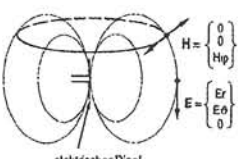
---

---

Theoretische Grundlagen

## Babinet - Dualität zwischen Hertzischem und Fitzgeraldschem Dipol

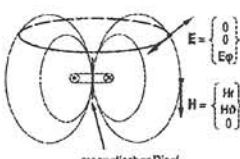
### Nahfeld



elektrischer Dipol

$$H = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ H_{\phi} \end{pmatrix}$$

$$E = \begin{pmatrix} E_r \\ E_{\theta} \\ 0 \end{pmatrix}$$



magnetischer Dipol

$$E = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ E_{\phi} \end{pmatrix}$$

$$H = \begin{pmatrix} H_r \\ H_{\theta} \\ 0 \end{pmatrix}$$

Schematische Darstellung je eines  
quasistatischen und magnetischen Nahfeldes

EMD

---

---

---

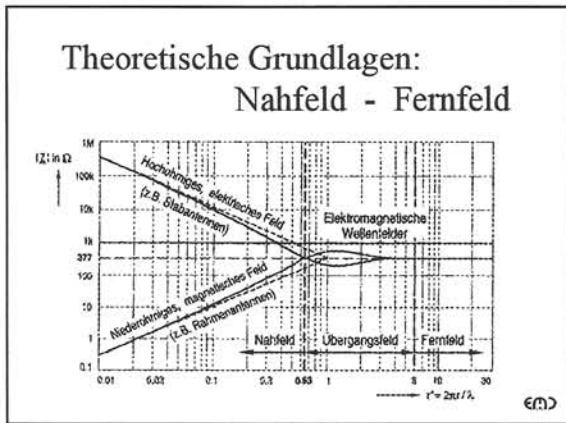
---

---

---

---

---




---

---

---

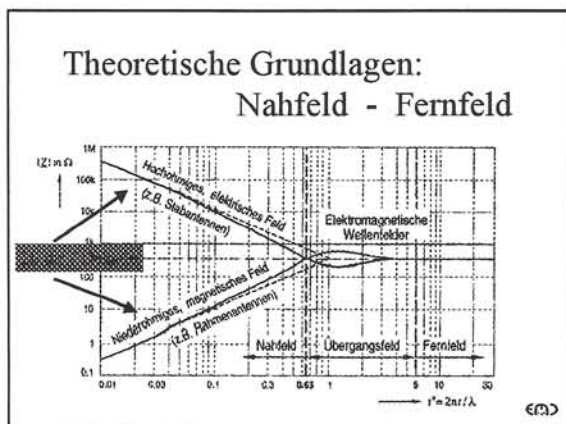
---

---

---

---

---




---

---

---

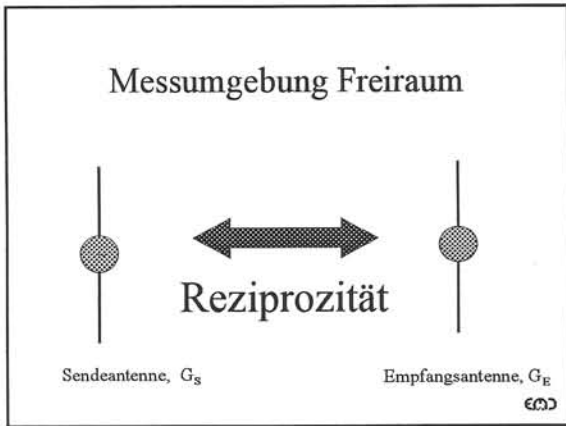
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

- ### 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'.

---

---

---

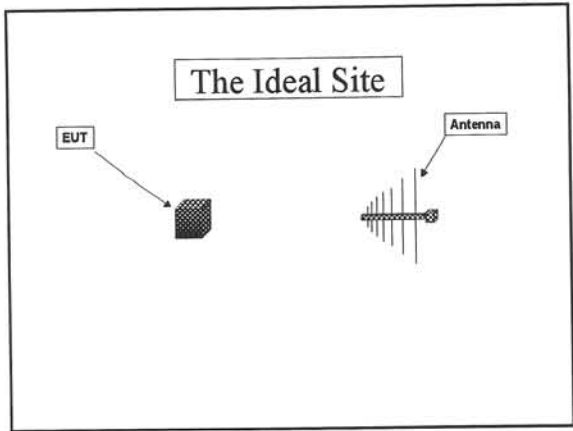
---

---

---

---

---




---

---

---

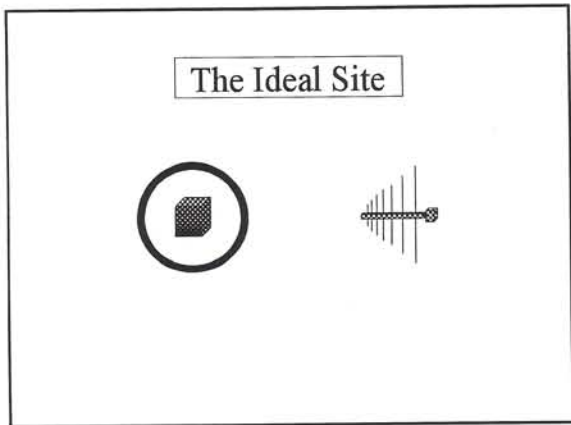
---

---

---

---

---




---

---

---

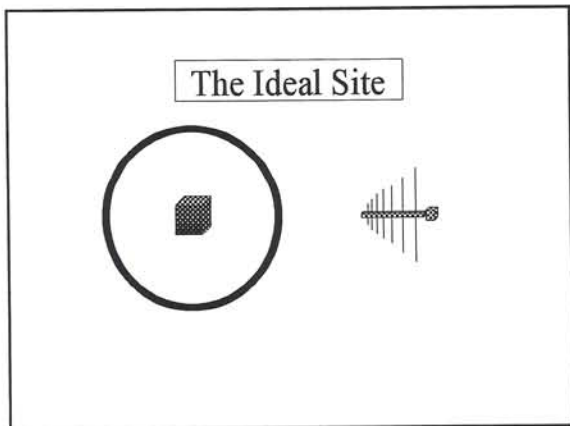
---

---

---

---

---




---

---

---

---

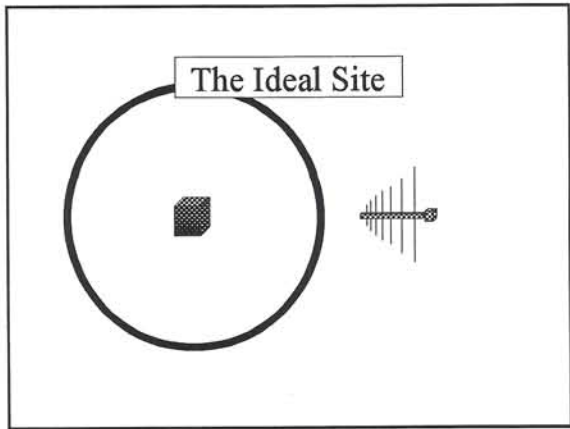
---

---

---

---





---

---

---

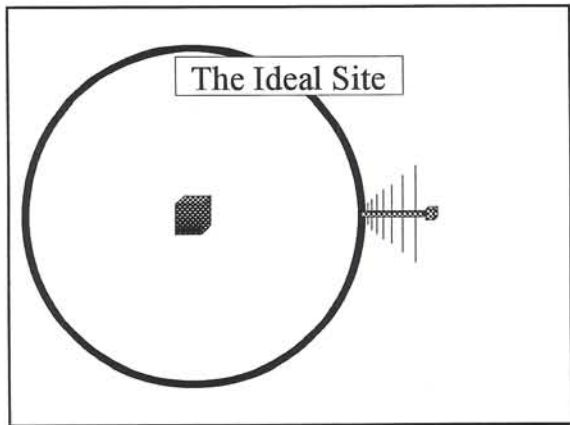
---

---

---

---

---



---

---

---

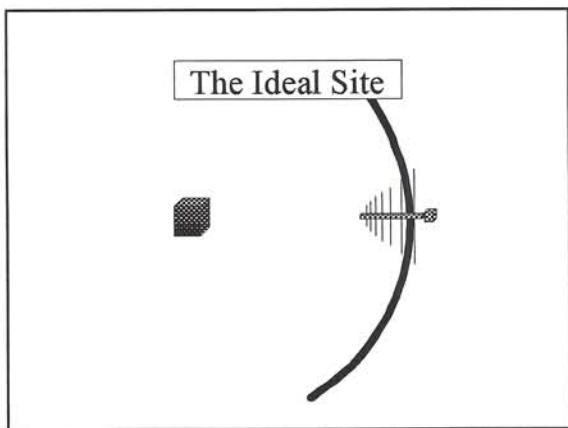
---

---

---

---

---



---

---

---

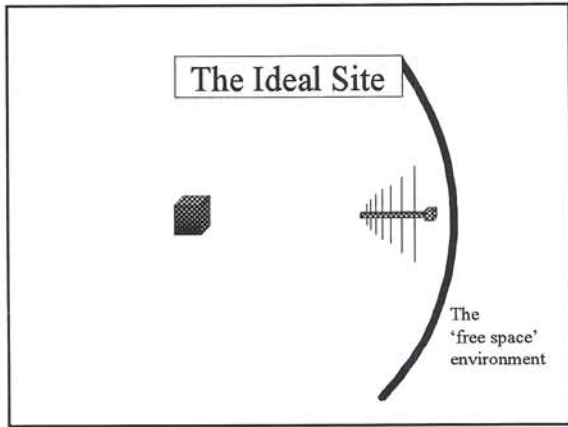
---

---

---

---

---



---

---

---

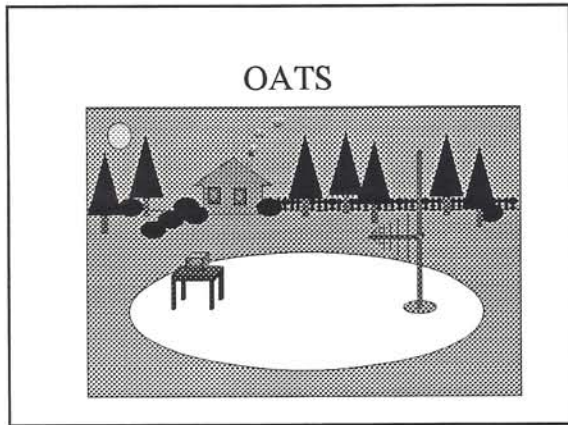
---

---

---

---

---



---

---

---

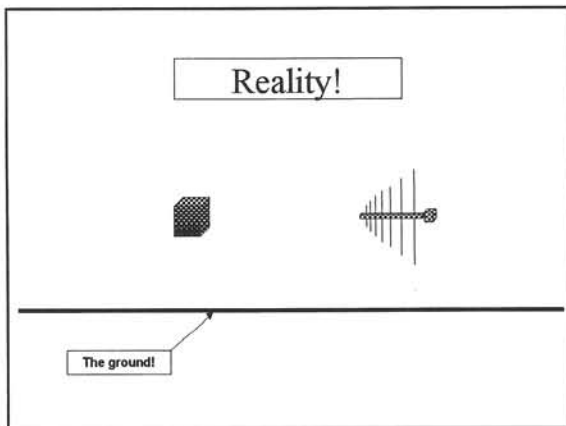
---

---

---

---

---



---

---

---

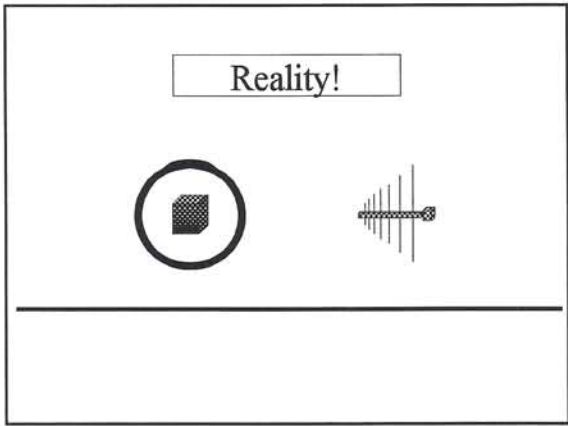
---

---

---

---

---



---

---

---

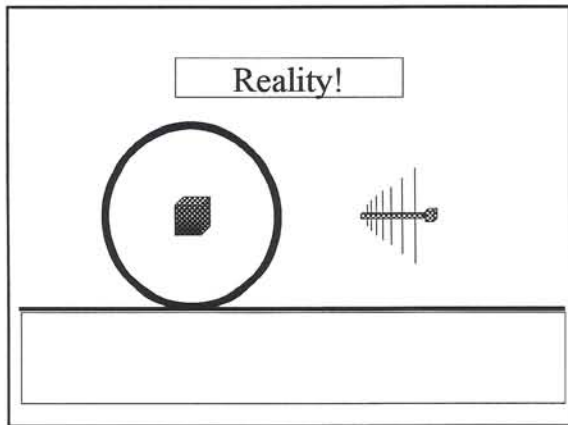
---

---

---

---

---



---

---

---

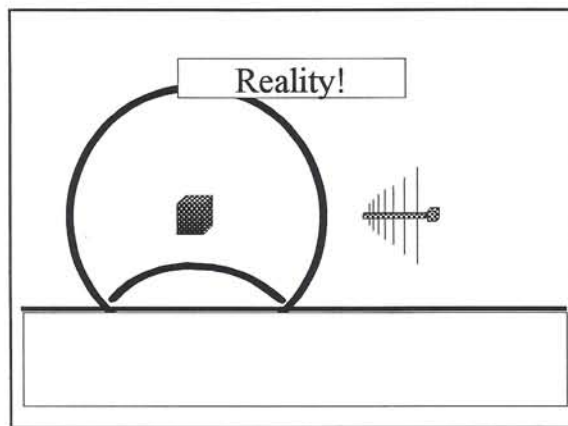
---

---

---

---

---



---

---

---

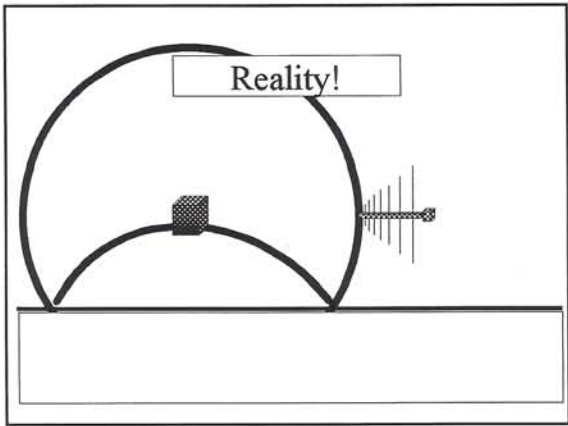
---

---

---

---

---




---

---

---

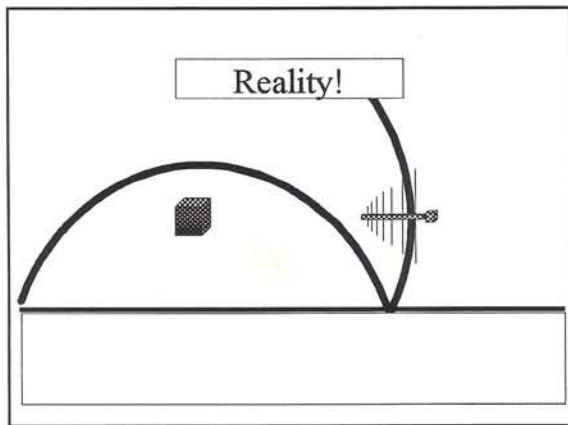
---

---

---

---

---




---

---

---

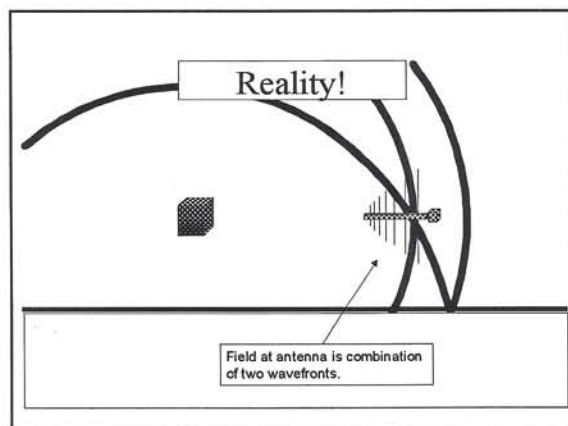
---

---

---

---

---




---

---

---

---

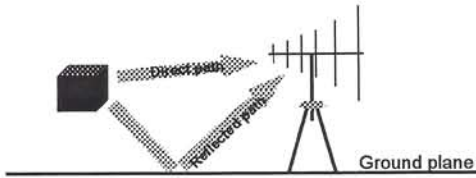
---

---

---

---

### 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.

---

---

---

---

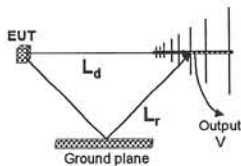
---

---

---

---

### 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.

---

---

---

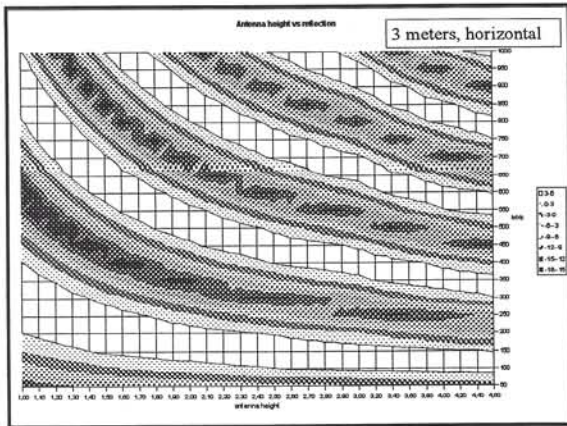
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

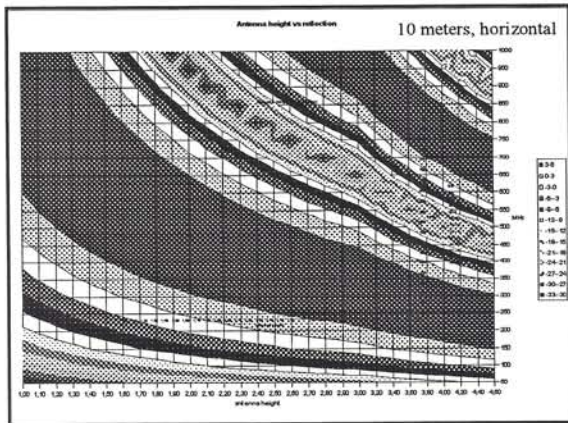
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

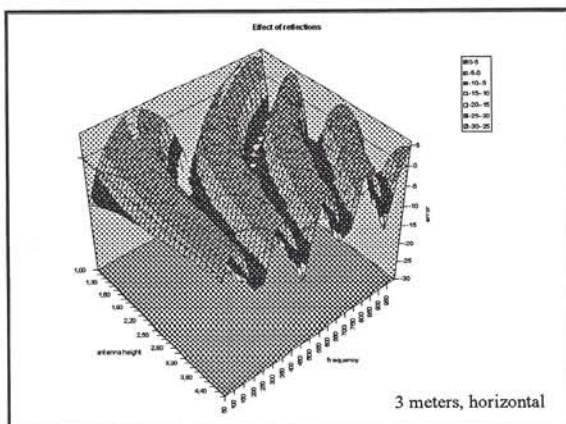
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

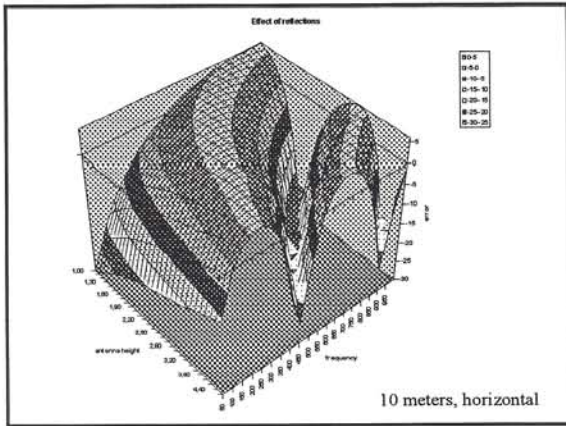
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

### 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.

---

---

---

---

---

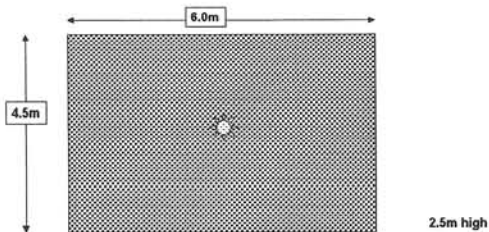
---

---

---

### 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.

---

---

---

---

---

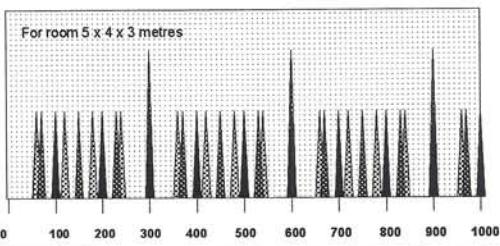
---

---

---

## Resonances

PLUS all the harmonic frequencies!



---

---

---

---

---

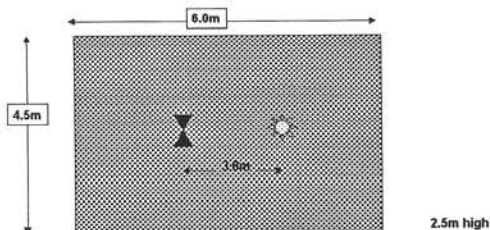
---

---

---

## Example

Screened room, 3m test site installed centrally.



---

---

---

---

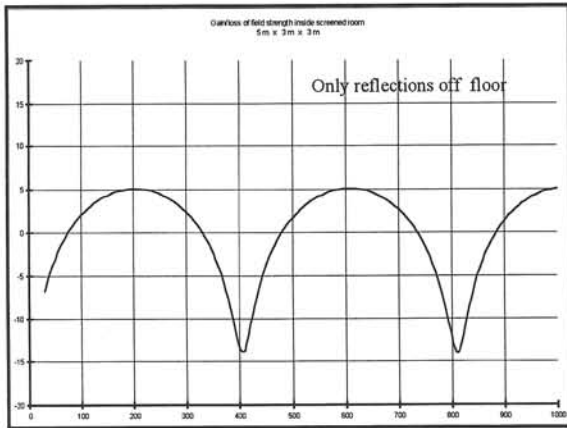
---

---

---

---






---

---

---

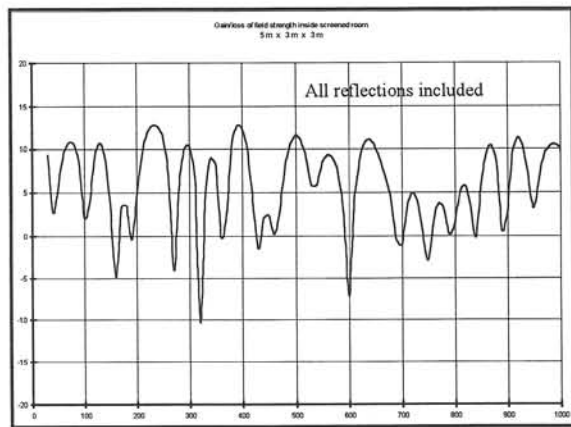
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---

**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](mailto: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	

---

---

---

---

---

---

---

---

**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

---

---

---

---

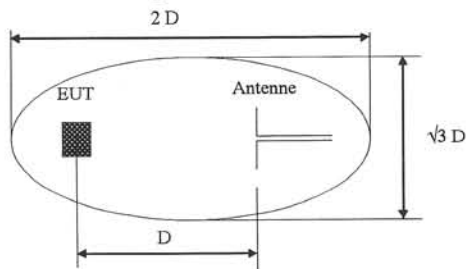
---

---

---

---

**Abmessungen für Freifelder**



EMD

---

---

---

---

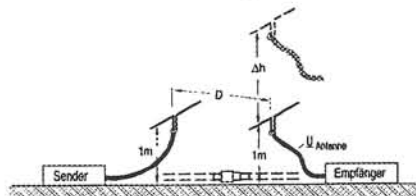
---

---

---

---

**Freifelddämpfung**



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

EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

### Einfügungsämpfung

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

επ)

---

---

---

---

---

---

---

---

### Vergleich Einfügungsämpfung 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<sub>s</sub> : Sendantennengewinn      G<sub>E</sub> : Empfangantennengewinn  
 R : Einfluß der vom Boden reflektierten Welle.

επ)

---

---

---

---

---

---

---

---

### Vergleich Einfügungsämpfung 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<sub>dB</sub> = 3,74...4,84 dB    (Mittelwert 4,3 dB)  
 D = 10 m :    R<sub>dB</sub> = 5,46...5,86 dB    (Mittelwert 5,7 dB)  
 D = 30 m :    R<sub>dB</sub> = 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

---

---

---

---

---

---

---

---

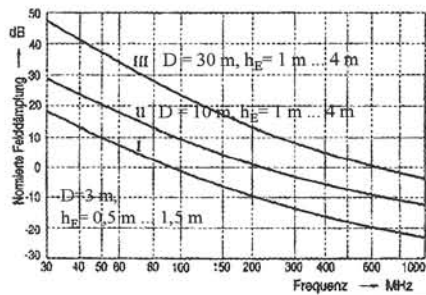
---

---

---

---

## 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

---

---

---

---

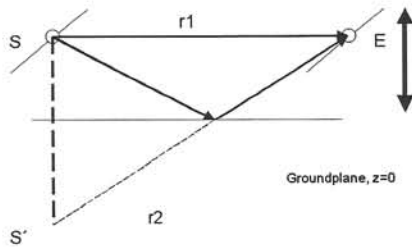
---

---

---

---

## Störstrahlung: direkter Weg und reflektierter Strahl



EMD

---

---

---

---

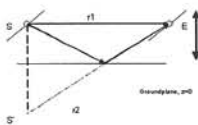
---

---

---

---

## Störstrahlung: direkter Weg und reflektierter Strahl



Laufzeitunterschiede führen zu konstruktiver oder destruktiver Interferenz

Antennenscan

Ermittlung des höchsten Maximums

EMD

---

---

---

---

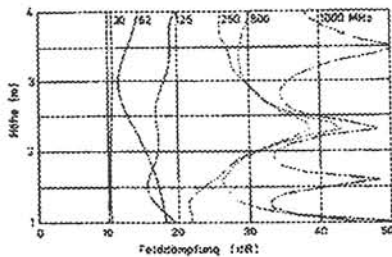
---

---

---

---

## 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

---

---

---

---

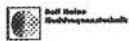
---

---

---

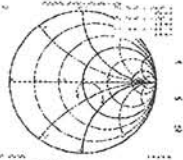
---

## Messdipol für 433 MHz



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 Halbwertsbreite schwingen und vertikal gehalten werden. Diese Bedingung muss eine ebene, reflektierende, schwingungsfreie, mit einem 100 Ohm Widerstand im Zentrum belastet werden, um einen 50 Ohm-Eintrag zu erzielen.



**Technische Daten:**

Empfandbarkeit	200V ... 10kV + 10dB
Leistung	100W
Spannung	100V bis 10kV
Umfang	100mm
Material	Alu-Messing
Montage	20mm Bohrung
Verpackung	20mm Bohrung
Bestellnummer	DP-433

EMD

---

---

---

---

---

---

---

---



## Breitband-Hybridantenne

20 MHz ... 1000 MHz

---

---

---

---

---

---

---

---

## Antennenfaktor, Übertragungsmass

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

---

---

---

---

---

---

---

---

## H-Feld-Antennen

- 0,5 mm Sägezahnrand
- 30 mm Außendurchmesser
- 0,3 mm Innendurchmesser
- Innenleiter
- 30-40 Ohm Chip-Widerstand
- RING Kerbschlitze
- zur SO-Mob

---

---

---

---

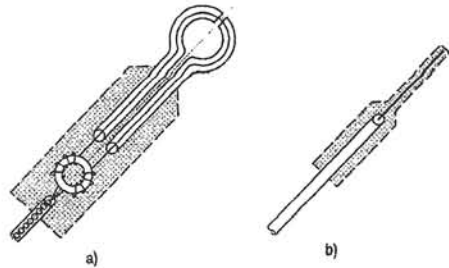
---

---

---

---

## 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

---

---

---

---

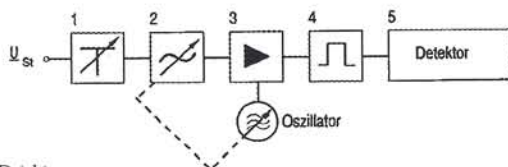
---

---

---

---

## Messempfänger



Detektoren:

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

EMD

---

---

---

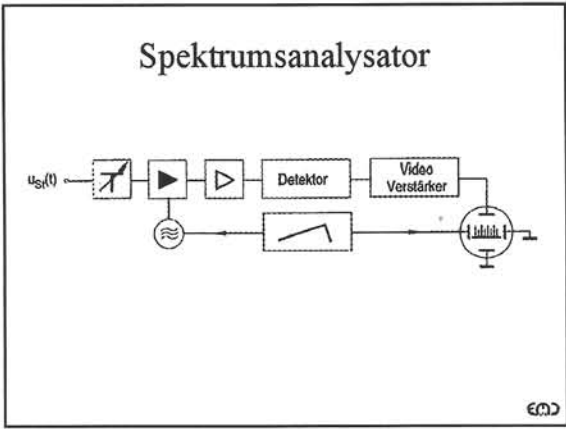
---

---

---

---

---




---

---

---

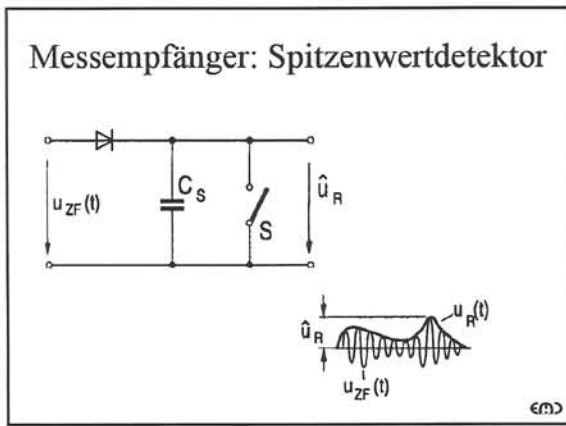
---

---

---

---

---




---

---

---

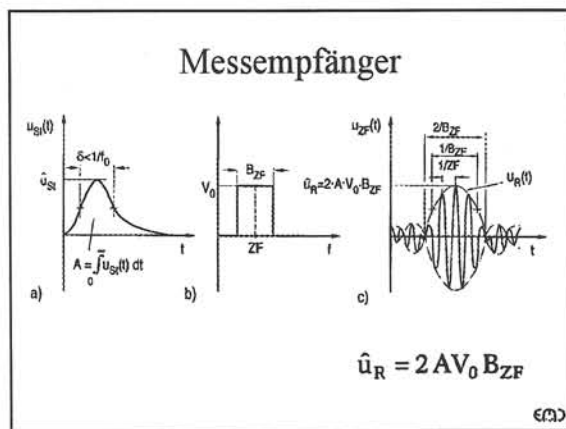
---

---

---

---

---




---

---

---

---

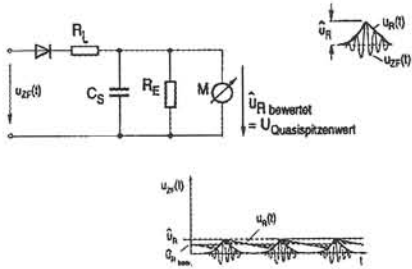
---

---

---

---

Mesempfänger:  
Quasipeak-Detektor



EMD

---

---

---

---

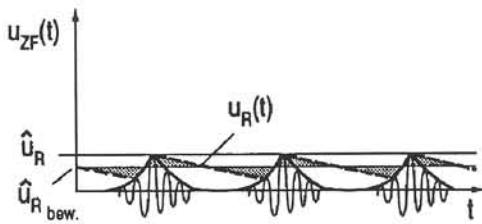
---

---

---

---

Mesempfänger: QP-Detektor



EMD

---

---

---

---

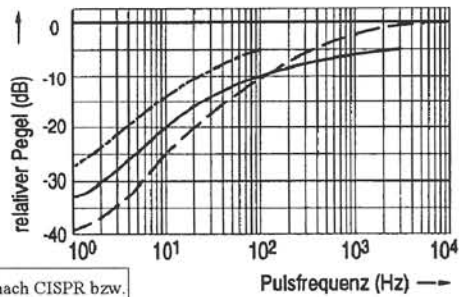
---

---

---

---

Mesempfänger: QP-Detektor



nach CISPR bzw.  
VDE 0876

EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## 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 $R_E C_E$	500 ms	160 ms	550 ms
Mechanische Zeitkonstante	160 ms	160 ms	100 ms

€M)

---

---

---

---

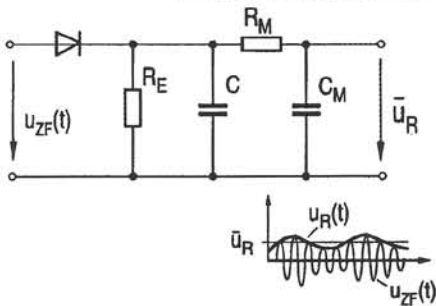
---

---

---

---

## Messempfänger: 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  $U(f)$ .  $f_{\text{rep}}$ : Impuls wiederholungs-frequenz;  $g(f_{\text{rep}})$ : Bewertungsfunktion;  $B_{\text{imp}}$ : 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

---

---

---

---

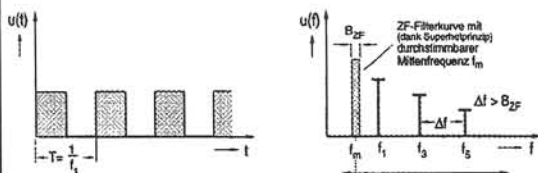
---

---

---

---

## 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

---

---

---

---

---

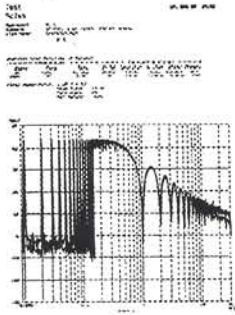
---

---

---



### Vergleich von Detektoren (1)



EMD

---

---

---

---

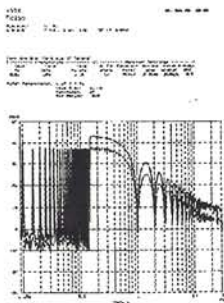
---

---

---

---

### Vergleich von Detektoren (2)



EMD

---

---

---

---

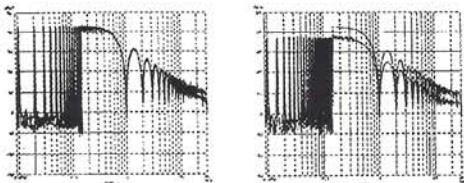
---

---

---

---

### 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

---

---

---

---

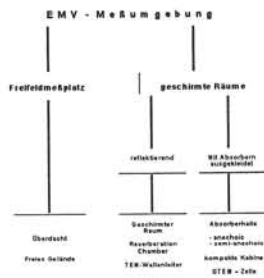
---

---

---

---

## Meßumgebungen



EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Messumgebung: Normen

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

EMD

---

---

---

---

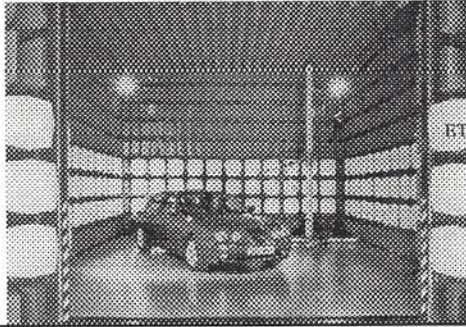
---

---

---

---

### Absorberraum (semi-anechoic)



ETS, Austin,  
TX



---

---

---

---

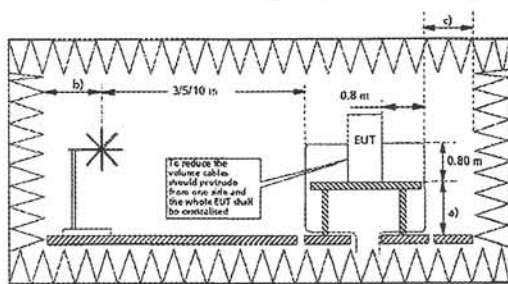
---

---

---

---

### 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)



---

---

---

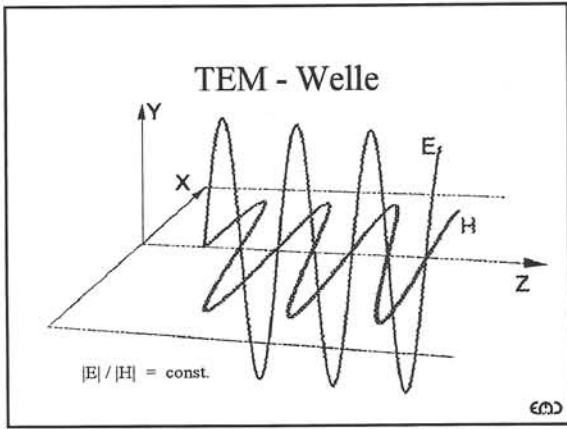
---

---

---

---

---




---

---

---

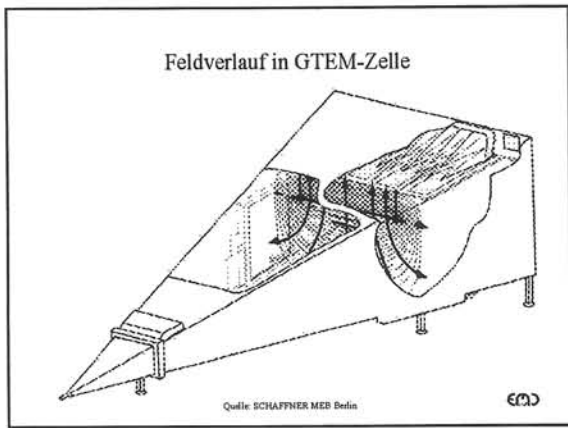
---

---

---

---

---




---

---

---

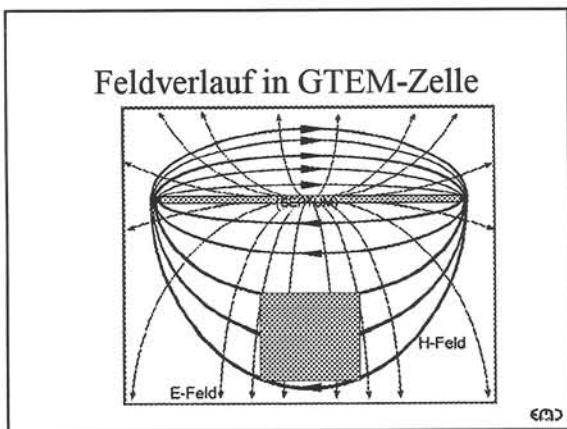
---

---

---

---

---




---

---

---

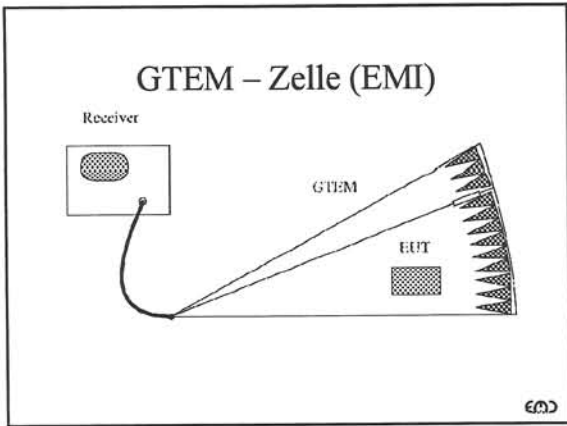
---

---

---

---

---




---

---

---

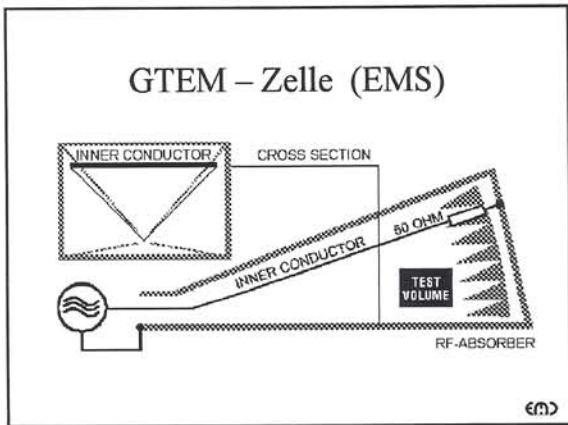
---

---

---

---

---




---

---

---

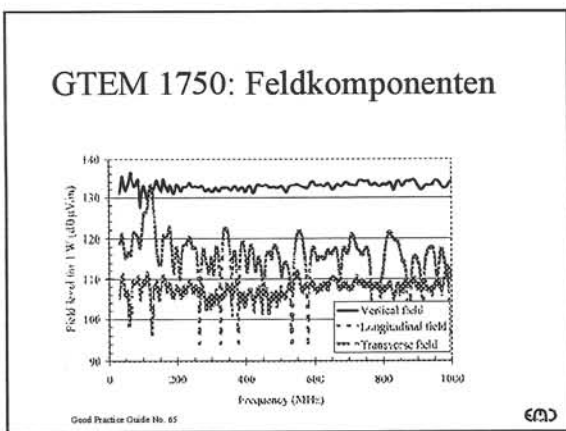
---

---

---

---

---




---

---

---

---

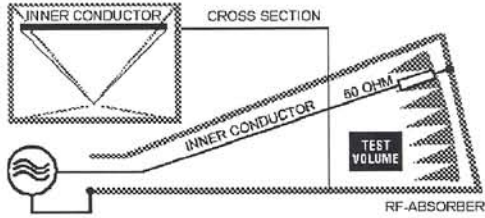
---

---

---

---

### GTEM - Zelle



EMD

---

---

---

---

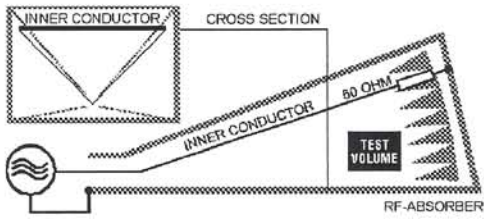
---

---

---

---

### GTEM - Zelle



EMD

---

---

---

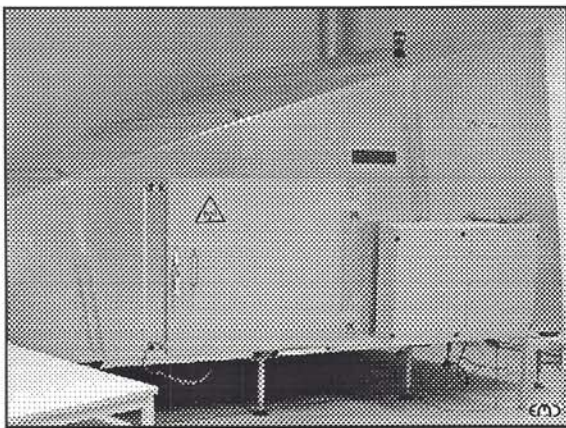
---

---

---

---

---



EMD

---

---

---

---

---

---

---

---

## Theorie der GTEM - Zelle

### Feld im Hohlleiter

$$E^z = \sum_{(n)} E_n^z$$

$$H^z = \sum_{(n)} H_n^z \quad n \text{ allgemeiner}$$

Summationsindex

$J$  - wirkt als Quelle



**TEM - Mode**, vereinfachte Annahmen für Amplitudenkonstanten  $a_0, b_0$

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{2} [P_{y\pm} J k_0 M_x] E_{0y}(0)$$

$P$  - elektrisches Dipolmoment  
 $M$  - magnetisches Dipolmoment

$k_0$  - Wellenzahl des TEM-Feldes

Quadrate der Amplitudenkonstanten: Dimension von Leistung

€(Ω)

---

---

---

---

---

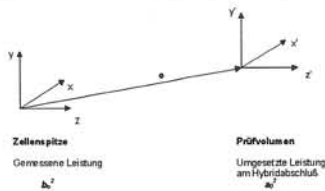
---

---

---

---

---



Einkopplung von Leistung in TEM - Mode:

$$\begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} = \frac{1}{2} [P_{y\pm} J k_0 M_x] E_{0y}(0)$$

Elektrisches Moment in  $y$  - Richtung  
 Magnetisches Moment in  $x$  - Richtung

€(Ω)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

### Zellenfaktor $E_{0y}(0)$

- Normierte elektrische Feldstärke des TEM-Modes in  $y$ -Richtung an der Position des Prüflings in der GTEM-Zelle
- Funktion von Position und Frequenz
- Übertragungsverhalten der GTEM-Zelle

$$E_{0y}(0) = \frac{E_y(0)}{P_{in}}$$

$E_y(0)$  - im Prüflingsvolumen gemessene Feldstärke

$P_{in}$  - an Zellenpitze eingespeiste Leistung

€(Ω)

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

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)

---

---

---

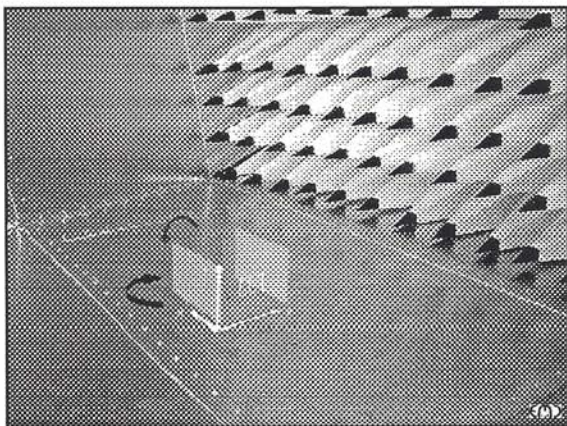
---

---

---

---

---




---

---

---

---

---

---

---

---



## 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

---

---

---

---

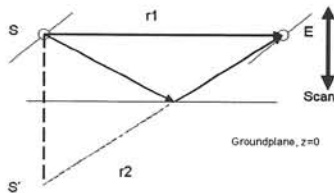
---

---

---

---

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

---

---

---

---

---

---

---

---