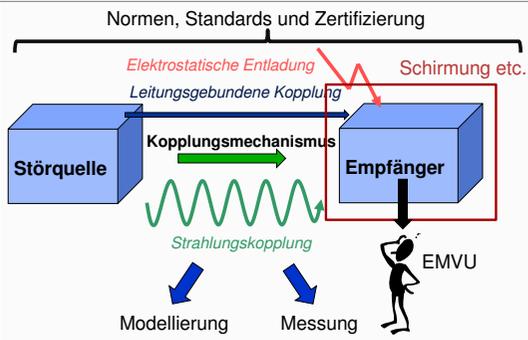


1. Einführung



1.1. Frequenzanalyse

Zeitbereich	Frequenzbereich
Harmonische Schwingung	Schmalbandig (Impuls)
schmalbandig (Impuls)	Breitbandig
Eckig, kantig	Hohe Frequenzen
Rauschen	Rauschen

1.2. Frequenztafel

50 Hz	Stromnetz	1 PHz	UV-Strahlung
2.45 GHz	Mikrowelle, WLAN	1 EHz	Röntgenstrahlung
600 THz	Sicht. Licht	30 EHz	Radioaktiv

2. Normen und Standards

Arten: Gesetzliche, Militärische und Medizinische Standards. Geregelt werden Grenzwerte sowie Mess- und Prüfmethoden.

Normung	Regulierung				
<table border="1"> <tr> <td>allgemein</td> <td>Elektrotechnik</td> <td>Telekommunikation</td> </tr> </table>	allgemein	Elektrotechnik	Telekommunikation		
allgemein	Elektrotechnik	Telekommunikation			
<table border="1"> <tr> <td>international</td> <td>ISO</td> <td>IEC</td> <td>ITU</td> </tr> </table>	international	ISO	IEC	ITU	UNECE
international	ISO	IEC	ITU		
<table border="1"> <tr> <td>regional (Europa)</td> <td>CEN</td> <td>GENELEC</td> <td>ETSI</td> </tr> </table>	regional (Europa)	CEN	GENELEC	ETSI	EU
regional (Europa)	CEN	GENELEC	ETSI		
<table border="1"> <tr> <td>National *) (Deutschland)</td> <td>DIN</td> <td>DKE VDE</td> <td>DKE VDE</td> </tr> </table>	National *) (Deutschland)	DIN	DKE VDE	DKE VDE	Nationale Gesetzgebung
National *) (Deutschland)	DIN	DKE VDE	DKE VDE		

Ratgeber: ANSI/IEEE Dauer bis gültige Norm: ≈ 5 Jahre
 Zertifikate: TÜV GS: Geprüfte Sicherheit; CE: Kein Gütesiegel
 Frequenznutzungsplan von 9 kHz bis 275 GHz: Bundesnetzagentur
 ISO: International Organization for Standardization
 IEC: International Electrical Commission
 ITU: International Telecommunication Union
 DKE: Deutsche Kommission Elektrotechnik

2.1. Spezifische Absorptionsrate SAR

$$SAR = \frac{j^2}{\rho\sigma} = [SAR] = \frac{W}{kg}$$

Europa: 2 USA: 1.6 China: < 1

3. Quellen der EMB

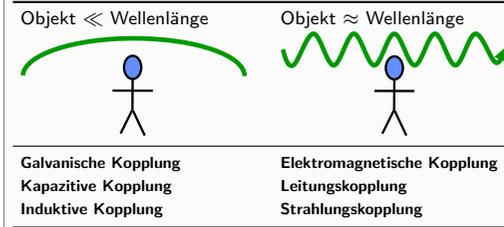
3.1. Störquellen

Systeme: Mobilfunk, Radar, GPS, RFID, Hochspannungsleitungen
 Schaltungen: Autozündung, Schalter, Motoren, Lautsprecher
 Natürlich: Blitze, Hintergrundstrahlung, Sonnenwinde
 Nichtlineare Bauteile erzeugen Oberschwingungen.

3.2. Blitze

Ein Blitz ist ein Plasma, welches aus Ionen, Elektronen und Neutralteilchen besteht. 90% der Entladungen finden zwischen den Wolken statt.
 Stromfluss 200 kA El. Feld: $1 - 10 \frac{kV}{m}$
 Donner: Luft erwärmt sich so schnell, dass sie sich mit Überschall ausdehnt.

4. Kopplung



4.1. Objekt << Wellenlängen

4.1.1 Galvanische Kopplung

Transferimpedanz Z_T

4.1.2 Kapazitive Kopplung

Verringerung des Leiterabstandes im System
 Vergrößerung des Abstandes zwischen den Systemen
 Einseitige Erdung bei niedrigen Frequenzen, beidseitig bei Hohen

4.1.3 Induktive Kopplung

Verringerung des Leiterabstandes im System
 Vergrößerung des Abstandes zwischen den Systemen
 Schirmung, Verdrehen, Senkrechte Anordnung

4.2. Objekt \approx Wellenlänge

4.2.1 Elektromagnetische Kopplung

4.2.2 Leitungskopplung

$$\text{Reflexionskoeffizient } \Gamma = \frac{E_{\text{Ref}}^-}{E_{\text{In}}^+} = \frac{Z_{\text{new}} - Z_0}{Z_{\text{new}} + Z_0}$$

Hin- und Rücklaufende Welle: $U(z) = U^+ e^{-\Gamma z} + U^- e^{\Gamma z} = \frac{1}{2}(U_0 + Z I_0) e^{-\Gamma z} + \frac{1}{2}(U_0 - Z I_0) e^{\Gamma z}$
 Offene Leitung: Reflexionsfrei, konstanter Widerstand
 Abgeschlossene Leitung: Reflexionen, veränderlicher Widerstand
 Stehwellenverhältnis (VSWR): $s = \frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}} = \frac{I_{\text{max}}}{I_{\text{min}}}$

4.2.3 Strahlungskopplung

$$\text{Fernfeld: } kr \gg 1 \quad \text{Nahfeld: } kr \ll 1$$

Elektrischer Dipol: Stab			Magnetischer Dipol: Ring		
$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$	$\frac{1}{r^3}$	$\frac{1}{r}$	$\frac{1}{r^2}$	$\frac{1}{r^3}$
E_r	-	✓	E_r	-	-
E_φ	✓	✓	E_φ	✓	-
H_r	-	-	H_r	-	✓
H_θ	✓	✓	H_θ	✓	✓

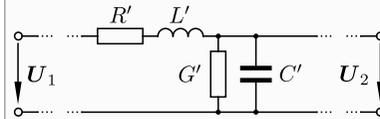
Greensche Funktion $G(\underline{r}, \underline{r}')$: Impulsantwort des freien Raums für eine Punktladung

4.3. Leitungseläge

Elektrostatik (NF): R', G', C', L' Elektrodynamik (HF): γ, Z

	Koaxial	Doppel	Einzel	Parallel
R'	$\frac{R_A}{\pi} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right)$	$\frac{R_A}{\pi d} \frac{2s}{\sqrt{s^2 - d^2}}$	$\frac{R_A}{\pi d} \frac{2s}{\sqrt{4s^2 - d^2}}$	$\frac{2R_A}{b}$
C'	$\frac{2\pi\epsilon}{\ln \frac{D}{d}}$	$\frac{\pi\epsilon}{\arccos\left(\frac{s}{d}\right)}$	$\frac{2\pi\epsilon}{\arccos\left(\frac{2s}{d}\right)}$	$\frac{\epsilon b}{s}$
L'	$\frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{d}$	$\frac{\mu}{\pi} \arccos\left(\frac{s}{d}\right)$	$\frac{\mu}{2\pi} \arccos\left(\frac{2s}{d}\right)$	$\frac{\mu s}{b}$

4.4. Leitungsgleichung LGS mit $\underline{U}, \underline{I} \in \mathbb{C}^n$



$$\text{System DGLs: } \dot{\underline{U}}(x) = -i\omega \underline{L}' \underline{I}(x) \quad \dot{\underline{I}}(x) = -i\omega \underline{C}' \underline{U}(x)$$

$$\begin{pmatrix} \underline{U}(l) \\ \underline{I}(l) \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\beta l) \underline{E}_n & -i\omega \frac{\sin(\beta l)}{\beta} \underline{L} \\ -i\omega \frac{\sin(\beta l)}{\beta} \underline{C} & \cos(\beta l) \underline{E}_n \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \underline{U}(0) \\ \underline{I}(0) \end{pmatrix}$$

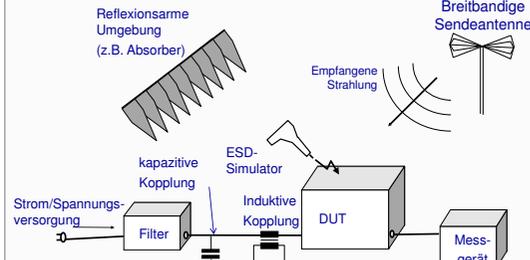
Bei Einspeisung von Strom/Spannung in Leitung 1 kann eingekoppelter Strom/Spannung in Leitung n analytisch berechnet werden.

5. Messungen

EMI: Emissionsmessung EMS: Störfestigkeitsmessung

5.1. Messkammer

Reflexionsarme Wände (Absorber), Gitterboden unter dem die Kabel verlaufen. Messequipment außerhalb der Kammer. Keine Fenster, nur Kamera



Antenne: Breitbandige drehbare Antenne

Kabel: Kabel müssen in kleinen Schleifen verkürzt werden und nicht zu Rollen gewickelt werden

Absorber: Graphitgetränkte Pyramidenabsorber: Teil der Welle dringt ein der andere Teil wird reflektiert.

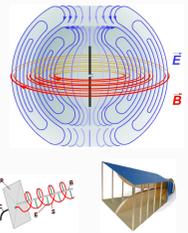
Messgeräte: Messempfänger, Spektrumanalysator, Oszilloskop

DUT: Device under Test (Entweder Störung oder Abstrahlung)

LISN: Line impedance stabilization network, Netznachbildung: Durchlassen von NF Speisung zum DUT und HF Störung vom DUT

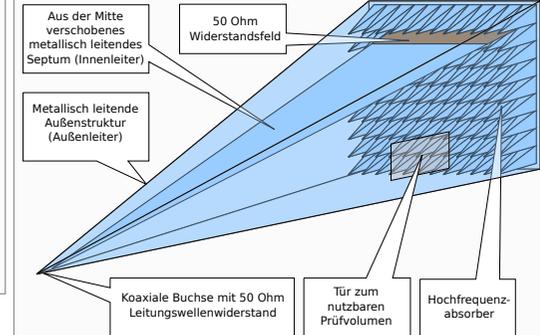
5.2. Messantennen

Typ	Frequenz in MHz
Stab / Schleifen	0.01 - 0.30
Bikonisch	20 - 220
Dipolantenne	30 - 10.000
Log-periodisch / Helix	200 - 20.000
Hornantenne	> 1000



5.3. GTEM Zelle

Störfestigkeitsmessung mit Transversalwelle mit $Z = Z_0$
 TEM-Zelle: Parallelplattenleitung, dazwischen kleines Objekt

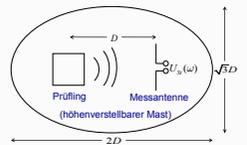


5.4. Freifeldmessung

Wenn zu messende Objekte zu groß für die Messkammer ist.

Freie Ellipse: Reflektierte Wellen müssen mindestens doppelten Weg zurücklegen. Messequipment muss geschirmt werden.

Probleme: Wetter, Bodenunebenheit, Rohre im Boden, Mobilfunk



6. Modellierung

Vorgehen:

Design Rule Checkers (z.B. EMBoardCheck von SimLab) Analytische Modellierung (einfache Strukturen) Leitungsmodellierung (CableMod von SimLab) Schaltungs-Systemmodellierung (allgemein, z.B. Pspice)

Physikalische Berechnung: FDTD, FEM, MOM, BEM, TLM
 Hybride Methoden:

Berechnung der Leitungsparameter numerisch (FEM)
 Ausbreitung auf Mehrleitersystem (Leitungsgleichung)
 Berechnung der Abstrahlung mit Kabel als Quelle (Integralgleichungsmethode)

Wichtig: Be critical to model and tool!

7. Maßnahmen gegen EMB (Beeinflussung)

7.1. Schirmung

$$\text{Schirmungsfaktor } Q(\omega) = \frac{H_{\text{innen}}}{H_{\text{ohne}}}$$

E-Dipol (Nahfeld, hochohmig): Dämpfung nimmt mit zunehmender Frequenz ab, niedrige Frequenz → Reflexion, hohe Frequenz → Absorption, Abschirmung leicht realisierbar (dünnes Metall → Skintiefe)

H-Dipol (Nahfeld, niederohmig) Dämpfung nimmt mit steigender Frequenz zu, hauptsächlich Absorption, Abschirmung niederohmiger Magnetfelder bei niedrigen Frequenzen schwierig

EM Welle (Fernfeld) Dämpfung in weitem Frequenzbereich frequenzunabhängig, unabhängig vom Abstand, Schirmung leicht

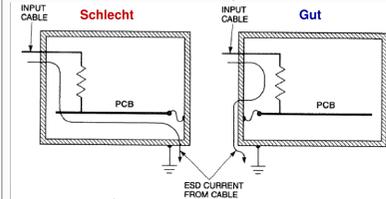
7.2. Blitzschutz

Fanganordnungen sollen den Blitz einfangen

Blitzableiter sollen den Strom abtransportieren

Bestimmung der Orte mit Blitzkugelmethode

Schutzerde: Evtl. Multiground (Achtung Erdschleifen!)



Schaltung sollte mind. 1 cm von nicht geerdeten Teilen und mind. 1 mm von geerdeten Gehäuseteilen entfernt sein!

7.3. PCB Design

8. EMVU – Umweltverträglichkeit

Effekte von el. mag. Feldern auf biologisches Material.

Thermische Effekte: Erwärmung $P_A = \pi f \varepsilon_0 \iiint_V \varepsilon_r'' \|\underline{E}\|^2 dv$

Mikrowellenhören

Nicht-thermische Effekte:

auf Zellmembranen (Potential, Ströme, Ca^{2+} Fluss)

Nervensystem (EEG, Schlaf, Melatonin)

Immunsystem, Krebsgefahr

Physikalische Primäreffekte: Ladungsinfluenz, Feldeinkopplung, Ladungsbewegung, Polarisation von Molekülen

Biologische Sekundäreffekte: Durch Primäreffekte ausgelöste biologische Effekte (Herzkammerflimmern, Verbrennungen)

Ab 5 GHz absorbiert nur obere Haut und Fettschicht

Specific Absorption Rate: $\text{SAR} = c \frac{dT}{dt}$

Wissenschaftlich Effekte* $\text{SAR} = 4 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$

Arbeiter $\text{SAR} = 0.4 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$

Bevölkerung $\text{SAR} = 0.08 \frac{\text{W}}{\text{kg}}$

*: Erhöhung der Körpertemperatur um 1°C nach 30 Minuten.

9. Übungen

Freileiter Bündelanordnung: Schwächeres Feld

Schmalbandige Störungen: Mikrowelle, Computer, Radio

Breitbandige Störung: Blitz, Relais, Schalter

Relai Schalten: Hohe Induktion in der Spule (Maß: Diode)

Antennenstörung: Abstand, Abschirmung, Drehen der Antenne

EMI besser als Spektrumanalysator: Dynamik, Präzision, SNR

Aber SA schneller als EMI

EMI-Zeiten: Sweepzeit, Haltezeit, Gesamtzeit = SZ + HZ

Antennenfaktor: $\frac{\|\underline{E}\|}{U}$

EMS heißt elektromagnetische Störfestigkeit, Funktioniert Gerät

Genzwerte: Physikalisch 1, Arbeiter $\frac{1}{10}$, Allgemein $\frac{1}{50}$

Keine Ecken, Schleifen, lange dünne Drähte in PCBs

10. Klausurfragen:

Wer gibt Normen vor?

Wo werden solche Normen produziert: Regierungen, Fabrikanten wegen Qualität, Militärische Standards (Robustheit)

Was wird Standardisiert? Prüfverfahren und Grenzwerte

Störquellen: Breibandige, Schmalbandig, Natürlich (Blitze, Entladungen) Stromerhöhung, Menschliche, Industrielle Quellen (Schalter über Leitungen, Ladungstrennung durch Reibung)

Kopplungen: Leitungen oder Freiraum

Welle größer als Objekt: Statisch, getrennte Betrachtung von el. und mag. Wellen

Welle in der selben Größenordnung: Gekoppelte Welleneffekte

Schirmung: Box (Achten auf Löcher in Wellenlängengrößenordnung), Materialien mit hohem μ_r , Parallele Leitungen verhindern. Drähte verdrillen, Absorber dazwischen

Messkammer: Homogene Feldverteilung, Leistung aufdrehen

Messequipment: ANTennen, Filter, Reflektoren

Modellierung und Simulation

EMVU: thermische (primär und sekundäreffekte) und nicht thermische Immer 2 Gruppen testen.