



TEM Zellen für Pre-Compliance Messungen





DI Christian Spindelberger christian.spindelberger@tuwien.ac.at



• Einführung

Verifikation

- Prüfvolumen
- IEC 61000-4-20

Messtechniken

- Abgestrahlte Emission
- Korrelation zum Freifeld
- Abgestrahlte Immunität

DIY TEM Zelle

- S-Parameter
- Feldhomogenität

Einführung



• SAC/OATS

- Viel Platz notwendig
- Kostspielig
- Lange Messzeiten

Nahfeld Messungen

- Lokalisierung von EMI spots
- Aktuell keine Immunitätstests möglich

• Modenverwirbelungskammer

- Limitiert für niedrige Frequenzen
- Compliant
- Große EUTs möglich

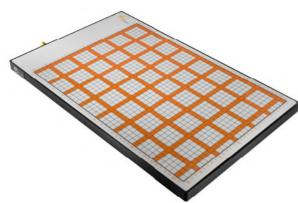
TEM Zellen

- Compliant (EUT ohne Kabel)
- Testvolumen vs. BW limitiert
- Einfach und günstig zu bauen
- Höhere Frequenzen -> GTEM









Einführung

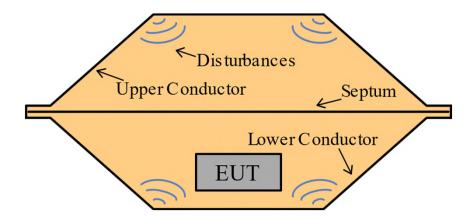


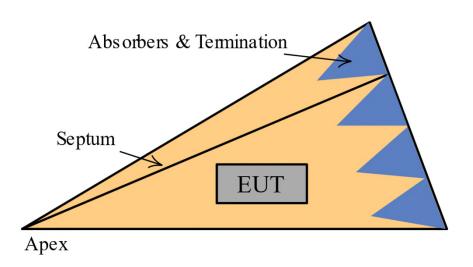
TEM Zelle

- Zweitor
- Ecken limitieren Frequenz bzw. Prüfvolumen
- Offene Leiter benötigen Schirmzelt
- Low-Cost

GTEM Zelle

- Eintor
- 50 Ohm Abschluss am Septum
- Absorber notwendig
- Höherer Frequenzbereich
- Asymmetrisch
- Geschlossenes Design







• Einführung

Verifikation

- Prüfvolumen
- IEC 61000-4-20

Messtechniken

- Abgestrahlte Emission
- Korrelation zum Freifeld
- Abgestrahlte Immunität

DIY TEM Zelle

- S-Parameter
- Feldhomogenität

Verifikation

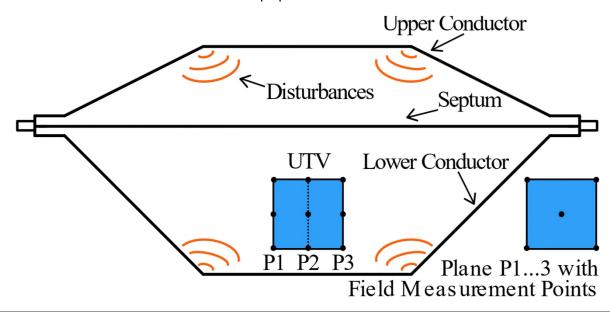


• TEM Modus wird angeregt

- Elektrische Feldkomponente in vertikale Richtung
- Höhere Moden stören die Feldhomogenität

• Feldhomogenität im Prüfvolumen

- IEC 61000-4-20
- 75% der Testpunkte
- 2 Requirements:
 - i) Die Magnitude $|\vec{E}|$ darf nicht mehr als 6dB variieren
 - ii) Sekundäre Feldkomponenten müssen 6dB kleiner als $|\vec{E}|$ sein



Verifikation



Alternatives Kriterium

- $|10\log_{10}(|S_{11}|^2 + |S_{21}|^2)| \le 1dB$
- Verluste, Modenkopplung
- Hilfreich zur Verifikation beladener Zellen
- Nur mit Zwei-Tor möglich!

• TE₁₀ Mode großes Problem!

- Longitudinale Komponente wird stark beeinflusst
- Ausbildung von Resonanzen (hoher Güte)
- Abgestrahlte Messungen unmöglich



• Einführung

Verifikation

- Prüfvolumen
- IEC 61000-4-20

Messtechniken

- Abgestrahlte Emission
- Korrelation zum Freifeld
- Abgestrahlte Immunität

DIY TEM Zelle

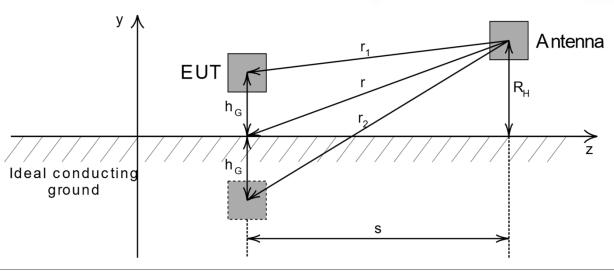
- S-Parameter
- Feldhomogenität

Abgestrahlte Emissionen



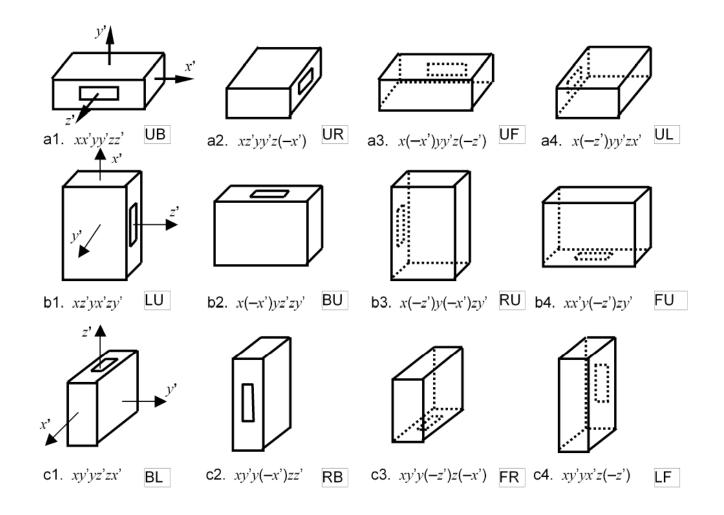
- Annahme: EUT ist klein $d \le \lambda_{\min}$ (Dipolmoment dominant)
- Berechnung der abgestrahlten Feldstärke mittels Korrelationsalgorithmus
- Rotation des EUTs (3 orthogonale Positionen)
- 5° Rotationsschritte f > 1GHz
- Annahme für Freifeldmessplatz: Dipolcharakteristik
- Höhensweep und Polarisation der Antenne wird analytisch berücksichtigt

$$E_{\max} = g_{\max} \frac{60k_0}{e_{0y}} \sqrt{\frac{\sum V_i^2}{Z_C}}, \quad g_{\max} = \begin{cases} \left| \frac{e^{-jk_0r_1}}{r_1} - \frac{e^{-jk_0r_2}}{r_2} \right|_{\max} \\ \left| \frac{s^2}{r_1^2} \frac{e^{-jk_0r_1}}{r_1} + \frac{s^2}{r_2^2} \frac{e^{-jk_0r_2}}{r_2} \right|_{\max} \end{cases}$$



Abgestrahlte Emissionen





Abgestrahlte Emissionen



• Analytische Bestimmung des Feldfaktors

$$e_{0y} = \frac{4}{a} \sqrt{Z_C} \sum_{m=1,3,\dots}^{\infty} \frac{\cosh(My)}{\sinh(Mh)} \cos(Mx) \sin\left(\frac{Ma}{2}\right) J_0(Mg)$$

- Mittels Querschnitt der TEM Zelle
- Berücksichtigung der EUT Positionierung

Messung des Feldfaktors mittels Feldsensor

Erfordert Kalibration des Sensors

Referenzobjekt

- Bekannte Abstrahlcharakteristik (SAC)
- Bspw. Kammgenerator
- Verbesserung des Korrelationsalgorithmus

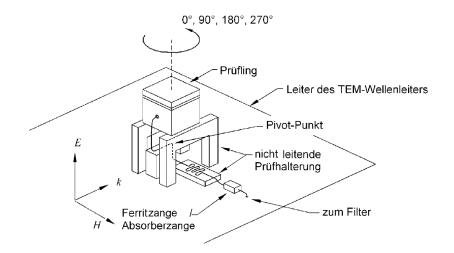
Abgestrahlte Immunität

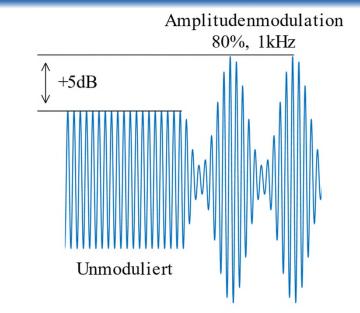
EMEE TU WIEN

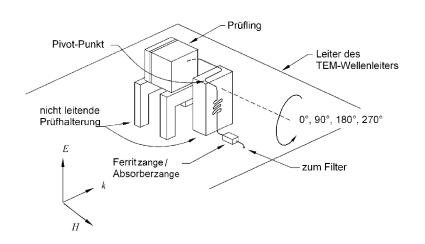
- CW Signal mit Amplitudenmodulation
- Feldstärke Abschätzung

$$E = \frac{\sqrt{Z_0 I}}{h_s}$$

- Tiefpassfilter erforderlich für hohe Frequenzen
- Vermeidung von Resonanzen in der Zelle durch harmonische Signalanteile
- Mehrfache Rotation notwendig!
- Rotationspositionen







Prüflingsgröße



• Prüflingsgröße

- Hersteller: 0.5hs

- *ISO* 11452: 0.33ws x 0.6lc

- *MIL-STD 462F*: 0.5*ws* x 0.5*lc*

- *IEC 61000-4-20*: 0.6ws x 0.6lc

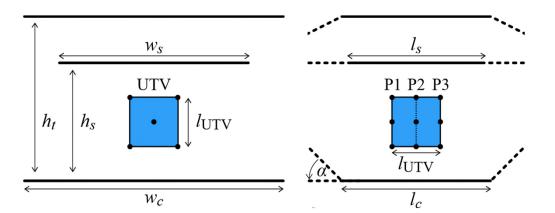
(Ausnahme)

Generelle Faustregel

- Ein Drittel der Septumshöhe nicht überschreiten

Testung der Immunität mit Impulsen

- GTEM Zellen bis zu sehr hohen Frequenzen nutzbar
- Häufig militärische Anwendungen





• Einführung

Verifikation

- Prüfvolumen
- IEC 61000-4-20

Messtechniken

- Abgestrahlte Emission
- Korrelation zum Freifeld
- Abgestrahlte Immunität

DIY TEM Zelle

- S-Parameter
- Feldhomogenität
- Zusammenfassung

DIY TEM Zelle



• Wie groß ist der Einfluss von höheren Moden?

- Verbesserung der Feldhomogenität -> Absorber
- Keine Low-Cost Lösung mehr!
- Optimierung der Geometrie mittels Feldsimulator

• Fertigungstoleranzen?

Asymmetrische Leitergeometrie

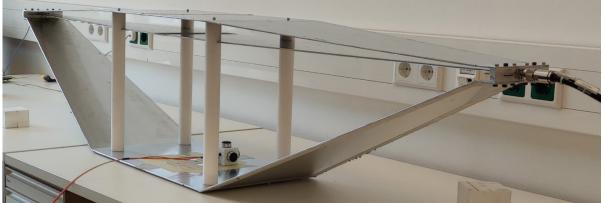
Effizientere Nutzung des Prüfvolumens

Designziele

- Septumshöhe 300mm
- Matching niedriger als -10dB
- Frequenzbereich 30MHz bis 1GHz
- Einfach zu bauen
- Budget < 500€





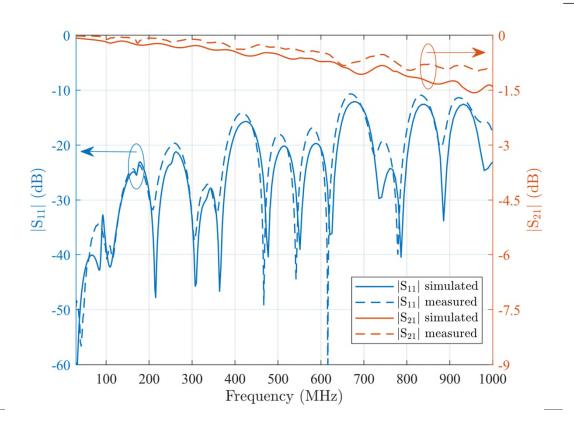


DIY TEM Zelle



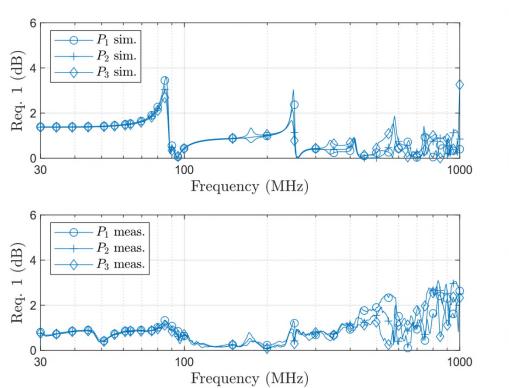
S-Parameter

- Simulation stimmt gut mit Messungen überein
- $|S_{11}| \le -10 dB$
- Abweichungen: Randbedingung
- Mechanischer Stress
- Konnektormodelle limitiert



Feldhomogenität

- Uniformität erfüllt bis 1GHz
- Sensor RadiiSense IV: Durchmesser 42mm
- Variation der Magnitude $|\vec{E}|$ deutlich unter 6dB



DIY TEM Zelle

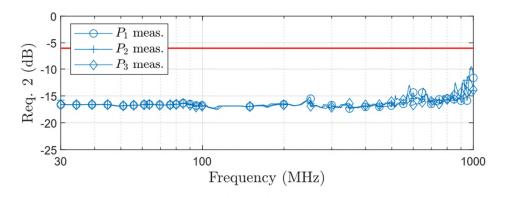


• Feldhomogenität

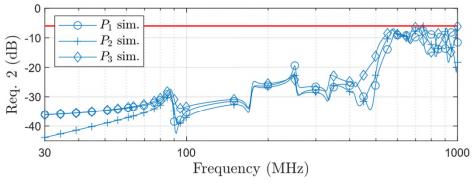
- Longitudinale Komponente knapp am Limit
- TE_{10} Mode: $f_c = \frac{c_0}{2wc} = 500$ MHz

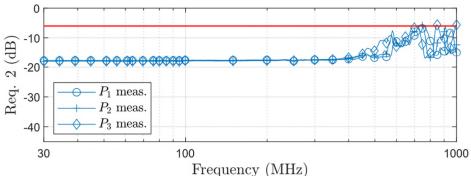
Transversale Komponente

$\begin{array}{c} 0 \\ -5 \\ -20 \\ -25 \\ 30 \end{array}$ $\begin{array}{c} P_1 \text{ sim.} \\ P_2 \text{ sim.} \\ -P_3 \text{ sim.} \end{array}$ $\begin{array}{c} P_1 \text{ sim.} \\ P_2 \text{ sim.} \\ -10 \\ -25 \\ 30 \end{array}$ $\begin{array}{c} 1000 \\ \text{Frequency (MHz)} \end{array}$



Longitudinale Komponente







• Einführung

Verifikation

- Prüfvolumen
- IEC 61000-4-20

Messtechniken

- Abgestrahlte Emission
- Korrelation zum Freifeld
- Abgestrahlte Immunität

DIY TEM Zelle

- S-Parameter
- Feldhomogenität



- TEM Zellen sind vollständiges Setup für Pre-Compliance
- Limitierte Bandbreite (Problem mit höheren Moden)
- EUT mit Kabel problematisch
- DIY TEM Zelle für < 500€
- Framework f
 ür die Auswertung wird zur Verf
 ügung gestellt
- Durchführung der vorgestellten Methoden: Morgen!