

Index

1	Welche Eingangsleistung muss ich aufbringen, um eine bestimmte elektrische Feldstärke im Inneren der TEM-Zelle zu erzeugen?.....	2
2	Was ist der nutzbare Frequenzbereich einer TEM-Zelle?.....	3
3	Wie sind TEM-Zellen im Vergleich zu Nahfeldsonden oder Antennen.....	3
4	Offene TEM-Zellen versus geschlossene TEM-Zellen	6
5	TEM-Zellen versus GTEM-Zellen	7
6	Wie korreliert man TEM-Zellenmessungen mit Fernfeldgrenzen?	7
7	Wie führt man die Pre-Compliance-Prüfung der Störaussendung mit offenen TEM-Zellen durch?.....	11
8	Wie wird die Prüfung der gestrahlten Störfestigkeit mit offenen TEM-Zellen vor der Konformitätsprüfung durchgeführt?	11
9	Wie groß ist das nutzbare Volumen der Tekbox TEM-Zellen?.....	12
10	Feldverteilung in einer TEM-Zelle	13
11	Geschichte	Error! Bookmark not defined.

1 Welche Eingangsleistung muss ich aufbringen, um eine bestimmte elektrische Feldstärke im Inneren der TEM-Zelle zu erzeugen?

Das E-Feld (V/m) zwischen Septum und unterer (oberer) Wand der TEM-Zelle ist

$E = V/d$ wobei V die RMS-Spannung des angelegten Signals und d der Abstand zwischen Septum und unterer (oberer) Wand ist. Dies basiert auf der vereinfachten Annahme, dass das E-Feld perfekt homogen/gleichmäßig verteilt ist.

Eine genauere Formel ist $E = V \cdot \text{Cor}/d$, wobei Cor ein Korrekturfaktor für die durchschnittliche Feldstärke über das Volumen des Prüflings ist, der aus der Analyse der realen Feldverteilung über den Querschnitt der Zelle abgeleitet wird.

Unter der Annahme, dass der Prüfling in der Mitte der Zelle und in der Mitte zwischen Boden und Septum platziert ist, können wir jedoch die vereinfachte Formel mit ausreichender Genauigkeit verwenden.

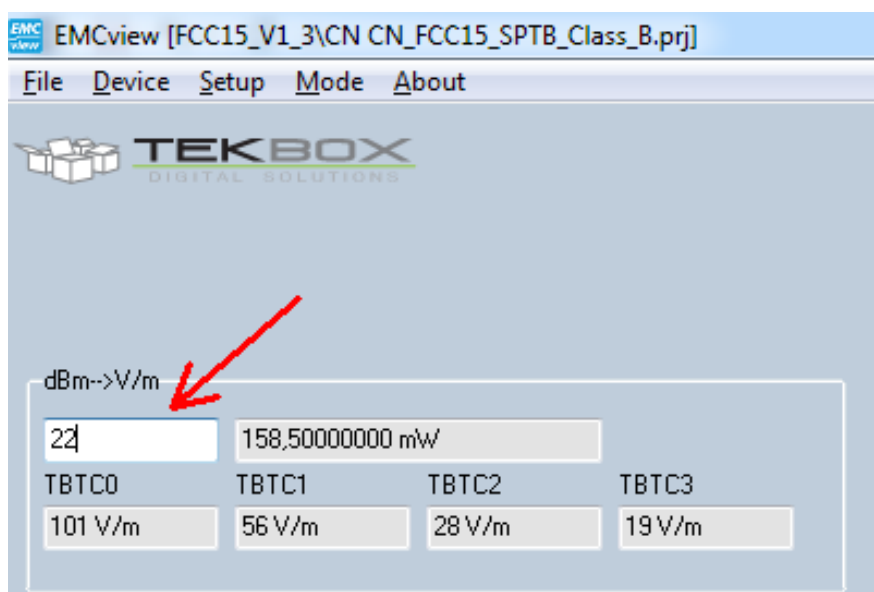
TBTC0	$d = 2,8 \text{ cm}$	$E = (\sqrt{P \cdot 50 \Omega}) \cdot 35,7$
TBTC1	$d = 5 \text{ cm}$	$E = (\sqrt{P \cdot 50 \Omega}) \cdot 20$
TBTC2	$d = 10 \text{ cm}$	$E = (\sqrt{P \cdot 50 \Omega}) \cdot 10$
TBTC3	$d = 15 \text{ cm}$	$E = (\sqrt{P \cdot 50 \Omega}) \cdot 6,66$

Alternativ können Sie eine Kopie von EMCview herunterladen und installieren, mit der Sie Zugriff auf viele Funktionen haben, ohne eine Lizenz zu benötigen:

<https://www.tekbox.com/product/emcview-pc-software-emc-compliance-testing/>

Wenn Sie das Menü **MODE, GENERATOR** öffnen, finden Sie in der oberen linken Ecke des Fensters ein Hilfsprogramm zur Umrechnung von dBm in V/m.

Nach Eingabe eines Leistungspegels in dBm berechnet das Dienstprogramm die resultierende elektrische Feldstärke für alle Tekbox Open TEM-Cell Modelle. Der Screenshot unten zeigt die elektrische Feldstärke, die durch Ansteuerung der TEM-Zellen mit einem modulierten Verstärker Tekbox TBMDA1 erreicht werden kann. Je niedriger die Septumhöhe ist, desto höher ist die resultierende Feldstärke für jeden beliebigen Leistungspegel:



Tekbox bietet derzeit vier dedizierte modulierte Breitband-Leistungsverstärker zur Ansteuerung der TEM-Zellen an. Sie benötigen keinen speziellen HF-Signalgenerator, um diese Verstärker zu betreiben. Sie sind so ausgelegt, dass sie ihre jeweilige maximale Ausgangsleistung mit einer Eingangsleistung von $\leq 0 \text{ dBm}$

liefern und haben eine eingebaute Modulationsfähigkeit. Folglich sind sie geeignet, um mit dem Mitlaufgeneratorsignal eines Spektrumanalysators betrieben zu werden.

Verstärker-Modell	Frequenzbereich [MHz]	Max. Ausgangsleistung [dBm]	Max. el. Feldstärke TBTC0 [V/m]	Max. el. Feldstärke TBTC1 [V/m]	Max. el. Feldstärke TBTC2 [V/m]	Max. el. Feldstärke TBTC3 [V/m]
TBMDA1	40 - 3500	22	101	56	28	19
TBMDA2	10 - 1500	27	179	100	50	33
TBMDA3	10 - 1000	37	565	317	158	106
TBMDA4	0.1 - 50	37	565	317	158	106

2 Was ist der nutzbare Frequenzbereich einer TEM-Zelle?

Im Datenblatt der TEM-Zellen sind Werte für S11 und S21 der TEM-Zellen angegeben.

S21 ist die Einfügedämpfung über die Frequenz und wird gemessen, indem ein HF-Signal in einen Anschluss eingespeist und das Ausgangssignal am gegenüberliegenden Anschluss gemessen wird. Sie charakterisiert grundsätzlich, wie stark ein Signal gedämpft wird, sobald es vom Septum aufgenommen wird. Allerdings müssen zwei Dinge beachtet werden - die Einfügedämpfung wird mit einer leeren TEM-Zelle gemessen und das Signal wird punktförmig an der Gegenseite abgegriffen und wandert anschließend den ganzen Weg zur anderen Seite. Das bedeutet, dass die Geometrie des Prüflings einen gewissen Einfluss hat, der schwer zu charakterisieren ist, es sei denn, der Prüfling ist klein im Vergleich zur Höhe des Septums und das Signal wird über die gesamte Fläche des Septums aufgenommen.

In der Praxis, unabhängig von der 3dB-Frequenz von S21, kann jede Tekbox TEM-Zelle gestrahlte Emissionen bis zu 6 GHz oder darüber gut aufnehmen. Bei der Umrechnung des Messergebnisses in einen entsprechenden Fernfeldwert nach der in der Norm IEC 61000-4-20 angegebenen Methode verschlechtert sich jedoch die Genauigkeit der Umrechnung oberhalb der 3dB-Frequenz der TEM-Zelle.

S11 charakterisiert die Eingangsreflexionen, wenn ein HF-Signal in einen Port eingespeist wird und der andere Port mit 50 Ohm abgeschlossen ist. Bei niedrigen Frequenzen breitet sich nur die Hauptwelle (TEM-Mode) aus und die E-Feldverteilung innerhalb der TEM-Zelle ist gleichmäßig. Aufgrund der Geometrie von TEM-Zellen lassen sich Resonanzen bei höheren Frequenzen nicht vermeiden. S11 verschlechtert sich und es entstehen TEM-Moden höherer Ordnung. Das bedeutet, dass das E-Feld nicht mehr gleichmäßig ist und je höher die Frequenz ist, desto mehr Minima und Maxima können beobachtet werden. Die Formel für die Feldstärke und die Umrechnung der IEC 61000-4-20 verliert an Genauigkeit. Unsere Messungen haben gezeigt, dass das Feld bis zu einem S11 von -15 dB und einem Prüflingsquerschnitt $\leq 1/5$ des Querschnitts der TEM-Zelle einigermaßen gleichmäßig ist. Für weitere Details können Sie nach den Arbeiten von Myron L. Crawford, dem Erfinder der TEM-Zelle, googeln: *Generation of standard EM fields using TEM transmission cells*

Die Brute-Force-"Tekbox-Foltermethode" für Störfestigkeitsprüfungen kann bis in den Bereich von mehreren GHz angewandt werden, ohne dass man sich allzu viele Gedanken über die Lautstärke des Prüflings oder S11 machen muss. Siehe Kapitel 8.

3 Wie sind TEM-Zellen im Vergleich zu Nahfeldsonden oder Antennen

Wenn Sie nur einen Hammer haben, sieht alles wie ein Nagel aus. Das gilt auch, wenn Sie nur einen Satz Nahfeldsonden haben, oder nur eine TEM-Zelle oder eine Messantenne. Ich brauche wohl nicht zu erwähnen, dass Sie glücklicher sind, wenn Ihre Schublade mit verschiedenen Werkzeugen gefüllt ist.

Nahfeld-Sonden

Nahfeldsonden sind ein unverzichtbares Werkzeug, um Quellen von Störaussendungen auf einer bestückten Leiterplatte zu lokalisieren. Tekbox-Nahfeldsonden sind nicht nur in Bezug auf den Kopplungsverlust über der Frequenz spezifiziert, sondern auch in Bezug auf die Umwandlung der Messergebnisse in magnetische und elektrische Feldstärke. Darüber hinaus ermöglichen Transimpedanztabellen der H-Feld-Sonden die Umrechnung der Messergebnisse in entsprechende HF-Ströme auf Leiterbahnen. Da Nahfeldsonden auf eine gute spezielle Auflösung ausgelegt sind, die notwendig ist, um den Ursprung von Abstrahlungen gut einzuengen, zeigen sie nur die Abstrahlungen eines kleinen Bereichs der Leiterplatte. Um ein vollständiges Bild zu erhalten, ist es notwendig, manuell über die Leiterplatte zu scannen. Man kann es mit der Beobachtung des Sternenhimmels durch ein Teleskop vergleichen, wo man auch nur einen kleinen Ausschnitt sieht.

Ein weiterer Vorteil ist die Unempfindlichkeit der Tastköpfe gegenüber Umgebungsstörungen. Was immer Sie auf Ihrem Spektrumanalysator sehen, wird von Ihrem Prüfling abgestrahlt.

Nahfeldsonden sind ebenso nützlich für die Fehlersuche bei Störfestigkeitsproblemen. Wenn die Sonden mit einem HF-Signal gespeist werden, lassen sich anfällige d.h. empfindliche Bereiche auf Leiterplatten leicht lokalisieren.

Es besteht manchmal das Missverständnis, dass die von Nahfeldsonden aufgenommenen Signale in einen äquivalenten Fernfeldwert umgewandelt werden können und so eine Antennenmessung ersetzen. Ohne ins Detail zu gehen - es gibt einen Grund, warum es Antennen gibt und es gibt einen Grund, warum es Nahfeldsonden gibt. Wie Sie sehen werden, gibt es auch einen Grund, warum es TEM-Zellen gibt.

TEM-Zelle

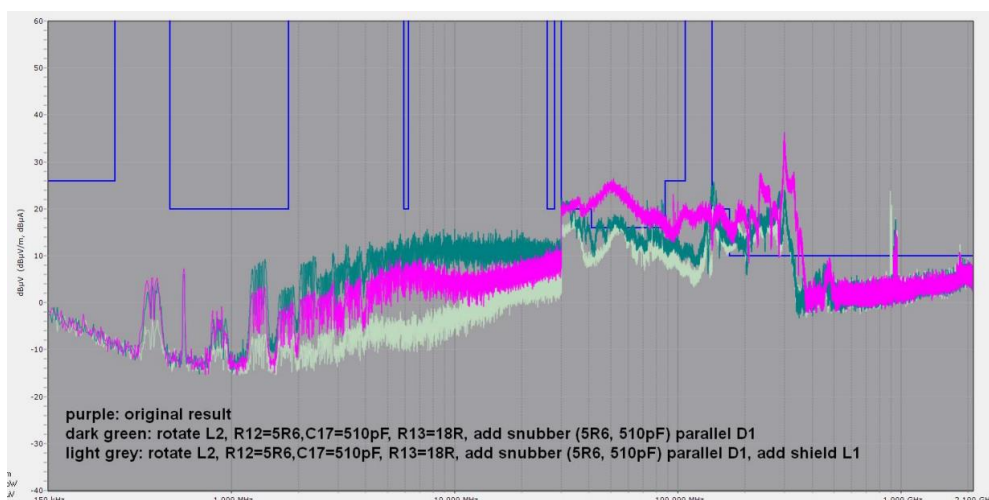
TEM-Zellen wurden ursprünglich entwickelt, um starke und gut definierte E-Felder für Störfestigkeitsprüfungen zu erzeugen. Die notwendige HF-Leistung, die erforderlich ist, um die in verschiedenen EMV-Normen spezifizierten E-Feld-Pegel zu erreichen, ist bei Verwendung einer TEM-Zelle viel geringer als bei Verwendung einer Antenne. Wie in Kapitel 1 gezeigt, können Sie mit einem billigen 5 W HF-Verstärker und einer TBTC0 ein E-Feld mit fast 600 V/m erzeugen. Wenn Sie das Budget haben, einen Ferrari zu kaufen, könnten Sie stattdessen den HF-Breitbandverstärker kaufen, der notwendig ist, um die gleiche Feldstärke im Fernfeld einer Antenne zu erzeugen. Das mag etwas übertrieben sein, ist aber nicht weit von der Wahrheit entfernt. Höchstwahrscheinlich benötigen Sie sogar, um den gesamten in Ihrer Norm angegebenen Frequenzbereich abzudecken, mehr als nur einen Verstärker.

Auf der anderen Seite führen die Abmessungen der TEM-Zellen zu Einschränkungen bei der Größe des Prüflings, den Sie unterbringen können.

In Bezug auf die Prüfung der Störaussendung sind TEM-Zellen sehr breitbandig. Sie können Signale von weit unter 100 kHz bis zu 6 GHz und darüber aufnehmen. TEM-Zellen messen im Nahfeld und bieten eine gewisse Dämpfung des Umgebungsrauschens, so dass Sie in der Lage sind, Emissionen zu sehen, die im Falle der Verwendung einer Antenne eine abgeschirmte Umgebung und Vorverstärker erfordern würden. Nachteilig ist, dass TEM-Zellen Nahfeldwerte liefern, die nicht einfach in eine äquivalente Fernfeldmessung umgerechnet werden können, indem man einfach einen Offset addiert. Nichtsdestotrotz gibt es Korrelationsmethoden, wie sie z.B. in der IEC 61000-4-20 spezifiziert sind, allerdings erfordern sie einen gewissen Zusatzaufwand und haben einige Einschränkungen.

TEM-Zellen sind nicht nur sehr effizient, wenn es darum geht, einen guten Überblick über das gesamte von einem Prüfling abgestrahlte Spektrum zu erhalten, sondern auch, wenn es darum geht, die Auswirkungen von Hardware-Modifikationen/Optimierungen eines Prüflings zu verfolgen. Die TEM-Zelle ist relativ unempfindlich in Bezug auf die Platzierung des Prüflings, was es einfach macht, relative Änderungen der abgestrahlten Emissionspegel zu verfolgen. Wenn Ihr Prüfling im Testhaus die Grenzwerte um z.B. 10 dB überschreitet, messen Sie ihn in der TEM-Zelle und optimieren Sie das Design, bis der in der TEM-Zelle gemessene Pegel eine Verbesserung von mindestens 10 dB aufweist. Sie können die Tekbox EMCview Software verwenden, die Grafik jedes Iterationsschritts speichern, sie überlagern und haben so eine

perfekte Dokumentation Ihrer Bemühungen. Eine TEM-Zelle ist sehr bequem zu bedienen, da sie auf jedem Labortisch Platz findet.



Beispiel: Verwendung einer TEM-Zelle und der Software EMCview zur Verfolgung der Auswirkungen von Hardwareänderungen über einen weiten Frequenzbereich

Bleibt noch zu erwähnen, dass CISPR 25 und CISPR 14 als Alternative zu den Fernfeldgrenzwerten Strahlungspegel für TEM-Zellen angeben. In diesem Fall können Sie die am Ausgang der TEM-Zelle gemessenen Pegel direkt anwenden und müssen sie nicht umrechnen. Es gibt jedoch einige Einschränkungen. CISPR 14 beschränkt die TEM-Zellen-Messungen auf batteriebetriebene Geräte.

Messantenne

Der Unterschied zwischen einer Antenne und einer Messantenne ist die Verfügbarkeit von Antennenfaktortabellen. Antennenfaktoren werden üblicherweise in dB/m angegeben. Wenn Sie den Antennenfaktor zum Ausgangssignal Ihrer Antenne in dBµV addieren, erhalten Sie die entsprechende elektrische Feldstärke in dBµV/m.

Die meisten Normen spezifizieren Grenzwerte für unerwünschte Abstrahlungen zusammen mit einem definierten Abstand zwischen Prüfling und Antenne.

CISPR 16 definiert verschiedene Frequenzbänder und die dazugehörigen Antennen:

Frequenzbereich	Antennen-Typ	
Bis zu 30 MHz	Überwiegend Loop-Antennen	
30 MHz - 200 MHz	Bikonische Antenne	
200 MHz - 1 GHz	Logarithmische periodische Antenne	Hybride Antennen
Über 1 GHz	Hornantenne	

Durch die Verwendung von Messantennen erhalten Sie Ergebnisse, die direkt mit genormten Abstrahlungspegeln verglichen werden können.

In der Praxis gibt es einige Hindernisse, solange man keinen abgeschirmten Raum zur Verfügung hat. Gestrahlte Emissionsmessungen mit Antennen in einer ungeschirmten Umgebung werden durch Umgebungsrauschen behindert. In der Tat ist es nicht trivial, das Umgebungsrauschen von den Emissionen Ihres Prüflings zu unterscheiden. Die Standardmethode, den Prüfling ein- und auszuschalten und die beiden Spektren zu vergleichen, mag vor Jahren angemessen gewesen sein. Heutzutage ist das Spektrum des Umgebungsrauschens jedoch hochdynamisch, was diese Methode ziemlich unbrauchbar macht.

Hier kommt eine TEM-Zelle zum Einsatz. Verschaffen Sie sich zunächst einen Überblick über das Spektrum Ihres Prüflings mit einer TEM-Zelle und messen Sie anschließend die entsprechenden Fernfeldpegel mit einer Antenne.

Wo soll die Antenne aufgestellt werden? Die Aufstellung innerhalb des Labors kann zu erheblichen Fehlern aufgrund von Reflexionen führen. Wenn möglich, stellen Sie die Messung auf einem Flachdach oder einer anderen Freifläche auf.

Ein weiteres Hindernis wird durch die Begrenzung des Antennengewinns verursacht. Messantennen sind breitbandig und haben folglich keinen hohen Gewinn. Je geringer der Gewinn ist, desto höher ist der Antennenfaktor. Wie bereits erwähnt, muss der Antennenfaktor zum Messergebnis hinzugerechnet werden. Das bedeutet, dass der Grundrauschpegel des Spektrumanalysators um den Antennenfaktor erhöht wird. Bei Normen mit niedrigen Grenzwerten kann das mit dem Antennenfaktor korrigierte Grundrauschen sehr nahe an die Grenzwerte herankommen oder diese sogar überschreiten. In reflexionsarmen Räumen ist dies kein großes Problem. Die fehlende Verstärkung wird mit rauscharmen Vorverstärkern kompensiert. In einer ungeschirmten Umgebung ist es jedoch wahrscheinlich, dass auch Umgebungsstörungen mit hohen Pegeln vorhanden sind. Diese verursachen nichtlineare Verzerrungen und führen zu Messfehlern, wenn Vorverstärker zwischen Antenne und Spektrumanalysator eingesetzt werden. Als Abhilfe für eine ungeschirmte Umgebung kann der Antennenabstand verringert werden. Bei CW-Emissionen ist es auch sinnvoll, die Messbandbreite zu verringern, um das Grundrauschen zu reduzieren.

Zusammenfassung

Prüfung des abgestrahlten Rauschens vor der Konformität:

Wenn Sie keinen Zugang zu einer reflexionsarmen Kammer haben, ist der kombinierte Einsatz von TEM-Zelle, Nahfeldsonden und Messantennen der richtige Weg, um das Problem zu umgehen.

Beginnen Sie mit einer TEM-Zelle, um kritische Emissionen zu identifizieren. Verwenden Sie ggf. ein geeignetes und dokumentiertes Referenzgerät oder IEC 61000-4-20, um die Pegel mit Fernfeldmessungen zu korrelieren.

Als Nächstes stellen Sie Ihren Prüfling in einer Freifeldumgebung auf und verwenden eine Messantenne, um die Fernfeldpegel jeder Emission zu erhalten, die aufgrund der Ergebnisse der TEM-Zelle als kritisch angesehen wird.

Falls eine der Emissionen die entsprechenden Grenzwerte überschreitet, verwenden Sie Nahfeldsonden, um den Ursprung der Emissionen zu lokalisieren, was Sie auf die Grundursache hinweisen wird.

Optimieren Sie die Prüflingshardware iterativ, indem Sie die TEM-Zelle zur Überwachung der relativen Verbesserungen verwenden.

Wenn Sie sicher sind, dass Ihre Verbesserung die Emissionen ausreichend reduziert hat, validieren Sie sie mit der Messantenne.

Prüfung der gestrahlten Störfestigkeit in Bezug auf Konformität:

Verwenden Sie TEM-Zellen. Wenn Sie nicht über ein großzügiges Budget verfügen, denken Sie nicht einmal an Antennen. Fernfeld-Setups erfordern leistungsstarke HF-Breitbandverstärker.

4 Offene TEM-Zellen versus geschlossene TEM-Zellen

Eine offene TEM-Zelle hat keine Seitenwände. Eine geschlossene TEM-Zelle hat metallische Seitenwände. Eine abgeschirmte Tür an der Seite bietet Zugang zum Einlegen des Prüflings. Die Tür kann mit einem abgeschirmten Glasfenster zur Beobachtung des Prüflings ausgestattet sein. Der Prüfling wird über Durchführungsfilter elektrisch angeschlossen.

Der einzige Vorteil einer geschlossenen TEM-Zelle ist die Abschirmung des Septums von Umgebungsgeräuschen. Die konstruktiven Details führen jedoch dazu, dass geschlossene TEM-Zellen deutlich teurer sind als offene TEM-Zellen. Die maximale Größe des Prüflings ist durch die Abmessungen der abgeschirmten Tür begrenzt. Die Handhabung des Prüflings ist im Falle einer offenen TEM-Zelle einfacher. Wenn Sie keine geschlossene TEM-Zelle mit einem abgeschirmten Fenster haben, kann die Störfestigkeitsprüfung behindert werden, da Anzeigeleuchten, LEDs oder Displays nicht beobachtet werden können.

Eine geschlossene TEM-Zelle kann ersetzt werden, indem eine offene TEM-Zelle in ein abgeschirmtes Zelt oder eine abgeschirmte Tasche eingesetzt wird. Die kombinierten Kosten für ein abgeschirmtes Zelt + offene TEM-Zelle sind niedriger als die Kosten für eine geschlossene TEM-Zelle. Darüber hinaus kann ein abgeschirmtes Zelt oder eine abgeschirmte Tasche für andere Zwecke verwendet werden, z. B. zur Abschirmung eines Messaufbaus für leitungsgebundenes Rauschen vor Umgebungsgeräuschen.

5 TEM-Zellen versus GTEM-Zellen

GTEM-Zellen sind pyramidenförmige 50-Ohm-Übertragungsleitungen. Ein 50-Ohm-Koaxial-Eingang wird auf einen rechteckigen Querschnitt mit einem Seitenverhältnis von 3:2 Höhe zu Breite transformiert. Das Septum ist einseitig typischerweise mit einer N-Buchse verbunden und auf der gegenüberliegenden Seite mit einem verteilten 50-Ohm-Widerstand abgeschlossen. Das Volumenfeld ist mit einem HF-Absorber abgeschlossen. GTEM-Zellen können so ausgelegt werden, dass sie bis weit in den GHz-Bereich hinein arbeiten, auch bei großen Abmessungen. Allerdings können sie bei niedrigeren Frequenzen aufgrund der Absorptionseigenschaften von HF-Absorberschäumen unterhalb von 1 GHz Einschränkungen haben. Bei GTEM-Zellen ist das Septum gegenüber der vertikalen Mitte erhöht und bietet somit mehr Platz für Prüflinge.

Folglich kann die IEC 61000-4-20-Korrelation im Vergleich zu TEM-Zellen auf größere Prüflinge angewendet werden.

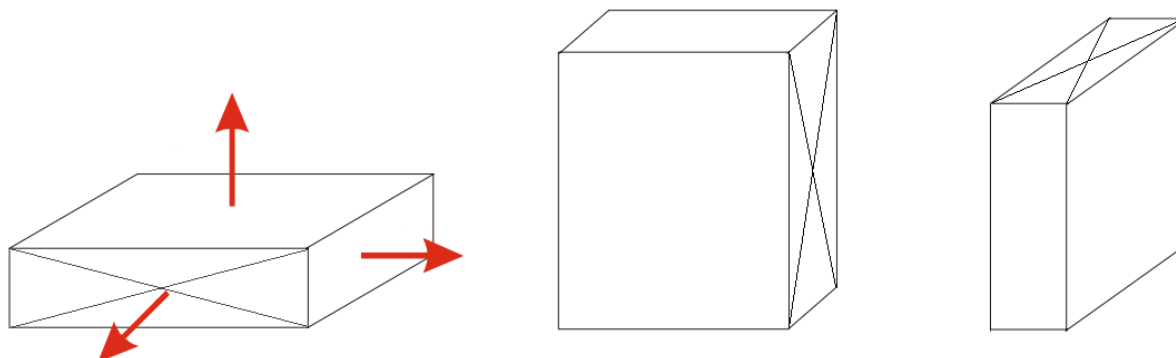
GTEM-Zellen sind hervorragende Instrumente für die Durchführung von Störstrahlungs- und Störfestigkeitsprüfungen, ihre Größe und Kosten können jedoch die Grenzen der Pre-Compliance-Budgets überschreiten.

6 Wie korreliert man TEM-Zellenmessungen mit Fernfeldgrenzen?

Es ist ein weit verbreitetes Missverständnis, dass der Ausgangspegel der TEM-Zelle durch einfaches Hinzufügen einer Korrekturkurve in ein äquivalentes Antennenmessergebnis umgerechnet werden kann. Die Amplitude der am Ausgang der TEM-Zelle gemessenen Emissionen ist ziemlich unempfindlich gegenüber der Verschiebung der Position des Prüflings in der TEM-Zelle. Der Prüfling kann über die Bodenplatte der TEM-Zelle verschoben werden und die Amplitude bleibt ziemlich konstant. Dies ist von großem Vorteil, wenn das Messobjekt während der HW-Optimierung wiederholt entfernt und wieder eingesetzt wird. Um relative Änderungen der Emissionen zu verfolgen, ist es nicht notwendig, das Messobjekt bei jeder Messung exakt an der gleichen Stelle zu platzieren.

Die Amplitude der am Ausgang der TEM-Zelle gemessenen Emissionen ist jedoch nicht konstant in Bezug auf die Orientierung des Prüflings. Um die Orientierung nicht mit der Platzierung zu verwechseln - Orientierung bedeutet, ob der Prüfling auf dem Kopf steht, um 90° gedreht ist, etc:

3 orthogonale Hauptausrichtungen des Prüflings:



Wenn man also versucht, das Messergebnis zu korrelieren, muss man die Orientierung des Prüflings finden, die die höchsten Emissionswerte ergibt. Es gibt nicht unbedingt nur eine einzige, "schlechteste" Orientierung. Ein Prüfling strahlt typischerweise bei verschiedenen Frequenzen ab, die von verschiedenen Bausteinen des Prüflings stammen. Folglich ist die ungünstigste Orientierung für verschiedene Störfrequenzen möglicherweise nicht identisch.

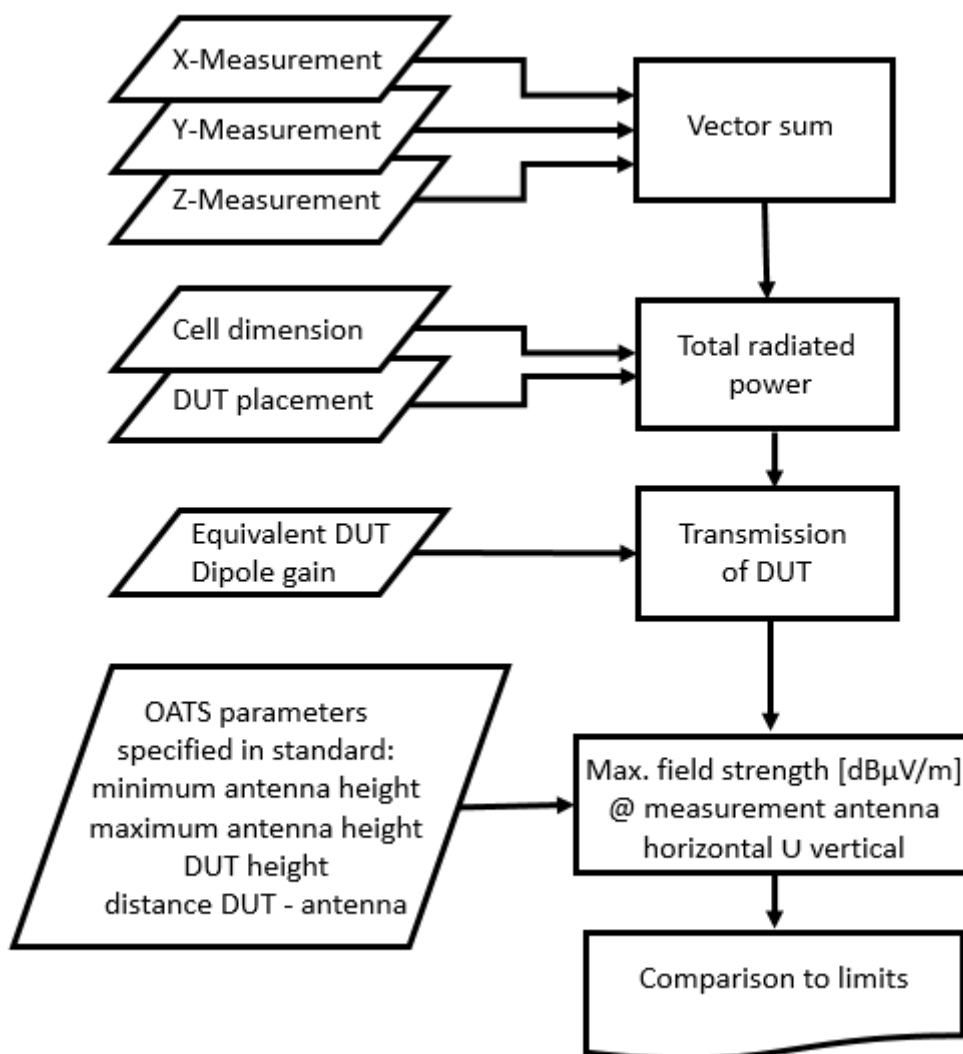
Wenn Sie sich die Mühe machen, die ungünstigste Prüflingsausrichtung zu finden, dann gibt es mehrere Ansätze, um herauszufinden, ob die mit der TEM-Zelle gemessenen Störaussendungen die Grenzwerte für die Störaussendung einhalten oder nicht einhalten würden.

- 1) Rein empirisch und extrem pauschal: Jeder Emissionspegel von 40 dB μ V oder mehr könnte als kritisch angesehen werden. Beachten Sie allerdings, dass die Grenzwerte für verschiedene Frequenzen und Normen unterschiedlich sind.
- 2) Wiederum empirisch und pauschal: TEM-Zellenpegel in dB μ V liegen oft innerhalb von ± 10 dB des äquivalenten Fernfeldpegels in dB μ V/m in 3 Meter Entfernung.
- 3) Verwenden Sie ein Produkt mit ähnlichen Abmessungen, das bereits in einer Absorberhalle gemessen wurde, als Referenzgerät
- 4) Verwenden Sie die in IEC 61000-4-20 spezifizierte Korrelationsmethode
- 5) Verwenden Sie einen kombinierten Ansatz, der auf TEM-Zelle, Nahfeldsonden und Antennenmessungen basiert, wie in der Zusammenfassung von Kapitel 4 beschrieben.
- 6) Bei einigen wenigen Normen müssen Sie keine Korrelation durchführen, da diese alternativ Grenzwerte für TEM-Zellen anbieten (z. B. CISPR 14, CISPR 25)

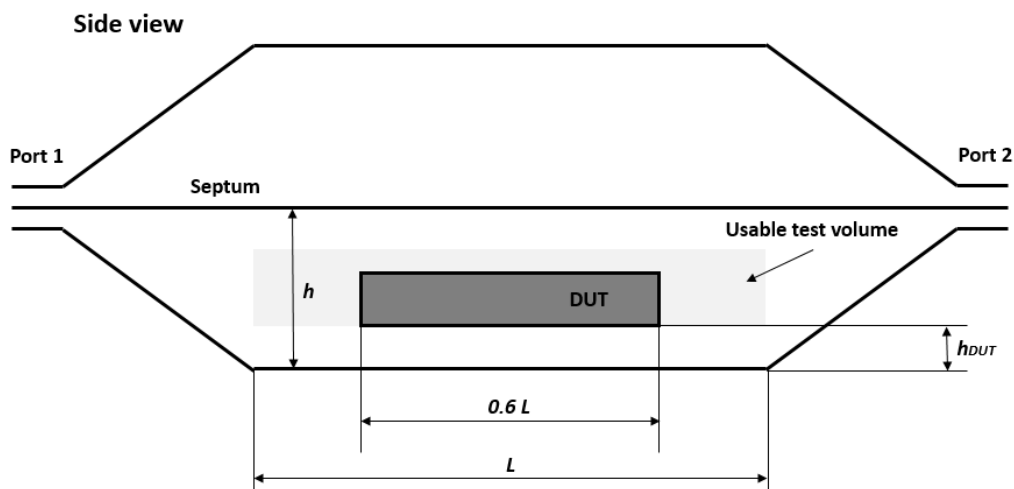
Korrelation mit IEC 61000-4-20

Die Norm beschreibt mehrere Verfahren, die sich grundsätzlich darin unterscheiden, wie viele Orientierungen des Prüflings gemessen werden, um die Vektorsumme der abgestrahlten Emissionen zu berechnen.

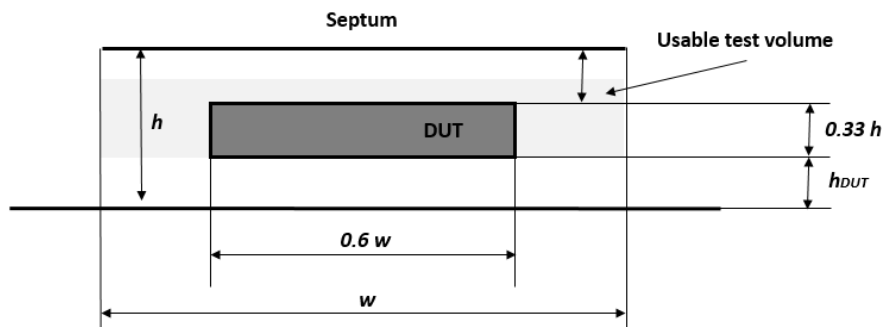
Die im Folgenden beschriebene Methode beschreibt den sogenannten "Drei-Positionen-Korrelations-Algorithmus". Er erfordert Messungen der drei orthogonalen Hauptausrichtungen des Messobjekts. Die wichtigste vereinfachende Annahme in diesem Algorithmus ist, dass die abstrahlenden Strukturen des Messobjekts keinen größeren Antennengewinn als ein Dipol hat und eine Richtwirkung wie ein Dipol haben. Der Ausgang der Messungen des Algorithmus wird dann in einen äquivalenten Fernfeldwert umgerechnet. Der Algorithmus wird typischerweise für Frequenzen oberhalb von 30 MHz angewendet.



Gemäß IEC 61000-4-20 müssen folgende Anforderungen in Bezug auf die Größe und Platzierung des Prüflings im Verhältnis zu den Abmessungen der TEM-Zelle erfüllt werden, um eine akzeptable Genauigkeit zu erreichen:



Cross sectional view



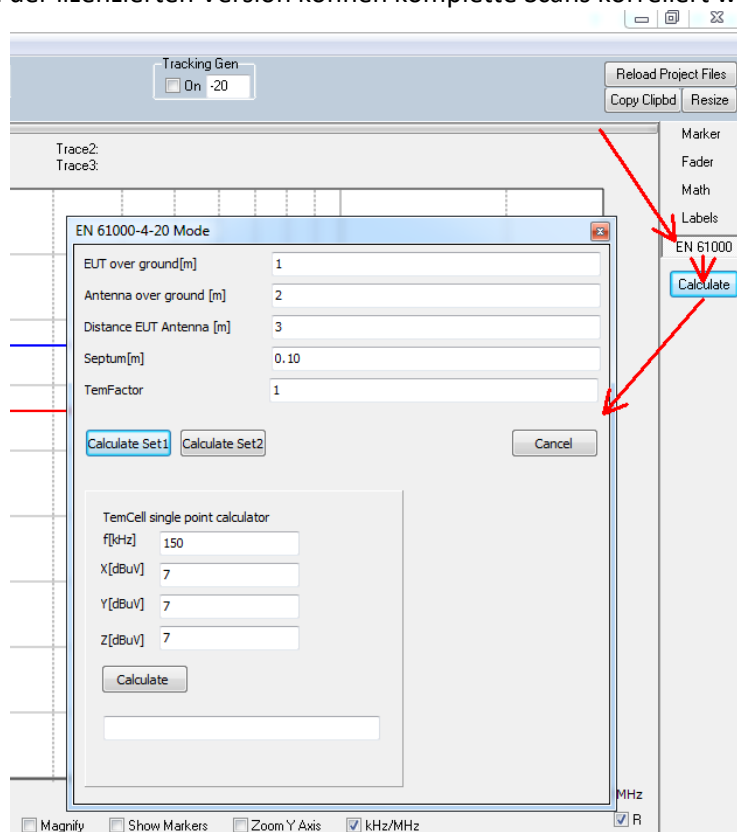
Beim Drehen des Prüflings in eine der drei orthogonalen Hauptpositionen muss der geometrische Mittelpunkt des elektronischen Teils des Geräts in der gleichen Position bleiben.

Mit EMCview V7.06 hat Tekbox eine vorläufige Implementierung des Drei-Positionen-Korrelationsalgorithmus eingeführt.

EMCview kann heruntergeladen werden unter

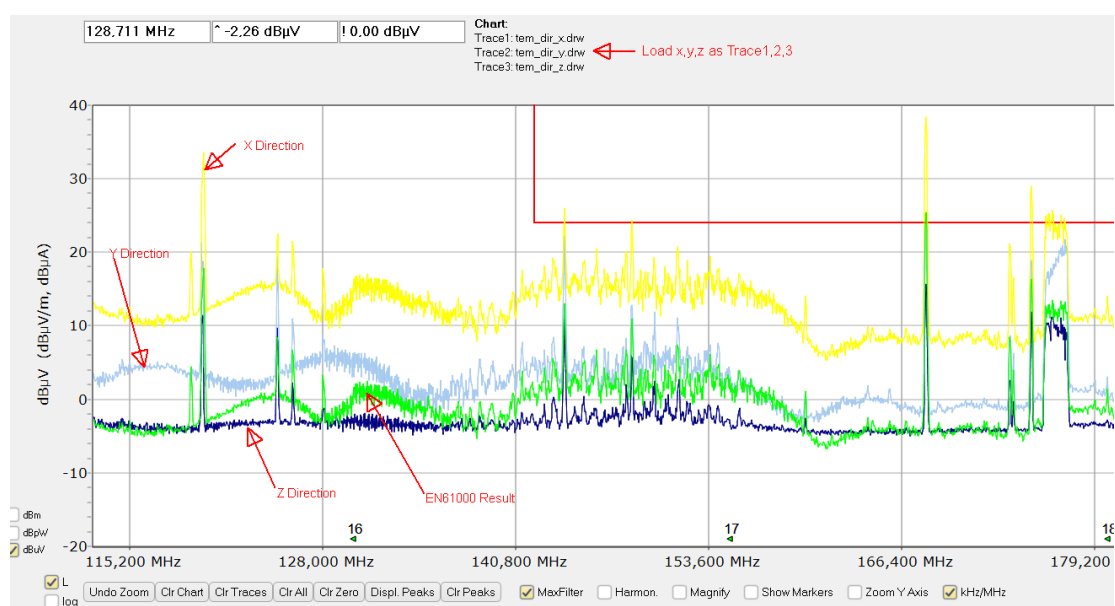
<https://www.tekbox.com/product/emcview-pc-software-emc-compliance-testing/>

Der Algorithmus kann auch ohne Software-Lizenz zur Berechnung der Korrelation bei diskreten Frequenzen verwendet werden. In der lizenzierten Version können komplette Scans korreliert werden.



Starten Sie das Korrelationswerkzeug durch Klicken auf die Schaltflächen EN61000 und CALCULATE. Geben Sie im Pop-up-Fenster die Prüfplatzparameter nach Norm und die Septumhöhe der jeweiligen TEM-Zelle ein. Der TEM-Faktor ist standardmäßig auf "1" eingestellt. Sie können ihn ändern, um eine Feinabstimmung / Anpassung des Ergebnisses vorzunehmen, falls Ihr Prüfling bereits in einem Testhaus gemessen wurde. Um eine Emissionsmessung bei einer einzelnen Frequenz zu korrelieren, geben Sie einfach die Störungsamplituden in dB μ V für die drei wichtigsten orthogonalen Ausrichtungen ein und klicken auf die Schaltfläche Berechnen.

Um einen Scan zu korrelieren, führen Sie den Scan für die drei orthogonalen Hauptorientierungen nacheinander durch und speichern Sie die resultierende Grafik nach jeder Messung mit der Funktion SAVE CHART. Laden Sie anschließend die drei Graphen als TRACES und klicken Sie auf die Schaltfläche CALCULATE SET1. Die resultierende Korrelation wird als zusätzlicher Graph im Graph-Fenster angezeigt und kann wie jeder andere Messgraph bearbeitet werden (Peak-Suche, Beschriftung, Prüfberichtserstellung, etc.)



7 Wie führt man die Pre-Compliance-Prüfung der Störaussendung mit offenen TEM-Zellen durch?

Siehe Kapitel 4 und 6 dieses Dokuments.

Weitere Details zum kombinierten Ansatz mit TEM-Zelle, Nahfeldsonden und Antennen finden Sie in unserer Application Note [AN_pre_compliance_radiated_noise_measures](#).

8 Wie wird die Prüfung der gestrahlten Störfestigkeit mit offenen TEM-Zellen vor der Konformitätsprüfung durchgeführt?

Die jeweilige Norm, die auf Ihr Produkt angewendet werden muss, gibt den Frequenzbereich und die elektrische Feldstärke an, die für die Störfestigkeitsprüfung aufgebaut werden muss. Wenn Sie die Prüfung möglichst normgerecht durchführen wollen, müssen Sie sicherstellen, dass Ihr Prüfling in das in der IEC 61000-4-20 angegebene und in Kapitel 6 dargestellte nutzbare Arbeitsvolumen passt. Berechnen Sie die erforderliche HF-Leistung gemäß Kapitel 1, um die gewünschte Feldstärke zu erreichen. Führen Sie dann 3 Sweeps durch, um die 3 wichtigsten orthogonalen Ausrichtungen des Prüflings abzudecken und die empfindlichste Ausrichtung zu finden.

Die meisten Störanfälligkeitsprobleme werden durch Leiterbahnen auf der Leiterplatte verursacht, die als Antenne fungieren und HF an Halbleiterübergänge weiterleiten. HF wird an den Halbleiterübergängen dann gleichgerichtet, wodurch Bias-Verschiebungen entstehen, die letztendlich zu Fehlfunktionen des Prüflings führen können.

Die maximale Suszeptibilität ist zu erwarten, wenn der Prüfling so ausgerichtet ist, dass die Leiterbahnen parallel zum elektrischen Feldvektor verlaufen. Das elektrische Feld ist orthogonal zum Septum. Eine parallel zum Septum liegende Leiterplatte unterliegt keinem starken Gradienten des elektrischen Feldes und Suszeptibilitätsprobleme sind weit weniger wahrscheinlich.

Seien Sie sich bewusst, dass das Einrichten und Durchführen eines möglichst normgerechten Tests, Ihre Aufgabe unter Umständen unnötig kompliziert macht. Am Ende des Tages ist das Ziel Ihrer Störfestigkeitsprüfung die maximale Störfestigkeit des Produkts und nicht nur das Bestehen der Störfestigkeitsprüfung im Testhaus. Sie können viel Detailarbeit investieren, damit das elektrische Feld über den gesamten spezifizierten Frequenzbereich auf genau 10V/m eingestellt ist, den Test bestehen, aber irgendwo im Feld passieren dann unangenehme Fehler, weil ein unvorhergesehener Anwendungsfall Ihr Produkt einer höheren Feldstärke aussetzt. Möglicherweise übersehen Sie eine Schwachstelle im Design, weil der Fehlermodus knapp über 10V/m auftritt. Dies kann oft durch das Hinzufügen eines winzigen, preiswerten Kondensators oder einer Ferritperle behoben werden und gibt Ihnen Immunität bis zu mehreren hundert Volt pro Meter.

Die "Tekbox-Foltermethode" geht dieses Thema mit brachialer Gewalt an. Injizieren Sie die maximale HF-Leistung, die Sie erzeugen können, in die kleinste TEM-Zelle, die Sie haben. Bei Tekbox bevorzugen wir die TBTCO und steuern sie mit 5W an, womit eine Feldstärke von fast 600V/m erzielt werden kann. Da die meisten DUTs in diese niedrige TEM Zelle nicht hineinpassen, entfernen wir die Gehäuse, um die PCBA freizulegen. Wenn das PCBA immer noch zu groß ist, testen wir es in Abschnitten oder verwenden die nächst größere, passende TEM-Zelle. Dieser Test lässt sich innerhalb von Minuten einrichten und wir müssen keine wiederholten Sweeps durchführen, um die empfindlichste Ausrichtung zu finden. Wenn das Design eine Schwachstelle hat, finden wir diese mit ziemlicher Sicherheit unabhängig von der Orientierung. Werfen Sie einen Blick auf die Applikationsschrift *AN_Immunity_testing_Tekbox_TEM_Cell*, die ein Beispiel zeigt, wie man mit der Tekbox-Foltermethode erfolgreich ist.

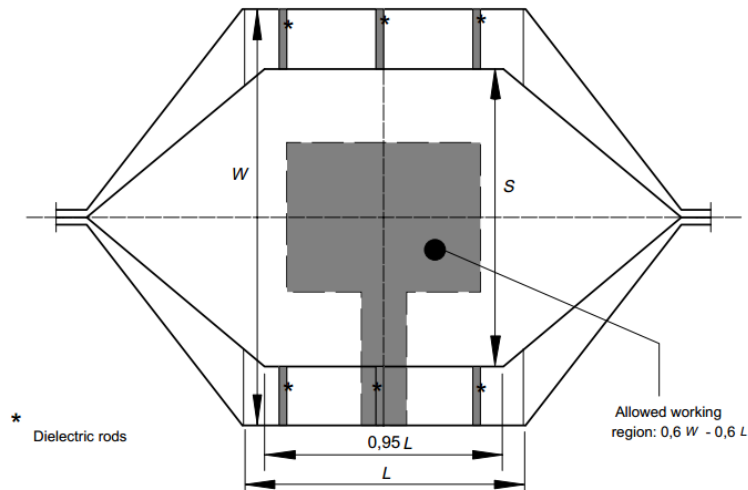
9 Wie groß ist das nutzbare Volumen der Tekbox TEM-Zellen?

Die Abmessungen aller Tekbox TEM-Zellen sind im Datenblatt dokumentiert.

Generell können Sie alles in die TEM-Zelle legen, solange es zwischen Bodenplatte und Septum passt. Sie können sogar Abstandshalter entfernen, um einen besseren Zugang zum Inneren der TEM-Zelle zu erhalten. Wenn Sie einen Prüfling haben, der größer als die TEM-Zelle ist, können Sie ihn ausschnittsweise messen. Es ist völlig legitim, das gesamte Volumen der TEM-Zelle auszunutzen, solange Sie sich darüber im Klaren sind, wie sich dies auf Ihre Messung auswirken wird. Bei relativen Störaussendungsmessungen oder Brachialgewalt-Immunitätstests werden Sie Ihre Ziele erreichen, ohne sich um das nutzbare Volumen zu kümmern.

Wenn Sie Ihre Messung möglichst normkonform durchführen wollen, beachten Sie die ISO 61000-4-20. Die Norm gibt das Nutzvolumen in Abhängigkeit von den Abmessungen der TEM-Zelle an. Die entsprechenden Abbildungen finden Sie in Kapitel 6 dieses Dokuments.

Wenn Sie Störaussendungsmessungen nach der Norm CISPR25 durchführen, finden Sie auch eine Spezifikation für den erlaubten Arbeitsbereich.

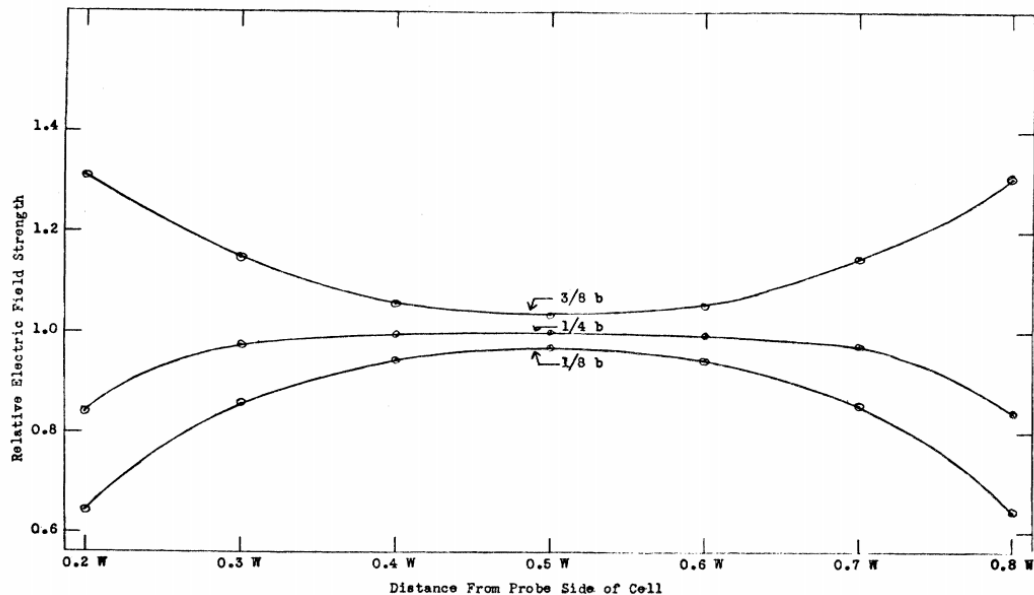


erlaubter Arbeitsbereich - Screenshot aus CISPR25, Anhang E

10 Feldverteilung in einer TEM-Zelle

Der Beitrag *Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells* von Myron I. Crawford, dem Erfinder der TEM-Zelle, veröffentlicht in IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. EMC-16, NO. 4, NOVEMBER 1974 ist eine hervorragende Referenz in Bezug auf die Feldverteilung in TEM-Zellen.

Die Zeichnung unten zeigt die Feldverteilung über den Querschnitt einer TEM-Zelle mit einem Formfaktor, der den Tekbox TEM-Zellen sehr ähnlich ist.



Relative elektrische Feldverteilung innerhalb der Zelle. Querschnittsschnitt

W: Breite der TEM-Zellen-Ober-/Unterplatte

b: innere Höhe der TEM-Zelle (Septum ist auf Höhe $b/2$)

Messungen der Feldverteilung der Tekbox TEM-Zellen, die im Frequenzbereich mit $S_{11} \leq -20$ dB durchgeführt wurden, stimmten gut mit der obigen Zeichnung überein.

11 Versionen

Version	Datum	Autor	Änderungen
V 1.0	3.9.2016	Mayerhofer	Erstellung des Dokuments
V 1.1	3.3.2021	Mayerhofer	Update aller Kapitel
V 1.2	09.03.2021	Stacey	Übersetzung