

Systematische Testlücke bei Einstrahlverfahren auf IC-Ebene und deren Behebung

Dr.-Ing. Viki Müllerwiebus, viki.muellerwiebus@posteo.de

1 Einleitung

Es gibt diverse Aufbauten zu TEM-Zellen [1]. Gewöhnlich sind sie der Systemebene zuzuordnen, da in das EMV-Testsystem vollständig betriebs- und überwachungsbereite Systeme eingebracht werden müssen. In der z.B. GTEM ist eine Einbringung eines Testsystems in das Volumen unterhalb des Septums möglich. Es kann jedoch nicht ein isolierter IC eingebracht werden, sondern nur ein gesamtes System aus IC mit Systemplatine. Die notwendigen Betriebskomponenten außerhalb des ICs, Leitungen und Quellenversorgung befinden sich dann ebenfalls innerhalb des Prüfvolumens. Alternativ können möglichst viele dieser notwendigen Betriebskomponenten außerhalb der GTEM positioniert werden. Dies resultiert in langen Zuleitungen zum IC innerhalb des Prüfvolumens. Im Fehlerfall ist in beiden Fällen nicht direkt unterscheidbar, ob der Fehler durch direkte Einkopplung auf den IC ausgelöst wird, indirekt durch Einkopplung auf die übermäßig langen Zuleitungen (die in der Praxis später nicht vorhanden wären) oder an sonstiger Stelle im System außerhalb des ICs. Solche Aufbauten sind Tests auf Systemebene zuzuordnen, da nicht die Möglichkeit des Tests eines vereinzelt ICs besteht. Insbesondere für IC-Hersteller ist diese Messmöglichkeit auf Systemebene mangelhaft - es soll klar unterschieden werden, ob der Fehler durch direkte Einstrahlung auf den IC ausgelöst wird oder über evt. ungünstig angeordnete Systemkomponenten außerhalb des ICs. Hierzu wurden Tests auf IC-Ebene definiert [2], wie beispielsweise die μ TEM-Zelle [3] oder die μ strip-Zelle [4]/[5]. Bei diesen Verfahren auf IC-Ebene befindet sich der IC auf einer mehrlagigen Testplatine. Ausschließlich der IC liegt auf der Unterseite der Testplatine. Sämtliche weiteren Komponenten und Zuleitungen befinden sich auf der Oberseite der Testplatine. Dazwischen verlaufen Ebenen mit flächiger Masse, nur unterbrochen durch Durchkontaktierungen zum IC. Auf diese Weise wird ermöglicht, dass die Testfelder fast ausschließlich auf den IC selbst einstrahlen, nicht auf die Zuleitungen oder Betriebskomponenten der Systemplatine. Es werden zu EMV-Testzwecken auf IC-Ebene aber alleinig Testmittel genutzt, mit denen lediglich TEM-Felder erzeugt werden können, bei denen die E-Feld-Komponente senkrecht auf dem IC und dessen Masseplatte steht. Dies ist in Bild 1 skizziert. Den IC mit einem TEM-Feld zu testen bei dem das E-Feld parallel zur Masseplatte erzeugt wird, ist mit diesen Messmitteln (μ TEM, GTEM auf IC-Ebene, μ Strip) prinzipiell nicht möglich. Bei der GTEM-Zelle führte der Ansatz auf IC-Ebene dazu, dass im Zellengehäuse eine Aussparung angebracht ist, die durch die IC-Testplatine ersetzt werden kann. Diese Messmöglichkeit bezeichnet die IC-Ebene, wie in Bild 2 verdeutlicht. Eine Drehung der Testplatine ist um 90° möglich, jedoch nur als Rotation zur Achse senkrecht zum Septum. Da die IC-Testplatine aber stets Teil des Gehäuses parallel zum Septum ist, ist grundsätzlich die E-Feldorientierung senkrecht zum IC gegeben. Die Wirkung einer auf IC-Ebene betriebenen GTEM-Zelle ist physikalisch identisch zum Aufbau einer μ TEM oder μ strip-Zelle nach [3] - [5].

Die Einstrahlung mit paralleler E-Feld-Erzeugung zum IC auf IC-Ebene zur Realitätsnachbildung von einfallenden Freiraumwellen ist jedoch notwendig, auch zur Vorhersage oder Nachbildung von Ergebnissen bei Einstrahltests auf Systemebene. Statt dem Wechsel der Feldorientierung Tests mit deutlich erhöhten Feldstärken bei z.B. μ TEM-Zellen-Tests mit weiterhin senkrechter E-Feldorientierung durchzuführen, ist aufgrund der Unabhängigkeit dieser Fälle nicht zielführend. Dennoch ist dies eine häufige Forderung wegen der vorhandenen Testlücke auf IC-Ebene. Dies ist jedoch keine akzeptable Lösung. Es gibt daher eine

systematische Lücke bei den einfachen Testverfahren zu Einstrahltests auf IC-Ebene, da die Möglichkeit zur Nachbildung der Einstrahlung paralleler E-Feldorientierung ausschließlich auf den IC (jedoch nicht seine notwendigen Betriebskomponenten und Zuleitungen) fehlt. Diese Testlücke wurde nach bestem Wissen des Autors in der Literatur bisher nicht in Hinblick auf die reine IC-Ebene betrachtet. Sie ist jedoch fundamental, um EMV-Probleme frühzeitig während der IC-Entwicklung erkennen zu können. Dieser Bericht zeigt, dass der Eindruck der prinzipiellen Testlücke im niedrigen Frequenzbereich zunächst nicht gegeben ist. Hier ist die senkrechte Feldorientierung als alleiniger Test für Einstrahltests auf IC-Ebene ohne Beschränkung anwendbar. Dies folgt aus der Tatsache, dass physikalisch bedingt allgemein an leitenden Flächen wie der IC-Massefläche keine E-Felder tangential auftreten können - unabhängig von den Feldorientierungen der einstrahlenden Quelle. Im höheren Frequenzbereich (abhängig von IC-Größe und Anforderung ab einer Testfrequenz von ca. 200 MHz/ 500 MHz) ergibt sich jedoch zunehmend eine fundamentale Testlücke auf IC-Ebene.

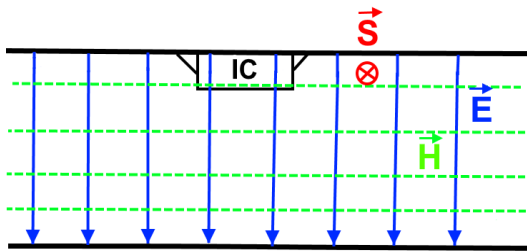


Bild 1 Feldbild in einer μ TEM/GTEM auf IC-Ebene/ μ strip-Zelle in der Umgebung des ICs

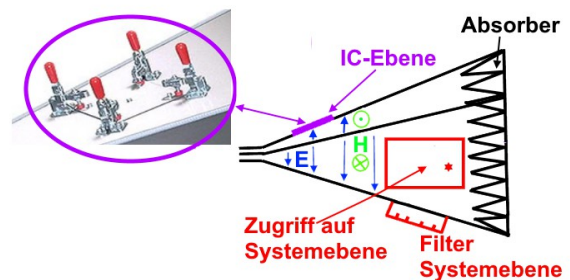


Bild 2 GTEM auf IC-Ebene entgegen Systemebene

2 Nachzubildende Realität – Reflexion ebener Freiraumwelle an Metallebene

Bei einstrahlenden EMV-Tests wird üblicherweise vom Vorliegen von Fernfeldern ausgegangen. Ebenso sind gewöhnlicherweise ICs dicht über einer Masseebene montiert, die als ideal leitende Metallplatte angenommen werden kann. Die Abmessungen der Masseplatte sind gewöhnlich deutlich größer als der IC, es wird daher eine unendlich ausgedehnte ideal leitende Metallebene als Masseplatte angenommen. Diese Annahmen führen zunächst zu der zu betrachtenden Situation, dass eine eintreffende ebene Fernfeld-Freiraumwelle aus einem verlustlosen Medium ($\kappa = 0$) an einer Leiteroberfläche ($\kappa \rightarrow \infty$) reflektiert wird, hierbei ist κ die Leitfähigkeit. Diese Situation ist hinreichend bekannt und über Formeln beschrieben, z.B. in [6]/[7]. Wie in [6]/[7] aufgezeigt wird, sind grundsätzlich zwei Feldorientierungen als Fallunterscheidung für die einfallende Welle zu betrachten. Hieraus sind dann allgemein alle einfallenden Wellen der beschriebenen Einschränkung (ebene Freiraumwelle, Fernfeld) in beliebigen Orientierungen zur leitenden Ebene über Überlagerung der beiden betrachteten Fälle konstruierbar. Die zugehörigen H-Felder müssen in dieser Betrachtung nicht gesondert geführt werden. Da Fernfeldbedingungen und eine feste Ausbreitungsrichtung der Freiraumwelle angenommen werden, sind sie fest mit den Fällen der E-Feldorientierungen verknüpft. Der Betrag folgt aus dem allgemeinen Zusammenhang einer Fernfeldfreiraumwelle über den Freiraumwellenwiderstand zu $|H| = |E|/\eta$, $\eta \approx 377 \Omega$. Die Orientierung der H-Feldkomponente ist jeweils gegeben aus der Tatsache, dass diese unter Fernfeldbedingungen stets sowohl senkrecht zur Ausbreitungsrichtung als auch senkrecht zur E-Feldkomponente steht.

2.1 Einfallende Feldorientierung nach Fall 1

Im ersten Fall, aus [6], soll das Magnetfeld H_e in der Einfallsebene (xz-Ebene) verlaufen und das elektrische Feld E_y senkrecht hierzu, siehe Bild 3 nach [6]. Hierbei sind E_e und H_e Feldstärken und S_e die Leistungsdichte der einfallenden Welle, α_e ist der Einfallswinkel. E_r , H_r , S_r und α_r sind die entsprechenden Größen der reflektierten Welle.

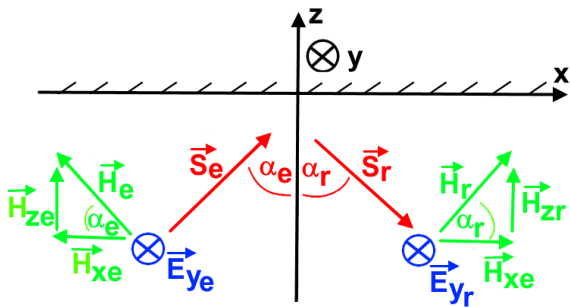


Bild 3 Feldorientierung der an der leitenden Fläche einfallenden und reflektierten Welle Fall 1, [6]

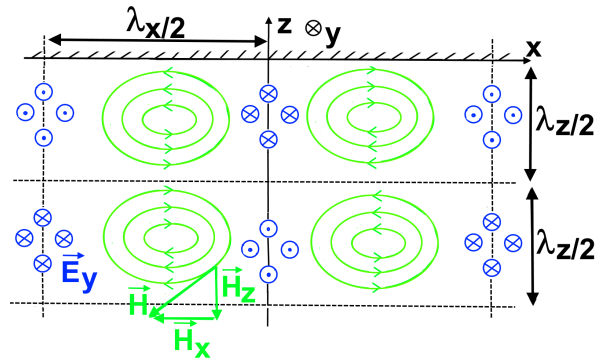


Bild 4 resultierendes Feldbild für eine Welle der Feldorientierung wie in Bild 3, [6]

Da Fernfeldbedingungen gelten sollen, ist sowohl die H-Feld- als auch die E-Feld-Komponente senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Das Feld strahlt im Einfallswinkel α_e auf die leitende Ebene und wird an ihr reflektiert. Nach [6] kann das resultierende E-Feld beschrieben werden als

$$\underline{E}_y(t) = -2j\hat{E}_e \cdot e^{-jk_1 x \sin(\alpha_e)} \cdot e^{j\omega t} \cdot \sin(k_1 \cdot z \cdot \cos(\alpha_e)) \quad (1)$$

Hierbei ist t die Zeit, k_1 die Wellenzahl der einfallenden Welle, ω die Kreisfrequenz und x, y und z die Koordinaten wie in Bild 3 gegeben. Der Betrag der E-Feldstärke ist daraus folgend

$$|\underline{E}_y(t)| = 2\hat{E}_e \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1} \cdot z \cdot \cos(\alpha_e)\right) \quad (2)$$

Formel (1) beschreibt eine sich in Richtung parallel zur leitenden Ebene ausbreitende Welle sowie eine stehende Welle senkrecht zu dieser leitenden Ebene. Dies ist ebenso im Feldbild in Bild 4 zu erkennen. Hierbei ist λ_x die Wellenlänge der sich in x -Richtung ausbreitenden Welle. λ_z ist die Wellenlänge der sich in z -Richtung durch die Reflexion ausbildenden Stehwelle.

2.2 Einfallende Feldorientierung nach Fall 2

Als zweite Feldorientierung der einfallenden Welle ist nach [6] zu betrachten, dass die E-Feldkomponente in der Einfallsebene (xz -Ebene) verläuft und H_y senkrecht zu dieser. Die Welle trifft unter dem Winkel α_e auf die leitende Ebene. Sie wird reflektiert. Diese vorausgesetzte Situation ist in Bild 5 skizziert. Es ergibt sich nach [6] das resultierende Feldbild wie in Bild 6 skizziert. Wiederum ist eine sich in Richtung parallel zur leitenden Ebene ausbreitende Welle sowie eine stehende Welle senkrecht zu dieser leitenden Ebene beschrieben.

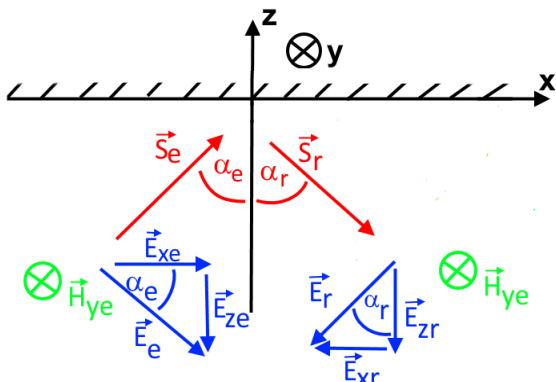


Bild 5 Feldorientierung der an der leitenden Fläche einfallenden und reflektierten Welle Fall 2, [6]

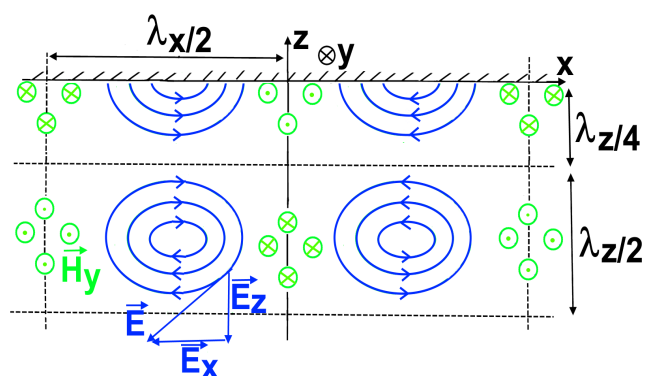


Bild 6 resultierendes Feldbild für eine Welle der Feldorientierung nach Bild 5, [6]

3 Frequenzgrenzen der Testlücke bei alleiniger Nutzung von Zellen der μ TEM-Art

Die Betrachtung der Felddiagramme der nachzubildenden Realität in Bild 4 und Bild 6 ergibt, dass über der ideal leitenden Masseebene physikalisch bedingt die E-Feld-Komponente senkrecht verläuft. Dies ist allgemein gültig und bekannt für alle ideal leitenden Oberflächen. Senkrecht zur Masseebene bildet sich eine stehende Welle aus, wie aus Formel (1) und Formel (2) ersichtlich. Diese stehende Welle weist die Wellenlänge $\lambda_z = \lambda_1 / \cos(\alpha_e)$ für den Fall 1 auf. Dies ist ersichtlich, wenn Formel (2) umgestellt wird nach

$$|\underline{E}_y(t)| = 2\hat{E}_e \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_1 / \cos(\alpha_e)} \cdot z\right) \quad (3)$$

Für EMV-Betrachtungen sind grundsätzlich die Bedingungen anzunehmen, die zum Worst-Case führen. Der IC ist dicht über der Masseebene an einem Ort in dieser stehenden Welle positioniert. Ist der IC noch in einem Bereich positioniert, in der die E-Feld-Komponente der stehenden Welle noch nahezu ausschließlich senkrecht auf der Masseebene verläuft, bildet die μ TEM-Zelle/GTEM/ μ strip-Zelle die Realität bereits vollständig nach. Es sind dann keine weiteren Messungen vonnöten. Wie in den Bildern 4 und 6 zu erkennen ist, bilden sich in der stehenden Welle in einem gewissen Abstand zur leitenden Masseebene E-Feld-Komponenten parallel zu der Masseebene aus, während an der Masseebene die Nullstelle vorliegen muss. Im Abstand $(\lambda_1/4)/\cos(\alpha)$ in Bild 4 verläuft die E-Feld-Komponente maximal. Liegt der IC durch den praktisch immer gegebenen Abstand des Halbleiter-Chips zur Masseebene bereits in diesem Bereich der stehenden Welle, so ist die μ TEM-Zelle/GTEM/ μ strip-Zelle als alleiniges Messmittel für einstrahlende Tests auf IC-Ebene nicht akzeptabel. Dieses Beispiel ist in Bild 7 skizziert. Bild 7 beschreibt in a) und c) die Fälle 1 und 2 einer niedrigen Einstrahlfrequenz. Hier treten keine nennenswerten E-Feldstärken im Bereich der IC-Halbleiterschicht (a) bzw. nur nennenswerte E-Feldstärken mit einer Feldorientierung senkrecht zum IC auf (c). Diese Situation wird hinreichend durch eine μ TEM/GTEM auf IC-Ebene/ μ strip-Zelle nachgebildet. Die Fälle b) und d) skizzieren die Fälle höherer Einstrahlfrequenz der beiden einstrahlenden Feldorientierungen.

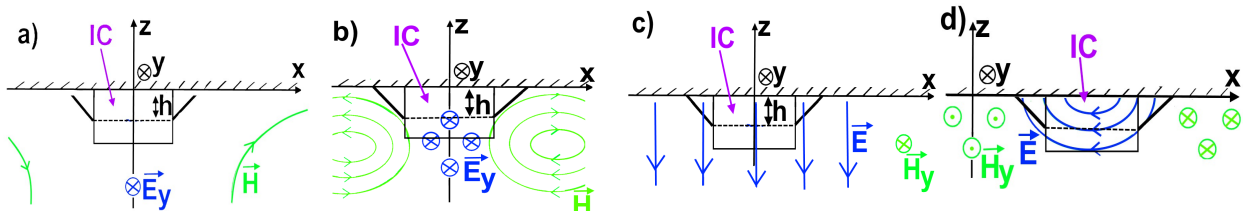


Bild 7 Position des zu testenden ICs im Bereich der Stehwelle bei a) niedriger Frequenz und b) hoher Frequenz zu Fall 1 aus Bild 3 und 4; sowie c) niedriger Frequenz und d) hoher Frequenz zu Fall 2 aus Bild 5 und 6; h ist die Höhe der IC-Halbleiterschicht oder der Bonddrähte über der Massefläche

Es ist ersichtlich, dass bei höheren Frequenzen die IC-Halbleiterschicht in Bereichen mit teilweise parallel zu ihr verlaufenden E-Feldstärken liegt. Dies ist abhängig von der Einstrahlfrequenz und der Höhe h der Halbleiterschicht über der Massefläche. Ab einer bestimmten Frequenzgrenze ergibt sich eine Testlücke, da dies nicht durch Tests mit μ TEM/GTEM auf IC-Ebene/ μ strip abdeckbar ist. Im folgenden wird diese Frequenzgrenze ermittelt.

Die Wellenlänge λ_z der sich aus der Reflexion ergebenden stehenden Welle senkrecht zur leitenden Masseebene hängt von der Wellenlänge der einfallenden Welle λ_1 ab, sowie dem Einfallswinkel α_e , siehe Formel (3). In diesem Fall ist der Worst-Case die kleinste Wellenlänge der stehenden Welle senkrecht zur Masseebene, da dann mit dem geringsten Abstand des Halbleiterchips zur Masseebene parallele E-Feld-Komponentenanteile erreicht werden. Nach Formel (3) ist die kleinste sich ergebende Wellenlänge λ_z der Stehwelle bei $\alpha_e = 0^\circ$ erreicht und identisch zur Wellenlänge der einfallenden Welle $\lambda_z = \lambda_1$. Dieser Worst-Case wird nur in wenigen Fällen der Realität eintreten – wenn die Störquelle senkrecht auf die Masseebene des ICs einstrahlt. Dennoch ist dieser Fall zur Bestimmung der Frequenzgrenzen zu betrachten, um die Allgemeinheit der Aussage für alle Einstrahlrichtungen der Realität zu erhalten.

3.1 Praktisch gegebene Höhenabmessungen der ICs über der Masseebene

Im Allgemeinen kann man annehmen, dass der Halbleiterchip im IC dicht an der Masseebene montiert ist. Das Leadframe schließt gewöhnlich dicht an die Massefläche an, auf ihm ist der Halbleiterchip montiert. Von diesem Chip sind Bonddrähte zum Leadframe gezogen. Oft wird durch die Dicke des Leadframes der bis zu 0,3 mm dicke Halbleiterchip in einer Höhe von bis zu 0,8 mm montiert. Die Bonddrähte können in einem Bogen oberhalb des Halbleiterchips verlaufen, oft höchstens 1-2 mm über dem Halbleiterchip. Somit wird oft ein Abstand von höchstens 1,1 mm zwischen Halbleiteroberfläche und Masseebene erreicht. Die Bonddrähte verlaufen stückweise auch parallel zur Masseebene und stellen eine gute Einkoppelmöglichkeit dar. Berücksichtigt man die Einkopplung von strahlenden Feldern über die Bonddrähte auf den Halbleiterchip, so muss von einer Höhe von oft 3,1 mm ausgegangen werden. Bis zu einer Testfrequenz von 1 GHz könnten die Einkopplungen über die Bonddrähte über die Möglichkeit des leitungsgebundenen DPI-Tests (Direct Power Injection Test) abgedeckt werden [8]. Praktisch ist jedoch ein einstrahlender Test gemeinsam auf den Halbleiter und die Bonddrähte vorzuziehen. Es ist daher im folgenden die Gesamthöhe inklusive der Bonddrähte zu betrachten.

Die Wellenlänge der Stehwelle muss hierbei wegen des IC-Gehäuses noch korrigiert werden, da dieses ein Dielektrikum darstellt und sich somit die Wellenlänge in direkter Umgebung des Halbleiters um den Faktor $\sqrt{\epsilon_r}$ verkleinert. Hierbei beschreibt ϵ_r die relative Dielektrizitätszahl. Das ϵ_r des IC-Gehäuses wird im weiteren als Worst-Case mit $\epsilon_r=4$ angenommen. Geringere ϵ_r hätten eine größere Wellenlänge λ_z zur Folge, was unkritischer bei der Grenzfrequenzbestimmung ist. Es gilt $\lambda_1=\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}$, wobei λ_0 die Wellenlänge der einfallenden Welle im Vakuum ist. Die Dicke des Halbleiters selbst ist im Vergleich zur Dicke des IC-Gehäuses und der betrachteten Wellenlängen vernachlässigbar und wird nicht eingebracht. Die Felder außerhalb des ICs sind nicht von direkter Bedeutung, es wird daher als Worst-Case ausschließlich eine Welle in einem ausgedehnten Dielektrikum betrachtet. Ebenso ist das Nichteinbringen von metallischen Leitern in der Halbleiterebene hier als Worst-Case-Betrachtung zu sehen.

3.2 Definition von $x[\%]$, dem Anteil des parallelen E-Feldes am Ort des ICs

Es werden Fernfeldbedingungen angenommen, daher gilt $|S|=|E|*|H|=|E|^2/Z$ mit dem Wellenwiderstand Z . Bei dem Feldorientierungsfall 1 nach Bild 3 und 4 ist nur die y-Komponente E_y des E-Feldes vorhanden, entweder als Nullstelle oder bereits mit nennenswerten Anteil an parallelem \hat{E}_y , siehe Bild 7 a) und b). Hier gilt $|S|=|E_y|*|H|=|E_y|^2/Z$. Zur Definition der Grenzfrequenz soll der Anteil der Feldleistungsdichte am Ort z (bzw. der Höhe h der Halbleiterschicht/Bonddrähte über der Masseebene) $x[\%]$ der maximale Feldleistungsdichte nicht überschreiten. Es gilt hier mit $x=|S(z)|/|S_{max}|$ als Beziehung $x=|E_y(z)|^2/|\hat{E}|^2$, wobei $x[\%]=100*x$ gilt. Das E-Feld ist in diesem Fall stets in y-Richtung (parallel zur Masseebene) orientiert. Unter dem Feldorientierungsfall 2 nach Bild 5 und 6 liegen die Feldkomponenten E_x und E_z vor, sowie H_y . Hier gilt $|S|=|E|*|H_y|=|E|^2/Z=(|E_x|^2+|E_z|^2)/Z=|E_x|^2/Z+|E_z|^2/Z$. $|E_z|^2=|E|^2-|E_x|^2$ mit $\sqrt{x}=|E_x|/|E|$ ergibt für x dann die Grundlage der Definition im zweiten Fall über den Zusammenhang $|E_z|=|E|\sqrt{1-x}$. Es folgt beim Vergleich der Formeln mit $|S|=x*|E|^2/Z+(1-x)*|E|^2/Z$, dass x den Anteil der Feldleistungsdichte beschreibt, der in E-Feldorientierung parallel zur Massefläche in x-Richtung vorliegt. $(1-x)$ beschreibt den Anteil, der in E-Feldorientierung senkrecht zur Masseebene vorliegt. x ist in beiden Fällen (nach Abschnitten 2.1 und 2.2) verwendbar als Definition, welcher Anteil der Feldleistungsdichte am Ort des ICs in der Orientierung mit E-Feldern parallel zur Masseebene (in Fall 1 in y-Richtung, in Fall 2 in x-Richtung) vorliegt. Durch die Möglichkeit und im Test gewöhnlich durchgeführte Drehung des DUTs um die z-Achse ist lediglich die Unterscheidung von E-Feldern parallel und senkrecht zur Masseebene entscheidend, es muss nicht zwischen E-Feldern in x- und y-Richtung unterschieden werden. Allgemein sind auch die einstrahlenden Felder in die beiden Feldorientierungsfälle aus Bild 3 und 5 zerlegbar, sodass diese Definition von x allgemein hier anwendbar ist.

3.3 Darstellung der Frequenzgrenzen bis zum Auftreten der Testlücke

Aus obiger Definition folgt, dass der E-Feldanteil parallel zur Masseebene (E_y am Ort des ICs und bezogen auf \hat{E} für Fall 1 und E_x für Fall 2) zu $|E_{\text{parallel}}|(\text{Ort des ICs}) = \sqrt{x} * |E|$ folgt. Für den Feldorientierungsfall 1 nach Bild 3 folgt aus Formel (3) im Worst-Case von $\alpha = 0^\circ$ somit

$$\sin^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}} * z\right) \stackrel{!}{\leq} \frac{x[\text{Prozent}]}{100} \quad (4)$$

Es folgt hieraus, dass der gesamte IC an folgenden Orten z platziert sein müsste, damit keine Testlücke bei Tests alleinig mit $\mu\text{TEM}/\text{GTEM}$ auf IC-Ebene/ μstrip vorhanden ist:

$$h = |z| \leq \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \frac{\arcsin\left(\sqrt{\frac{x[\text{Prozent}]}{100}}\right)}{2\pi} \quad (5)$$

bzw. mit $c_0/f_0 = \lambda_0$ ergibt sich für die einzuhaltende Grenzfrequenz

$$f_0 \leq \frac{c_0/\sqrt{\epsilon_r}}{2\pi} \arcsin\left(\sqrt{\frac{x[\text{Prozent}]}{100}}\right) \frac{1}{|z|} \quad (6)$$

Für den Orientierungsfall 2 nach Bildern 5 und 6 ist die Situation beschreibbar mit der Forderung

$$\cos^2\left(\frac{2\pi}{\lambda_0/\sqrt{\epsilon_r}} * z\right) \stackrel{!}{\geq} (1 - x_1) \quad (7)$$

Dies ergibt unter Beachtung des Zusammenhanges $\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1$ die gleichen einzuhaltenden Forderungen wie für den Fall 1. Es sind keine Forderungen hinzuzufügen.

Abhängig von der maximalen Testfrequenz ergibt Formel (4) den Leistungsdichteanteil vom Feld paralleler E-Feldorientierung am Ort des ICs. Nach Abschnitt 3.2 ist zu beachten, dass der Leistungsdichteanteil der parallelen Feldkomponenten am Ort des ICs quadratisch proportional zur E-Feldstärke ist. In Formel (6) kann der Zusammenhang der maximalen Testfrequenz in Abhängigkeit der Höhe des IC über der Massefläche und des zulässigen Leistungsdichteanteils für die parallele E-Feldkomponente am Ort des ICs abgelesen werden. Dieser Zusammenhang von Formel (6) ist in Bild 8 graphisch dargestellt. Bild 9 zeigt den Zusammenhang bei fester Höhe h der einkoppelnden Strukturen über der Masseebene. Überschreitet die Testfrequenz f die Grenzkurve (bei gegebener Höhe h des ICs über der Masseebene und einem gewünschten Leistungsdichteanteil $x[\%]$ für die parallele E-Feldausrichtung am Ort des ICs), so ist ein Messmittel mit alleiniger Ausrichtung auf E-Feldorientierungen vertikal zur Masseebene nicht mehr akzeptabel. Mit abnehmender Höhe des ICs und höherer Akzeptanz paralleler Feldanteile steigt erwartungsgemäß die tolerierbare Grenzfrequenz. Frequenzgrenzen sind beispielhaft in Tabelle 1 angegeben. Um in der Regel den gesamten IC im Einstrahltest zu charakterisieren, ist für h die Höhe inklusive der Bonddrähte zu berücksichtigen. Wird die Einkopplung über Bonddrähte von anderen Methoden (z.B. DPI [8]) getestet, so wäre die Höhe der Halbleiterschicht im IC zu wählen.

Berücksichtigte Höhe h des ICs [mm]	x [%]	Max. Anteil im parallelen E-Feld am IC [%]	Max. paralleles E-Feld am IC bei Test 200V/m	Grenzfrequenz ab der Testlücke auftritt [GHz]
3,1 (oft inkl. Bonddrahthöhe)	1	10	20 V/m	0,77
3,1	0,5	7	14 V/m	0,55
3,1	0,1	3,3	7 V/m	0,24
1,1 (z.B. Einstrahlung nur direkt auf Halbleiter berücksichtigt)	1	10	20 V/m	2,17
1,1	0,1	3,3	7 V/m	0,69

Tabelle 1 Ergebnisse der Grenzfrequenzen ab der die systematische Testlücke auftritt abhängig von der berücksichtigten Einkoppelhöhe h und der tolerablen parallelen Restfeldstärke, bei $\epsilon_r = 4$

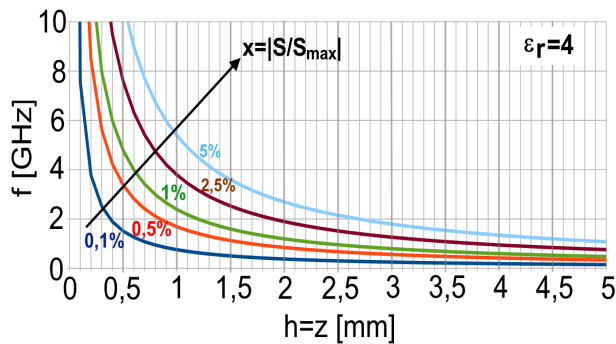


Bild 8 Grenzfrequenz der Testfrequenz f , für $\epsilon_r \leq 4$ des Gehäuses und in Abhängigkeit der Höhe h des ICs über der Masseebene und der Feldleistung $x[\%]$ am IC mit E-Feld-Orientierung parallel zur Massefläche bezogen auf die Gesamtfeldleistung

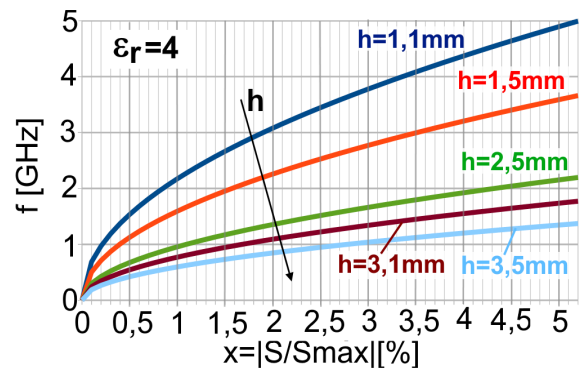


Bild 9 Grenzfrequenz der Testfrequenz f , für $\epsilon_r \leq 4$ des Gehäuses in Abhängigkeit der Feldleistung $x[\%]$ am IC mit E-Feld-Orientierung parallel zur Massefläche bezogen auf die Gesamtfeldleistung

4 Praktische Umsetzung zur Schließung der Messlücke auf IC-Ebene

Bei ICs mit Höhen von oft bis zu $h = 3,1$ mm (bei Berücksichtigung der Bonddrähte als einkoppelnde Strukturen) treten nach Abschnitt 3 ab einer Testfrequenz von ca. 200 MHz/ 500 MHz somit Testlücken auf – die Einstrahlung mit Freiraumwellen mit E-Feldorientierung parallel zur Masseplatte kann dann nicht hinreichend auf IC-Ebene nachgebildet werden. Bis 1 GHz ließe sich diese über die Methodik der DPI einschränken [8], jedoch nur unter hohem Testaufwand, da jeder Pin über DPI getestet werden müsste. Zudem ist die Methodik der DPI lediglich bis 1 GHz definiert, was zunehmend als unzureichend zu sehen ist. Eine Testerweiterung auf höhere Frequenzen ist wünschenswert. Das Ziel der Nachbildung zur Schließung der bestehenden Testlücke besteht nicht direkt darin, den IC in Bereiche mit parallelen E-Feldverläufen einzubringen. Ziel ist die Erzeugung eines Feldbildes, dass dem der Reflexion einer Freiraumwelle mit beim Einfall parallelen E-Feldverläufen an einer Masseebene entspricht. Verschiedene Aufbauten zur Nachbildung des Einfalls ebener Freiraumwellen mit paralleler E-Feldorientierung sind denkbar. Eine vielversprechende Möglichkeit besteht darin, einen Leitungstyp der Microstripleitungen in Ausbreitungsrichtung leerlaufen zu lassen oder kurzzuschließen. Die Systeme basierend auf Microstripleitungen sind in der EMV über μ TEM/GTEM/ μ Strip gegeben, wobei 50 Ohm Quellen- und 377 Ohm Feldimpedanz bereits nachgebildet sind. Anstatt die GTEM mit Abschlüssen und Absorbern zu terminieren, ist sie am Ende kurzzuschließen, wie in Bild 10 dargestellt. Die IC-Testplatine ist im GTEM-Gehäuse in die Kurzschlussfläche einzubringen. Es befindet sich dann ausschließlich der IC im einstrahlenden Testfeld, alle Betriebskomponenten, die Systemplatine und Zuleitungen sind außerhalb. Alternativ kann in eine GTEM-Zelle eine Kurzschlussfläche mit IC-Messplatine eingebracht werden, sodass die Testabgriffe außerhalb des Feldes liegen und im feldfreien Raum herausgeführt werden.

Dies unterscheidet diesen Aufbau wesentlich von dem derzeitigen möglichen Aufbau der Systemebene zur Einstrahlung von Feldern mit paralleler E-Feldkomponente (bei dem sowohl der IC als auch seine Systemplatine, Betriebskomponenten und Zuleitungen im einstrahlenden Feld der GTEM zu liegen kommen). Es kann die übliche μ TEM-Testplatine für die jeweiligen ICs weiterverwendet werden, welches den praktischen Testaufbau deutlich vereinfacht. Die Quelle des Testaufbaus kann über High-Power-Isolatoren vor der Totalreflexion der Leistung geschützt werden. Isolatoren mit 100 W Vorwärts- und Rückwärtsleistung sind z.B. in 3 Stufen im Bereich 45 MHz - 5 GHz verfügbar. Der Testaufbau ist somit prinzipiell mindestens bis 5 GHz einsetzbar. Für geringere Frequenzen ist in der Regel keine Testlücke vorhanden, siehe Abschnitt 3.

Die Quellleistung von 100 W entspricht im speisenden 50 Ohm-System einer Spannung von

70 V. Wählt man die Höhe der unteren kurzschließenden Rückwand der GTEM-Zelle, welche die IC-Testplatine beinhaltet, zur Länge der Testplatine von 10 cm, so folgen daraus einfallende Testfeldstärken von 700 V/m. In der GTEM-Zelle bildet sich eine Stehwelle aus, die Nullstelle liegt physikalisch bedingt dicht am IC. Dies bildet die Realität einer einfallenden Welle mit paralleler E-Feldorientierung zur Masseplatte jedoch exakt nach. Die Höhe der deutlich geringeren Feldstärke am Ort des ICs ist abhängig von der Höhe des ICs und der Testfrequenz. Sie kann mit Formel 2 unter $\alpha_e = 0$ berechnet werden. Die Größe dieser Feldstärke muss jedoch zur Testdefinition nicht berechnet werden, da sie eben den Fall nachbildet, der sich ergibt, wenn eine Fernfeldwelle mit paralleler E-Feld-Orientierung von einer Stärke von 700 V/m auf das DUT unter Worst-Case-Bedingung einstrahlt. Physikalisch bedingt wird sich die geringere Feldstärke am Ort des ICs in der nachzubildenden Praxis ebenso einstellen wie im hier aufgeführten Testaufbau. Der relevante anzugebende Testwert als einstrahlender Feldwert wäre in diesem Fall daher 700 V/m, unabhängig vom IC und der tatsächlichen Feldstärke am Ort des ICs.

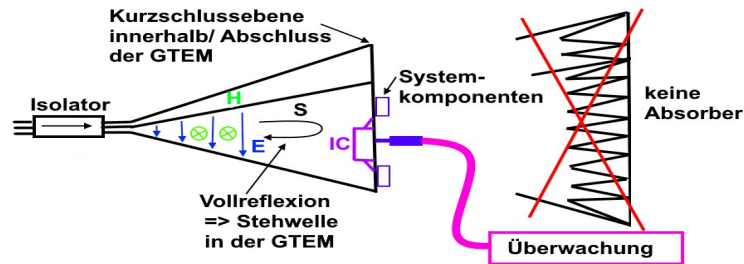


Bild 10 GTEM ohne Abschlüsse und Absorber, am Ende kurzgeschlossen, Testboard des ICs mit Masseebene des ICs ist Teil der Kurzschlussebene des GTEM-Gehäuses. Systemplatine, Betriebskomponenten und Zuleitungen liegen **außerhalb** der GTEM. Alternativ wäre eine Kurzschlussebene in die GTEM einziehbar, Systemkomponenten lägen außerhalb des GTEM-Feldes.

5 Zusammenfassung

Auf IC-Ebene ist bei den einstrahlenden EMV-Tests durch bisher fehlende Einstrahlungsmöglichkeiten mit E-Feld-Orientierung parallel zur Massefläche des ICs eine systematische Testlücke vorhanden. Diese tritt bereits deutlich unter 1 GHz auf, lediglich bei niedrigen Testfrequenzen im unteren MHz-Bereich nicht. Die Situation zur frühzeitigen Erkennung von EMV-Problemen während der IC-Entwicklung ist unzureichend. Im Bericht wurde detailliert dargelegt, ab welchen Frequenzgrenzen diese systematische Testlücke auftritt sowie ein Testaufbau vorgestellt zum Beheben dieser Testlücke bereits auf IC-Ebene.

Literaturangaben

- [1] A. J. Schwab, W. Kürner: Elektromagnetische Verträglichkeit, Springer-Verlag, 2007, pp. 370-373
- [2] IEC 62132-1, "Integrated circuits - Measurement of electromagnetic immunity -Part 1: General conditions and definitions"
- [3] IEC 62132-2, "Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity -Part 2: Measurement of radiated immunity – TEM cell and wideband TEM cellmethod"
- [4] IEC 62132-8, „Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity -Part 8: Measurement of radiated immunity – IC Stripline method“
- [5] B. Körber, N. Müller, M. Trebeck: IC-Streifenleitung – Neues Messverfahren zur Bewertung der EMV-Eigenschaften von Halbleitern, EMV 2008, VDE Verlag GmbH Berlin 2008, pp. 159-166
- [6] Prof. Dr.-Ing. H. Singer: Umdrucke zur Vorlesung Theoretische Elektrotechnik I/II, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1998, pp. 5.4.4
- [7] Meinke, Gundlach: Taschenbuch der Hochfrequenztechnik, Springer-Verlag, B8-B10
- [8] IEC 62132-4, "Integrated circuits - Measurement of electromagnetic immunity 150 kHz to 1 GHz - Part 4: Direct RF power injection method"