

Messung der Störfestigkeit integrierter Schaltungen getrennt für das elektrische und magnetische Feld

Stephan Pfennig, Gunter Langer,
Langer EMV-Technik GmbH,
01728 Bannewitz, Deutschland,
pfennig@langer-emv.de

1 Einführung

Eine Methode zur Messung der elektromagnetischen Störfestigkeit von integrierten Schaltungen (IC's) unter Verwendung einer TEM-Zelle ist in DIN EN 62132-2 [1] spezifiziert. Bei dieser Methode wird der zu untersuchende IC auf ein Testboard montiert und das Testboard in eine Öffnung in der Wand der TEM-Zelle eingelegt. Bei der Messung wird der IC mit dem in der TEM-Zelle erzeugten elektromagnetischen Prüffeld beaufschlagt. Das Prüffeld erfüllt im nutzbaren Frequenzbereich der TEM-Zelle die Fernfeldbedingungen. Die elektrische und magnetische Komponente des Prüffeldes bzw. der sich in der Zelle ausbreitenden TEM-Wellen sind über die Feldwellenimpedanz des freien Raumes $Z_{W0} \approx 377 \Omega$ fest miteinander verknüpft, stehen senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Welle. Im Fall einer Störbeeinflussung kann nicht bestimmt werden, ob die Beeinflussung durch die elektrische oder magnetische Komponente des Prüffeldes verursacht wurde.

Im Weiteren wird eine neue Methode zur Messung der Störfestigkeit von integrierten Schaltungen vorgestellt, die eine Unterscheidung zwischen der Störfestigkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern ermöglicht. Diese Methode verwendet zwei speziell entwickelte Feldquellen zur Erzeugung eines elektrischen bzw. magnetischen Prüffeldes. Das Testboard mit dem IC wird in eine Massefläche eingelegt. Anschließend wird unter Verwendung eines Distanzringes eine der Feldquellen über dem IC positioniert. Die Höhe des Distanzringes bestimmt dabei den Abstand zwischen Feldquelle und IC. Bei dieser Methode befindet sich der IC im Nahfeld der Quelle.

Mit den Feldquellen kann die Messung der Störfestigkeit getrennt für das elektrische und magnetische Feld erfolgen. Dieser Vorteil wurde in [2] verwendet, um die Schirmwirkung verschiedener Schirmkonfigurationen und Materialien zu untersuchen. Die Messung der elektrischen Feldstärke bzw. magnetischen Flussdichte erfolgte dabei mit Hilfe von zwei Feldmessern, die anstelle des IC's in das Testboard eingelegt wurden.

Der Aufbau zur Messung der feldgebundenen Störfestigkeit und der Schirmwirkung wird in Abschnitt 2 vorgestellt. Eine Charakterisierung der Prüffelder erfolgt in Abschnitt 3. Ausgewählte Ergebnisse zur Schirmdämpfung werden in Abschnitt 4 vorgestellt und diskutiert. Eine Zusammenfassung gibt Abschnitt 5.

2 Messaufbau

Zur Messung der Störfestigkeit im Frequenzbereich bis 3 GHz werden die IC-Testumgebung ICE1 und das IC Testsystem P1402/P1502 verwendet [3]. Für Messungen bis 1 GHz kann das IC Testsystem P1401 / P1501 verwendet werden [3].

Für die Messung werden die Massefläche GND 25, der Distanzring D70h10 mit der Höhe $h = 10$ mm, die Feldquelle P1402 zur Erzeugung des magnetischen Prüffeldes und die Feldquelle P1502 zur Erzeugung des elektrischen Prüffeldes verwendet. Das Testboard mit dem IC wird in die Massefläche eingelegt und die entsprechende Feldquelle unter Verwendung des Distanzringes über dem IC positioniert. Zur Erzeugung der Prüffelder werden die Feldquellen über einen Signalgenerator, Verstärker und zusätzlichen Richtkoppler gespeist.

Zum IC Testsystem gehören die Feldmesser EPM 02 und BPM 02, mit denen die elektrische bzw. magnetische Feldstärke am Ort des IC's gemessen werden kann. Mit Hilfe der Feldmesser, die unter Verwendung des Adapters GNDA 02 in die Massefläche GND 25 eingelegt werden, kann eine Regelung der Generatorleistung auf die gewünschte Prüffeldstärke erfolgen. Die notwendigen Leistungspegel können im Rahmen einer Vormessung ermittelt werden.

In Verbindung mit den Feldmessern EPM 02 und BPM 02 können die Feldquellen zur Untersuchung der Schirmwirkung auf IC-Ebene verwendet werden. Die einzelnen Komponenten und den Messaufbau zeigt Abb. 1. Dieser Messaufbau wurde in [2] verwendet, um die Schirmwirkung verschiedener Schirmkonfigurationen und Materialien zu untersuchen. Dazu wurde eine IC-Attrappe aus Styrodur verwendet. Diese wurde auf dem Feldmesser platziert und anschließend der Schirm aufgebracht [2].

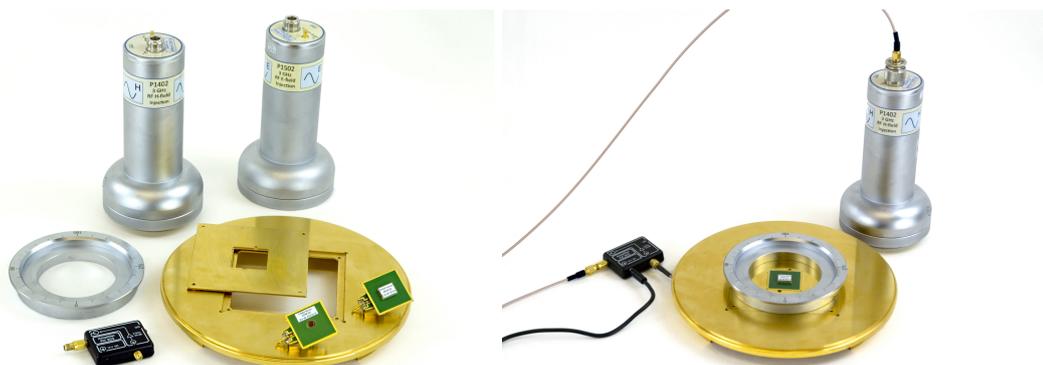


Abbildung 1: Messequipment und Messaufbau zur Messung der Schirmdämpfung

Zur Messung der Schirmdämpfung wurde jeweils ein Feldmesser anstelle des IC's in die Massefläche eingelegt und die entsprechende Feldquelle zusammen mit dem Distanzring über dem Feldmesser positioniert. Anschließend wurde der Ausgang des verwendeten Netzwerkanalysators (NWA's) mit der Feldquelle und der Ausgang des Feldmessers über einen Vorverstärker mit dem Eingang des NWA's verbunden und die Einfügedämpfung des Systems ohne sowie mit dem jeweiligen Schirm gemessen.

3 Prüffeld der Feldquellen

Die Feldquelle P1402 erzeugt ein magnetisches Feld und die Feldquelle P1502 ein elektrisches Feld. Im Bereich des zu prüfenden IC's ist das elektrische Feld der P1502 senkrecht zur Massefläche gerichtet und das magnetische Feld der P1402 in einer Ebene parallel zur Massefläche. Durch Drehen der Feldquelle P1402 auf dem Distanzring kann die Richtung des magnetischen Feldes in dieser Ebene variiert werden.

3.1 Bestimmung der Feldstärken

Wird der Feldmesser EPM02 bzw. der Feldmesser BPM 02 in die Massefläche eingelegt, kann das erzeugte Feld am Ort des zu prüfenden IC's gemessen werden. Die am Ausgang der Feldmesser gemessenen Spannungen u_m bei Anregung der Feldquellen mit einer Leistung von -5 dBm sind in Abb. 2 dargestellt. Mit Hilfe der Korrekturfaktoren der Feldmesser k_{EPM} und k_{BPM} kann die entsprechende elektrische Feldstärke E bzw. magnetische Flussdichte B berechnet werden.

$$k_{\text{EPM}} = \frac{E}{u_m} \quad \frac{E}{\text{dB}\left(\frac{\mu\text{V}}{\text{cm}}\right)} = \frac{u_m}{\text{dB}\mu\text{V}} + \frac{k_{\text{EPM}}}{\text{dB}\left(\frac{1}{\text{cm}}\right)} \quad (1)$$

$$k_{\text{BPM}} = \frac{B}{u_m} \quad \frac{B}{\text{dB}\mu\text{T}} = \frac{u_m}{\text{dB}\mu\text{V}} + \frac{k_{\text{BPM}}}{\text{dB}\left(\frac{\text{T}}{\text{V}}\right)} \quad (2)$$

Die Ergebnisse für den Frequenzbereich von 1 MHz bis 4 GHz sind in Abb. 2 dargestellt und zeigen, dass das Feld beider Feldquellen im Frequenzbereich bis 3 GHz näherungsweise konstant ist. Eine zusätzliche Anpassung der Feldstärke an die Prüffeldstärke kann, wie in Abschnitt 2 kurz beschrieben, durch eine frequenzabhängige Regelung der Generatorleistung erfolgen.

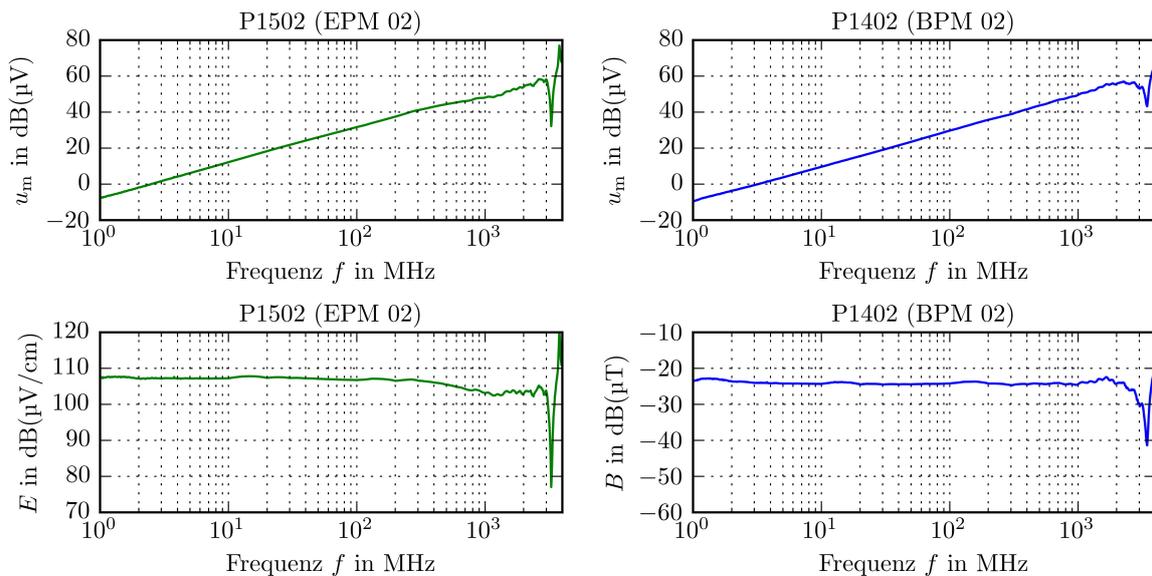


Abbildung 2: Berechnung der Feldgrößen mit Hilfe der Feldmesser EPM02/BPM02.

3.2 Feldkomponenten im Nahfeld der Feldquellen

Zur Charakterisierung der Feldquellen wurden für beide Feldquellen die elektrische und magnetische Feldstärke am Ort des zu prüfenden IC's mit Hilfe der Feldmesser bestimmt. Die Diagramme in Abb. 3 (oben) zeigen, dass neben der dominierenden bzw. gewünschten Feldgröße jeweils auch die andere Feldgröße existiert. Diese ist in Abhängigkeit von der Frequenz jedoch deutlich geringer. Neben den Feldstärken ist in Abb. 3 (unten) für beide Feldquellen das Verhältnis der Feldstärken E/H , das heißt die Feldwellenimpedanz Z_W der Quelle, in $\text{dB}\Omega$ angegeben. Die Ergebnisse zeigen, dass die Feldwellenimpedanz der elektrischen Feldquelle wie erwartet im Nahfeld [4, S. 204] hochimpedant ist und mit steigender Frequenz abfällt. Entsprechend ist die Feldwellenimpedanz der magnetischen Feldquelle im Nahfeld niederimpedant und steigt mit der Frequenz an. In beiden Fällen fällt bzw. steigt die Feldwellenimpedanz mit näherungsweise 20 dB/Dekade und nähert sich im GHz-Bereich der Feldwellenimpedanz des freien Raumes $Z_{W0} \approx 377 \Omega$ ($Z_{W0} \approx 51 \text{ dB}\Omega$).

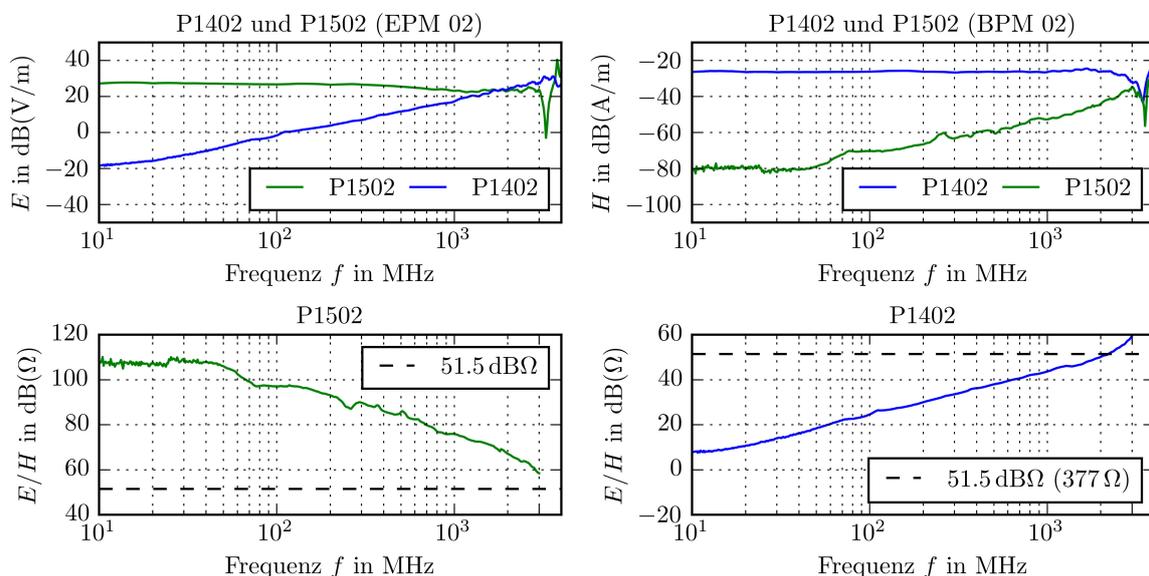


Abbildung 3: Elektrische Feldstärke E , magnetische Feldstärke H und Feldwellenimpedanz E/H der Feldquellen P1402 und P1502.

Die gewonnenen Ergebnisse gelten für den Distanzring D70 h10 und zeigen, dass sich der zu prüfende IC bis näherungsweise 3 GHz im Nahfeld der Quellen befindet. Das heißt, die vorgestellte Methode zur getrennten Messung der Störfestigkeit gegenüber elektrischen und magnetischen Feldern kann bis ungefähr 3 GHz verwendet werden.

Als Übergangspunkt zwischen dem Nahfeld und dem Übergangsfeld des elektrischen und magnetischen Elementardipols bzw. einer Dipol- und Rahmenantenne wird in [4, S. 204] der Abstand r von der Quelle angegeben, für den $r/r_0 = 0,63$ gilt. Für einen konstanten Abstand $r = 10 \text{ mm}$ von der Quelle und $r_0 = \lambda/(2\pi) = c/(2\pi f)$ ergibt sich die Frequenz $f = 3,0 \text{ GHz}$. Das heißt, liegt der betrachtete Aufpunkt 10 mm von der Quelle entfernt, befindet sich dieser bis 3 GHz im Nahfeld der Quelle. Diese theoretische Abschätzung unterstützt die messtechnisch gewonnene Frequenzgrenze.

3.3 Feldhomogenität

Ein weiteres Kriterium zur Bewertung des Prüffeldes ist dessen Homogenität. In einer ersten Messung wurde die Feldhomogenität der Feldquellen P1401 und P1501, die zur Messung der Störfestigkeit bis 1 GHz verwendet werden können, untersucht. Dazu wurde der Distanzring mit der jeweiligen Feldquelle auf der Massefläche verschoben. Das verwendete Koordinatensystem wurde so gewählt, dass die Ebene $z = 0$ in der Massefläche liegt und der Koordinatenursprung im Mittelpunkt der kreisförmigen Massefläche. Die Ergebnisse für eine Verschiebung der Feldquellen entlang der x - bzw. y -Achse zeigt Abb. 4. Die Messwerte wurden auf $E(x = 0, y = 0) = E_0$ und $B(x = 0, y = 0) = B_0$ normiert dargestellt. Aufgrund von Symmetrien im Aufbau der Feldquellen wurde die Feldhomogenität bei drei der vier Messungen nur für den positiven Achsenabschnitt aufgenommen.

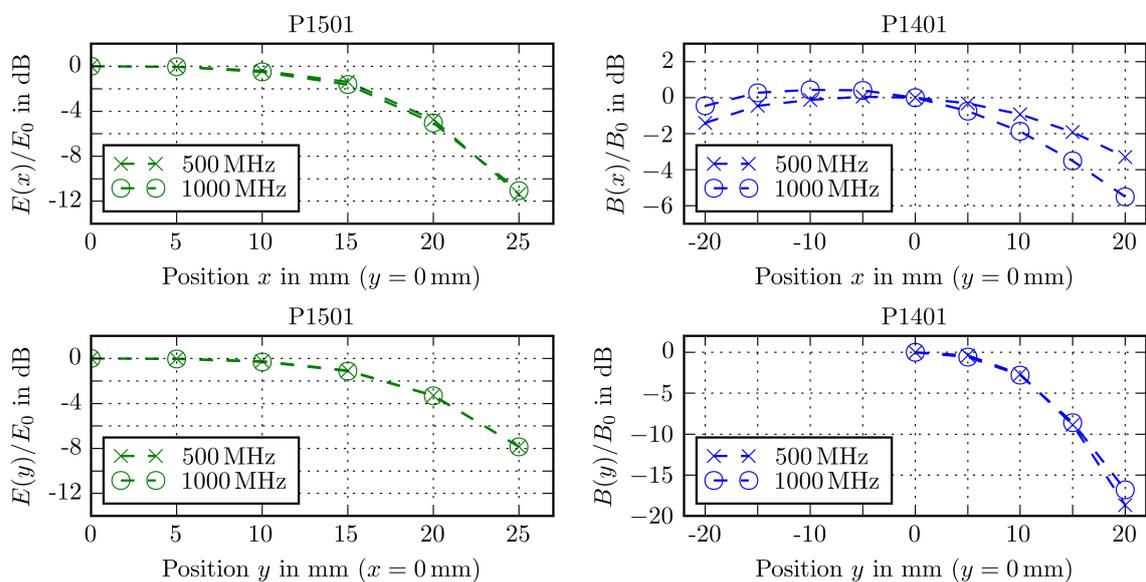


Abbildung 4: Feldhomogenität der Feldquellen P1401 und P1501 bei Verwendung des Distanzringes D70 h10.

Zur Bewertung der Feldhomogenität kann im ersten Schritt das Kriterium verwendet werden, dass das Feld im Prüfbereich nicht mehr als 6 dB abfallen darf. Für die Feldquelle P1501 wäre damit in erster Näherung ein kreisförmiger Prüfbereich mit einem Radius von 20 mm möglich. Da das Feld der P1401 in y -Richtung jedoch stärker abfällt, ergibt sich bei Verwendung des 6 dB-Kriteriums ein Prüfbereich mit einem Radius von ungefähr 12 mm bzw. in erster Näherung ein rechteckiger Bereich von (40×24) mm.

Weitere Untersuchungen zur Feldhomogenität der IC Testsysteme sowie zum Einfluss des zu prüfenden IC's auf das Prüffeld sind geplant. Beide Feldquellen besitzen einen Messausgang, über den die felderzeugende Spannung bzw. der felderzeugende Strom im Inneren der Feldquelle gemessen werden kann. Mit Hilfe dieser Messausgänge kann der Einfluss des IC's auf das Prüffeld messtechnisch ermittelt werden und darüber auch eine Anpassung der Prüffeldstärke erfolgen.

4 Messung der Schirmdämpfung

Zur Messung der Schirmdämpfung wurde der in Abb. 1 vorgestellte Messaufbau verwendet. Bei den Messungen wurde für verschiedene Schirmkonfigurationen die Einfügedämpfung (der Vorwärts-Transmissionsfaktor S_{21}) des Systems ohne und mit Schirm gemessen. Mit Hilfe der Korrekturfaktoren der Feldmesser und des Vorverstärkers wurde die elektrische Feldstärke bzw. magnetische Flussdichte berechnet. Aus den entsprechenden Kurven wurde anschließend für jede Schirmkonfiguration die Schirmdämpfung a_s für das elektrische bzw. magnetische Feld berechnet. Zur Untersuchung der verschiedenen Schirmkonfigurationen wurde zunächst eine IC-Attrappe aus Styrodur über dem jeweiligen Feldmesser platziert und anschließend der Schirm aufgebracht.

Die beste Schirmwirkung würde prinzipiell ein Schirm erzielen, der den IC vollständig bedeckt und rundum mit Masse verbunden ist. Praktisch ist dies jedoch nicht immer umsetzbar. Als einfachste Variante der Schirmung wurden daher Streifen aus Kupferklebeband verwendet, wobei deren Breite b variiert und bei der Anbindung des Schirmes zwischen der einseitigen bzw. beidseitigen Kontaktierung des Schirmstreifens gegen Masse unterschieden wurde. Der beobachtete Einfluss der Kontaktierung wurde untersucht und gezeigt, dass bei Verwendung von Kupferklebeband der Übergangswiderstand stark variieren kann und dies einen signifikanten Einfluss auf die Schirmwirkung hat. Die Ergebnisse wurden bereits in [2] vorgestellt und diskutiert.

Im ersten Schritt wurde die Schirmwirkung des Kupferklebebandes für Streifen der Breiten $b = (2, 4, 6, 8, 10)$ mm untersucht. Die Ergebnisse für die Schirmung des elektrischen und magnetischen Feldes sind für die beidseitige Kontaktierung des Schirmes in Abb. 5 dargestellt.

Im Fall der beidseitigen Kontaktierung verbessert sich die Schirmwirkung wie erwartet mit der Breite des Streifens. Die Ergebnisse für das elektrische Feld zeigen, dass die Schirmdämpfung im Frequenzbereich bis 2 GHz näherungsweise konstant ist. Für das magnetische Feld steigt die Schirmdämpfung im unteren Frequenzbereich mit ungefähr 20 dB pro Dekade an und ist im oberen Frequenzbereich bis 2 GHz näherungsweise konstant. Da der beidseitig kontaktierte Schirm eine Kurzschlusschleife bildet, entspricht dieser Verlauf ebenfalls dem erwarteten Verhalten.

Der Wirkmechanismus der Kurzschlusschleife zur Schirmung magnetischer Felder wurde in [2] erläutert und dabei auf die Wirksamkeit der Kurzschlusschleife in Abhängigkeit von der Frequenz eingegangen. Die für das magnetische Feld beobachtete Verschiebung der Kurven im unteren Frequenzbereich kann ebenfalls mit dem Wirkmechanismus der Kurzschlusschleife erläutert werden. Diese Verschiebung wird durch den Übergangswiderstand zwischen Massefläche und Schirm verursacht. Bei Verwendung von Kupferklebeband kann der Übergangswiderstand stark variieren und im Fall hoher Übergangswiderstände die Schirmwirkung deutlich geringer sein [2].

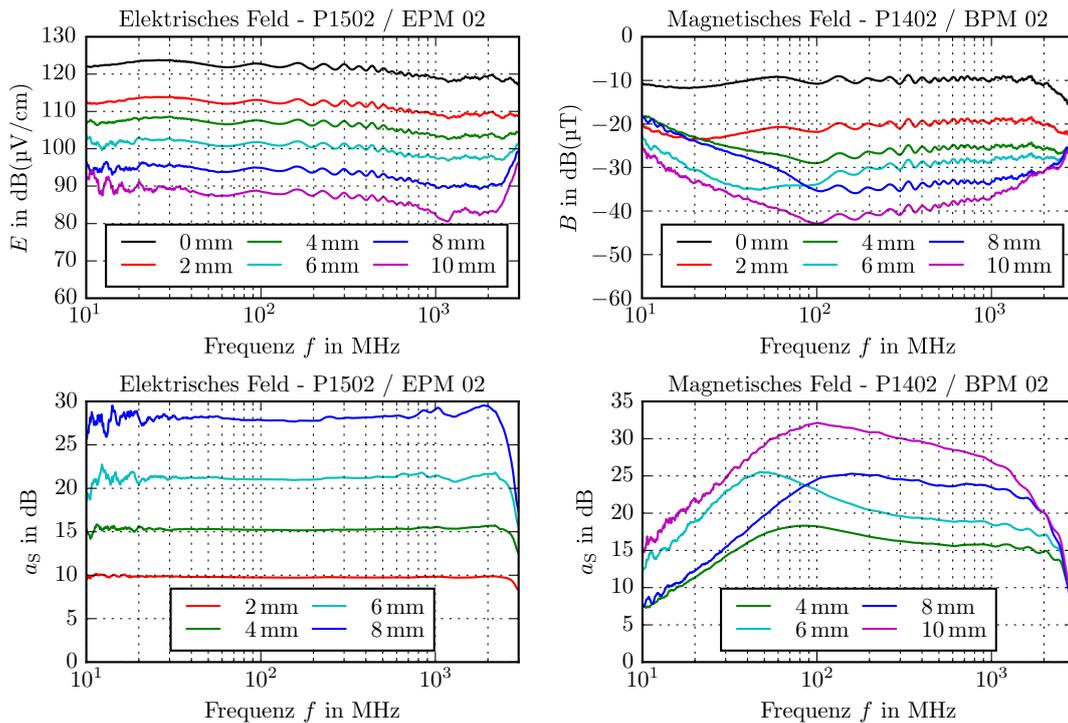


Abbildung 5: Elektrische Feldstärke E bzw. magnetische Flussdichte B in Abhängigkeit der Schirmbreite b und resultierende Schirmdämpfung a_s für einen beidseitig mit Masse verbundenen Schirmstreifen.

Für die einseitige Kontaktierung des Schirmes ergaben sich die in Abb. 6 dargestellten Ergebnisse. Im linken Diagramm sind diese für das elektrische Feld dargestellt und zeigen, dass sich im Vergleich zur beidseitigen Kontaktierung die Schirmwirkung im unteren Frequenzbereich nicht ändert. Im höheren Frequenzbereich wird die Schirmwirkung jedoch durch die parasitäre Kapazität zwischen Schirm und Masse, die von der Breite des Schirmes abhängig ist, reduziert [2]. Die Ergebnisse im rechten Diagramm zeigen, dass der Schirm für das magnetische Feld keine Wirkung besitzt. Da der Schirm nur einseitig kontaktiert ist, wird keine Kurzschlusschleife gebildet.

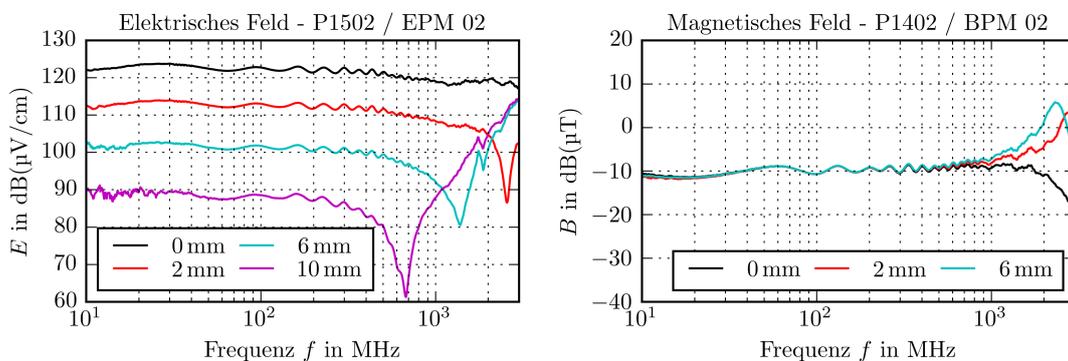


Abbildung 6: Elektrische Feldstärke E bzw. magnetische Flussdichte B in Abhängigkeit der Schirmbreite b für einen einseitig mit Masse verbundenen Schirmstreifen.

Bei Verwendung eines einseitig kontaktierten Schirmes mit großer Schirmfläche über dem IC und einer sehr schmalen Anbindung gegen Masse sind die parasitäre Kapazität des Schirmes und Induktivität der Schirmanbindung entsprechend groß. In diesem Fall wird die Schirmwirkung bereits im unteren Frequenzbereich signifikant reduziert. Daher sollte bei einer einseitigen Kontaktierung des Schirmes auf eine breite Anbindung des Schirmes geachtet werden [2].

5 Zusammenfassung

Es wurde eine neue Methode zur Messung der Störfestigkeit von IC's vorgestellt, die es erlaubt, die Störfestigkeit getrennt für das elektrische und magnetische Feld zu bewerten. Diese Methode verwendet eine definierte Massefläche, einen Distanzring und zwei separate Feldquellen zur Erzeugung des elektrischen bzw. magnetischen Prüffeldes. Das Testboard mit dem IC wird in die Massefläche eingelegt und anschließend eine der Feldquellen unter Verwendung des Distanzringes über dem IC positioniert. Die Höhe des Distanzringes bestimmt dabei den Abstand zwischen der Feldquelle und dem IC. Da sich der IC bei dieser Methode im Nahfeld der Quelle befindet, kann die Messung der Störfestigkeit getrennt für das elektrische und magnetische Feld erfolgen und damit der Störmechanismus näher untersucht werden. Diese Methode bietet sich daher als Ergänzung zur Messung in der TEM-Zelle nach DIN EN 62132-2 an.

Die vorgestellte Methode wurde verwendet, um die Schirmwirkung auf IC-Ebene zu untersuchen. Dabei wurde zwischen der Schirmwirkung gegenüber dem elektrischen und dem magnetischen Feld unterschieden. Im Rahmen der Untersuchungen wurden verschiedene Schirmkonfigurationen und Materialien verwendet. Die gewonnenen Ergebnisse zeigen sehr anschaulich, welche Schirmkonfigurationen zur Schirmung elektrischer bzw. magnetischer Felder geeignet sind.

Literaturangaben

- [1] DIN EN 62132-2:2011-07: *Integrierte Schaltungen - Messung der elektromagnetischen Störfestigkeit - Teil 2: Messung der Störfestigkeit bei Einstrahlungen - TEM-Zellen- und Breitband-TEM-Zellenverfahren*
- [2] PFENNIG, Stephan: Measuring Shielding Effectiveness at the IC Level. In: *Electromagnetic Compatibility & Signal/Power Integrity (EMCSI), 2017 IEEE International Symposium on*. <http://dx.doi.org/10.1109/ISEMC.2017.8078011>. – DOI 10.1109/ISEMC.2017.8078011
- [3] *Produktübersicht IC Messtechnik, Langer EMV-Technik GmbH*. <https://www.langer-emv.de/de/category/ic-messtechnik/12>
- [4] SCHWAB, Adolf J. ; KÜRNER, Wolfgang: *Elektromagnetische Verträglichkeit*. 5., aktualisierte und ergänzte Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007. – ISBN 978-3-540-42004-0