

Fachartikel

Magie der Spektrumanalyse

Magie der Spektrumanalyse Teil 2

Im ersten Teil des Artikels wurden die Grundlagen der Spektrumanalyse erörtert. Angesprochen wird der Praktiker. Der zweite Teil zeigt anhand von Beispielen aus dem EMV-Bereich den Einsatz eines Spektrumanalysators exemplarisch auf.

Die Leistungsfähigkeit moderner Elektronik (Halbleiterbauelemente, Mikroprozessoren, Oszillatoren ...) wird unter anderem durch eine immer weitergesteigerte Verarbeitungsgeschwindigkeit erreicht. Die dabei auftretenden Signalfrequenzen erreichen schon längst Frequenzbereiche, die nach den Methoden der Hochfrequenztechnik behandelt werden müssen. Die dazu notwendige Messtechnik bedient sich unter anderem der Spektrumanalyse. Angesprochen wird im vorliegenden Artikel der Praktiker, der sich bei seiner täglichen Arbeit mit moderner Elektronik, Signalen und Spektren auseinandersetzen muss.

Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)

Harmlosere EMV-Problematiken, die uns quasi täglich umgeben, manifestieren sich beispielsweise folgendermassen: Ein Autoradio gibt undefinierbare Geräusche von

sich, wenn ein Mobiltelefon benützt wird oder der Bildschirm «wackelt», wenn in der Nähe ein Zug vorbeifährt. Hierbei handelt es sich mit grösster Wahrscheinlichkeit um elektromagnetische Unverträglichkeit. Ein elektrisches System ist erst dann elektromagnetisch verträglich, wenn es:

- sich selbst nicht stört,
- andere Systeme nicht stört,
- von anderen Systemen nicht gestört wird.

Hier setzen die, seit dem 1.1.1996 in Kraft getretenen, EG-Richtlinien an. Man möchte verhindern, dass elektrische Systeme von elektromagnetischen Feldern aus der Umgebung gestört werden bzw. andere Systeme stören. Wer ein CE-Zeichen auf ein Gerät aufbringen will, muss einen Nachweis über eine gewisse Mindestanforderung an elektromagnetischer Verträglichkeit erbringen. Die Qualität des Systems muss durch entsprechende Prüfergebnisse belegt werden.

EMV-Probleme in den Griff bekommen

Wo früher Ströme im mA-Bereich und Signale mit einer Signaldauer von 20 ms und mehr erforderlich waren, um beispielsweise ein Relais zu schalten, wird heute mit Signalströmen im μA -Bereich und Impulsen mit Anstiegszeiten von 1 ns und weniger gearbeitet. Die wachsenden Verarbeitungsgeschwindigkeiten und die immer steiler werdenden Signalfanken verschieben die EMV-Probleme in immer höhere Frequenzbereiche.



Bild 1
Ermittlung der abgestrahlten Stör-
energie mit Hilfe einer Magnetfeld-
sonde (H-Feld-Sonde) und eines Spek-
trumanalysators.

Um elektromagnetische Verträglichkeit zu garantieren, muss ein sehr grosses Frequenzspektrum von etwa 10 kHz bis 1 GHz beherrscht werden. Die maximal zulässigen Pegel der abgestrahlten elektrischen Feldstärke sind zudem sehr klein und betragen nur einige zehn $\mu\text{V}/\text{m}$ bis wenige mV/m . Dies bedeutet, dass in höheren Frequenzen Spannungen von weniger als einem mV und Ströme im mA -Bereich die Ursache sein können, dass die EMV-Vorschriften nicht mehr eingehalten werden können.

Grund für die harten Anforderungen in der EMV ist u.a. die Tatsache, dass auch empfindliche Rundfunkempfangsanlagen in der Umgebung von elektronischen Geräten noch störungsfrei funktionieren sollen - oder wer möchte schon an seinem Arbeitsplatz auf den Radioempfang verzichten, sobald der PC eingeschaltet wird.

Was kosten EMV-Massnahmen?

EMV muss nicht teuer sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass EMV-Massnahmen etwa 3 bis 5 % der Gerätekosten betragen, wenn EMV-Massnahmen vom Beginn einer Entwicklung an mit «hineinkonstruiert» und entwicklungsbegleitend getestet werden.

Blauäugigkeit bezüglich elektromagnetischer Felder kommt allerdings allzu oft teuer zu stehen. Wird die EMV erst nach Fertigstellung eines Gerätes zum Thema, so kann es leicht vorkommen, dass die EMV-Massnahmen 50 bis 100 % der geplanten Entwicklungskosten betragen, d. h. man beginnt nochmals ganz von vorne und bezahlt Unmengen Geld für wochenlange Messreihen.

Die normgerechten Schluss-Prüfungen werden meist in entsprechend ausgerüsteten und spezialisierten Labors durchgeführt.

Während der Entwicklung dagegen ist es wichtig, rasch und ohne grossen Aufwand zu genügend aussagekräftigen Ergebnissen zu gelangen. Für die Kontrolle der Wirksamkeit von EMV-Massnahmen ist es während der Entwicklung nicht wichtig, mit normgerechten Versuchsaufbauten zu arbeiten. Vielmehr geht es darum, rasch die kritischen Zonen im Schaltungsaufbau und die Signalleitungen mit einem hohen Störpotential zu erkennen, um mit vergleichenden Messungen die optimalen und kostengünstigsten EMV-Massnahmen zu finden.

Oszilloskop, oder ...

Für EMV-Massnahmen ist man mit einem klassischen Oszilloskop mit dem Latein sehr rasch am Ende. EMV-Probleme können sich über einige hundert MHz erstrecken und selbst schwache Signalanteile können grosse Probleme verursachen. Als Beispiel seien die Harmonischen der Clockfrequenzen erwähnt. Wenn man beispielsweise die 17. Harmonische einer Clockfrequenz um einen Faktor 3 verändert (entspricht etwa 10 dB), so wird man dies auf einem Oszilloskop kaum erkennen können. Wenn dagegen durch eine Massnahme ein digitales Signal auf dem Oszilloskop leicht verändert erscheint, wird niemand sagen können, wie sich dadurch die 13., die 19. oder die 21. Harmonische verändert hat. Das Oszilloskop hat seine unbestrittenen Qualitäten und mit Recht einen festen Platz am Elektronik-Arbeitsplatz, aber für EMV-Tests sind andere Eigenschaften gefordert, wie beispielsweise:

- die Möglichkeiten der empfindlichen, frequenzselektiven Messung zwischen 10 kHz bis 1 GHz im μV - und mV -Bereich
- die logarithmische Darstellung von Amplituden

Hohe und frequenzselektive Empfindlichkeit wird benötigt, um die oft problematischen, hochfrequenten Anteile eines Signals im Detail erkennen zu können. Die logarithmische Darstellung von Amplituden erlaubt es, die «Spreu» vom «Weizen» zu trennen. So wird in einer ersten Analyse in einem bestimmten Frequenzbereich nach den grössten Signalanteilen gesucht, und man kümmert sich nicht um Signalanteile, die beispielsweise 10 dB oder 20 dB kleiner sind. Die geforderten Eigenschaften eines «EMV-gerechten» Messgeräts werden von einem Spektrumanalysator erfüllt.

... Spektrumanalysator

Es ist nach wie vor ernüchternd, wie selten Spektrumanalysatoren im Entwicklungsalltag anzutreffen sind. Oft werden Kostengründe vorgeschoben. Die entwicklungsbegleitende Spektrumanalyse verlangt keineswegs nach einem «Rolls-Royce» unter den Spektrumanalysatoren. Da Spektrumanalysatoren nicht tagtäglich eingesetzt werden, ist es im Gegenteil besser, einfach zu bedienende Geräte einzusetzen, welche

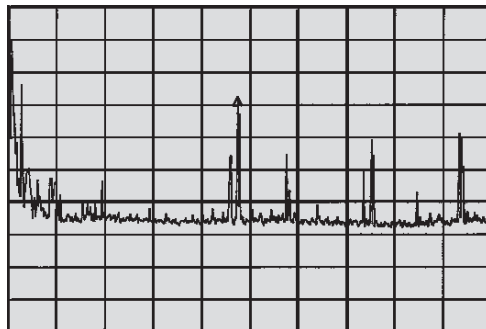


Bild 2
Aufnahme eines
Breitbandspektrums.

von jedem Entwickler ohne grosse Schwellenangst verwendet werden können. Wichtig ist es, rasch und mit wenig Aufwand vergleichende Messungen durchführen zu können. Wie schnell ein Spektrumanalysator amortisiert ist, zeigt folgende Überlegung. Ein Messtag in einem spezialisierten EMV-Labor kostet zurzeit etwa Fr. 2500.–. Ein einfacher und kostengünstiger Spektrumanalysator ist bereits amortisiert, wenn es damit gelingt, insgesamt zwei bis drei Messtage im EMV-Labor einzusparen. Insgesamt muss es das Ziel einer effizienten EMV-Entwicklung sein, mit jedem neu entwickelten Gerät nur ein einziges Mal zur normengerechten Schlussprüfung anzutreten.

Feldgeführte Störsignale

Unter feldgeführten Störungen wird die Abstrahlung von Störsignalen verstanden, im Unterschied zu sogenannten leitungsgeführten Störungen. Der Frequenzbereich für feldgeführte Störsignale erstreckt sich von ca. 30 MHz bis 1 GHz.

Normengerecht werden die feldgeführten Störpegel mittels Antennen und Messempfängern in einem reflexionsfreien Umfeld, welches frei von Drittstörungen ist, gemessen. Die normengerechten Messungen werden daher meistens in sogenannten Absorberhallen durchgeführt. Absorberhallen sind speziell ausgekleidete, abgeschirmte Räume. Die Investitionskosten für derartige Anlagen inklusive der passenden Messgeräte liegen meist über einer Mio. Franken.

Entwicklungsbegleitend sind derartige Messungen jedoch ineffizient, weil zeitraubend und teuer. Gefragt sind schnelle Aussagen über das Störpotential, innerhalb einer Schaltung und insbesondere auf sämtlichen Leitungen, welche eine Leiterplatte oder ein Gerät verlassen. Obwohl in diesem

Abschnitt von sogenannten feldgeführten Störungen die Rede ist, sind es auch bei diesen Störungen die Leitungen, die wie Antennen wirken und eine Abstrahlung erst richtig ermöglichen. Im Entwicklungslabor konzentriert sich die EMV-Arbeit vorwiegend auf die Beurteilung der durch solche Leitungen verschleppten Störungen.

Diese Messungen können – mit den entsprechenden Hilfsmitteln – im unmittelbaren Nahfeld teilweise sogar direkt auf den Signal-, Versorgungs- und Masseleitungen oder auf den Kabelschirmen erfolgen. Wer zum ersten Mal mit einem Spektrumanalysator eine Schaltung untersucht, wird mit grossem Erstaunen feststellen, dass selbst auf Signalleitungen für langsame oder statische Signale erhebliche, hochfrequente Signalanteile, ausgehend von anderen Schaltkreise, «mitreiten».

Mit einem Oszilloskop betrachtet, gehen diese Signalanteile im Rauschen unter und sind meist überhaupt nicht zu erkennen. Das elektromagnetische Störfeld benützt dabei die metallische Struktur einer Leitung – unabhängig vom eigentlichen Nutzsignal auf dieser Leitung – als eine Art «Führungsschiene», um sich daran entlang energieeffizient ausbreiten zu können. Im Entwicklungslabor können diese Störgrössen ohne grösseren Aufwand mit einem Spektrumanalysator und den entsprechenden Sonden sichtbar gemacht werden. Es werden zu diesem Zweck drei Messsonden benötigt, die im folgenden näher erläutert werden.

Aktive E-Feld-Sonde (= Fernfeldsonde)

Die aktive E-Feld Sonde ist eine breitbandige Fernfeldsonde mit einer sehr hohen Empfindlichkeit. Sie ist so empfindlich, dass man sie ohne weiteres zum Radio- oder Fernsehempfang verwenden könnte. Mit ihr kann man die Gesamtabstrahlung einer Baugruppe oder eines Gerätes beurteilen. In der Regel wird sie in einem Abstand von 0,5 bis 1,5 m von dem zu untersuchenden Objekt eingesetzt. Damit lässt sich sowohl die Wirkung von Abschirmmassnahmen überprüfen als auch Filtermassnahmen beurteilen, falls diese Leitungen betreffen welche das Gehäuse verlassen, und somit die Gesamtabstrahlung beeinflussen.

Wegen der hohen Empfindlichkeit kann es vorkommen, dass mit der aktiven E-Feld

Sonde auch Drittstörungen, ausgehend von anderen Geräten im Labor gemessen werden. Die Messung erfolgt deshalb so, dass zuerst bei ausgeschaltetem Prüfling die Störungen aus der Umgebung erfasst werden und nach Einschalten des Prüflings die neu hinzugekommenen Signale analysiert werden. Sind die Störungen aus der Umgebung zu stark, so genügt es vielfach, die Messungen im Untergeschoss oder im Luftschutzraum eines Gebäudes durchzuführen, weil dadurch Störsignale von aussen, z. B. von nahen Radio- und Fernsehsendern reduziert werden.

Die Messergebnisse mit einer aktiven E-Feld Sonde sind wie alle Fernfeld-Antennenmessungen auch vom Prüfaufbau abhängig. Insbesondere spielt die Lage der Kabel eine nicht zu unterschätzende Rolle. Sollen reproduzierbare Messungen durchgeführt werden – nicht nur einmalige Vergleichsmessungen verschiedener Massnahmen – so wird empfohlen, die Versuchsanordnung genau festzulegen und beispielsweise auf ein Brett zu fixieren.

Die aktive E-Feld Sonde kann auch zur Untersuchung von Störungen aus der Umgebung verwendet werden. Wird vermutet, dass eine unbekannte Störquelle in einem Gerät eine Funktionsstörung verursacht, so kann mittels aktiver E-Feld-Sonde und Spektrumanalysator die elektromagnetische Umgebung erfasst werden. Dank der Analyse im Frequenzbereich lässt sich meist sehr schnell die Störquelle ausfindig machen.

Aktive H-Feld-Sonde (= Nahfeldsonde)

Eines der Erfolgsrezepte in der EMV ist es, die Störströme zu beachten. Der gängige Einsatz von Oszilloskopen verleitet zu einem reinen «Spannungsdenken». Erfolgreiche EMV-Ingenieure denken aber vor allem in «Strömen». Um Störströme berührungsfrei und ohne Auftrennen von Leitungen aufspüren zu können, sind aktive H-Feld-Sonden ein optimales Hilfsmittel.

Aktive H-Feld-Sonden sind Nahfeldsonden, mit welchen die magnetische Feldstärke gemessen werden kann, und diese magnetische Feldstärke ist im Nahfeld direkt mit den Leitungsströmen verknüpft. H-Feld-Sonden sind relativ unempfindlich gegen Störungen von aussen (Drittstörer) und zeigen ein starkes Ansteigen des gemessenen

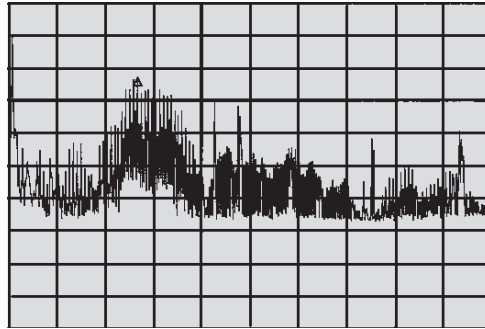


Bild 3
Messung der abgestrahlten Leistung ohne Gehäuse.

Pegels bei der unmittelbaren Annäherung an die Störquelle. Sie erlauben damit sehr gezielt, Störströme innerhalb einer Schaltung zu lokalisieren. In Verbindung mit einem Spektrumanalysator können damit auch frequenzselektiv Störsignal-Anteile aufgespürt werden, wie beispielsweise die Verteilung der Harmonischen eines Clocksignals auf einer Leiterplatte.

Bewegt man eine H-Feld-Sonde entlang eines Gehäuses oder einer Abschirmung, sind «undichte» Stellen wie beispielsweise Schlitzlöcher leicht erkennbar. Es zeigen sich dabei die charakteristischen Merkmale einer Schlitzantenne mit einem Signalpegel-Maximum an den Enden eines Schlitzes (grösste Stromdichte).

Wie schon erwähnt, sind alle Arten von metallischen Kabeln – dies gilt sogar für Glasfaserkabel mit metallischer Zugsentlastung – die Antennen für die Störabstrahlung und auch für die Störeinkopplung. Hält man die H-Feld-Sonde an ein Kabel und analysiert die Signale mit einem Spektrumanalysator, so wird man mit einigem Erstaunen feststellen, dass selbst auf Netzleitungen oder anderen «langsamen» Datenleitungen wie beispielsweise Telefonleitungen, verblüffend hohe Pegel hochfrequenter Signalanteile (z. B. Harmonische der Clocksignale) festzustellen sind. Mit der H-Feld-Sonde und der logarithmischen Amplitudendarstellung eines Spektrumanalysators (Bild 1) ist einfach festzustellen, ob alle Leitungen etwa gleich stark «verseucht» sind, oder ob gewisse Leitungen mehr oder weniger Störungen auskoppeln. Damit können gezielt Massnahmen eingeleitet werden, so dass die Wirksamkeit dieser Massnahmen im Labor ohne die Verwendung eines geschirmten Raumes und ohne grossen Messaufwand rasch und einfach beurteilt werden können.

Hochimpedanz-Tastkopf

Mit einem Hochimpedanz-Tastkopf kann gezielt an einem Punkt, beispielsweise an einem IC-Pin, oder an einzelnen Leitung in einer Schaltung breitbandig (> 1 GHz) gemessen werden, ohne den Messpunkt mit der üblichen Eingangsimpedanz eines Spektrumanalysators von 50Ω zu belasten. Die Eingangsimpedanz des Hochimpedanz-Tastkopfes ist weitgehend kapazitiv und die Kapazität liegt unter 2 pF. Der Hochimpedanz-Tastkopf kann auch an ein Oszilloskop (mit $50\text{-}\Omega$ -Eingang) angeschlossen werden. Er arbeitet in diesem Fall als Tastkopf mit der oben beschriebenen Bandbreite und Eingangskapazität.

Der besondere Vorteil ist, dass dieser Messpunkt so gut wie nicht durch das Messgerät belastet wird. Es kann nämlich leicht vorkommen, dass ein niederohmiger Tastkopf genau jene Schwingung dämpft bzw. eliminiert, die gemessen werden soll. Je höher die zu messende Frequenz wird, desto mehr verschärft sich dieses Problem, jedes pF spielt hier eine Rolle. Mit der geringen Eingangskapazität des Hochimpedanz-Tastkopfes kann dieses Phänomen bis zur Bandbreiten-Grenze vernachlässigt werden.

Der Hochimpedanz-Tastkopf besitzt nur eine einzige Spitze und wird ohne «Masseleitung» betrieben. Der Rückstrom des Messsignals erfolgt «kapazitiv» über das elektrische Feld der Umgebung. Es wird damit tatsächlich möglich, das EMV-Störpotential eines IC-Pins oder einer einzelnen abgehenden Leitung zu messen. Durch die «kapazitive und hochohmige» Messmethode lassen sich damit auch sogenannte Gleichtaktstörungen an ihrer Quelle aufspüren.

Werden beispielsweise die Signal-, Versorgungs- und Masseleitungen auf einem Flachbandkabel zwischen zwei Leiterplatten oder die Leitungen einer meist kritischen «Backplane-Verdrahtung» gemessen, so ist mit Hilfe der logarithmischen Darstellung eines Spektrumanalysators sehr rasch festzustellen, welche Leitungen den grössten Beitrag zur Störabstrahlung beitragen. Es gilt wiederum die Devise, die im logarithmischen Massstab deutlich stärksten Signale als erstes zu unterdrücken. EMV-Massnahmen (wie beispiels-

weise Filtermassnahmen für einzelne Leitungen) lassen sich damit sehr gezielt an den «höchstbelasteten» Pins bzw. Leitungsabgängen vornehmen. Das Resultat einer getroffenen Massnahme ist sehr rasch und einfach beurteilbar.

Dämpfung durch Gehäuse

Praxisorientierte Messung der Schirmdämpfung von Abschirmgehäusen

Was erreicht man mit der Massnahme, ein ganzes Gerät in ein Abschirmgehäuse zu stecken? Dies die Frage eines jeden, der bei der Abnahme zur CE-Zertifizierung durchgefallen ist.

Leider ist diese Frage nicht pauschal zu beantworten, denn nicht jedes metallische Gehäuse gewährleistet die notwendige Schirmung. Kaum einer wird aber bis

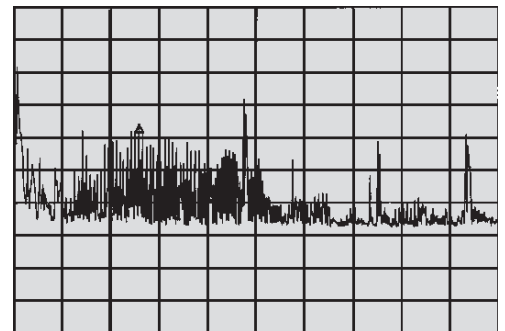


Bild 4
Messung der abgestrahlten Leistung mit Gehäuse.

zur nächsten Abnahmemessung warten wollen. Was, wenn es wieder nicht stimmt? Es ist erforderlich, mit einem einfachen Messverfahren den relativen Erfolg beurteilen zu können. Hierzu bietet sich der Einsatz hochempfindlicher E-Feld-Sonden an. Sie sind auch als sehr breitbandige Messantenne verwendbar, wodurch sie zur Klärung der oben beschriebenen Fragen gut dienen können.

Einsatz der Sonde

Vor der Verwendung der Sonde muss zunächst geklärt werden, ob sie ausreichend empfindlich ist. Grundsätzlich sind alle passiven Sonden meist unbrauchbar, weil sie zu unempfindlich sind. Die für den Praktiker einfachste Lösung zur Klärung dieser Frage ist die Aufnahme eines Breitbandspektrums von 0 bis 1000 MHz in seinem Labor. Bild 2 zeigt eine solche Aufnahme, die mittels aktiver E-Sonde aufgenommen wurde.

Im Bereich bis 50 MHz zeigen sich relativ hohe Pegel, die von Rundfunksendern aus dem Mittel- und Kurzwellenbereich stammen. Im Bereich um 100 MHz sind Signale von UKW-Rundfunksendern aus der Umgebung erkennbar. Da es am Ort der Messung keinen lokalen Sender gibt, fallen diese Signale etwas schwächer aus. Die stärkste Linie bei 474 MHz stammt von einem Fernsehsender, der exponiert in rund 15 km Entfernung steht. Es folgen bis 800 MHz mehrere Linien von Fernsehsendern aus der Umgebung. Den Abschluss bildet der Bereich knapp über 900 MHz, der zu den örtlichen D-Netz-Stationen gehört. Die Aufnahme zeigt, dass die verwendete Sonde breitbandig und empfindlich ist. Beginnend vom Mittelwellenbereich bis zum D-Netz sind Linien zu finden, die weit aus dem Rauschen herausreichen.

Natürlich fällt dieses Bild an jedem Ort anders aus, aber da die Schweiz überall mit Rundfunk und Fernsehen versorgt ist, dürften die zugehörigen Linien nirgendwo fehlen. Auch in sehr ländlichen Bereichen darf heute nirgendwo das D-Netz in der Aufnahme fehlen: Es würde zeigen, dass die Sonde eine zu niedrige Grenzfrequenz hat.

Die Aufnahme des Hintergrundspektrums dient allerdings nicht nur der Prüfung der Sondenempfindlichkeit. Sie soll im Falle, dass man die folgenden Messungen nicht in einer Schirmkabine ausführen kann, als Referenz dienen. Auf diese Weise lassen sich die wichtigsten Spektrallinien erkennen, die nicht aus der zu untersuchenden Elektronik stammen.

Zur Durchführung der Messung stellt man nun den Prüfling zunächst ohne Abschirmung in einer Entfernung von mindestens 0,5 m von der Sonde auf. Anschliessend dreht man den Prüfling, bis die Richtung des Abstrahlungsmaximums gefunden ist. In dieser Position wird die zweite Aufnahme erstellt (Bild 3). Es ist erkennbar, dass im Vergleich zum Hintergrundspektrum Störleistungen bis hin zu 1 GHz vorhanden sind.

Das Maximum der Störstrahlung liegt im Bereich von 250 bis 350 MHz. Die stärkste Linie ist mit dem Marker gekennzeichnet, der relative Pegel liegt bei -42,8 dBm.

Nun folgt die zweite Messung: Hierbei trägt der Prüfling sein Abschirmgehäuse. Er wird zuerst so gedreht, dass erneut das Maximum der Störstrahlung gefunden wird. Dieses kann in einer anderen Richtung liegen als bei offenem Gerät; Bild 4 zeigt das Resultat.

Man erkennt, dass die Abstrahlung im gesamten Frequenzbereich geringer geworden ist. Aus den Pegeldifferenzen aus Bild 3 und Bild 4 lässt sich die Schirmdämpfung für verschiedene Frequenzen ermitteln. Für die markierten Linien entnimmt man: -55,9 dBm. Dies ergibt eine Dämpfung von 13,1dB. Für Frequenzen bei 800 MHz werden nur 9 dB erreicht.

Schirmdämpfungen in dieser Grössenordnung scheinen kaum das Blech wert zu sein, aber leider ist ein solches Ergebnis nicht ungewöhnlich. Die Messungen wurden an einem handelsüblichen Frequenzzähler der unteren Preisklasse vorgenommen. Es gibt zahllose Geräte, deren Gehäuse keine besseren Werte erwarten lassen. Es lohnt sich also, zu messen, bevor man Geld für Schirmblech ausgibt.