

HAMEG EMV-Messtechnik

Wer innerhalb des EWR (Europäischer Wirtschaftsraum) ein elektrisches oder elektronisches Gerät in Verkehr bringt ist verpflichtet, die Bestimmungen der EMV-Richtlinie einzuhalten, also die elektromagnetische Verträglichkeit (EMV) zu gewährleisten. Das betrifft Hersteller und Importeure in den Mitgliedsländern der EU (Europäische Union) sowie Island, Liechtenstein und Norwegen.

Für den Bereich Störaussendung der EMV bietet HAMEG kostengünstige Geräte, mit denen sich Pre-Compliance Messungen durchführen lassen.



Stören und sich stören lassen?

Moderne Elektronik stellt, bedingt durch immer höhere Taktfrequenzen und stärkere Integration, permanent steigende Anforderungen an die einzusetzende Messtechnik für die Störsicherheit von Geräten. Um elektromagnetische Verträglichkeit zu garantieren, muss ein sehr großes Frequenzspektrum von etwa 150 kHz bis 1 GHz beherrscht werden. Dabei ist zu erwarten, dass bei kommenden Normanpassungen dieser Frequenzbereich nach oben noch erweitert wird.

Der damit verbundene Messaufwand und die Kosten sind zum Teil erheblich, lassen sich aber bei überlegtem Einsatz vernünftiger Messmittel und geeigneter Methoden, gut kontrollieren.

Was kosten EMV-Maßnahmen?

EMV muss nicht teuer sein. Untersuchungen haben gezeigt, dass EMV-Maßnahmen etwa 3 bis 5 % der Gerätekosten betragen, wenn EMV-Verträglichkeit vom Beginn einer Entwicklung an mit „hineinkonstruiert“ und entwicklungsbegleitend getestet wird.

Blauäugigkeit bezüglich elektromagnetischer Verträglichkeit kommt allerdings oft teuer. Wird die EMV erst nach Fertigstellung eines Gerätes zum Thema, so kann es leicht vorkommen, dass die EMV-Maßnahmen letztlich mehr als 50 % der geplanten Entwicklungskosten betragen, d.h. man beginnt nochmals von vorne und bezahlt viel Geld für lange Messreihen und externe Dienstleister.

Normgerechte Prüfungen werden meist in entsprechend ausgerüsteten und spezialisierten Labors durchgeführt. Die dazu notwendige Messtechnik ist teuer und die Verfahren sind sehr aufwendig. Während der Entwicklungszeit ist es dagegen 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 ...

Trotz seiner Vielseitigkeit, für EMV-Störaussendungsmessungen ist ein Oszilloskop leider ungeeignet, denn es zeigt die Form eines Signals, also den zeitlichen Verlauf der Spannung, auf der Zeitachse an und nicht die einzelnen Spektren (Frequenzanteile mit ihrem jeweiligen Pegel) aus denen es sich zusammensetzt.

Die bei Störaussendungsmessungen anzuwendenden Normen verlangen Mittelwert- und Quasi-Spitzenwert-Messungen, die in Form einer frequenzselektiven Messung jedes einzelnen Spektrums vorzunehmen sind. Die zu verwendende Messbandbreite hängt von der Messfrequenz ab.

Der bei Störaussendungsmessungen zu erfassende Frequenzbereich reicht von 150 kHz bis 1 GHz. Dabei muss das Messgerät über eine hohe Eingangsempfindlichkeit, die Messungen von wenigen μV ermöglicht, verfügen.

Die Anzeige eines größeren Frequenzmessbereichs und die logarithmische Darstellung der Spektren mit einem Anzeigebereich von ca. 80 dB, lassen auf einen Blick erkennen, wo die Schwerpunkte liegen und welche Auswirkungen eine Maßnahme auf alle Spektren und ihre Pegel hat.

Spektrumanalysator, und ...

Es ist nach wie vor ernüchternd, wie selten Spektrumanalysatoren im Entwicklungsalltag anzutreffen sind. Oft werden Kostengründe vorgeschoben. Die entwicklungsbegleitende Messtechnik verlangt jedoch keineswegs nach dem „Rolls-Royce“ unter den Spektrumanalysatoren. Da Spektrumanalysatoren nicht tagtäglich eingesetzt werden, ist es sogar besser, einfach zu bedienende Geräte einzusetzen, welche von jedem Entwickler ohne grosse Schwellenangst und Einarbeitungszeit 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 1.000 EUR oder mehr. 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.

Der Spektrumanalysator gehört als Standardmessgerät gleichberechtigt neben einem Oszilloskop an den Arbeitsplatz eines Entwicklers. Wie hilfreich die Spektrumanalyse wirklich ist, werden Sie spätestens dann beurteilen können, wenn Sie aktiv mit Spektrumanalysatoren arbeiten.

Netznachbildung ...

Sie gehört neben dem Spektrumanalysator zur Basisausstattung im Labor- und Zertifizierungs-Einsatz. Eine Netznachbildung dient zur Isolierung, Erkennung und Quantifizierung von leitungsgebundenen Störungen. Im Zertifizierungslabor wird sie im Allgemeinen in Verbindung mit einem Messempfänger eingesetzt. Für den Bereich der Pre-Compliance-Messtechnik ist jedoch der Einsatz zusammen mit einem Spektrumanalysator die erheblich praktikablere – weil „schnellere“ – Lösung. HAMEG Spektrumanalysatoren der Serie 5000 bieten in Verbindung mit der Netznachbildung HM6050 Ergebnisse, die mit beim EMV-Dienstleister durchgeführten Messungen vergleichbar sind.

... und „Schnüffelsonden“

Was fängt man mit den Messergebnissen vom Dienstleister an, wenn sich herausstellt – da stört noch was ...? Und um was geht es dabei eigentlich?

Z. B.: Feldgeführte Störsignale

Unter feldgeführten Störungen wird die Abstrahlung von Störsignalen verstanden, im Unterschied zu sogenannten leitungsgeführten Störungen. Die EMV-Vorschriften legen den Frequenzbereich für die Erfassung der feldgeführten Störsignale auf 30MHz bis 1GHz fest, wobei zu erwarten ist, dass Normerweiterungen zum Bereich höherer Frequenzen hin noch erfolgen werden.

Normengerecht werden die feldgeführten Störpegel mittels Antennen und Messempfängern in einem reflexionsfreien Umfeld, welches frei von Drittstörungen ist, gemessen. Die normengerechten Messungen



Messung von leitungsgeführten Störungen mittels Spektrumanalysator und Netznachbildung.

werden daher meistens in sogenannten Absorberhallen durchgeführt.

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 benutzt dabei die metallische Struktur einer Leitung – unabhängig vom eigentlichen Nutz-

signal 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 für diese Messung geeigneten Sonden sichtbar gemacht werden. Es werden zu diesem Zweck unterschiedliche Messsonden benötigt.

Störquellen im Detail untersucht

Will man den Erfolg einzelner Entstörmaßnahmen nachprüfen, bieten sich sogenannte „Schnüffelsonden“ an. Sie werden als E-Feld und H-Feld-Sonden angeboten und erleichtern dem Entwickler zusammen mit Hochimpedanzsonden und Sonden mit extrem niedriger Eingangskapazität die Auswahl der passenden EMV-Maßnahmen.

Aktive E-Feld-Sonde

Die aktive E-Feld Sonde ist breitbandig, mit einer sehr hohen Empfindlichkeit. 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, die 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 und nach Einschalten des Prüflings die neu hinzugekommenen Signale analysiert 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 z. B. auf einem 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 auffindig machen. Dies macht es möglich, erforderliche Nachbesserungen so gezielt auszuführen, daß man bei der Abnahmeprüfung nicht ein zweites Mal durchfällt.

Aktive H-Feld-Sonde

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. 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 Pegels bei der unmittelbaren Annäherung an die Störquelle. Sie erlauben damit sehr gezielt, Störströme innerhalb einer Schaltung zu lokalisieren.

Bewegt man eine H-Feld-Sonde entlang eines Gehäuses oder einer Abschirmung, sind „undichte“ Stellen wie beispielsweise Schlitze leicht erkennbar.

Durch die weiter fortschreitende Integration auf Leiterplatten, stößt auch die Lokalisierung von Störern mit einer H-Feld-Sonde an Grenzen. Hilfe bietet hier die μ H-Feld-Sonde HZ545. Hiermit ist es möglich bis in den mm-Bereich exakt die jeweilige Störquelle zu lokalisieren. Diese Sonde findet Einsatz bei der Identifizierung von Störern direkt auf der Leiterplatte.

Wie schon erwähnt, sind alle Arten von metallischen Kabeln die Antennen für die Störabstrahlung und auch für die Störeinkopp-



Messsondensatz HZ530 von HAMEG bestehend aus drei aktiven Sonden (E-Feld-, H-Feld- und Hochimpedanzsonde)

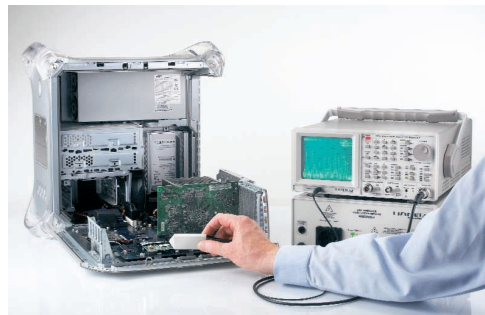
lung. Hält man die H-Feld-Sonde an ein Kabel und analysiert die Signale mit einem Spektrumanalysator, so wird man mit einigem Erstaunen feststellen, dass selbst auf Netzleitungen oder „langsamen“ Datenleitungen wie beispielsweise Telefonleitungen, verblüffend hohe Pegel hochfrequenter Signalanteile (z. B. Harmonische der Clock-signale) festzustellen sind. Mit der H-Feld-Sonde und der logarithmischen Amplitudendarstellung eines Spektrumanalysators 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, z. B. 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 $50\ \Omega$ zu belasten. Die Eingangsimpedanz der Hochimpedanz-Tastköpfe aus den HAMEG Sondensätzen ist weitgehend kapazitiv und die Kapazität liegt unter $2\ \text{pF}$. Der Hochimpedanz-Tastkopf kann auch an ein Oszilloskop (mit $50\ \Omega$ -Eingang) angeschlossen werden. Er arbeitet in diesem Fall als Tastkopf mit der oben beschriebenen Bandbreite und Eingangskapazität.

Besser noch ist der Einsatz eines Low-Capacitance-Tastkopfes mit noch geringerer Eingangskapazität ($<0,3\ \text{pF}$) und höherer Bandbreite bis zu $3\ \text{GHz}$ (z. B. HZ543). Hiermit wird der zu untersuchende Schaltungspunkt noch deutlich weniger belastet und ermöglicht so ein verfälschungssicheres Messen auch in sehr hochfrequenten Schaltungen.

Der besondere Vorteil ist, dass in diesem Fall der Messpunkt so gut wie nicht durch das Messgerät belastet wird. Es kann sonst leicht vorkommen, dass ein niederohmiger Tastkopf genau jene Schwingung dämpft bzw. eliminiert, die gemessen werden soll. Je höher die zu messende Frequenz wird,



Ermittlung der abgestrahlten Stör-energie mit Hilfe der Magnetfeld-Sonde (H-Feld-Sonde) und dem Spektrumanalysator.

desto mehr verschärft sich dieses Problem. Jedes pF spielt hier eine enorme Rolle. Mit der geringen Eingangskapazität des HZ543 kann dieses Phänomen bis zur Bandbreiten-Grenze vernachlässigt werden. Der Low-Capacitance-Tastkopf besitzt nur eine winzige Tastschleife und wird ohne „Masseleitung“ betrieben. Der Rückstrom des Messsignals erfolgt „kapazitiv“ über die „Belastung“ durch den Messenden. 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.

EMV-Probleme in der Praxis

Dem Elektronik-Entwickler sind mittlerweile zahlreiche Maßnahmen zur Verbesserung der EMV von z. B. Leiterplatten bekannt. Wie viel diese Maßnahmen jeweils im Einzelfall wert sind, erkennt man oft erst bei der Abstrahlungsmessung. Diese Tatsache führt aber dazu, dass die Einzelmaßnahme selten geprüft wird, weil der Aufwand an Zeit und Kosten viel zu groß wäre. Prüft man jedoch erst, nachdem eine ganze Reihe von Maßnahmen durchgeführt wurde, dann kann man den Erfolg oder Misserfolg der Einzelmaßnahme nicht mehr zuordnen.

Für eine gewisse Vorabprüfung bietet sich die Verwendung oben beschriebener Nahfeldmesssonden - oder „Schnüffelsonden“ an. Die E-Feld-Sonde reagiert auf elektrische Wechselfelder. Die H-Feld-Sonde ist empfindlich für Änderungen des magnetischen Flusses.

Bevor man diese Sonden einsetzt, sollte man sich darüber klar werden, welche Felder bei modernen Leiterplatten die überwiegende Rolle spielen. Bei hohen Spannungen und geringen Strömen spielt das

elektrische Feld die bedeutendere Rolle. Bei kleinen Spannungen und hohen Strömen überwiegt das magnetische Feld. Der erste von beiden Fällen lag eindeutig bei der Röhrentechnik vor.

Moderne integrierte Schaltungen weisen kleine Spannungen und zum Teil recht hohe Ströme auf. An dieser Stelle muss hervorgehoben werden, dass es nicht so sehr auf die Absolutwerte der Ströme, sondern auf die Rate ihrer Änderung ankommt. Bei der Anregung einer elektromagnetischen Welle, wenn dies mit der magnetischen Komponente geschieht, ist die Änderung des magnetischen Feldes in der Zeiteinheit die bestimmende Größe.

Genau diese Komponente wird von einer H-Sonde ausgewertet. Die Amplitude des Sondersignals ist direkt proportional zur Änderung des magnetischen Flusses und damit zur Änderung des erregenden Stromes. Deshalb sind solche Sonden zur ersten und überschlägigen Untersuchung der Wirksamkeit von EMV-Maßnahmen besonders geeignet.

Die Mehrheit dieser Sonden hat jedoch einen erheblichen Nachteil: Sie haben eine sehr geringe räumliche Auflösung. Deswegen lässt sich das Signal, das man mit dieser Sonde aufnimmt, nicht mehr eindeutig dem Urheber zuordnen. Man achte deshalb beim Erwerb solcher Sonden besonders darauf, dass man zumindest auch eine Sonde mit hoher Auflösung für das magnetische Feld hat. Dies wird besonders dann immer wichtiger, wenn die Integrationsdichte der Leiterplatten weiter zunimmt und die Identifikation einzelner Störer sich im Millimeterbereich abspielt.

Messungen an 4-Lagen-Multilayer

Im Folgenden wird erläutert, wie man aus den Sondersignalen interessante Details entnehmen kann. Grundsätzlich können die Signale im Zeitbereich oder im Frequenzbereich angezeigt werden. Für den Anwender ist die Darstellung im Zeitbereich oft anschaulicher als die im Frequenzbereich. Die folgenden Messungen wurden an einem 4-lagigen Multilayer im Format einer Europakarte vorgenommen. Das Stromversorgungssystem dieser Karte ist flächig ausgelegt. Der Abstand zwischen V_{CC} - und

GND-Fläche ist 100 μm . Das Flächensystem ist durch eine Kondensatorgruppe, die in der Mitte der Platine positioniert ist, entkoppelt.

In Bild 1 sieht man das Flächenstromsignal in Nähe des V_{CC} -Pins eines 74 AC 163. Die Amplitude bildet das Ausmaß der Änderung des magnetischen Feldes ab und ist damit proportional zur Stromänderung in der Fläche an dieser Stelle. Der zeitliche Ablauf ist recht schnell. Die Flankenzeit liegt im Subnanosekunden-Bereich.

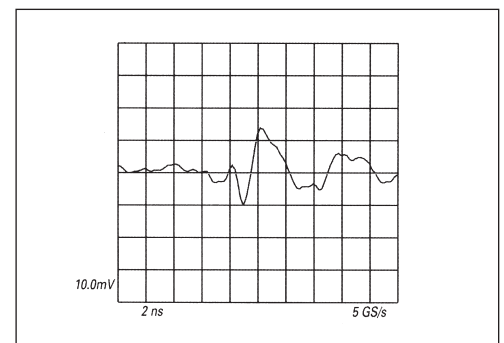


Bild 1: Flächenstromsignal in der Nähe des V_{CC} -Pins eines 74 AC 163

Dies hat seine Ursache darin, dass hochfrequente Stromkomponenten vor allem in der unmittelbaren Nähe des V_{CC} -Pins fließen, denn sie können nur aus der Ladung der V_{CC} -Fläche selbst entnommen werden. Über größere Zuleitungen können die hochfrequenten Komponenten nicht zugeführt werden, da deren Impedanz zu groß ist. Am V_{CC} -Pin selbst ist kein Stützkondensator angebracht, weil dieser ebenfalls hochfrequente Komponenten des Stromes nicht zu liefern vermag. Natürlich ist das V_{CC} -GND-System in der Flächenmitte mit einer Kondensatorgruppe zusätzlich gestützt. Diese Kondensatorgruppe vermag jedoch nur die niedrigen Frequenzkomponenten zu liefern.

Bild 2 zeigt die Flächenstromänderung in der Nähe dieser Kondensatorgruppe. Man erkennt, dass dieses Signal wesentlich langsamer ist als das in Bild 1. Die Flankenzeit liegt bei drei Nanosekunden. Die Kondensatorgruppe kann den Strom nur langsam in die Fläche einspeisen. Solche Details lassen sich natürlich nur mit hoch auflösenden Sonden, wie einer μH -Feld-Sonde erkennen.

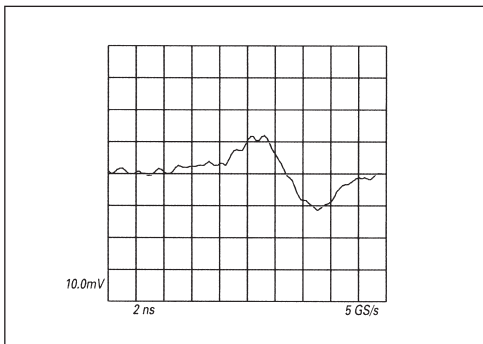


Bild 2: Flächenstromänderung in der Nähe einer Kondensatorgruppe.

Das nächste Beispiel zeigt uns die Wirkung absorptiver Entstörmaßnahmen. In Bild 3 ist das Signal unmittelbar am V_{CC} -Pin eines 74 AC 00 mit der μ H-Feld-Sonde entnommen worden. Die integrierte Schaltung wird hier aus einem nicht gedämpften V_{CC} -GND-Flächensystem gespeist. Die Änderungen des magnetischen Feldes sind sehr erheblich.

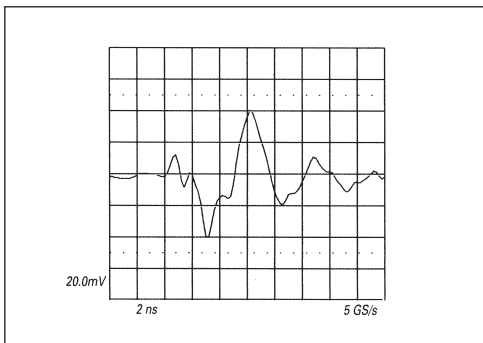


Bild 3: Signal unmittelbar am V_{CC} -Pin eines 74 AC 00

Im Gegensatz hierzu sieht man in Bild 4 das gleiche Signal, jedoch wird die Schaltung hier aus einem zweistufig gedämpften Stromversorgungssystem gespeist. Dies bedeutet, dass der V_{CC} -Pin über eine Breit-

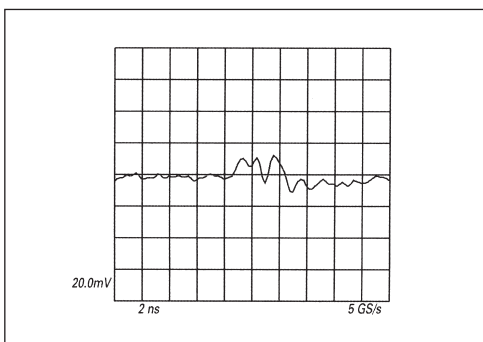


Bild 4: Vergleichsignal bei einem zweistufig gedämpften Stromversorgungssystem

banddrossel an die V_{CC} -Fläche angeschlossen ist, und außerdem ist diese Fläche aus Gründen der Dämpfung carbonisiert. Man erkennt, dass die Amplitude des Signals in Bild 4 wesentlich kleiner als die in Bild 3 ist. Die Wirksamkeit der Maßnahme ist bereits bei Anwendung der Sonden deutlich erkennbar, ohne dass ein größerer Aufwand an Messtechnik erforderlich wäre.

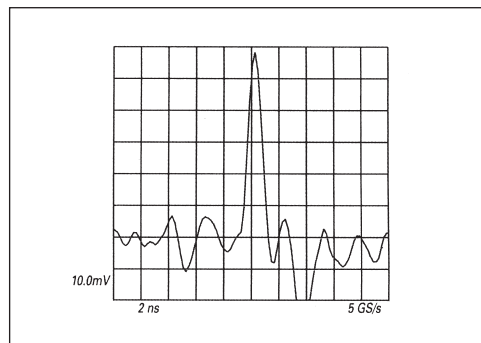


Bild 5: Das μ H-Sondensignal bei einem Aufbau ohne Entstörmaßnahmen

Als letztes Beispiel soll der Abgriff eines Sondersignals am Taktverteiler auf einer Europakarte geschehen. Das Signal wird unmittelbar am Ausgang des Takttreibers entnommen. In Bild 5 sieht man das μ H-Sondensignal in einem Aufbau, in dem keine Entstörmaßnahmen vorgenommen wurden. Es wird eine sehr große Amplitude von fast 60 mV erreicht.

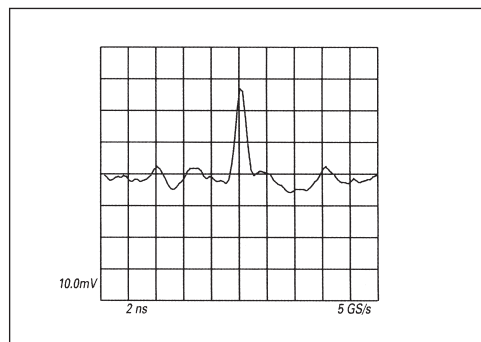


Bild 6: Halbierung der Signalamplitude durch einen Serienwiderstand am Ausgang des Takttreibers

Eine sehr beliebte Maßnahme zur Verbesserung der Situation ist die Einfügung eines Serienwiderstandes unmittelbar in den Ausgang des Takttreibers. Im vorliegenden Fall wurden 82Ω genommen. Bild 6 zeigt das Ergebnis: Die Signalamplitude ist halbiert. Auch in diesem Falle ist die Wirkung der Entstörmaßnahme unmittelbar erkennbar.