

Fuzzy-Logik analysiert EMV-Probleme auf PCB-Layouts

Die Elektronikbranche Europas wird in zunehmenden Maße mit der elektromagnetischen Verträglichkeit (EMV) konfrontiert. Die verschärfte europäische Gesetzgebung ab 1.1.1996 veranlaßt die Elektronikhersteller, alle neuen und auch bereits auf dem Markt angebotenen Geräte oder Komponenten in einem EMV-Labor zertifizieren zu lassen. Analysesoftware, die schon während der Entwicklungsphase EMV-Probleme aufdeckt, reduziert Kosten und verkürzt Innovationszyklen.

Erich Pyszny, Ernst Wurzer

Der europäische Binnenmarkt mit seinen vielfältigen Gesetzgebungen und Regelungen veranlaßt die Elektronikhersteller, alle neuen und auch bereits auf dem Markt angebotenen Geräte oder Komponenten in einem EMV-Labor zertifizieren zu lassen. Die CE-Kennzeichnung für Produkte ist die Voraussetzung für den Marktzugang. Für das deutsche Recht gilt eine Übergangsregelung bis 31.12.1995 um diese Hürde zu meistern. Analysesoftware, die schon während der Entwicklungsphase und vor dem Gang zum Prüflabor EMV-Probleme auf Leiterplattenlayouts aufdeckt, reduziert Kosten und verkürzt die Innovationszyklen. Der Markt bietet hierzu zwei Alternativen an: numerisch arbeitende Simulatoren oder auf Wissensakquise aufgebaute Expertensysteme. Das in diesem Aufsatz vorgestellte Expertensystem nutzt die Schnelligkeit einer auf Fuzzy-Logik basierenden EMV-Auswertung. Die Methode der unscharfen Logik erzeugt eine einfache Mensch-Maschine-Kommunikation und zeichnet sich durch eine klare und einfache Handhabung aus.

EMV-gerechter Leiterplattenentwurf

Der PCB-Layouter muß sich heute verstärkt der Herausforderung stellen, EMV-gerechte Layouts zu entwickeln; nicht nur wegen der europäischen Gesetzgebung, sondern auch des technologischen Sachzwanges. Die Baugruppen und Steckkarten werden durch kleiner und schneller werdende Bauteile immer kompakter; die daraus resultierende Leiterbahndichte immer höher. Eigenstörunsicherheiten, die das elektronische System bedingt durch die Leiterbahngeometrie der Leiterplatte beeinflussen, treten verstärkt in den Vordergrund. Softwarewerkzeuge, die dem Layouter gestatten, vor der Fertigung der ersten Leiterplatte eine Analyse auf Eigenstörunsicherheit durchzuführen, gewinnen immer mehr an Bedeutung. Die Eigenstörunsicherheit kann aufgeteilt werden in kapazitive, induktive und galvanische Kopplung, sowie in die Stromschleifenflächenkopplung. Das Prinzip, das allen Kopplungsarten zu Grunde liegt, ist das Beeinflussungsschema von 'Störquelle, Störkanal und Störsenke'.

Bei der Planung und Durchführung der Layoutentwicklung versucht der Layouter, seine EMV-Erfahrungen durch präventive Maßnahmen in sein Design einfließen zu lassen. Dazu unterteilt er die Schaltung in Schaltkreisgruppen, die durch eine oder mehrere Versorgungsspannungen und Bezugsleiter mit Energie versorgt werden. Jeder Schaltkreisgruppe weist er bestimmte ihrer Funktion entsprechende Eigenschaften zu: analog verstärkend, empfindlich oder digital CMOS, sehr schnell. Nach diesen Schaltkreiseigenschaften, sowie konstruktiven Gegebenheiten, führt er die Platzierung der Bauteile durch. Bei der anschließenden interaktiven Verlegung spezieller Leiterbahnverbindungen nimmt er ebenfalls Rücksicht auf die Eigenschaften der darauf fließenden Signale. Eine manuelle Endkontrolle, um die Arbeitsschritte Planung und Erstellung des fertigen Layouts zu überprüfen, führen aber die wenigsten Layouter durch.

Die elektromagnetische Verträglichkeit auf Leiterplatten wird in einem erheblichen Maße durch die rasante technologische Entwicklung in der Digitaltechnik beeinflusst. Die heutigen Anforderungen, die dabei an eine Leiterplatte gestellt werden, verlangen vom Designer besondere Sorgfalt bei der Entwicklung eines PCB-Layouts. Berücksichtigt man den Entwicklungstrend bei den Bauteilen - immer kleiner, immer schneller - so resultiert daraus eine immer dichtere Bauteilplatzierung und Leiterbahnverlegung. Berücksichtigt man schon während der Entwurfsphase eines elektronischen Gerätes bzw. einer Baugruppe die dafür möglichen EMV-Maßnahmen, so können die Kosten in der Test- und Produktionsphase erheblich reduziert werden (**Bild 1**).

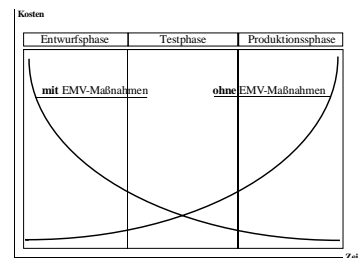


Bild 1: Produktkosten mit und ohne EMV-Maßnahmen

Die bisher übliche Vorgehensweise EMV-Maßnahmen erst in der Test- oder Produktionsphase zu berücksichtigen, kann eine dramatische Kostenexplosion nach sich ziehen, die eine noch so innovative Entwicklung letztendlich zum Scheitern bringen kann. Auch bei der Entwicklung des Layouts für die Leiterplatte einer Baugruppe besteht eine Palette von Möglichkeiten und Maßnahmen. Grundsätzlich können zwei Arbeitsschritte für EMV-gerechtes Layout unterschieden werden:

1. eine umsichtige EMV-Planung in der Entwurfsphase, d.h. Berücksichtigung von präventiven Maßnahmen während der Planung und Durchführung eines Layouts,
2. die nachträgliche Analyse eines erstellten Layouts, d.h. eine Überprüfung der EMV-Planung nach der Entwicklung des Layouts, entweder manuell oder rechnergestützt.

Störarten

Die Störungen auf bestückten Leiterplatten, besonders Multilayers, sind sehr komplex und treten zumeist gleichzeitig auf. Allen Störungen liegt das gleiche Schema zu Grunde: Störquelle, Störkanal und Störsenke. Die Störungen können grob in drei Störarten eingeteilt werden:

- **Störeinstrahlung**
- **Eigenstörunsicherheit**
- **Störabstrahlung**

Die **Störeinstrahlung** (Störfestigkeit) ist ein Maß für die externe Beeinflussung, die zum einen direkt auf die elektronische Schaltung einwirkt und zum anderen auf die Kombination der elektronischen Schaltung und des Bauteils Leiterplatte. Fremdstörungen haben magnetische-, elektrostatische- oder Strahlungseinkopplungen als Ursache. Die komplette Störeinstrahlung einer Baugruppe kann nur in einem EMV-Labor sinnvoll getestet werden.

Die **Störabstrahlung** einer Leiterplatte wird im wesentlichen durch drei Komponenten bestimmt: Die Störabstrahlung von Signalstromschleifen und des Versorgungsspannungssystems, sowie dem Strahlungsverhalten von IC-Gehäusen. Weiterhin wird das Abstrahlverhalten durch den Aufbau der Leiterplatte (ein/zweiseitig oder Multilayer) und der verwendeten Schaltungstechnologie (Analog- oder Digital) mitbestimmt. Leiterplatten in Multilayerausführung, bei denen außenliegende, ganzflächige Abschirmungen vorhanden sind, die mit Masse ankontaktiert sind, bieten den besten Schutz gegen Störabstrahlungen. Die Störeinflüsse reduzieren sich nur noch auf die der Bauteilgehäuse. Zur Beschreibung der Abstrahlungseffekte kann auf das Modell der magnetischen Dipole zurückgegriffen werden.

Eigenstörsicher ist eine Baugruppe nur dann, wenn die verschiedenen Schaltkreisgruppen auf einer Leiterplatte gleichzeitig störsticher funktionieren. Die Konstruktion der Leiterplatte darf dabei keinen Einfluß auf die Funktionalität der Schaltung ausüben. Zur **Eigenstörsticherheit** gehören alle leitungsgebundenen Störungen:

- kapazitive Kopplung,
- induktive Kopplung,
- galvanische Kopplung.

Diese Aufzählung listet nicht alle Kopplungsstörungen auf, zeigt aber, welche Kopplungen mit Hilfe eines heuristischen Expertensystems analysierbar sind.

Kapazitive und induktive Kopplung

Eines der hauptsächlichsten Probleme, die zu Eigenstörstörigkeiten auf einer Leiterplatte führen, ist das Übersprechen (Crosstalk) von zwei oder mehreren Leiterbahnen, die über größere Strecken parallel geführt werden. Diese Störart kann sowohl auf kapazitive als auch auf induktive Kopplungen zurückgeführt werden. Leiterbahnen, auf denen Signale mit hohen Ströme fließen, induzieren über magnetische Kopplung Störspannungen auf benachbarten parallelgeführten Leiterbahnen. Der überwiegende Teil der Crosstalk-Störungen wird durch kapazitiven Einfluß oder auf die Kombination beider Arten -kapazitiv/induktiv- bestimmt. Für beide Arten gelten folgende Übersprechvarianten:

- paralleles und antiparalleles Nebensprechen
- paralleles und antiparalleles Gegensprechen

Galvanische Kopplung

Die galvanische Kopplung, auch als Widerstandskopplung bekannt, ist eine der unübersichtlichsten Kopplungsarten, die auf Leiterbahnen des Bezugspotentials auftritt. Sie entsteht durch Spannungsabfälle auf parasitären Leitungsimpedanzen, die durch zwei oder mehrere Stromkreise auf einem gemeinsamen Leiterbahnsegment gebildet werden. Die Impedanzen teilen sich auf in einen ohmschen und einen imaginären Anteil (induktiv), die beide frequenzabhängig sind. Die Impedanz und somit auch die Störung vergrößern sich mit steigender Frequenz (Skinneffekt). Besonders bei gemischten Schaltungen, wo digitale Stromspitzen mit hohem Oberwellenanteil vorhanden sind, können sich Störungen auf Analogverstärker, die im μV -Bereich arbeiten, sehr heftig auswirken. Der Effekt der galvanischen Kopplung tritt demnach vorwiegend bei Leiterplatten auf, bei der der Bezugsleiter sequentiell oder vermascht verlegt wird. Bei Multilayern, mit massiven Vcc- und GND-Planes, kann dieser Effekt ebenfalls auftreten, nämlich dann, wenn die massive GND-Plane partielle Separierungen verschiedener GND's aufweist.

Stromschleifen

Die Störungsart der Stromschleifen bestimmt zum einen das Störabstrahlungs- und zum anderen das Störeinstrahlungsverhalten. Stromschleifen bilden sich grundsätzlich immer, wenn Signalleiterbahnen zu ihrem jeweiligen Bezugsleiter Flächen bilden. Dies ist immer der Fall bei ein- und zweiseitigen Leiterplatten. Besonders bei hochohmigen Analogschaltungen können Stromschleifenflächen als eine Art Empfangsantenne für elektromagnetische- oder Strahlungseinkopplungen aufgefaßt werden. Beim Einsatz der Digitaltechnik werden von Leiterbahnen auf ein- oder zweiseitigen Leiterplatten, auf denen hochfrequente, steilflankige Signale fließen, immer Störaussendungen ausgehen. Die Sendeleistung hängt von der Größe der Signalstromschleifenfläche und dem in der Schleife fließenden Strom ab.

MENHIR

Nicht alle Probleme der EMV auf Leiterplatten lassen sich mit numerisch basierten Systemen, den Simulatoren, analysieren. Teils ist die Problematik zu komplex oder nicht in Form von Algorithmen umzusetzen, oder die resultierende Rechenzeit ist viel zu hoch. Deshalb lassen sich einige Problemstellungen mit Systemen auf heuristischer Basis, den Expertensystemen, in kürzerer Zeit mit adequaden Ergebnissen und geringerem Zeitaufwand wesentlich besser lösen. MENHIR ist ein Expertensystem, das erstmalig zur Analyse von Eigenstörstörigkeiten auf Leiterplattenlayouts Fuzzy-Technologie einsetzt und die vorher beschriebenen Kopplungsarten auswertet.

Fuzzy-Logik

Die Auswertungslogik des Programmes gliedert sich in zwei unabhängige Teilsysteme, von denen das erste für kapazitive und induktive Kopplungen (im folgenden als "Signalkopplungen" bezeichnet), das zweite für galvanische Kopplungen zuständig ist. Beiden Systemen ist gemeinsam, daß sie die notwendigen Informationen über die elektrischen Eigenschaften des auszuwertenden Designs aus Merkmalsvektoren - den sogenannten Properties - beziehen; diese Properties stellen jeweils unscharfe Klassifikationen dar, die den Fuzzy-Regelwerken neben den eigentlichen Layoutdaten als Eingangsgrößen dienen. Dabei arbeitet die Auswertung der Signalkopplungen mit Netz-Properties (d.h. Träger dieser Information ist stets ein ganzes Netz), wogegen das "galvanische" Teilsystem auf anders strukturierten Pin-Properties beruht, die die Charakteristik der verschiedenen Bauteilanschlüsse an einem zu untersuchenden Bezugsleiter (GND) spezifizieren. Jede Property ist ein Datensatz aus mehreren numerischen Werten, die jeweils die relative Ausprägung eines bestimmten Merkmals darstellen; diese Merkmale sind zum Teil "elektrischer" Natur, beinhalten aber auch "subjektive" Informationen. Zum Beispiel enthält eine Netz-Property ebenso Daten über Spannungspegel, Stromstärke, Frequenzbereich, Anstiegszeit und Impedanz (der Signalsenke) wie auch Faktoren, die Aussagen zur funktionalen Störbarkeit des Netzes machen. In analoger Weise bezeichnet eine Pin-Property den von einem Bauteilanschluß ausgehenden Strom in mehreren Frequenzbereichen sowie die funktionale "Empfindlichkeit" dieses Pins gegenüber Störungen in denselben Bereichen. Properties liegen dem Anwender in einer binären Bibliothek vor und werden durch ihre Namen, die den grundsätzlich unscharfen Charakter der Informationen widerspiegeln, angesprochen (Beispiele für Netz-Properties: "Referenzspannung, mittlere Spannung <10V", "Kleinrelais Spule, 12V", "Taktleitung TTL, normal 8 MHz").

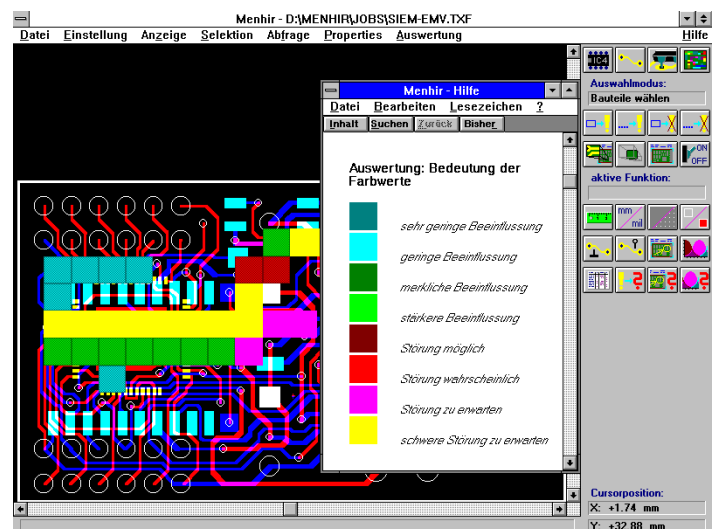


Bild 2. Farblich gekennzeichnete Sektoren zeigen in welchen Bereichen des Layouts Eigenstörstörigkeiten vorhanden sind.

Beide angesprochenen Auswertungssysteme benutzen jeweils mehrere Fuzzy-Regelbasen, die Merkmalsdaten aus den Properties der Design-Objekte (Netze bzw. Bauteilpins) mit den CAD-Daten des physikalischen Leiterplattenlayouts verknüpfen. Die einzelnen Regelbasen arbeiten dabei als Entscheidungsfunktionen und bewerten nacheinander Teilaspekte des Problems. Die verwendeten Regeln sind nicht direkt verbaler Ausdruck menschlichen Expertenwissens, sondern dienen lediglich als Parameter zur Steuerung des Verhaltens der Funktionen; ähnliches gilt für die *membership functions* der Fuzzy-Variablen. Am Beispiel der Signalkopplungen wird im folgenden das Zusammenwirken der Regelbasen erläutert.

Hierbei besteht das Auswertungssystem aus drei Ebenen:

1. Ermittlung der potentiellen Kopplungsreichweite.

Es wird ein Netzpaar daraufhin untersucht, ob die Properties beider Netze überhaupt eine gegenseitige Kopplung ermöglichen und wenn ja, welche maximale Reichweite dieser Störung zugesprochen werden soll. Die zuständige Regelbasis bestimmt aus Strom-, Spannungs- und Frequenzparametern des Netzpaars direkt einen Wert, der in der nächsten Stufe verwendet wird, um das Leiterplattenlayout zu untersuchen.

2. Ermittlung eines "geometrischen" Kopplungsfaktors.

Auf dieser Ebene wird der physische Verlauf der potentiellen Störsekte über den gesamten Lagenaufbau des Designs schrittweise verfolgt. In jedem Schritt wandelt MENHIR alle im soeben bestimmten Umkreis liegenden Leiterbahngeometrien in eine spezielle Datenstruktur um, die einer zweiten (mehrstufigen) Regelbasis als Eingabe dient. Diese bewertet, inwieweit die Lage von Störquelle und -senke zueinander im betrachteten Bereich der Leiterplatte eine Kopplung begünstigt und liefert einen entsprechenden Faktor an die nächste Stufe.

3. Ermittlung des Gefährdungsgrades.

Abschließend faßt eine dritte, besonders komplexe Regelbasis das Ergebnis der zweiten Stufe mit den elektrischen und subjektiven Merkmalen beider Netze zu einem Wert zusammen, der die Gefährdung der Funktion des Senkennetzes durch den in dieser Iteration betrachteten Störer in einem bestimmten Bereich der Leiterplatte repräsentiert. Überschreitet dieser Faktor einen bestimmten Wert, wird der Anwender gewarnt und auf die betroffene Stelle unter Angabe der beteiligten Netze hingewiesen.

MENHIR DER EMV PREDICTOR

Die zuvor beschriebenen Probleme der EMV-gerechten Layoutentwicklung, speziell die der Eigenstörungsicherheit, werden von MENHIR, einem auf heuristischer Basis aufgebauten Expertensystem, beurteilt. Bei Workstation-basierten PCB-Programmen werden den Netzen der Schaltkreisgruppen und Einzelnetzen die Eigenschaften (Properties) als Attribute schon im Schaltplanprogramm beigelegt. Nach der Erstellung des Layouts werden die geometrischen Strukturen der Leiterbahnen mit den Eigenschaften der darauf fließenden Signale durch die Fuzzy-Logik ausgewertet. Das System kennzeichnet Bereiche des Layouts, in denen Eigenstörungsicherheiten erkannt werden, durch farbliche Sektoren. Diese können selektiert werden, um Informationen abzurufen: über die Art der Störung oder zwischen welchen Leiterbahnen eine Störquellen-/Senkenbeziehung vorliegt. Der Predictor verfügt über Schnittstellen zu allen gängigen PCB-CAD-Systemen, sowohl für Workstation-, als auch für PC-basierte Programme. Der mit MENHIR erstmalig realisierte Ansatz, Fuzzy-Datenanalyse im CAD-Bereich zur Qualitätssicherung einzusetzen, hatte inzwischen Gelegenheit, sich in über 100 Installationen bei industriellen Anwendern und Hochschulen zu bewähren.

Fuzzy-Logik

MENHIR, das einzigartige Softwaretool, das den fehlenden Arbeitsschritt der manuellen Endprüfung auf den Rechner verlagert und so Zeit und Geld einspart, arbeitet unter Zuhilfenahme der Fuzzy-Logik. Die 'unscharfe' Logik gestattet es, ein Programm auf die Arbeits- und Denkweise eines Menschen anzupassen, um so eine optimale Mensch-Maschine-Kommunikation zu erreichen. Die Anwendung der Fuzzy-Logik ist sowohl im Bereich der PCB-Tools neu, als auch für die Anwendung, EMV-Probleme auf Leiterplattenlayouts zu analysieren. Die Daten, die dem mehrstufigen Regelwerk der Fuzzy-Logik über die Properties, den Signaleigenschaften der zu bewertenden elektronischen Schaltung, zur Verfügung gestellt werden, basieren auf einer umfangreichen Wissensakquise. Dieses Wissen resultiert aus der 10-jährigen Erfahrung des Layout-Dienstleisters CADTRON mit den Ingenieuren der Auftraggeber aus den Entwicklungs- und EMV-Abteilungen. Die Abstimmung der Signal-Properties mit den real auftretenden Störungen auf einer Leiterplatte (Störquellen-/Störsektorenbeziehung) wurden durch umfangreiche meßtechnische Analysen vieler Layouts und Re-Designs durchgeführt.

Gruppen

Die Arbeit mit MENHIR lehnt sich sehr eng an die schon beschriebene Arbeitsweise für die EMV-gerechte Layouterstellung an. Zwingend notwendig ist die Bildung von Gruppen: **Versorgungsgruppen** und **Schaltkreisgruppen**. Da dieser Arbeitsschritt sinnvollerweise bereits vor der Platzierung und Entflechtung des Layouts durchgeführt wurde, kann der Layouter diese Informationen direkt übernehmen. Die Versorgungsgruppen bildet er durch Selektion der Versorgungs- und Bezugsleiterbahnen und stellt diese in Beziehung durch Namensvergabe (z.B. VCC und GND bilden die Versorgungsgruppe Digital). Gleiches führt er durch Selektion der Verbindungsnetze einer Schaltkreisgruppe durch und vergibt hier ebenfalls einen passenden Namen (z.B. Controller, Schnittstelle RS232, Speicher).

Properties

Jede Schaltkreisgruppe oder spezielle Netzverbindung hat eine ihrer Funktion entsprechende Eigenschaften. Diese Eigenschaften berücksichtigen

sichtigt der Layouter schon bei der Platzierung der Bauteile, Verlegung der Leiterbahnen, Einfügen von Abschirmungen, usw. Diese Schaltungs- und Netzeigenschaften sind, betrachtet man das Beeinflussungsschema von 'Störquelle, Störkanal und Störsekte', die Ursache für Eigenstörungsicherheiten auf einer Leiterplatte. Die fuzzy-gestützte Berechnung der Eigenstörungsicherheit durch MENHIR beruht auf einem Algorithmus, der die Eigenschaften der elektronischen Schaltung mit den geometrischen Gegebenheiten des Leiterplattenlayouts in Beziehung setzt. Die Eigenschaften der Schaltkreisgruppen und Einzelnetze fügt der Layouter in Form eines unscharfen Begriffes seinem zu untersuchenden Layout aus einer umfangreichen Property-Bibliothek zu.

Properties (Eigenschaften) sind mehrdimensionale Merkmalsvektoren, die eine Schar von physikalischen Größen beinhalten: Spannung, Strom, Frequenz, Flankensteilheit, statischer/dynamischer Störabstand, usw.

Auswertergebnis

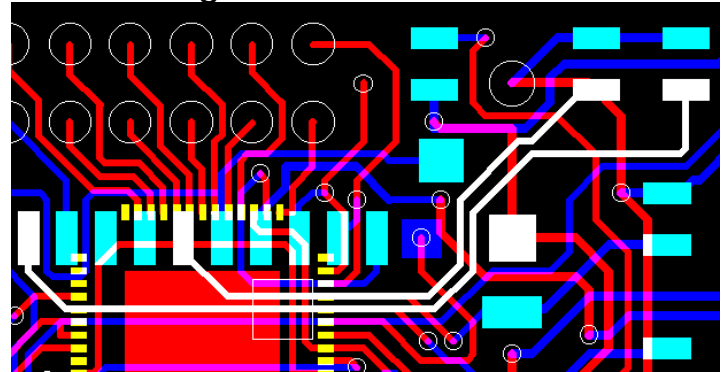


Bild 1. Das Auswertergebnis zeigt zwei parallelgeführte Leiterbahnen, die extrem unterschiedliche Eigenschaften aufweisen, so daß es zu einer induktiv/kapazitiven Kopplung führt.
Leiterbahn 1: geschaltete Spule, geringe Leistung < 100mA;
Leiterbahn 2: Analog verstärkend, sehr geringe Leistung, DC

Nach der 'Verpropfung' des Layouts beginnt MENHIR DER EMV PREDICTOR mit der Auswertung des gesamten Layouts, es sei denn der Layouter wählt nur einen bestimmten zu untersuchenden Bereich. Der Predictor überlagert dem Layout quadratische Sektoren von 2x2mm Größe, in denen das Auswertergebnis in Form eines Farbwertes gekennzeichnet wird. Damit hat der Layouter bereits ein optisches Ergebnis über die Eigenstörungsicherheit seines erstellten Layouts. Selektiert er die farblich gekennzeichneten Sektoren, erhält er in einer Dialogbox Informationen darüber welche Störung vorliegt und welche Netze Störquelle oder Senke sind.

Die Auswertesektoren sind in das PCB-Design-File rückschreibbar und können im CAD-Programm als optische Orientierung benutzt werden, um entsprechende Änderungen am Layout vorzunehmen.

Fazit

MENHIR, ein Werkzeug, das speziell für die Analyse der EMV-Probleme auf Leiterplattenlayouts konzipiert wurde, ist maßgeschneidert für den praktischen Einsatz am CAD-Arbeitsplatz. Ein Layouter wird schnell feststellen, daß dieses Werkzeug durch eine einfache Bedienung und schnelle Auswertung die stetig wachsenden Anforderungen mitbewältigt, ein EMV-gerechtes Layout zu erstellen. Die optischen Informationen gestatten ihm eine wesentlich bessere Übersicht der EMV-Unzulänglichkeiten als dies Kolonnen physikalischer Zahlenwerte tun können.

Den kostspieligen Luxus, eine EMV-Optimierung erst am fertigen Gerät durch *try and verify* zu erreichen, wird sich aus wirtschaftlichen, zeitlichen und haftungsrechtlichen Gründen in Zukunft kaum noch jemand leisten können. Der Einsatz solcher Werkzeuge wie MENHIR zeigt, daß es sich lohnt, schon in der Entwurfsphase EMV-Maßnahmen durchzuführen und nicht erst in der Test- oder Produktionsphase einer Baugruppe oder eines Gerätes.

In Österreich vertreten durch

SELB OEG
CAD / CAM / CAE Software distributor
Ing. Ernst E. Wurzer
2540 Bad Vöslau
Tel/Fax: 02252/76095□