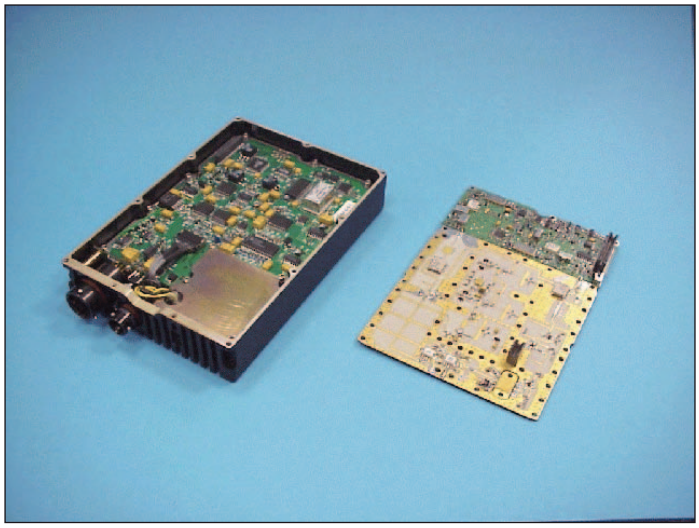
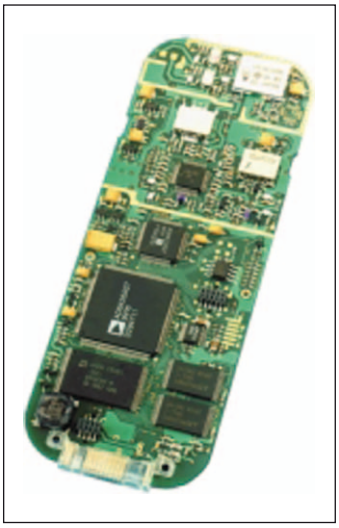
Optimale Platinen für HF- und Funk-Technik





Die elektrischen Eigenschaften der Platine haben im HF-Bereich einen signifikanten Einfluss auf die Funktion und das Leistungsvermögen der Schaltung. Dieser Einfluss steigt mit der Frequenz, da sich die dielektrischen Eigenschaften sukzessive verschlechtern und die Blindwiderstände der parasitären Elemente sich ungünstig verändern. Dies zwingt zu einer entsprechenden Einbindung der genannten elektrischen Eigenschaften in das Modell der Leiterplatte bei der Entwicklung der Baugruppe und bei deren Simulation. In der Praxis der Funkkomponenten-Entwicklung kann es dabei leicht zu einem Konflikt mit wirtschaftlichen oder räumlichen Anforderungen (der sogenannten Best-Manufacturing-Praxis) kommen. Daraus folgt, dass während des Entwicklungsprozesses sowohl der Funk-Designer als auch der PCB-Designer und der Fertigungsingenieur die Erfordernisse der anderen Seiten im Auge behalten sollten.

PCB-Materialien

Recht verschiedene Materialien werden zur Herstellung von PCBs eingesetzt. Diese Materialien können auch auf verschiedene Arten miteinander verbunden werden, was dann wieder entsprechend angepasste Laminate und verschiedenartige Durchverbindungen/Durchführungen (Vias) nach sich zieht. Eine Reihe von Abschlussschichten kann genutzt werden, etwa unter Verwendung solcher Materialien wie Gold, Nickel, Zinn und Blei. Die üblichen Board-Materialien für HF- und funktechnische Baugruppen sind FR4, Rogers R04003 und Rogers RT/Duroid. Man erhält sie in vielen Graduierungen und Formen mit verschiedenen elektrischen Eigenschaften und zu unterschiedlichen Kosten.

Hybride Strukturen kombinieren zwei verschiedene Materialien, sodass bestimmten Schaltungsbereichen eigene (optimale) physikalische Grundlagen zugeordnet werden. Einige Beispiele für hybride Strukturen findet man schon lange in kommerziellen Produkten; dazu gehören die FR4/Duroid-LNC-Konstruktion für Mikrowellen-Satelliten-Receiver oder eine FR4/Rodgers-Hybridkonstruktion in einem Formel-1-Telemetriesystem.

Eine Zusammenfassung der hauptsächlichen elektrischen Eigenschaften von drei häufig genutzten Board-Materialien für Funkprodukte bringt die Tabelle 1. Die Kosten steigen mit der dielektrischen Toleranz und sinken mit den elektrischen Verlusten.

Die üblichen Prozessschritte bei der Herstellung von PCBs sind Bohren, Zerteilen (Plating), Verbinden/Kleben (Bonding) und Beschichten/Verkupfern/Ätzen (Etching). Neuere Entwicklungen nutzen die Laser-Technik, um hervorragende Verbindungen zu schaffen ,bei Leiterbahnbreiten bis herab zu 0,05 mm. Ausgenommen die billigsten Funkprodukte, werden in aller Regel Multilayer-PCBs eingesetzt. Hierbei wird eine Anzahl von Laminaten von Board-Materialien individuell zerteilt und verbunden. Der prinzipielle Vorteil dieser Vorgehensweise ist die Möglichkeit, mehr als zwei Leitschichten einzusetzen, um den Platzbedarf auf dem Board zu reduzieren. Von Nachteil sind die erhöhten Kosten.

Eine typische PCB-Struktur bei der Volumenproduktion funktechnischer Produkte, wie Mobiltelefonen, weist vier bis sechs Layer mit FR4-Material auf. Eine solche Multilayer-Konstruktion kann, neben verschiedenen Strukturen der Laminate, auch recht verschiedene Strukturen der Vias aufweisen. Im übersichtlichsten Fall gehen alle Löcher durch alle Layer

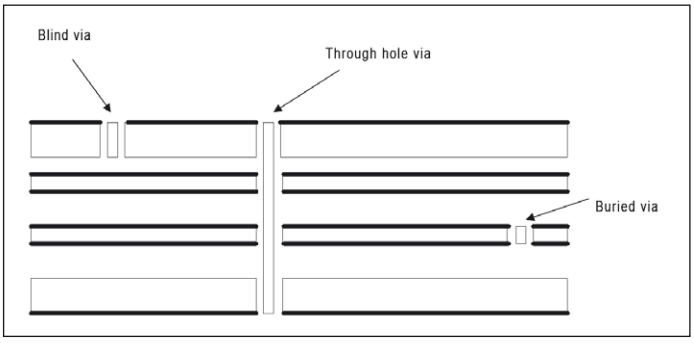


Bild 1: Verschiedene Durchkontaktierungsarten

Quelle: Geoff Smithson, Plextek Ltd., Practical RF Printed Circuit Board Design, übersetzt von FS

Material	typ. Dielektrizitätskonstante	Toleranz	Verlustfaktor
FR4	4	+/-5...25%	0,01
Rogers R04003	3,38	+/-0,05	0,0027
Rogers RT/Duroid	2,2	+/-0,03	0,0009

Tabelle 1: Verschiedene für HF geeignete PCB-Materialien und ihre Eigenschaften

des Boards. Daher lassen sich beliebige Leiterzüge in der Vertikalen durchverbinden. Der Vorteil dieses Konzepts liegt in der minimierten Herstellungszeit, da alle Vias in einem Prozessschritt hergestellt werden können. Von Nachteil ist der Platzbedarf der Vias an Punkten, wo sie nicht genutzt werden. Etwas komplexere Strukturen sind möglich, wenn man blinde oder vergrabene Vias vorsieht. Ein blindes Via meint ein von oben und unten sichtbares Via zwischen einer Anzahl von Layern, wobei aber nicht alle erfasst werden. Ein vergrabenes Via ist ein Via zwischen einer Anzahl von Layern, das von mindestens einer Seite nicht erkennbar ist, da es diesen Layer nicht erfasst. Die Art und Weise der gewählten Via-Struktur hat einen beträchtlichen Einfluss auf den Herstellungsprozess des PCBs und auf die gesamten Herstellungskosten. Bild 1 skizziert diese drei Via-Typen beispielhaft.

Beschränkungen der PCB-Herstellung

Im Interesse des optimalen Designs eines Produkts auf Basis eines PCBs ist es wichtig, die praktischen Begrenzungen beim Herstellungsprozess zu kennen und zu verstehen. Die hierbei erfolgenden Schritte, etwa das Ätzen der Leiterzüge, das Bohren der Löcher und das Aufbringen der Laminate unterliegen Beschränkungen. Werden diese Grenzen überschritten, dann gehen die Kosten der PCB-Herstellung beträchtlich in die Höhe, und die Ertragsaussichten der Produktion sinken.

Das typische Limit der Leiterbreite nach unten für die High-Volume-Fertigung eines komplexen Produkts liegt bei 0,2 mm. Ähnlich groß ist der minimale Abstand zwischen zwei verschiedenen Leiterbahnen. (Je größer man die minimale Leiterbahnbreite und den minimalen Leiterbahnabstand definiert, umso kostengünstiger wird das PCB.)

Einige PCB-Hersteller bieten das Ätzen ab Leiterbahnbreiten von 0,125 mm an. Das ist eigentlich eine kostspielige Spezialleistung, die man nur dann in Anspruch nehmen sollte, wenn es absolut notwendig ist. Die typische Toleranz der Breite geätzter Leiterzüge beträgt +/-0,025 mm.

Die minimale Via-Lochgröße übt ebenfalls einen bemerkenswerten Einfluss auf die Kosten des Boards aus und limitiert die Anzahl der PCBs, die mit einem Mal gestapelt gebohrt werden können. Die Auswirkungen von kleinen Via-Durchmessern auf die HF-Performance außer acht lassend, werden typisch minimale Größen von 0,25 mm genutzt. Jedoch ergeben sich geringere Kosten, wenn man sich auf 0,5 mm beschränkt.

Eine Zusammenfassung der typischen Beschränkungen gibt Tabelle 2 für FR4-PCBs. Drei Kostenkategorien wurden eingerichtet, um die Toleranzbereiche besser zu etablieren.

Parasitäre Elemente von PCB und Komponenten

Die physikalischen PCB-Eigenheiten haben einen Einfluss auf die HF-Performance der darauf realisierten Schaltung. Bei hohen Frequenzen wirken lange, dünne Leitungen auch als Induktivitäten und relativ großflächige Pads über der Massefläche als Kapazitäten. So kann man beispielsweise einen Kondensator der Bauform 0805 auf einem 0,25 mm dicken doppelseitig beschichteten FR4 PCB über einer Massefläche als Bandpass auffassen, wobei die Anschlüsse gegen Masse eine bemerkenswerte parasitäre Kapazität aufweisen. Auch der Kondensator selbst weist, neben seiner eigentlichen Kapazität, zwei serielle parasitäre Induktivitäten auf, hervorgerufen durch die Pad-Metallisierung und die PCB-Leitung. Hinzu kommt sein Verlustwiderstand. Will man noch mehr ins Detail gehen, ist auch die Impedanz der Verbindungen zwischen Schaltungskomponenten und der Massefläche zu berücksichtigen. Auch eine Durchverbindung (Via) hat eine bemerkenswerte Induktivität von z.B. typisch 0,75 nH bei 1,6 mm Länge und 0,2 mm Durchmesser. Diese mag zunächst als recht klein erscheinen, zeigt sich jedoch in einer Simulation als beachtliches parasitäres Element. Durch die SMT, welche kleinste Abmessungen und Leitungslängen erlaubt, werden also parasitäre Einflüsse zwar minimiert, jedoch nicht beseitigt. In gleicher Weise kann man die Bauelemente selbst betrachten. Auch diese zeigen kein ideales Verhalten.

Der Gütefaktor Q eines Bauelements kennzeichnet die Qualität eines reaktiven Bauteils. Q ist das Verhältnis von gespeicherter zu verlorener Energie im Bauteil oder von Betrag des Blindwiderstands zu Längs-Verlustwiderstand. Typische Werte für eine SMD-Spule liegen bei 50 und für einen keramischen Kondensator mit COG-Dielektrikum bei 200 (Q ist frequenzabhängig).

Masseflächengestaltung

Für ein HF- oder Funk-Produkt sind verschiedene Strategien der Masseflächengestaltung anwendbar. Es gibt keine eindeutige Antwort auf die Frage nach der besten Strategie für ein bestimmtes Produkt. Einige Designer sind ausgesprochene Vertreter der Strategie, die Massefläche konsequent in Bereiche für analoge und digitale und/oder HF- und NF-Bereiche einzuteilen. Erfahrungen mit einer Anzahl von Funkprodukten bei Plextek haben gezeigt, dass eine einfache niederinduktive Massefläche für alle Teile der Schaltung im Allgemeinen bereits einen guten Ausgangspunkt darstellt. Oft hat sich herausgestellt, dass das Aufsplitten der Massefläche in verschiedene Bereiche mehr Probleme schafft als löst. Eine sorgfältige Betrachtung der Stromflüsse (RF, AC, DC) innerhalb der Schaltung ist jedoch unabdingbare Voraus-

Kriterium	Low-Cost-HF-PCB	Medium-Cost-HF-PCB	High-Cost-HF-PCB
min. Track & Gap	0,25 mm	0,2 mm	0,125 mm
Cu-Ätztoleranz	+/-0,05 mm	+/-0,025 mm	+/-0,01 mm
min. Lochdurchmesser	0,7 mm	0,5 mm	0,2 mm
max. Anzahl der Layer	2	4	6
Via-Struktur	Through Hole	Through Hole & blind	Through Hole, blind & buried
Board Finish	Hot Air solder levelled	Gold flash	Gold plated

Tabelle 2: Zusammenstellung typischer PCB-Herstellungs-Limitationen

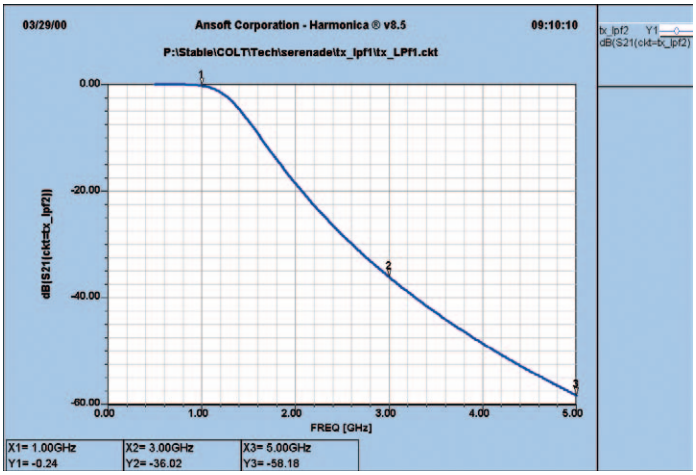


Bild 2: Kennlinie für ein Butterworth-Lowpass-Filter ohne parasitäre Elemente

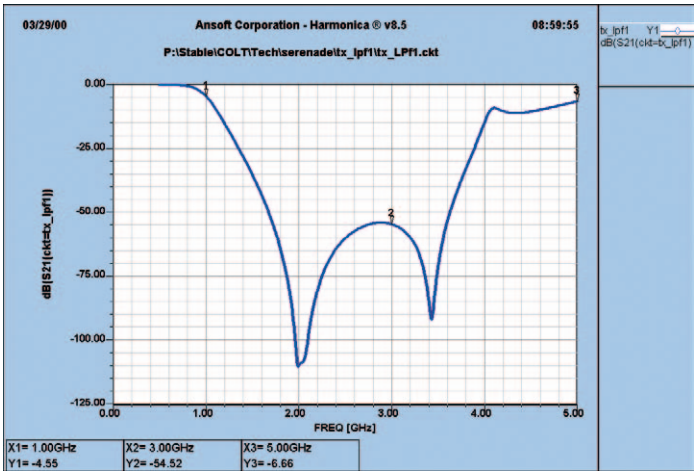


Bild 3: Kennlinie für ein Butterworth-Lowpass-Filter mit parasitären Elementen

setzung, um z.B. Beeinträchtigungen zwischen digitalen und hochfrequenten Bereichen zu minimieren. Vorausgesetzt, man beherrscht den Einsatz von DSP und Mikroprozessoren in HF- und funktechnischen Produkten, ist dies ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

Ein Schaltungsbeispiel

Die potentielle Bedeutung der parasitären PCB- und Bauteil-Elemente soll nun anhand eines Beispiels demonstriert werden. Angenommen sei ein Tiefpassfilter für den Ausgang eines HF-Leistungsverstärkers, um Harmonische zu reduzieren. Die genaueren Daten:

- HF-Ausgangsleistung: 30 dBm
- 3. Harmonische im ungefilterten Ausgang: -40 dBc
- 5. Harmonische dto. -50 dBc
- geforderte maximale unerwünschte Emissionen -30 dBm
- Trägerfrequenz 1 GHz
- Systemimpedanz 50 Ohm

Somit sind mindestens 20 dB Unterdrückung für die 3. Harmonische (3 GHz) und mindestens 10 dB für die 5. Harmonische (5 GHz) erforderlich. Betrachtet man die Standard-Kennlinie eines Butterworth-Filters 5. Ordnung (2x L, 3x C), so bieten sich deutlich höhere Dämpfungen als erforderlich, nämlich >30 dB @ 3rd Harmonic und >50 dB @ 5th Harmonic. Die dazu passende Kennlinie aus der Simulation dieses von Parasiten freien Filters zeigt Bild 2. Versieht man diese Struktur umfassend mit parasitären Elementen von PCB und Bauteilen, dann springt die Anzahl der Schaltungselemente von fünf auf 18. Die entsprechende simulierte Performance zeigt Bild 3. Der Unterschied zum Ideal ist klar ersichtlich. Der Wert für die 3rd Harmonic hat sich um etwa 20 dB verbessert, während der Wert für die 5th Harmonic sich um über 50 dB verschlechtert hat! Zusätzlich ist die Durchgangsdämpfung von 0,25 dB auf kaum vertretbare 4,5 dB angestiegen.

Zusammengefasst

Es wurden die Eigenschaften von drei PCB-Materialien betrachtet, die häufig für HF- und Funk-Produkte gewählt werden. Darüber hinaus stehen dem PCB Designer weitere Materialien mit verschiedenen Laminaten und Stärken zur Verfügung. Damit ist die Basis gegeben, um die Unterbringung verschiedener Schaltungsblöcke, wie Basisband-Block und HF-Signalverarbeitung, auf einem gemeinsamen Board zu bewerkstelligen. Bei der Festlegung von flachen Durchführungen (Vias) muss der Designer die Kostenfrage in den Fokus stellen, besonders bei Hybrid- und Multilayer-Konstruktionen.

Die Begrenzungen durch den PCB-Herstellungsprozess wurden erläutert und das Problemfeld der parasitären Effekte allgemein dargestellt sowie beispielhaft illustriert. Für ein optimales kommerzielles Funkprodukt ist es wichtig, dass der PCB-Layout-Entwickler und der Schaltungsdesigner jeweils diese Problemkreise verstehen. ◄