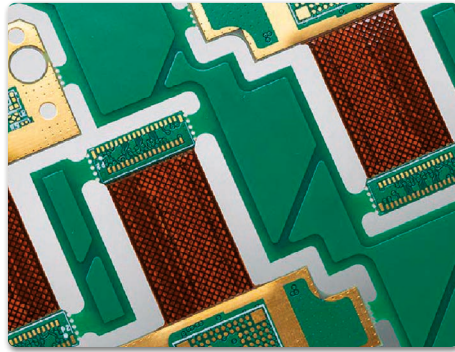
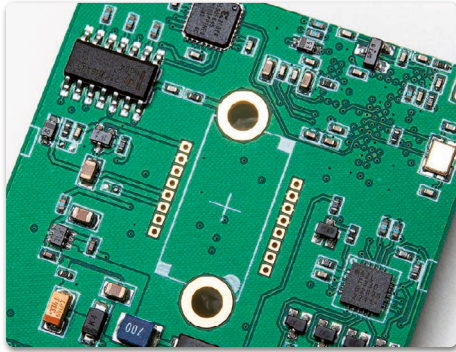


Für den Leiterplatten-Konstrukteur

## Einfügedämpfung des PCB-Materials

Dieser Beitrag ist eine Einführung in das Thema „Einfügedämpfung von Hochfrequenzsignalen auf Platinen“. Da die Frequenz von Hochfrequenzsignalen sukzessive steigt, nimmt auch die Bedeutung dieses Problems zu.



Mit dem Fortschritt der Technologie werden Hochfrequenzsignale zunehmend in verschiedenen Bereichen wie Kommunikation, Netzwerke und Automobile eingesetzt. Auch Leiterplatten dienen der Übertragung von Hochfrequenzsignalen. Jede Leiterplattenübertragung mit mehr als 50 MHz gilt als Hochgeschwindigkeitsübertragung. Die Signalübertragung der Zukunft wird sich voraussichtlich in Richtung höherer Frequenzen und geringeren Stromverbrauchs entwickeln.

Kommunikation werden hauptsächlich digitale Rechtecksignale verwendet, z.B. in Großrechnern, Netzwerk-Kommunikationsprodukten und bei der internen Signalübertragung in Mobiltelefonen.

In der Elektronik, der Regelungstechnik und der Statistik stellen Frequenzbereichsdiagramme die Signalmenge innerhalb jedes gegebenen Frequenzbandes über einen Frequenzbereich dar. Spektrumanalysatoren werden häufig verwendet, um tatsächliche Signale in ihre Frequenzbereichsspektren umzuwandeln.

### Ein näherer Blick auf aktuelle Hochfrequenzsignale

Bei der drahtlosen Kommunikation werden hauptsächlich analoge Sinussignale verwendet, z.B. in Basisstationen, Kollisionsvermeidungssystemen für Kraftfahrzeuge, Rundfunk, Mobiltelefonen, Radar und Fernbedienungen. Bei der drahtgebundenen

Funktionen oder Signale können durch ein Paar mathematischer Operatoren zwischen Zeit- und Frequenzbereich umgewandelt werden. Die Fourier-Transformation wird verwendet, um eine Rechteckwelle in mehrere Sinuswellen zu zerlegen und diese in einem Histogramm aus Amplitude

Quelle:  
Whitepaper „Introduction to High-Frequency Signal Insertion Loss“  
Ryon Hu  
PICA Manufacturing Solutions  
www.picamfg.com

übersetzt und gekürzt von FS

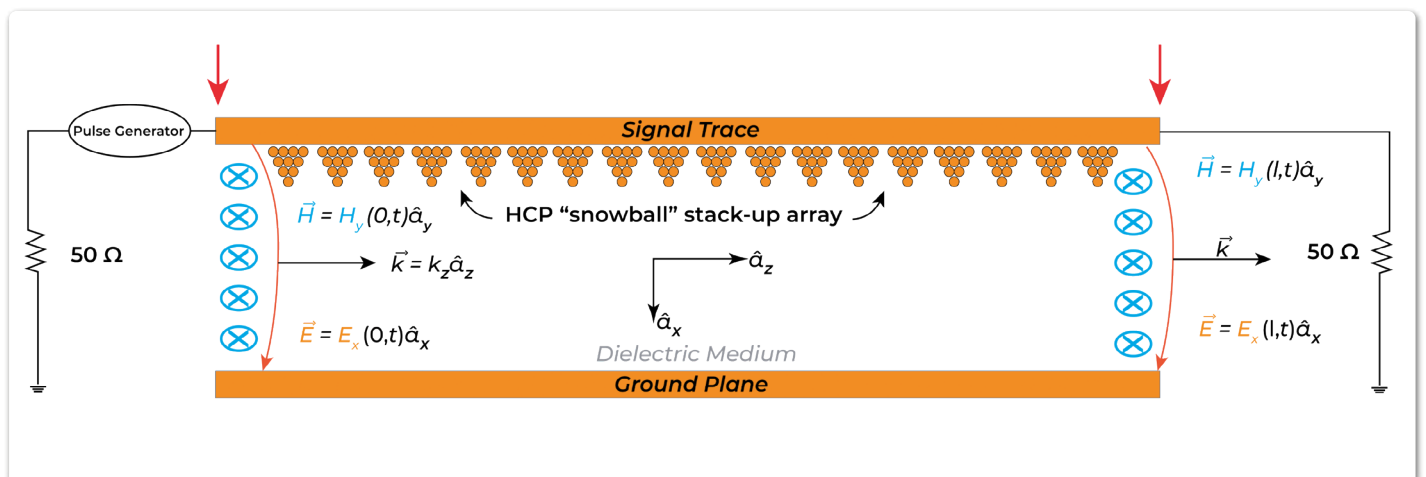


Bild 1: Leiterzug zwischen Quelle und Last

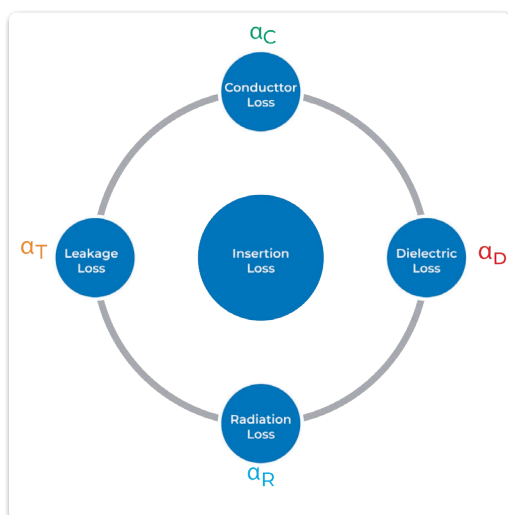


Bild 2: Die vier Einflussfaktoren

und Frequenz, das als Frequenzspektrum bezeichnet wird, darzustellen. Dies beschreibt die Beziehung zwischen Frequenz- und Amplitudenänderungen.

### Signalintegrität

In der Kommunikation können Signale in Form von Bildern, Tönen und Befehlen dargestellt werden. Signalintegrität bezieht sich auf die Vollständigkeit des Signals, das auf der Empfangsseite empfangen wird, nachdem es von der Sendeseite über einen Leiter (Träger) übertragen wurde, s. Bild 1. Während der Signalübertragung kann die Qualität des Leiters zu Signalverlust oder -verzerrung führen. Für hohe Signalintegrität sollte die Einfügungsdämpfung, also der Signalverlust, der während der Übertragung von Hochfrequenzsignalen vom sendenden Ende über den Träger (PCB) zum empfangenden Ende auftritt, minimiert werden. Ein übermäßiger Signalverlust führt zu Signalverzerrungen und Übertragungsverlusten.

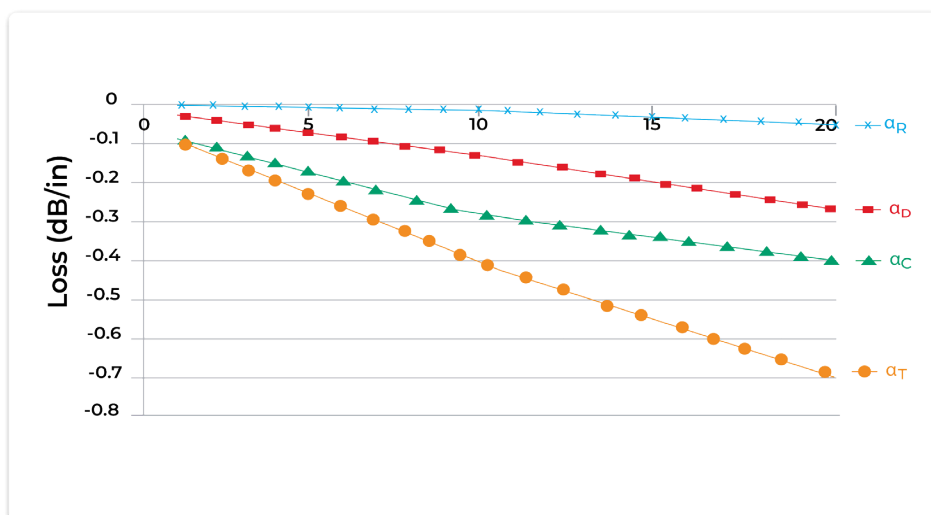


Bild 3: Wirkung der vier Störfaktoren

### Faktoren, die zur Einfügungsdämpfung beitragen

- dielektrischer Verlust: Materialeigenschaften (Dk & Df)
- Leitungsverlust: Leitwiderstand
- Strahlungsverlust: Strahlung in die Betriebsumgebung
- Leckverlust: Interferenzen durch Signalübertragung in benachbarten Leitungen

Der dielektrische Verlust ( $\alpha_D$ ) macht etwa 40% aus. Der Leitungsverlust ( $\alpha_C$ ) macht etwa 57% aus. Der Strahlungsverlust ( $\alpha_R$ ) macht etwa 3% aus. Der Leckverlust ( $\alpha_L$ ) kann vernachlässigt werden (Bilder 2 und 3).

Die Hauptfaktoren, die den Einfügungsverlust beeinflussen, sind also der dielektrische Verlust und der Leiterverlust.

### Wie der dielektrische Verlust entsteht

Die dielektrische Schicht besteht aus vielen polaren Molekülen (Dipolen, s. Bild 4). Je stärker die Polarität, desto höher der Dk. Wenn sich Rechteckwellen schnell ausbreiten, verursachen sie eine Bewegung der zahlreichen Dipolmoleküle im Dielektrikum, wodurch Energie verschwendet wird.

Die Dipolmoleküle im Dielektrikum werden durch das elektrische Rechteckwellenfeld beeinflusst, was zu einem leichten „Zittern oder Schwingen“ und einem „Dehnen oder Ziehen“ aufgrund positiver und negativer Anziehung führt, was wiederum zu einem Energieverlust führt.

Die Energie, die vorübergehend für die „positive und negative Anziehung“ verwendet wird, wird als Er oder Dk bezeichnet. Die durch Flattern und Ziehen verbrauchte Energie wird in Wärme umgewandelt und geht dauerhaft verloren, was als Df oder dielektrischer Verlust bezeichnet wird.

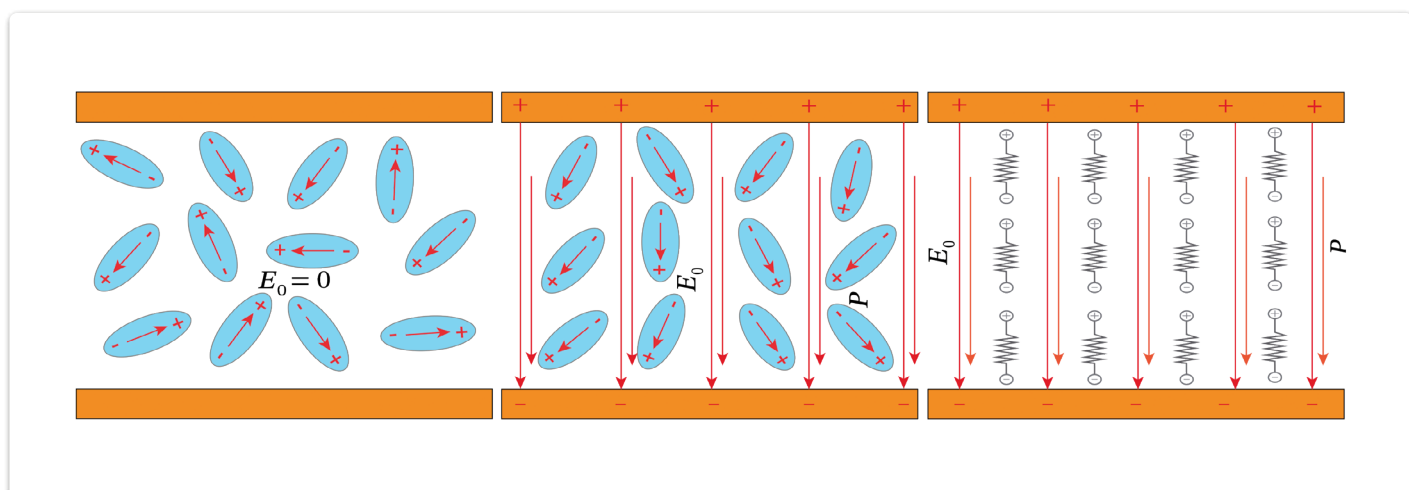


Bild 4: Modulares Modell zur Einfügungsdämpfung

Maßnahmen zur Verbesserung des dielektrischen Verlusts (αD)

Wenn der Kunde hohe Anforderungen an die Einfügungsdämpfung (IL) stellt, müssen Materialien mit niedrigem Dk und niedrigem Df gewählt werden, s. Tabelle 1. Je höher die Bandbreite, desto größer der Verlust. Der Leitungsverlust (αC) ist konstant, aber unterschiedliche Materialien (Dk & Df) führen zu unterschiedlichen Differenzialverlusten. Durch die Auswahl eines bestimmten Materials mit niedrigem Dk- und Df-Wert kann der Einfügungsverlust (IL) bei einer Bandbreite von 10 GHz um 68% reduziert werden.

| Frequency | FR4         |                 |            | 4350        |                 |            |
|-----------|-------------|-----------------|------------|-------------|-----------------|------------|
|           | Copper Loss | Dielectric Loss | Total Loss | Copper Loss | Dielectric Loss | Total Loss |
| 10 MHz    | 0.005       | 0.001           | 0.006      | 0.005       | 0.000           | 0.005      |
| 100 MHz   | 0.019       | 0.012           | 0.031      | 0.019       | 0.002           | 0.021      |
| 1 GHz     | 0.090       | 0.123           | 0.213      | 0.090       | 0.017           | 0.107      |
| 10 GHz    | 0.330       | 1.227           | 1.557      | 0.330       | 0.173           | 0.503      |

Wie es zu Leitungsverlusten kommt

- 1. Skin-Effekt: Hochfrequenzsignale werden durch die Oberflächenschicht des Leiters übertragen, insbesondere durch die Unterseite, die der Rücklaufschicht zugewandt ist, die viele Kupferkügelchen aufweist. Dies erhöht den Widerstand und führt zu einer Erwärmung, was wiederum zu einem Energieverlust führt.
- 2. Die elektrischen und magnetischen Felder von hochfrequenten Rechteckwellen, die das Dielektrikum durchqueren, verursachen eine vorübergehende Energiespeicherung (Dk) und einen Verlust (Df). Diese doppelten Hindernisse führen zu Signalverlust. Dieser gestaltet sich frequenzabhängig wie beispielsweise in Bild 5.

Tabelle 1: RF4 und 4350 im Vergleich

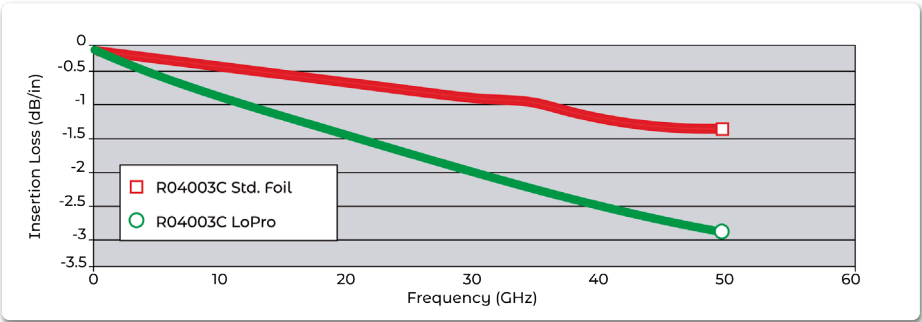


Bild 5: Verlauf der Einfügungsdämpfung zweier hochwertiger Materialien über der Frequenz

Messung der Einfügungsdämpfung von Hochfrequenzsignalen zur Verbesserung der Leitungsverluste (αC)

Man senkt Leitungsverluste durch Verwendung von teurerem Material mit RTF- oder VLP-, HVLP-Kupferfolie zur Herstellung von Signalleitungen der inneren und äußeren Schicht. Die geringere Rauheit unter dem Schaltkreis reduziert den Übertragungsverlust von Rechteckwellen. Man gibt die Einfügungsdämpfung in dB/Zoll

| No. | Test Principle                                            | Instrument Used |
|-----|-----------------------------------------------------------|-----------------|
| 1   | EWB (Effective Bandwidth)                                 | TDR             |
| 2   | RIE (Root Impulse Energy)                                 | TDR or VNA      |
| 3   | FD (Frequency Domain Method)                              | TDR or VNA      |
| 4   | SPP (Short Pulse Propagation)                             | TDR or VNA      |
| 5   | SET2DIL (Single-Ended TDR to Differential Insertion Loss) | TDR or VNA      |
| 6   | Delta-L                                                   | TDR or VNA      |

Tabelle 2: Prüfverfahren und Equipment

bei der Messfrequenz an. Testmethoden für die Einfügungsdämpfung stellt Tabelle 2 zusammen. In Leiterplattenfabriken üblich ist die Methode Delta-L. ◀