

HF-Leitungen auf Platinen in Theorie und Praxis

Streifenleitungen (Striplines) nennt man oft HF-Leitungen auf Platinen (PCBs). Sie sind wie HF-Kabel homogen aufgebaut und daher durch einen Wellenwiderstand charakterisierbar, der der Quelle wie ein ohmscher Widerstand erscheint. Dieser Beitrag vermittelt einige theoretische Grundlagen und gibt praktische Hinweise.

$$\left(\frac{W}{H}\right) < 1: \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left[\left(1 + 12 \left(\frac{H}{W}\right)\right)^{-1/2} + 0.04 \left(1 - \left(\frac{W}{H}\right)\right)^2 \right]$$

$$\left(\frac{W}{H}\right) > 1: \quad \epsilon_{eff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \left(\frac{H}{W}\right)\right)^{-1/2}$$

Formel 1: Berechnung der effektiven Dielektrizitätskonstante

$$\left(\frac{W}{H}\right) < 1: \quad Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_{eff}}} * \ln\left(8 \frac{H}{W} + 0.25 \frac{W}{H}\right)$$

Formel 2: Vereinfachte Berechnung der effektiven Dielektrizitätskonstante

$$\left(\frac{W}{H}\right) > 1: \quad Z_0 = \frac{120\pi}{\sqrt{\epsilon_{eff}} \left(\frac{W}{H} + 1.393 + 0.667 \ln\left(\frac{W}{H} + 1.444\right) \right)}$$

Formel 3: Berechnung der charakteristischen Impedanz der Microstrip Line

Entsprechungen des Koaxialkabels. Darüber hinaus kennt man noch die differentielle Stripline (Bild 3), welche der Paralleldrahtleitung entspricht.

Wellenwiderstand der Microstrip Line

Ausgehend von den physikalischen Eigenschaften des PCB-Materials ist es möglich, eine Transmission Line mit dem gewünschten Wellenwiderstand (auch Characteristic Impedance genannt) zu entwerfen. Für die Microstrip Transmission Line benötigt man dazu rein theoretisch die in Bild 4 aufgeführten Größen. Die Länge der Leitung ist unerheblich, der Wellenwiderstand ist davon unabhängig. Zunächst gilt es, die effektive Dielektrizitätskonstante zu

berechnen, wie in Formel 1 zu sehen.

Die effektive Dielektrizitätskonstante ist deshalb erforderlich, da sie das Feld, welches zwischen den Leitern existiert, mitbestimmt. Im Vakuum und näherungsweise in Luft ist sie 1, nicht jedoch in Platinenmaterial. Nimmt man praxisgerecht die Dicke des Leiters T (Thickness) als wesentlich geringer als die Höhe des PCB-Isoliermaterials an ($T/H < 0,005$), dann kann die effektive Dielektrizitätskonstante mit der vereinfachten Formel 2 errechnet werden.

Das Ergebnis weicht beträchtlich von der eigentlichen Dielektrizitätskonstanten ab. Beträgt diese beispielsweise 4,7, so entspricht dem eine effektive Dielektrizitäts-

konstante von etwa 3,1. Hat man die effektive Dielektrizitätskonstante nach einer der obigen Formeln ermittelt, lässt sich die charakteristische Impedanz der Microstrip Line mit Formel 3 errechnen.

Erleichterung durch Programme

Der Umfang dieser Formeln ist beträchtlich. Erfahrungsgemäß stellt sich dabei die Frage nach der Korrespondenz mit der Praxis. Es war daher hier besonders sinnvoll, die Computertechnik zu bemühen und den Studenten, Laboringenieuren und Entwicklern entsprechende Programme zur Verfügung zu stellen. Diese können Bestandteil kommerzieller Programme für die HF-Technik sein, wie zum Beispiel AppCAD von Agilent Technologies, oder sie sind online zu erreichen und kostenlos nutzbar. Beispiele hierzu:

www.pasternack.com/t-calculator-stripline.aspx

www.multek.se/engelska/engineering/

www.emtalk.com/mscalc.php

Es wird nun nur noch die einfache Dielektrizitätskonstante benötigt. Die Dicke des Leiters T bleibt selbstverständlich auch hier unberücksichtigt, da klein gegenüber H. Die Anwendung ist also sehr einfach. Man achte nur darauf, dass statt eines Kommas oft ein Punkt einzugeben ist und dass eventuell für den Wellenwiderstand nicht relevanten Eingaben, wie Leitungslänge und Frequenz, verlangt werden (man gibt dann einfach etwas ein, wie 10 mm oder 1 GHz). Außerdem

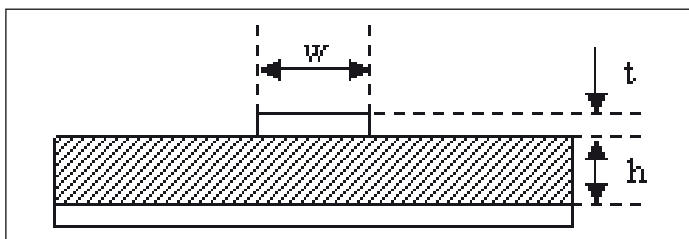


Bild 1: Grundaufbau der Microstrip Transmission Line

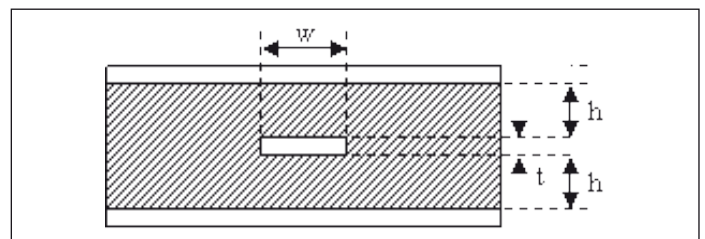


Bild 2: Prinzip der Stripline

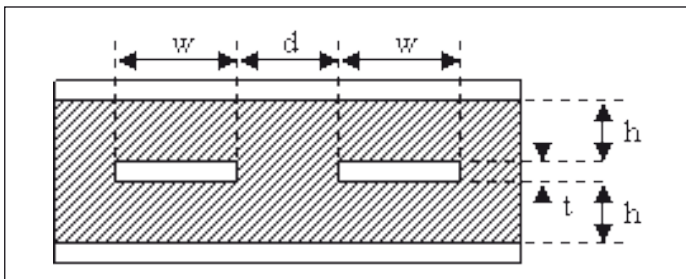


Bild 3: Grundstruktur einer differentiellen Stripline

kann bei Striplines entweder der Abstand der flankierenden Kupferflächen oder der Abstand des Leiters zu einer dieser Flächen zugrundegelegt werden. Einige dieser Programme liefern nicht nur den Wellenwiderstand, sondern auch Induktivität, Kapazität und/oder Laufzeit pro Längeneinheit.

Bei einem Test zeigten sich – nicht ganz unerwartet angesichts des theoretischen Unterbaus – bemerkenswerte Ergebnisdifferenzen. Zugrundegelegt wurden zwei Microstrip Lines mit folgenden Daten:

$$W = 0,003/0,006 \text{ Inch} = 0,0762/0,1524 \text{ mm}$$

$$H = 0,062 \text{ Inch} = 1,5748 \text{ mm}$$

Dielektrizitätskonstante 4,7

Dies ist praxisrelevant, entspricht es doch dem G-10-Glasmaterial. Die Leitungen sind bis auf die Breite (Verhältnis 2) gleich, W (Wide) setzt der Stromtragfähigkeit die Grenze und ist eventuell bei Senderausgangsleitungen kritisch. Ausgegeben wurden:

$$\text{Pasternack: } 200,8/151 \text{ Ohm}$$

$$\text{Multek: } 160,3/143,4 \text{ Ohm}$$

$$\text{Emtalk: } 177,9/152,6 \text{ Ohm}$$

Diese Unterschiede sollte man jedoch nicht überbewerten. Beträgt nämlich bei einer Fehlanpassung das Widerstandsverhältnis 1:2 oder 2:1, so ist dies lediglich mit einem Leistungsverzicht von 11% gegenüber Leistungsanpassung verbunden. Praktisch ist aber der Wellenwiderstand als Ergebnis nicht, denn die Applikation gibt diesen in der Regel vor. Den praktischen Weg erlaubt beispielsweise

Emtalk, wo man den Wellenwiderstand, die Dielektrizitätskonstante und H vorgibt und W erhält. Will man mit den obigen Werten beispielsweise 75 Ohm erhalten, so muss W 1,32 mm betragen. Hieran zeigt sich, wie träge der Wellenwiderstand auf W-Änderungen reagiert, denn W der breiten Leitung mit etwa 150 Ohm müsste nun fast verzehnfacht werden.

Knackpunkt Dielektrizitätskonstante

Die Dielektrizitätskonstante sollte man indes nicht unterschätzen. Am besten ist es, wenn man sie dem Datenblatt des verwendeten Materials entnehmen kann. Hier einige Richtwerte:

Standard-FR4: 4,1...4,4

Isola FR408: 3,75

Arion 25N: 3,38

Fiber Glass G-10: 4,7...5,3

Diese Kenngröße ist nicht unerheblich von der Frequenz abhängig! Hiervon vermittelt Bild 5 einen orientierenden Eindruck: Die relative Dielektrizitätskonstante fällt mit steigender Frequenz. Neben der sich hieraus ergebenden Abhängigkeit der charakteristischen Impedanz von der Frequenz ist eine Frequenzabhängigkeit der Laufzeit einzukalkulieren.

Exkurs:

Als **Dielektrizitätskonstante** ϵ_r bezeichnet man den Proportionalitätsfaktor zwischen der elektrischen Feldstärke und der dielektrischen Verschiebung. Damit gibt ϵ_r die Durchlässigkeit eines Materials für elektrische Felder an. Die dielektrische Verschie-

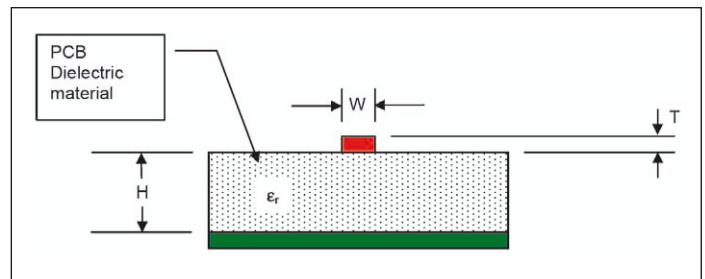


Bild 4: Ein PCB Microstrip Trace und seine Kenngrößen

bung bei Anlegen eines elektrischen Feldes E an ein Dielektrikum ist $\epsilon_r \times \epsilon_0 \times E$. Hierbei ist ϵ_0 die Dielektrizitätskonstante im Vakuum.

Als **relative Dielektrizitätskonstante** ϵ_r (oder Dielektrizitätszahl, Dielektrizität, Permittivitätszahl) bezeichnet man das (dimensionslose) Verhältnis der Dielektrizitätskonstanten in Materie und im Vakuum. Im Gegensatz zur Dielektrizitätskonstanten des Vakuums ist die relative Dielektrizitätskonstante Träger von physikalischer Information: In ihr ist das Verhalten dielektrischer Materie (Dielektrikum) in einem äußeren elektrischen Feld parametrisiert. Im Vakuum ist ϵ_r gleich 1. In isotropen Medien ist ϵ_r für manche Materialien näherungsweise ein konstanter Skalar, meist jedoch eine komplexe, von der Frequenz des elektrischen Feldes abhängige Funktion. Wird ein Isolator zwischen die Platten eines Kondensators gebracht, entstehen durch die Polarisierung

Oberflächenladungen, die dessen Kapazität gemäß $C = \epsilon_r \times C_{\text{Vakuum}}$ erhöhen, was große technische Bedeutung hat und auch zur Messung von ϵ_r benutzt werden kann.

FS

Quelle Bild 1 bis 3:

Multi-Teknik, www.multek.se

Quellen Formeln und Bild 4:

I. J. Bahl, D. K. Trvedi: *A Designer's Guide to Microstrip Line, Microwaves, May 1977*

Semtech: *RF Design Guidelines, AN 1200.04, 2006, www.semtech.com*

Quelle Bild 5:

Lee W. Ritchey: *A Survey and Tutorial of Dielectric Materials Used in the Manufacture of Printed Circuit Boards, Circuitree Magazine, September 1999* ◀

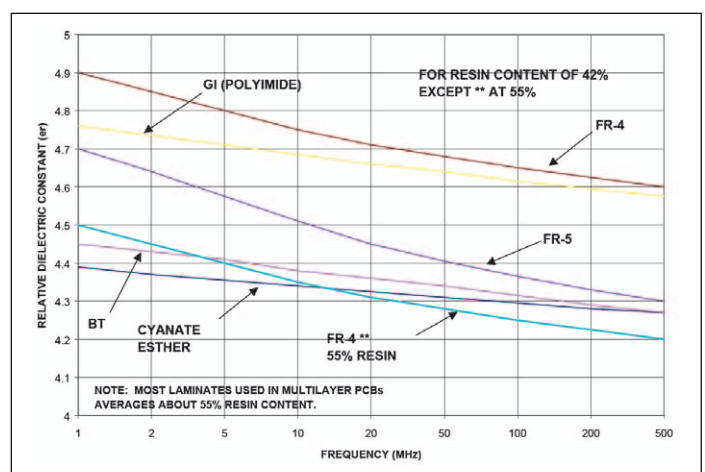


Bild 5: Relative Dielektrizitätskonstante verschiedener Laminat-Typen über der Frequenz