

6/10: HF-Technik – keine Hexerei

Kabel und Leitungen

Sobald eine Leitung bezüglich ihrer Länge in den Bereich einer Wellenlänge kommt, darf die an verschiedenen Orten der Leitung vorhandene Spannung nicht mehr als konstant angenommen werden. Entsprechend hat ein Signal, das über die Leitung transportiert wird, eine endliche Laufzeit. Leitungen werden mittels Wellenimpedanzen charakterisiert, was beim Abschluss der Leitungsenden mit den entsprechenden Lasten berücksichtigt werden muss.



Prof. Dr. Heinz Mathis
Dozent für
Mobilkommunikation
HSR Hochschule für Technik
Oberseestrasse 10
8640 Rapperswil
Tel. 055 222 45 95
Fax 055 222 44 00
heinz.mathis@hsr.ch
http://mk.hsr.ch

Das Konzept der Wellenimpedanzen kann leicht als Analogie zum Wesen von Wasserleitungen verstanden werden. Wenn eine dicke Leitung ohne Übergangsstück an eine dünne Leitung angeschlossen wird, geht Wasser verloren. Nur wenn beide Leitungen denselben Durchmesser aufweisen, kann die gesamte Wassermenge weiter fließen (Bild 1). Die genaue Definition der Wellenimpedanz kommt aus dem Ersatzschaltbild eines infinitesimal kleinen Leitungsstücks, das in Bild 2 dargestellt ist.

Vier Elemente modellieren die Physik eines Kabelstücks: Jeder Draht bildet eine Induktivität, die in Längsrichtung wirkt. Zwei gegenüber stehende Kabel (oder Kabel und Abschirmung) bilden eine Kapazität in Querrichtung. Ausserdem werden Kabelverluste als Längswiderstand und Verluste von einem Leiter zum andern als Leitwert modelliert. Bei einem verlustfreien Kabel entfallen die beiden letzten Elemente. Es kann gezeigt werden, dass die

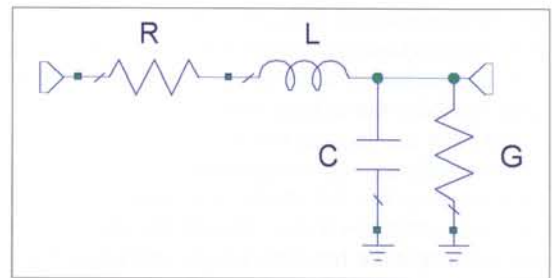


Bild 2: Ersatzschaltbild eines unendlich kleinen Leitungsstücks

Wellenimpedanz eines solchen verlustfreien Kabels gerade $Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$ (1)

entspricht. Bringt man nun mittels eines Kabels eine Leistung von einer Quelle zur Last, sollte das Kabel eine Wellenimpedanz aufweisen, die dem Lastwiderstand entspricht. Dann entstehen zumindest bei der Last keine Reflexionen. Eine ähnliche Überlegung gilt für die Quelle. Andernfalls sollte mittels Leistungsanpassung (durch Anpassnetzwerk) das gleiche Impedanzniveau erreicht werden.

Die ideale Impedanz

In der HF-Technik werden meist Koaxialkabel verwendet, d.h., der Innenleiter ist von einer Masseleitung ummantelt (Bild 3).

In der Praxis trifft man hauptsächlich auf Koaxialkabel mit Wellenimpedanzen von 50 und 75 Ω . Weshalb sich gerade diese beiden Werte etabliert haben, soll an dieser Stelle kurz erläutert werden. Verschiedene Eigenschaften eines

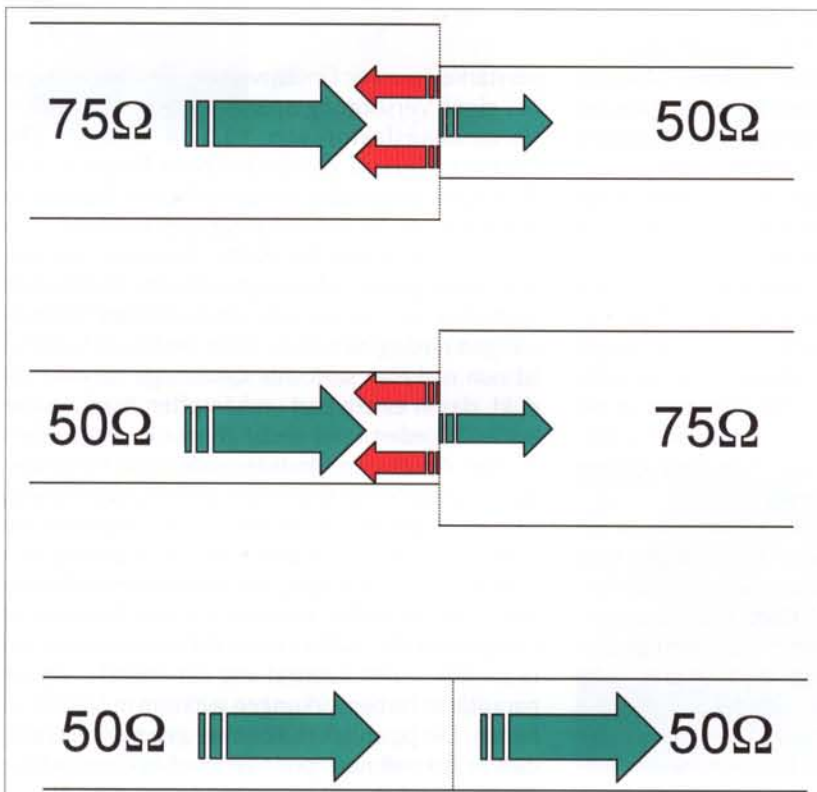


Bild 1: Leistungsverlust bei verschiedenen Kabelimpedanzen – nur im Falle gleicher Wellenimpedanz wird die gesamte Leistung weitergeleitet

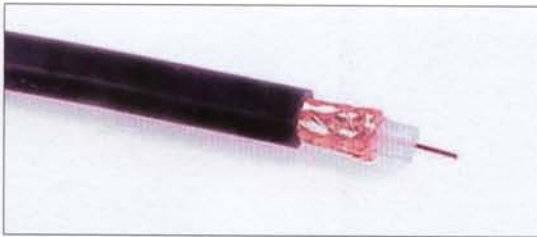


Bild 3: Ein in der HF-Technik übliches Koaxialkabel mit (von innen nach aussen) Innenleiter, Isolator (Dielektrikum), Abschirmung (Aussenleiter) und Schutzmantel

Koaxialkabeln werden durch die Art des verwendeten Wellenwiderstandes beeinflusst. So unterscheidet sich der Leitungsverlust je nach Art des Isolators zwischen dem Innenleiter und dem Mantel. Bild 4 zeigt den Verlauf des Leitungsverlustes in Funktion des Wellenwiderstandes.

Wird Luft als Isolator verwendet, bestehen die kleinsten Verluste bei einer Wellenimpedanz von ungefähr 75 Ω. Bei Polyäthylen liegt der ideale Wert

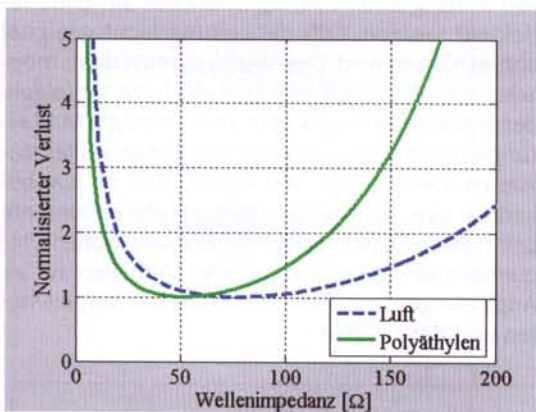


Bild 4: Leitungsverlust als Funktion der Wellenimpedanz

nahe bei 50 Ω. Für diese beiden Werte können also die verlustärmsten Koaxialkabel hergestellt werden.

Mehr als nur Zubringer

Die HF-Eigenschaften einer Leitung lassen sich auch vorteilhaft einsetzen. So können Leitungen nicht mehr nur als reiner Zubringer einer Leistung, sondern auch als Transformatoren, als Anpassnetz-

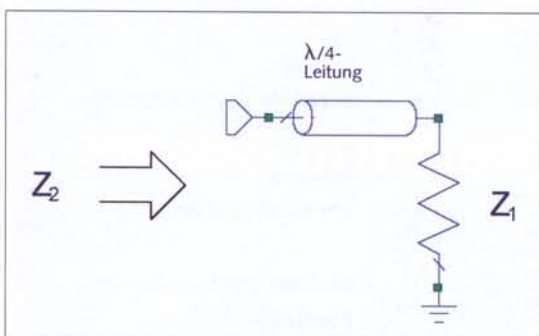


Bild 5: λ/4-Transformator

werke oder in Filtern genutzt werden. Bei Leitungstransformatoren ist vor allem die λ/4-Leitung beliebt (Bild 5).

Die λ/4-Leitung transformiert eine Impedanz Z_1 in eine Impedanz der Grösse $Z_2 = \frac{Z_w^2}{Z_1}$ (2)

Weil dabei die Impedanz Z_1 im Nenner von Gleichung (2) vorkommt, wird die λ/4-Leitung auch als Impedanzinverter bezeichnet. Tatsächlich können so induktive Lasten in kapazitive umgewandelt werden und umgekehrt. Als Beispiel nehmen wir an, dass wir eine Induktivität von 1 nH an eine

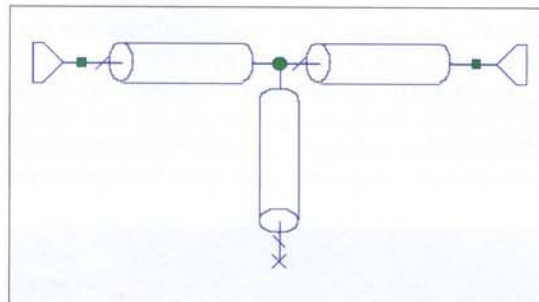


Bild 6: Einfaches Filter, bestehend aus drei gleich langen Leitungen

λ/4-Leitung mit der Wellenimpedanz Z_w anschliessen. Wie transformiert uns dann die Leitung diese Last bei 1 GHz? Dazu rechnen wir einfach

$$Z_2 = \frac{50^2}{j2\pi \cdot 10^9 \cdot 10^{-9}} = \frac{50^2}{j2\pi \cdot 10^9 \cdot 10^{-9}} \approx -j400\Omega \quad (3)$$

Das entspricht gerade einer Kapazität von $C = 0,4$ pF bei dieser Frequenz, da $1/j\omega C = -j400\Omega$.

So können wir Lasten einfach transformieren. Die Leitung kann statt in Längsrichtung auch als offene Stichleitung parallel zur Last stehen. Durch die Kaskadierung von Leitungen mit verschiedenen Wellenimpedanzen lassen sich verschiedene Impedanzverhältnisse ineinander überführen.

HF-Filter ohne L und C

Im zweiten Artikel dieser Serie wurde gezeigt, wie problematisch der Filterentwurf mit Spulen und Kondensatoren werden kann, wenn sich parasitäre Ele-

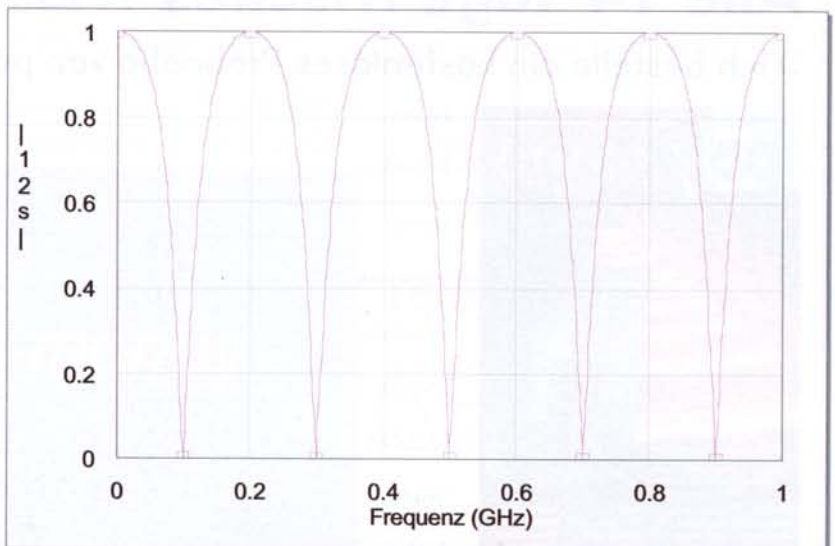


Bild 7: Bandpassfilter in Mikrostreifenfilter-Technik

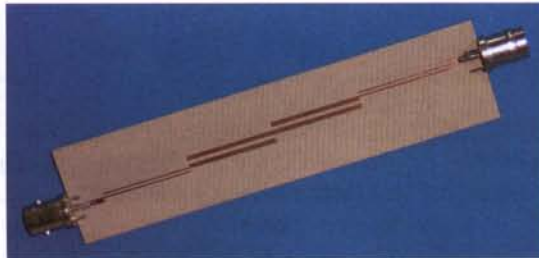
mente auswirken. Demgegenüber können Leitungsstücke bewusst eingesetzt werden, um ein Filter zu bilden. Bild 6 zeigt ein Filter, das aus drei Leitungen besteht.

Das mittlere Leitungsstück ist offen. Die Impedanzinversion macht für die Frequenz, bei der die Leitung gerade $\lambda/4$ lang ist, aus einem offenen Abschluss einen Kurzschluss. Deshalb wird für diese Frequenz kein Signal durchgelassen; das Filter wirkt in diesem Fall wie ein Notch-Filter. Tiefe Frequenzen werden praktisch ungehindert durchgelassen.

Da sich eine Leitung für alle Signale der Wellenlänge $\lambda/4 + n \cdot \lambda/4$ mit jedem Integerwert n gleich verhält, hat dieses Filter einen periodischen Frequenzgang, wie in Bild 7 dargestellt.

In der Praxis werden solche Leitungsfilter oft als so genannte Mikrostreifenfilter gebaut. Das sind im Wesentlichen Leitungen auf einer Seite eines PCBs, während die Unterseite eine grossflächige Masse

Bild 8: Bandpassfilter in Mikrostreifenfilter-Technik



darstellt. Bild 8 zeigt ein derartiges Bandpassfilter. Hier sind die einzelnen Leitungen kapazitiv gekoppelt. Deshalb wird der Gleichspannungsanteil sehr stark gedämpft. Bild 9 zeigt die Bandpasscharakteristik, die damit erzielt werden kann.

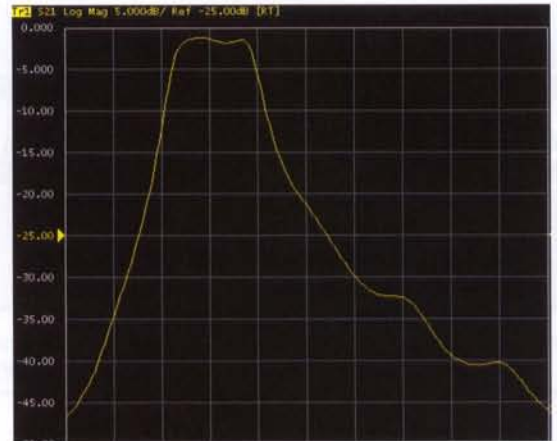


Bild 9: Gemessene Filtercharakteristik des Mikrostreifenfilters

Fazit

Im Gegensatz zur NF-Technik dürfen in der HF-Technik Leitungen nicht einfach als Verbindungen von Punkten gleichen Potentials betrachtet werden. Ein Signal bewegt sich mit endlicher Geschwindigkeit entlang einer Leitung und kann am Ende reflektiert werden, falls die Leitung nicht geeignet abgeschlossen wird. Der Abschluss muss dabei möglichst mit der Wellenimpedanz des Leiters erfolgen, der typischerweise 50 oder 75 Ω beträgt. Mit Leitungen lassen sich auch Anpassungen und Filter realisieren. Diese haben den Vorteil, dass sie klar bekannte bzw. kontrollierbare parasitäre Elemente beinhalten. Daher weisen sie bei sehr hohen Frequenzen ein wesentlich besseres Verhalten auf als Anpassungen und Filter mit diskreten Induktivitäten und Kapazitäten.