

15. Hochfrequenztechnik

1. Allgemeines

1.1 Schwingungen, Wellen, Wellenausbreitung

Wenn sich ein Schwingungszustand im Raum ausbreitet, so spricht man von einer Welle. Wellen können sich in geeigneten Medien oder auch im Vakuum **ausbreiten**. Man spricht auch von Wellenfortpflanzung.

Es gibt

- lineare Wellen (z.B. Seilwelle, Laserstrahl)
- Flächenwellen (z.B. Wasserwellen)
- Raumwellen (z.B. Licht, Schall, Radiowellen)

Mit der Wellenfortpflanzung findet grundsätzlich ein Energietransport statt.

1.2 Frequenz und Wellenlänge

Den Begriff Periodendauer kennen wir bereits.

Die **räumliche Länge** einer Schwingungsperiode nennt man **Wellenlänge**.

Beispiel: Bei Wasserwellen ist es der Abstand zweier Wellentäler.

Für alle Wellen gilt allgemein:

$\text{Frequenz} \cdot \text{Wellenlänge} = \text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}$

Bei elektromagnetischen Wellen **im Vakuum** ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit gleich der Lichtgeschwindigkeit c . Deshalb gelten die Beziehungen:

$c = f \cdot \lambda$	$\lambda = \frac{c}{f}$	$f = \frac{c}{\lambda}$	λ = Wellenlänge in Metern (Lambda) f = Frequenz in Hz c = Lichtgeschwindigkeit im Vakuum = rund 300'000'000 Meter pro Sekunde
-----------------------	-------------------------	-------------------------	--

Beispiel: Die Wellenlänge einer UKW-Welle von 100 MHz ist $300'000'000 / 100'000'000 = 3$ Meter.

1.3 Was ist Hochfrequenz?

Die Bezeichnung Hochfrequenz (**Abkürzung HF**) ist relativ.

Vom Gleichstrom ausgehend ist bereits die Frequenz des Stromnetzes (50Hz) "hoch".

Aus Sicht eines Mikrowellentechnikers ist "alles unter 1 GHz wie Gleichstrom".

Normalerweise meint man mit Hochfrequenz elektromagnetische Wellen im Frequenzbereich ab rund 100 kHz (kiloHertz) bis etwa 100 GHz (gigaHertz). Dabei kann es sich sowohl um drahtgebundene wie drahtlose Wellenausbreitung handeln.
--

Verwendungszweck für Hochfrequenz

Energie- und Informationsübertragung für drahtgebundene oder drahtlose Übertragung.

Warum muss man HF separat behandeln?

Bei Verwendung von Wechselströmen mit Hochfrequenz müssen zum Teil andere, neue Gesetzmässigkeiten berücksichtigt werden als bei der Verwendung von Gleichstrom (oder von niederfrequentem Wechselstrom).

2. Spezialitäten der drahtgebundenen Uebertragungstechnik

Wenn man Information oder Energie auf einer Leitung übertragen will, so ist auf der einen Seite ein Schwingungserzeuger oder Sender, auf der andern Seite ein Schwingungsempfänger. Die Welle, die Information oder allgemein das **Signal** soll sich auf der Leitung in Richtung Empfänger ausbreiten.

2.1 Leitungsmodell

Wenn wir Gleichstrom oder Niederfrequenz anschauen, so nimmt man häufig an, es handle sich um ideale Leitungen, also ohne Widerstand.

Bei realen und langen Leitungen ist die diese Vernachlässigung wie wir wissen nicht mehr statthaft.

Bei Hochfrequenz kommen weitere Effekte hinzu:

- Der Draht einer Leitung ist nichts anderes als eine abgewickelte Spule; er weist eine bestimmte **Induktivität L** auf.
- Die parallelgeführten Drähte einer Leitung sind nichts anderes als die beiden Elektroden eines Kondensators, sie weisen eine bestimmte **Kapazität C** auf.

Das Modell für einen bestimmten Abschnitt (z.B. jeden Meter) einer allgemeinen Leitung sieht so aus: - In Serie liegt der ohmsche Leitungswiderstand, der möglichst klein sein sollte. - Ebenfalls in Serie liegt ein induktiver Widerstand, der möglichst klein sein sollte. - Parallel liegt der Isolationswiderstand der beiden Leiter, der möglichst gross sein sollte (Isolationsleitwert G möglichst klein). Error! Bookmark not defined. Ebenfalls parallel liegt ein kapazitiver Widerstand, der möglichst gross sein sollte.	Bei Gleichstrom treten nur die ohmschen Widerstände in Erscheinung. Bei Hochfrequenz hingegen können die ohmschen Widerstände gegenüber den induktiven und kapazitiven Anteilen vernachlässigt werden. Uebrig bleiben die kapazitiven und induktiven Anteile. Das Leitungsmodell vereinfacht sich also: (C' bzw. L' sind bezogen auf ein bestimmte Leitungslänge, z.B. 1 km.)

Gemäss Formel wird der induktive Widerstand XL der Spule L mit zunehmender Frequenz grösser	$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	Da XL in Serie zur Signalquelle liegt, wird die Signaldämpfung mit zunehmender Frequenz stärker
Der kapazitive Widerstand XC eines Kondensators C wird mit zunehmender Frequenz kleiner	$X_C = \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C}$	Da XC parallel zur Signalquelle liegt, wird die Signaldämpfung auch aufgrund des Kondensators mit zunehmender Frequenz stärker

Damit wird klar:

Wenn man hochfrequente Signale benutzt, können bereits auf kurzen Leitungen beträchtliche Verluste auftreten! Die "ideale" Leitung gibt es bei Hochfrequenz nicht!

C und L sind **Leitungskenngrössen**, die von den Herstellern von Leitungen und Kabeln angegeben werden können (meist in Farad pro km und in Henry pro km).

2.2 Der Wellenwiderstand einer Leitung

Beim Energie- bzw. Informationstransport entlang der Leitung kann man sich vorstellen, dass die Spulen und Kondensatoren als Energie-Zwischenspeicher dienen und die Energie von einem Speicher zum nächsten weitergegeben wird.

Die Spulen- und Kondensator-Energien sind jeweils gleich gross. Für sie gelten die Formeln:

$$E_L = \frac{L}{2} \cdot I^2 \quad E_C = \frac{C}{2} \cdot U^2$$

Durch Gleichsetzen dieser beiden Energien und Umformen der Gleichung erhält man:

$\sqrt{\frac{U^2}{I^2}} = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{L}{C}}$	U/I stellt einen Widerstand dar ($U=R \cdot I$), Er wird als Wellenwiderstand Z_w bezeichnet. (Z ist das Zeichen für eine Impedanz (einen Wechselstromwiderstand)).
---	---

$Z_w = \sqrt{\frac{L}{C}}$	L ist eine Leitungsinduktivität pro Länge C ist eine Leitungskapazität pro Länge Zw wird z.B. 50 Ohm für ein Koaxialkabel
----------------------------	---

Der Wellenwiderstand hängt vom geometrischen Aufbau der Kabel ab:

- von Abstand, Dicke und Anordnung der Leiter
- vom Isolationsmaterial (Dielektrikum)

2.3 Reduzierte Ausbreitungsgeschwindigkeit

Gegenüber dem Vakuum reduziert sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit **v** in Festkörpern und erst recht in realen Leitungen stark.

Sie beträgt 60% - 90% der Lichtgeschwindigkeit und errechnet sich mit:	$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$
--	----------------------------------

2.4 Reflexion am Ende einer Leitung, Anpassung

Vom Sender aus gesehen ist am Ende einer Leitung die Last, der Verbraucher.

Diese Last kann wie jeder Verbraucher sehr verschieden sein. Dies hat je nach Last verschiedene Auswirkungen:

Last	Auswirkung	Uebertragungsqualität
Leitung ist kurzgeschlossen (Last= 0 Ohm), die Leitung "sieht" einen "Kondensator" mit der Kapazität null, also ohne Speichervermögen.	Die letzte Spule kann ihre Energie nur dem vorangehenden Kondensator zurückgeben.	Das Signal wird vollständig reflektiert und läuft auf der Leitung zum Sender zurück. Keine Energieübertragung. Man spricht von Fehlanpassung zwischen Leitung und Last.
Leitung ist offen (Last= unendlich Ohm), die Leitung "sieht" eine "Spule" mit der Induktivität null.	Der letzte Kondensator kann seine Energie nur der vorangehenden Spule zurückgeben.	Das Signal wird vollständig reflektiert und läuft auf der Leitung zum Sender zurück. Keine Energieübertragung. Fehlanpassung.
Die Last ist ein beliebiger Widerstand	Die Energie wird teilweise an den Verbraucher abgegeben, der Rest wird zurückgegeben.	Das Signal wird teilweise reflektiert. verminderte Energieübertragung. Fehlanpassung.
Last entspricht genau dem Wellenwiderstand, Leitung ist mit dem Wellenwiderstand abgeschlossen	Die Energie kann am Lastwiderstand abgenommen werden.	Keine Reflexion. Optimale Energieübertragung Zwischen Leitung und Last herrscht Anpassung.

2.5 Folgen der Fehlanpassung, Gegenmassnahme

Die Reflexion von Wellen auf Leitungen bei Fehlanpassungen kann im Leitungsnetz zu unerwünschten Wellenüberlagerungen führen, so genannten **Interferenzen**. Diese können das Nutzsignal abschwächen oder im Extremfall sogar vollständig neutralisieren.

Deshalb sind viele Datennetze oder Datenbusse an freien Kabelenden **mit dem Wellenwiderstand des Kabels** abzuschliessen (Dies können zum Beispiel Stecker sein mit einem eingebauten Widerstand). Aber auch der Innenwiderstand des Senders sowie die eigentlichen Verbraucher, die Empfänger, müssen Z_w als Innenwiderstand haben.

2.6 Dämpfung von Leitungen

Anstelle von Wirkungsgrad (Verhältnis Output zu Input) charakterisiert man die Uebertragung über eine Leitung mit der **Dämpfung**. Man gibt also an, um wieviel ein Signal auf der Übertragungsstrecke gedämpft, abgeschwächt wird.

Die Dämpfung wird als **Verhältnis aus Input zu Output** angegeben.

Der Dämpfungswert ist also umso grösser, je stärker das Signal gedämpft wird.

Das Dämpfungsmass a wird dann in Dezibel (dB) angegeben und ist für Leistungen definiert als:	$a = 10 \cdot \lg (P_{in} / P_{out})$
Pin ist die Eingangsleistung, Pout die Ausgangsleistung	
Die Leistung hängt quadratisch von der Spannung am Verbraucher ab. Deshalb ist das entsprechende Dämpfungsmass für Spannungen zu definieren als:	$a = 20 \cdot \lg (U_{in} / U_{out})$

- Solche Verhältnisbildungen werden in der Technik oft verwendet:
- Das Verhältnis wird logarithmiert (Zehnerlogarithmus). Dadurch werden Unterschiede um Zehnerpotenzen zu Unterschieden um konstante Werte.
- Ein Verhältnis gleicher Grössen ist ja immer einheitenlos. Für dieses logarithmierte Gebilde kam offenbar das Bedürfnis nach einer "Einheit". Die Einheit **Bel** war erfunden. Da die Werte in der Praxis zu klein und waren, rechnet man den Wert bei Leistungsverhältnissen noch mal 10, so dass das Verhältnis in **dezi-Bel (Zehntel Bel)** angegeben werden kann. **Abkürzung: dB**.

Dämpfungsfaktor:	Leistungsdämpfung	Spannungsdämpfung
um Faktor 2 (Halbierung des Leistungspegels)	3dB	6dB
um Faktor 10	10dB	20dB
um Faktor 100	20dB	40dB
um Faktor 1000	30dB	60dB
keine Dämpfung, auch keine Verstärkung (Faktor 1)	0dB	0dB

Bei der üblichen gleichzeitigen Verwendung verschiedener Frequenzen auf einer Leitung wird angestrebt, dass alle Frequenzen so gleichmässig wie möglich gedämpft werden, was natürlich nie ganz gelingen kann. Die Dämpfung hängt letztlich von den unter 2.1 genannten Leitungskonstanten ab.

2.7 Der Skin-Effekt

Für die Dämpfung von Signalen ist ein weiterer Effekt verantwortlich: Der Skin-Effekt.

Bei hoher Frequenz fliesst der Strom nicht mehr gleichmässig über den ganzen Querschnitt einer Leitung verteilt, sondern tendenziell an der Oberfläche (Haut, skin) des Leiters. Die **Stromdichte nimmt nach innen ab**. Für den Stromfluss steht weniger Querschnitt zur Verfügung.

Diese Stromverdrängung führt zu einer **Erhöhung des** ohmschen **Leiterwiderstandes** bei zunehmender Frequenz. Deshalb verwendet man bei hohen Frequenzen und aufwändigen Leitungen Hohlleiter (also Röhren) statt Drähte. Aus dem gleichen Grund werden HF-Drähte oft auch versilbert, weil die Silberoberfläche besser leitet.