**\subsection{Zuleitung}**

Darunter versteht man die Verbindung zwischen Quelle und Antenne. Je nach System kommen Zweidrahtleitungen, Koaxialkabelleitungen oder Hohlleiter zum Einsatz. Eine Zweidrahtleitung ist eine symmetrische Verbindung, während ein Koaxialkabel eine asymmetrische Verbindung darstellt.

Weiter Verbindungstypen sind:

\begin{itemize}

\item Drahtverbindung

\item Koaxialkabel

\item Leiterbahn

\item Hohlleiter

\item Glasfaserleiter

\end{itemize}

An dieser Stelle soll genauer auf die elektrische leitergebundene Übertragung eingegangen werden.

Leitungen gehören zu den wichtigsten Übertragungsmedien der Nachrichtentechnik. Sie leiten fast mit Lichtgeschwindigkeit elektromagnetische Wellen vom Sendeort zum Empfangsort.

Bei Gleichstrom und sehr niedrigen Frequenzen kann eine Leitung im allgemeinen als ideal oder mit einem rein ohmischen Verhalten angenommen werden. Man macht keine grossen Fehler, wenn man Signalverläufe am Eingang und am Ausgang als gleich und gleichzeitig ansieht. Kommt aber die physikalische Länge der Leitung in die Grössenordnung der Wellenlänge der Schwingung, oder die Anstiegszeit eines Impulses in die Grössenordnung der Ausbreitungsverzögerung, dann kann die Ausgangsspannung völlig anders aussehen als die Eingangsspannung. Die Leitung muss jetzt als Zweitor mit frequenzabhängigen Eigenschaften betrachtet werden.

Ein geeignetes Konzept für das Verständnis ist der Begriff der elektrischen Länge:

\begin{equation}

Elektrische Länge=\dfrac{l}{\lambda}\**label{eq:ElektrischeLänge}**

\end{equation}

Bei der Gleichung \ref**{eq:ElektrischeLänge}** ist $l$ die Länge der Leitung und $\lambda$ gibt die Wellenlänge des Signales auf der Leitung mit der Länge $l$ an.

Zur Analyse ob eine Leitung strahlt, das heisst, die Leitung muss als frequeznabäniges Zweitor betrachtet werden, werden zwei Fälle unterschieden.\\

Ist die $Elektrische Länge=\dfrac{l}{\lambda} \le \dfrac{1}{20}$ kann die Leitung mit der klassischen Schaltungstheorie behandelt werden. Die Leitung wird meist als verlustlos und reflexionsfrei betrachtet.\\

Ein etwas anders Bild zeigt sich, wenn die $Elektrische Länge=\dfrac{l}{\lambda}>\dfrac{1}{20}$ entspricht. Die Phänomene der elektromagnetischen Wellen werden wirksam. Die Leitungen müssen mit ihren frequenzabhängigen Eigenschaften behandelt werden.

Geht man von einer idealen Wellenausbreitung aus, bei der keine Verluste vorkommen, so ist die Wellenlänge $\lambda$ mit der Signalfrequenz $f$ mit der Lichtgeschwindigkeit $c$ wie in Gleichung \ref{eq:WellenlängeS} verknüpft.

\begin{equation}

\lambda\_{0}=\dfrac{c}{f}\**label{eq:WellenlängeMITc}**

\end{equation}

Da eine Leitung immer etwas Verlustbehaftet ist, kann die Ausbreitung einer Welle im Leitermedium nie der Lichtgeschwindigkeit $c$ entsprechen. Daher gilt:

\begin{equation}

\lambda=\dfrac{v}{f}\**label{eq:WellenlängeMITv}**

\end{equation}

Die Signalgeschwindigkeit $v$ dividiert durch die Anzahl Schwingungen pro Sekunde ergibt die Wellenlänge $\lambda$ im Medium.

Für die Gleichungen \ref{eq:ElektrischeLänge}, \ref{eq:WellenlängeMITc} und \ref{eq:WellenlängeMITv} gilt:

\begin{enumerate}[leftmargin=2cm]

\item[] l: Leitungslänge [m]

\item[] $\lambda$: Wellenlänge [m]

\item[] $f$: Frequenz (Hz) [1/s]

\item[] $c$: Lichtgeschwindigkeit [m/s]

\item[] $v$: Geschwindigkeit [m/s]

\end{enumerate}

Besonders vorteilhafte Übertragungseigenschaften hat die längshomogene Leitung. Es handelt sich dabei um eine Leitung, die auf ihrer ganzen Länge konstanten Leitungsquerschnitt, gleiches

Leitermaterial, konstanten Leiterabstand und einen gleichförmigen Isolator hat. Gebräuchliche Formen sind die symmetrische Zweidrahtleitung, die verdrillte Zweidrahtleitung, eine Streifenleitung auf

einer Printplatte oder das Koaxialkabel.

**\subsubsection{Leitungsmodell}**

Um die Zweitoreigenschaften einer längshomogenen Leitung zu ermitteln, wird diese wie in

Abbildung \ref{fig:LeitungsmodellZweitorKette} dargestellt in $n$ gleiche Elementarzweitore unterteilt, wobei $n$ sehr gross sein soll. Dabei wird die Leitung in eine Vielzahl von Zweitoren unterteilt. Es ist von einer Zweitorkette die Rede.

\begin{figure}[h]

\begin{center}

\begin{tikzpicture}

%unten

\draw[line width=0.5pt, \*-\*](2, 2) -- (3.5, 2);

\draw[line width=0.5pt, -\*](3.5, 2) -- (5, 2);

\draw[line width=0.5pt, -\*](5, 2) -- (6.5, 2) ;

\draw[line width=0.5pt, -\*](6.5, 2) -- (8, 2);

\draw[line width=0.5pt, -\*](8, 2) -- (9.5, 2);

%oben

\draw[line width=0.5pt, \*-\*](2, 3.5) -- (3.5, 3.5);

\draw[line width=0.5pt, -\*](3.5, 3.5) -- (5, 3.5);

\draw[line width=0.5pt, -\*](5, 3.5) -- (6.5, 3.5) node at (5.75,4) {$\Delta z$};

\draw[line width=0.5pt, -\*](6.5, 3.5) -- (8, 3.5);

\draw[line width=0.5pt, -\*](8, 3.5) -- (9.5, 3.5)node at (5.75,4) {n};

\draw[line width=1.5pt, ->, >=latex](2, 3.2) -- (2, 2.3) node at (1.5,2.75) {$\underline{U\_{1}}$};

\draw[line width=1.5pt, ->, >=latex](9.5, 3.2) -- (9.5, 2.3) node at (10,2.75) {$\underline{U\_{2}}$};

%vertikal gepunktete linien

\draw[line width=0.5pt, style=dashed](3.4, 2) -- (3.4, 3.5);%vertikal gepunktete Linie

\draw[line width=0.5pt, style= dashed](4.9, 2) -- (4.9, 3.5);%vertikal gepunktete Linie

\draw[line width=0.5pt, style= dashed](6.4, 2) -- (6.4, 3.5);%vertikal gepunktete Linie

\draw[line width=0.5pt, style=dashed](7.9, 2) -- (7.9, 3.5);%vertikal gepunktete Linie

\end{tikzpicture}

\end{center}

\caption{Leitungsmodell eine Kette von Zweitoren}

**\label{fig:LeitungsmodellZweitorKette}**

\end{figure}

Wie in der Abbildung \ref{fig:LeitungsmodellZweitorKette}gezeigt ist, kann die Leiterlänge durch $n$ geteilt werden. Da $n$ sehr gross ist, ergeben sich n+1 $\Delta z$ lange Leiterstücke. Betrachtet man ein kurzes Leitungsstück mit der Länge $\Delta z = 1/n$, so ist von der Elektrotechnik bekannt, dass beim Einschalten einer Signalquelle sich auf der Leitung ein Strom $i(t)$ einstellt. \\Die Folge davon ist ein magnetisches Feld radial um die Leitung. Der magnetische Fluss ergibt sich mit der Abschnittsinduktivität zu $\phi = i \Delta L$. \\

Das einschalten der Quelle führt weiter zu einer Spannung zwischen den Leitern. Die Folge davon ist ein elektrisches Feld und eine Oberflächenladung $Q = u \Delta C$ auf den Leitern \cite{Emant}.

\begin{figure}[!htb]

\centering

**\includegraphics**[width=11cm]{content/bilder/Leiterstueck.pdf}%

\caption{Ersatzschaltbild eines elementaren Leiterstücks}

**\label{fig:ESBLeiterstueck}**

\end{figure}

Bei einer längshomogenen Leitung darf die Annahme getroffen werden, dass die Induktivität $\Delta L$ und die Kapazität $\Delta C$ gleichförmig über die Länge $\Delta z$ verteilt sind. Man kann sie daher im Modell als Leiterbeläge ausdrücken. Die Gleichung \ref{eq:InduktiverLeitungsbelag} gibt den induktiven Leitbelag an. Die Gleichung \ref{eq:KapazitiverLeitungsbelag} zeigt den kapazitiven Leitbelag.

\begin{equation}

L'=\dfrac{\Delta L}{\Delta z}\**label{eq:InduktiverLeitungsbelag}**

\end{equation}

\begin{equation}

C'=\dfrac{\Delta C}{\Delta z}\**label{eq:KapazitiverLeitungsbelag}**

\end{equation}

Werden zudem die ohmschen Verluste im Leiter und allfällige dielektrische Verluste in der Isolation als Wirkwiderstände dargestellt, so lässt sich das Ersatzschaltbild einer Leitung gemäss Abbildung \ref{fig:ESBLeiterstueck} modellieren.

Für die Gleichungen \ref{eq:InduktiverLeitungsbelag}, \ref{eq:KapazitiverLeitungsbelag} und die Abbildung \ref{fig:ESBLeiterstueck} gilt:

\begin{enumerate}[leftmargin=2cm]

\item[] $R'$: Ohmsche Leiterverlust/m [$\Omega/m$]

\item[] $L'$: Serie Induktivität/m [$H/m$]

\item[] $G'$: Dielektrische Verluste/m [$S/m$]

\item[] $C'$: Kapazität zwischen den Leiten/m [$F/m$]

\item[] $\Delta m$: Abschnittslänge [$m$]

\end{enumerate}

\todo{serieeninduktivität}

Die Spannung und der Strom auf einer Leitung kann als Summe von zwei Wellen beschrieben werden. Die eine Welle läuft vorwärts entlang der positiven $z$ Ausrichtung. Die rückwärts laufende Welle geht entlang der negativen z Achse. Der Strom und die Spannung können mit Hilfe der elementaren Leiterabschnitte $\Delta z$ an jedem Punkt $z$ der Leitung berechnet werden. Die Gleichung \ref{eq:UvonZundT} gibt die Summe der vor- und zurücklaufenden Spannungswellen an. Der Strom an jedem beliebigen Punkt auf der Leitung kann mit der Gleichung \ref{eq:IvonZundT}berechnet werden.

\begin{eqnarray}**\label{eq:UvonZundT}**

U(z,t) &=& U\_{v}e^{-\alpha z}e^{j(\omega t -\beta z)}+U\_{r}e^{\alpha z}e^{j(\omega t \beta z)}

\end{eqnarray}

\begin{eqnarray}**\label{eq:IvonZundT}**

I(z,t) &=& I\_{v}e^{-\alpha z}e^{j(\omega t -\beta z)}+I\_{r}e^{\alpha z}e^{j(\omega t \beta z)}

\end{eqnarray}