Elektromagnetische Wellen

Wolfgang Kippels

10. März 2023

Inhaltsverzeichnis

1 Grundbegriffe bei Elektromagnetischen Wellen **2**

2 Leitungen **3**
2.1 Eigenschaften von Leitungen 5
2.2 Reflektionen auf Leitungen 9
2.3 Dämpfung auf Leitungen 10

1 Grundbegriffe bei Elektromagnetischen Wellen

Wenn wir es mit höheren Frequenzen zu tun haben, dann können wir nicht mehr ohne weiteres mit den Grundregeln der Gleichstromtechnik wie Ohmschem Gesetz und Kirchhoffschen Regeln arbeiten. In der klassischen 50-Hz-Technik tun wir das noch, und da klappt das in der Regel auch. Warum wir das machen können, werden wir gleich feststellen.

Zum Verständnis des Folgenden benötigen wir die Grundlagen der Wechselstromtechnik, siehe beispielsweise hier in Kapitel 2.1:

http://www.dk4ek.de/lib/exe/fetch.php/wechsels.pdf

Elektromagnetische Wellen breiten sich mit **Lichtgeschwindigkeit** aus. Diese ist (in Vakuum) eine Naturkonstante und beträgt ungefähr:

$$\boxed{c \approx 300\,000\,\frac{\mathrm{km}}{\mathrm{s}}}$$

Das ist eine recht große Geschwindigkeit. In einer Sekunde würde eine Elektromagnetische Welle mehr als 7 mal die Erde umrunden, oder in 1,3 Sekunden von der Erde bis zum Mond gelangen.

Um sich ein wenig vorstellen zu können, was eine Welle ist, begibt man sich am besten ans Meer. Dort können wir Wasserwellen beobachten. Deren Geschwindigkeit ist deutlich geringer, weshalb wir hier besser beobachten können. Sie liegt ungefähr bei $v = 2\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$.

An einer Wasserwelle können wir nun dreierlei beobachten:

- Wir beobachten einen Wellenberg, wie er sich weiterbewegt. Seine Bewegung ergibt die **Ausbreitungsgeschwindingkeit** der Welle, die wir v nennen können.
- Wir beobachten einen kleinen schwimmenden Gegenstand auf dem Wasser, beispielsweise einen Korken. Wir sehen, wie sich der Korken sich auf und ab bewegt, während die Welle unter ihm hindurchläuft. Am Korken können wir die **Frequenz** der Welle beobachten, die mit f bezeichnet wird.
- Wir können den Abstand zwischen zwei Wellenbergen erkennen. Diesen Abstand nennt man **Wellenlänge**, die das Formelzeichen λ bekommt.

Es gibt eine Beziehung zwischen diesen drei Größen. Wir wissen, dass die Geschwindigkeit definiert ist als Weg pro Zeit.

$$v = \frac{s}{t}$$

In unsere Anwendung der Welle ist s die Wellenlänge λ und t die Periodendauer T. Aus f können wir T berechnen:

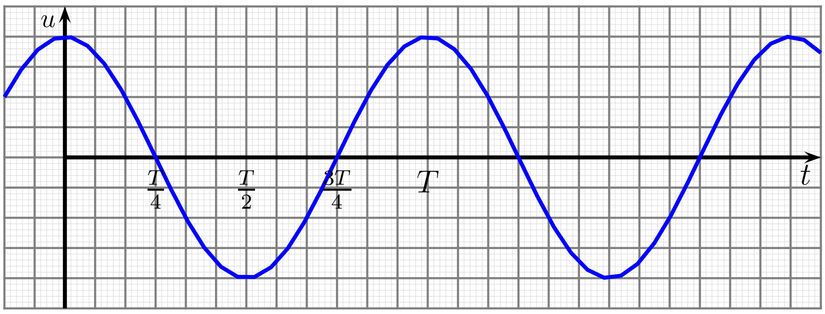
$$T = \frac{1}{f}$$

Wir übertragen das jetzt auf unsere Welle.

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

Für Elektromagnetische Wellen ist $v = c$. Damit gilt dann die Formel:

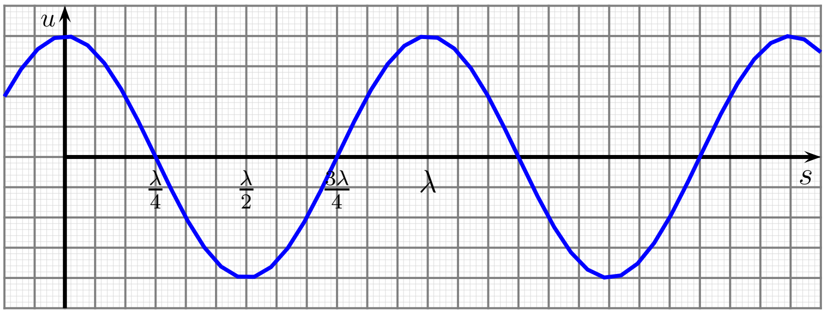
$$\boxed{\lambda \cdot f = c}$$



Schauen wir uns einmal den zeitlichen Verlauf einer sinusförmigen Wechselspannung an. In Abhängigkeit von der Zeit ist die Spannung mal positiv und mal negativ. Sie pendelt zwischen einem maximale positiven und einem maximalen negativen Ausschlag. Nach der Periodendauer T wird eine komplette Schwingung vollzogen.

2 Leitungen

Betrachten wir nun eine lange Leitung, an die links eine Wechselspannungsquelle U_0 und rechts ein Lastwiderstand R angeschlossen ist. Unter einer **Leitung** versteht man dabei **zwei Leiter**, die parallel geführt zwischen Quelle und Last verlaufen. Zum Zeitpunkt $t = 0$ liege an den linken Anschlussklemmen der Leitung der Maximalwert der Wechselspannung an, wie im Diagramm darüber zu sehen ist.



Jetzt betrachten wir eine „Momentaufnahme“ der Leitung. Auf den ersten Blick sehen wir wieder das Spannungs-Zeit-Diagramm von oben. Aber eben nur auf den ersten Blick. Hier ist die Spannung in Abhängigkeit vom **Ort** angegeben, oder genauer ausgedrückt, die Spannungsverteilung über den Weg s. Am Einspeisepunkt bei $s = 0$ haben wir gerade den Maximalwert der Wechselspannung erreicht, was zum Spannungs-Zeit-Diagramm oben passt. In der Entfernung einer **viertel** Wellenlänge $s = \frac{\lambda}{4}$ ist die Spannung Null und in der Entfernung einer **halben** Wellenlänge $s = \frac{\lambda}{2}$ vom Einspeisepunkt hat die Spannung gerade den **negativen** Maximalwert erreicht. Erst nach einer **ganzen** Wellenlänge haben wir wieder den selben Spannungswert, wie am Leitungsanfang.

Sinngemäß genauso sieht auch die Stromverteilung aus. Herr Kirchhoff würde sich im Grabe umdrehen, wenn er wüsste, dass der Strom in einer Reihenschaltung eben nicht überall gleich groß ist! Auf den ersten Blick ist es sicher schwierig, sich vorzustellen, dass in $\frac{\lambda}{2}$-Abständen auf der Leitung der Strom jeweils in der entgegengesetzten Richtung fließt. Zu Ehren von Herrn Kirchhoff und seinen Regeln möchte ich aber klarstellen, dass er seine Regeln nicht für die Hochfrequenztechnik, sondern für Gleichstromkreise entwickelt hat.

Späterstens jetzt kommt der Einwand, dass wir ja in der klassischen 50-Hz-Technik auch immer vollkommen problemlos mit den Kirchhoffschen Regeln gearbeitet haben. Warum geht das da?

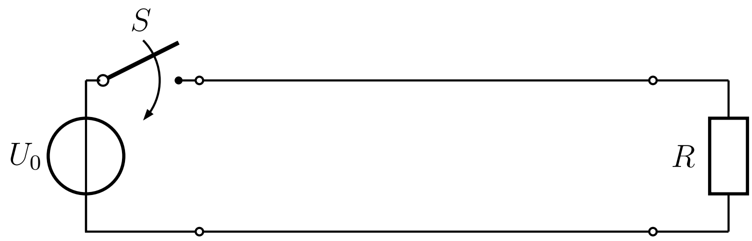
Rechnen wir doch einmal die Wellenlänge aus.

$$
\begin{aligned}
\lambda \cdot f &= c && \mid : f \\
\lambda &= \frac{c}{f} \\
&= \frac{300\,000\,\frac{\text{km}}{\text{s}}}{50\,\text{Hz}} \\
\lambda &= 6\,000\,\text{km}
\end{aligned}
$$

Ich kenne keine Eletroinstallation, weder in Wohnhäusern noch in Industrebetrieben, wo Leitungslängen von mehreren Tausend Kilometern eine Rolle spielen (außer man addiert die Längen aller dort parallel verlegten Leitungen zusammen). Wir haben selbst bei einer zehntel Wellenlänge (entsprechend 600 Kilometer Leitungslänge) noch kaum Unterschiede zu beachten. Wenn es natürlich um das europaweite Zusammenschalten von Verbundnetzen geht, dann sind Effekte durch die Phasenverschiebungen wegen der Wellenlänge zu beachten.

2.1 Eigenschaften von Leitungen

Nun möchte ich mit Ihnen ein Gedankenexperiment machen. Stellen Sie sich vor, Sie haben eine Gleichspannungsquelle U_0 über eine lange Leitung mit einem Lastwiderstand verbunden. Zunächst ist der Schalter S noch geöffnet, nirgendwo fließt ein Strom. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wird der Schalter geschlossen. Was passiert?



Sie werden sagen, ganz klar, es fließt ein Strom von der Größe $I = \frac{U_0}{R}$. Ja, das wird auch so sein, wenn wir nur lange genug warten. Ich möchte das aber genauer untersuchen.

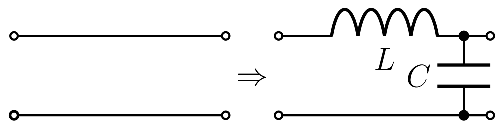
Im Einschaltmoment wird ein Stromfluss **beginnen**. Dieser Stromimpuls braucht aber eine gewisse Zeit, bis er am Widerstand R ankommt, er kann sich ja „nur“ mit Lichtgeschwindigkeit fortbewegen. Dafür sorgt Herr Einstein. Zugegeben, die Lichtgeschwindigkeit ist recht groß, aber sie ist endlich. Der Stromfluss hat sich also nach einer Nanosekunde gerade einmal 30 Zentimeter weiter ausgebreitet. Woher aber „weiß“ der Strom, wie groß der Lastwiderstand am anderen Leitungsende ist, mit welcher Stromstärke er also losfließen soll?

Die Antwort ist ganz einfach: **Er weiß es *nicht*!**

Trotzdem beginnt ja ein Stromfluss. Wonach kann sich dieser denn orientieren?

Hier kommt jetzt der sogenannte **Wellenwiderstand** Z_L der Leitung ins Spiel. Wenn wir durch den Baumarkt stöbern, dann werden wir in der Elektroabteilung Koaxkabel für Antennenanlagen finden, wo beispielsweise $75\,\Omega$ draufsteht. Wenn Sie ein Stück davon abschneiden und ausmessen, dann werden Sie weder für den Leiterwiderstand noch für den Isolationswiderstand einen Wert in dieser Größenordnung messen können. Zudem hat ja ein längeres Kabelstück auch einen größeren Leiterwiderstand. Das kann es also nicht sein.

Wir betrachten ein kurzes Stück aus der Leitung, hier links dargestellt. Die beiden Leiter der Leitung haben eine Induktivität L und zwischen den beiden Leitern besteht eine Kapazität C. Damit ergibt sich eine Ersatzschaltung des Leitungsstückes, wie rechts dargestellt. Ist das betrachtete Leitungsstück kurz, dann sind sowohl L als auch C klein, ist das Leitungsstück länger, dann sind diese beiden Größen entsprechend größer. Was gleich bleibt, ist das Verhältnis $\frac{L}{C}$.



Man muss sich den Ablauf ungefähr so vorstellen. Im Augenblick des Einschaltens will der Kondensator C aufgeladen werden. Die Induktivität verhindert aber ein plötzliches Ansteigen des Stromes. Es stellt sich ein Strom ein, der durch das Verhältnis $\frac{L}{C}$ bestimmt wird.

Interessant wird es, wenn man einmal versucht, die Einheit dieses ominösen Verhältnisses $\frac{L}{C}$ zu ergründen. Wir wissen zu den Einheiten von L und C:

$$[L] = 1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}} \quad \text{und} \quad [C] = 1\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}$$

Ich setze das einmal in dieses Verhältnis ein:

$$\left[\frac{L}{C}\right] = \frac{[L]}{[C]} = \frac{1\,\frac{\mathrm{Vs}}{\mathrm{A}}}{1\,\frac{\mathrm{As}}{\mathrm{V}}} = 1\,\frac{\mathrm{Vs}\cdot\mathrm{V}}{\mathrm{A}\cdot\mathrm{AS}} = 1\,\frac{\mathrm{V}^2}{\mathrm{A}^2} = 1\,\Omega^2$$

Wir sehen, die Einheit ist das Quadrat der Einheit eines Widerstandes. Zieht man daraus die Wurzel, dann kommen wir auf die Einheit eines Widerstandes. Tatsächlich bezeichnet man $\sqrt{\frac{L}{C}}$ als **Wellenwiderstand der Leitung**.

$$\boxed{Z_L = \sqrt{\frac{L}{C}}}$$

Dieser Wellenwiderstand bestimmt zusammen mit der angelegten Spannung U_0, mit welchen Wert ein Stromfluss beginnt, wenn unser Schalter die Spannungsquelle an der Leitung eingeschaltet wird.

Damit ist allerdings nur auf den ersten Blick alles klar. Es stellt sich nämlich die Frage, was ist denn, wenn dieser zu fließen beginnende Strom nicht zum Widerstand R am anderen Ende der Leitung passt?

Das ist eine sehr grundlegende Frage. Die ist nicht mal eben schnell mit drei Worten zu beantworten. Die Antwort hängt auch davon ab, **was genau** am anderen Leitungsende angeschlossen ist. Deshalb möchte ich hier mehrere Möglichkeiten im Detail durchspielen.

Fall 1: $R = Z_L$

Wenn der Lastwiderstand R zum Wellenwiderstand Z_L passt, dann ist die Sache ganz einfach. Der Stromimpuls kommt am Leitungsende an, findet einen passenden Widerstand und kann dann in genau der gleichen Größe weiterfließen. Der Einschaltvorgang ist abgeschlossen, der Strom fließt genau so weiter, bis irgendwann wieder abgeschaltet wird.

Fall 2: $R = \infty$
Nehmen wir nun an, dass das Leitungsende rechts **offen** ist, also kein Widerstand R angeschlossen ist. Der Stromimpuls wandert wie beschrieben auf der Leitung von links nach rechts – und dann geht es nicht weiter! Weil zunächst weiter Ladungen nachfließen, „drängeln“ die sich am Leitungsende zusammen. Der Kondensator in der Ersatzschaltung für den letzten Leitungsabschnitt wird weiter aufgeladen. Nach der Grundformel $Q = C \cdot U$ (umgestellt nach $U = \frac{Q}{C}$) steigt die Spannung an, und zwar auf das Doppelte.

Dadurch wird ein Stromimpuls zurück auf der Leitung nach links ausgelöst. Dieser Stromimpuls hat die gleiche Größe wie der erste Impuls zuvor, nur eben eine andere Richtung. Die Welle läuft wieder zurück nach links. Man muss sich das wie folgt vorstellen. Dazu betrachte ich die Vorgänge im **oberen** Leiter, im unteren sind die Stromrichtungen natürlich genau umgekehrt. Der Impuls läuft wie gesagt von rechts nach links. Links davon haben wir nach wie vor einen Strom nach **rechts**, aber rechts davon fließt kein Strom. Diese „Stromwelle“, wie ich den Impuls nun einmal nennen möchte, bewegt sich mit Lichtgeschwindigkeit nach links weiter. Stück für Stück wird die Leitung auf das Doppelte der ursprüngliche Spannung aufgeladen. Die Leitung stellt ja auch einen Kondensator dar.

Jetzt kommt natürlich die Frage, was denn auf der linken Seite passiert, wenn der reflektierte Impuls dort ankommt. Da gibt es (mindestens) zwei Möglichkeiten, sie sich nach der Antwort auf diese Frage unterscheiden: Hat die Spannungsquelle einen Innenwiderstand oder nicht?

Nehmen wir zunächst an, dass die Spannungsquelle einen Innenwiderstand hat, der genau dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht. Es kommt ein Impuls zurück, dessen Spannungshöhe genau doppelt so groß wie zuvor ist. Hinter dem Impuls fließt **kein** Strom. Wegen des Innenwiderstandes ist die Klemmenspannung beim ursprünglichen Einschalten auf die Hälfte der Urspannung zusammengebrochen und auf dem Wert geblieben, bis der Impuls zurück kam. Dessen Spannungshöhe entspricht nun genau der Urspannung U_0. Der Stromfluss ist damit zuende. Das erwarten wir ja auch, wenn am anderen Leitungsende nichts angeschlossen ist. Wenn man jetzt den Schalter wieder öffnet, dann bleibt der „Kondensator“, der aus den beiden Leitern der Leitung besteht, auf die Spannung U_0 aufgeladen. Das ist genau das, was wir in der klassischen Elektrotechnik auch so erwarten würden.

Nehmen wir nun an, dass die Quelle keinen (bzw. einen vernachlässigbar kleinen) Innenwiderstand hat. Dann ist die Spannung im Einschaltmoment **nicht** eingebrochen. Zurück kommt dann ein Impuls mit der Höhe von $2 \cdot U_0$. Wenn dieser am linken Leitungsende ankommt, trifft er auf die Spannungsquelle mit der Spannung U_0. Durch diesen „Teil-Kurzschluss“ fließt dann ein Strom im oberen Leiter nach links. Der Kondensator aus den beiden Leitern der Leitung beginnt, sich zu entladen. Dieser Stromfluss am linken Leitungsende nach links breitet sich nun mit Lichtgeschwindigkeit nach rechts aus. Die Stromstärke ist dabei genau so groß, wie beim ersten Einschalten, er geht nur in die andere Richtung, denn Die treibende Spannung ist nämlich hier $2 \cdot U_0 - U_0$, also wieder U_0 und der wirksame „Entladewiderstand“ bleibt nach wie vor der Wellenwiderstand Z_L. Wir haben den von rechts kommenden Impuls wieder reflektert und zurück nach rechts auf die Reise geschickt. Lediglich die Stromrichtung ist im Vergleich zum ersten Einschalten andersherum. Was unseren Impuls auf der rechten Seite erwartet, wissen wir ja schon. Er wird auch hier wieder reflektiert.

Hätten wir keine Dämpfung auf der Leitung, dann würde sich dieses Hin- und Herlaufen unseres Impulses bis in alle Ewigkeit fortsetzen. Man kann sich das Verhalten unserer Leitung wie ein Pendel vorstellen, das angestoßen wurde. Wenn man nur lange genug wartet, dann sorgt die Dämpfung dafür, dass das Pendeln nach und nach weniger wird und irgendwann aufhört.

Fall 3: $R = 0$
Bis hier haben wir untersucht, was passiert, wenn das rechte Leitungsende **offen** geblieben ist. Kümmern wir uns nun um die Frage, was ein **Kurzschluss** am rechten Leitungsende bewirkt.

Nach dem Schließen des Schalters passiert zunächst exakt das selbe, wie bei der offenen Leitung. Ein Stromimpuls läut von links nach rechts los, die Stromstärke bestimmt sich durch den Wellenwiderstand Z_L und die Spannung U_0 bestimmt, also $I = \frac{U_0}{Z_L}$. Stück für Stück wird der „Leitungskondensator“ aufgeladen. Irgendwann kommt der Stromimpuls am Leitungsende rechts an und findet einen Kurzschluss vor. Der Kurzschluss bewirkt, dass dort die Spannung auf 0 V zusammenbricht.

Der sich ergebende Kurzschlussstrom ist aber nicht unendlich groß, denn nun wirkt der Wellenwiderstand Z_L wie ein Innenwiderstand einer Spannungsquelle. Das bewirkt, dass nun ein **zusätzlicher** Strom von der Größe $I = \frac{U_0}{Z_L}$ über die Kurzschlussbrücke fließt. Der bisher fließende Strom wird dadurch **verdoppelt**. Dieser Strom fließt ab jetzt weiterhin über die Kurzschlussbrücke, aber der Spannungseinbruch auf 0 V verbunden mit der Verdopplung des Stromes breitet sich nun über die Leitung nach links aus. Was genau passiert, wenn dieser Impuls auf der linken Seite ankommt, hängt wieder davon ab, ob wir dort eine Spannungsquelle mit oder ohne Innenwiderstand haben.

Ich beginne wieder mit einem Innenwiderstand von der Größe des Wellenwiderstandes, $R = Z_L$. Beim Einschalten brach die Klemmenspannung auf die Hälfte der Urspannung U_0 zusammen, wegen $R_i = Z_L$. Nun kommt der Impuls von rechts am linken Ende der Leitung an. Der Strom ist doppelt so groß, wie zuvor. Dazu passt die ebenfalls mit dem Impuls angekommene Klemmenspannung von 0 V. Weil alles zusammenpasst, haben wir den Endzustand erreicht. Das ist wiederum das, was uns die klassische Elektrotechnik auch gesagt hätte.

Was wird aber, wenn die Quelle keinen (bzw. einen vernachlässigbat kleinen) Innenwiderstand hat? Der Impuls kommt von rechts mit doppeltem Strom aber $U = 0\,\mathrm{V}$. Die Quelle muss nun einen **zusätzlichen** Strom liefern, den wiederum U_0 und Z_L bestimmen. In der Summe fließt jetzt das **dreifache** des ursprünglichen Stromes. Auch diese Stromerhöhung läuft jetzt als Impuls nach rechts und wird dort wiederum mit einer weiteren Stromerhöhung reflektiert, usw. Mit jeder Reflektion erhöht sich der Strom weiter. Hätten wir tatsächlich eine **verlustfreie** Leitung mit einer **idealen** Spannungsquelle[1] würde der Strom unendlich groß, würde man nur lange genug warten. Das gleiche sagt uns auch die klassische Elektrotechnik beim Kurzschließen einer idealen Spannungsquelle. Wegen der in der Realität immer vorhandenen Verluste erhalten wir in der Praxis lediglich einen ziemlich großen Strom.

Zusammenfassung:
Wir haben gesehen, dass alles unproblematisch ist, wenn $R = Z_L$ ist. Man sollte also anstreben, dass der Lastwiderstand dem Wellenwiderstand der Leitung entspricht. Dann gibt es keine Probleme. Wenn diese Bedingung nicht erfüllt ist, gibt es Reflektionen am Leitungsende. Wir haben in unserem Gedankenexperiment zwar nur die Extremfälle $R = \infty$ und $R = 0$ untersucht, aber Reflektionen gibt es schon bei kleinen Abweichungen von R und Z_L. Die sind dann nur nicht so stark.

Weiterhin haben wir gesehen, dass eine vom Lastwiderstand R reflektierte Welle noch einmal an der Spannungsquelle reflektiert wird, wenn nicht auch deren (hier nicht eingezeichneten) Innenwiderstand $R_i = Z_L$ ist. Zudem erhalten wir nur bei „Leistungsanpassung" die **größtmögliche** Leistung aus der Quelle. Die hat man bei $R_i = Z_L$. Anzustreben ist daher immer:

$$R_i = Z_L = R$$

2.2 Reflektionen auf Leitungen

Offen ist aber noch die Frage, in wieweit überhaupt Probleme durch Reflektionen entstehen, wenn wir **keine** Übereinstimmung zwischen Wellenwiderstand Z_L und dem Lastwiderstand R haben. Je nach Anwendung können das drei Probleme sein.

1. Wenn eine Welle reflektiert wird, dann muss sie ja mehrfach die Leitung durchlaufen. Da ja jede Leitung auch eine Dämpfung hat, entsteht dadurch eine **zusätzliche** Dämpfung. Zudem gelangt durch die Fehlanpassung auch nicht die gesamte zur Verfügung stehende Leistung zum Empfänger (den wir hier einfach nur als Lastwiderstand R bezeichnet haben). Wenn wir Pech haben, reicht die am Empfänger aufgenommene Leistung nicht mehr aus, um die zu übertragende Information zu dekodieren.

[1] Was eine ideale Spannungequelle ist, kann man beispielsweise hier in Kapitel 3.1 nachlesen: http://www.dk4ek.de/lib/exe/fetch.php/netzwerk.pdf

2. Wenn wir ein Fernsehbild im (alten herkömmlichen) **analogen** TV übertragen wollen, dann erzeugen wir sogenannte „Geisterbilder“. Nehmen wir an, im Bild ist irgendwo ein markanter senkrechter Strich. Die Bildinformationen werden Punkt für Punkt in einer Zeile nacheinader übertragen. Während die Welle, die gerade die Information für einen Punkt dieses Striches zum Empfänger gebracht hat, wieder zurück zur Quelle läuft, um auch dort wieder reflektiert zu werden, vergeht einige Zeit. Die Welle mit der Information für den markanten Punkt kommt daher nach Ablauf dieser Zeit erneut beim Empfänger an. Zu diesem Zeitpunkt erwartet der Empfänger die Information für einen Bildpunkt etwas weiter rechts. In abgeschwächter Form wird also auch dort dieser markante Punkt abgebildet. Wenn also im TV-Bild irgendwo ein Straßenschild auf einem dünnen Standrohr abgebildet werden soll, erscheint rechts danaben noch ein weiteres schwächeres Standrohr (oder sogar mehrere). So etwas nennt man **Geisterbild**.

3. Haben wir eine Datenleitung, dann werden dort die Bits **seriell** übertragen, also schnell nacheinander. Kommen nun wegen Reflektionen die Bits mehrmals hintereinander erneut am Empfänger an, dann überlagern sich die Informationen. So kann aus einen H-Bit ein L-Bit (oder auch umgekehrt) werden. Die Information kann verfälscht werden. Auch beim digitalen TV hat man ggf. die gleichen Effekte. Dann ist die Bildübertragung eventuell gestört. Allerdings ist die digitale Datenübertragung in Bezug auf solche Effekte robuster, als die analoge, das muss ich zugeben. Probleme gibt aber dann, wenn der Signal-Rausch-Abstand nicht all zu groß ist. Darunter versteht man den Feldstärkeunterschied zwischen dem Nutzsignal und dem immer vorhandenen thermischen Rauschen, also kleinen zufällig entstehenden störenden Wellenimpulsen. Beim digitalen TV ist auch das Ergebnis „digital“. Entweder es geht (dann geht es sehr gut), oder es geht nicht (dann geht es garnicht). Dazwischen ist nichts.

2.3 Dämpfung auf Leitungen

Leider kommt am Ende einer Leitung in der Regel weniger Leistung an, als man vorn hineingesteckt hat. Das nennt man dann „Leitungsdämpfung“. Die Dämpfung wird in Dezibel[2] gemessen. Diese Dämpfung hat mehrere Ursachen.

- Die Leiter in der Leitung haben einen Leiterwiderstand.
- Der Leiterwiderstand erhöht sich bei größeren Frequenzen durch den „Skin-Effekt“. Durch Stromverdrängung aufgrund des magnetischen Wechselfeldes um den einzelnen Leiter steht nicht mehr der volle Leiterquerschnitt zur Verfügung, der Strom kann nur in der Nähe der Oberfläche fließen.
- Der Isolierstoff zwischen den Leitern stellt ein „Dielektrikum“ wie in einem Kondensator dar. Durch das elektrische Wechselfeld fließen „Verschiebungsströme“ im Dielektrikum, die je nach Qualität des Dielektrikums Wirkleistung in Wärme verwandeln. Diese Energie geht dem Empfänger verloren.

[2] Alles zum logarithmischen Maß Dezibel finden Sie beispielsweise hier: http://www.dk4ek.de/lib/exe/fetch.php/dezibel.pdf

(Fortsetzung folgt.)