

Nachrichtentechnik

Zusammenfassung

Joel von Rotz & Andreas Ming /  [Quelldateien](#)

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	3
1.1 Struktur von Kommunikationssystemen	3
1.1.1 Punkt-Punkt Verbindung	3
1.1.2 Kommunikationsnetz	3
1.1.3 Übertragungskapazität	4
1.2 Informationen	5
1.2.1 Qualität eines Übertragungssystems	5
2 Signalanalyse	7
2.1 Deterministische und Zufallssignale	7
2.1.1 Harmonische Schwingung	7
2.1.2 Rechteckpuls	7
2.1.3 Zufallssignal	7
2.2 Komplexe Zeigernotation	8
2.2.1 Zweiseitige Spektrumsdarstellung	8
2.3 Periodische Signale	9
2.3.1 Mittlere Leistung	9
2.4 <i>sinc</i> -Funktion	9
2.5 Komplexe Fourier Reihe (<i>perodisch</i>)	9
2.5.1 Parseval'sches Leistungstheorem	10
2.6 Nichtperiodische Energiesignale	10
2.7 Fourier Transformation (<i>nicht periodisch</i>)	11
2.7.1 Parseval'sches Energiethorem	11
2.8 Logarithmische Darstellung	12
2.9 Korrelation	12
2.9.1 Autokorrelation	12
2.9.2 Kreuzkorrelation	13
2.10 Signalabtastung und Rekonstruktion	14
2.10.1 Idealer Abtastprozess	14
2.10.2 Analoge Vorfilter	15
2.10.3 Reale Abtastung - PAM Signal	16
2.10.4 Abtastung von Bandpasssignalen	17
3 Leitergebundene Signalübertragung & -Filterung	18
3.1 Pegelberechnung	19
3.2 Filtersysteme	20
3.2.1 Reale Filter - Spezifikation	21
3.3 Leitergebundene Übertragung	22
3.3.1 Charakteristische Leitungsimpedanz Z_0	25
3.3.2 Leistungsfluss	25
3.3.3 Leitergeometrien	25
3.3.4 Reflexionen an der Last	26
3.3.5 Welligkeitsfaktor	27
3.3.6 Ausgleichsvorgang an einer Stossstelle	28

4 Drahtlose Signalübertragung & -Filterung	30
4.1 Linkbudget	31
4.2 Antenne	32
4.2.1 Fernfeld Kriterien	32
4.2.2 Antennenimpedanz	33
4.2.3 Richtcharakteristik	35
4.2.4 Effektiv abgestrahlte Leistung	36
4.2.5 Feldpolarisation	36
4.3 Verfügbare Leistung am Empfangsort	38
4.4 Ausbreitungsverluste einer Funkstrecke	39
4.4.1 Freiraummodell	39
4.4.2 Empirisches Kanalmodell	39
4.4.3 Zeitvarianter Mehrwegkanal	40
5 Modulation	40
5.1 Blockdiagramm eines Kommunikationssystems	40
5.2 Klassische binäre Leitungscodes	41
5.3 Basisbandmodulation	41
5.3.1 Bandbreitenbegrenzung	42
5.3.2 Basisbandmodulator	42
5.4 Angepasste Pulsformen	43
6 Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)	44
6.1 Elektromagnetisches Spektrum	45
6.2 Störquellen	45
6.2.1 Magnetische Feldenergie	45
6.2.2 Elektrische Feldenergie	46
6.2.3 Abgestrahlte Feldenergie	47
6.2.4 Gleichtakt-Störung	48
6.2.5 Impedanzkopplung	49
6.3 Störunterdrückung	50
6.3.1 Gleichtakt Störunterdrückung	50
6.3.2 Erdung	50
6.3.3 Schirmung	53

1. Einführung

1.1 Struktur von Kommunikationssystemen

1.1.1 Punkt-Punkt Verbindung

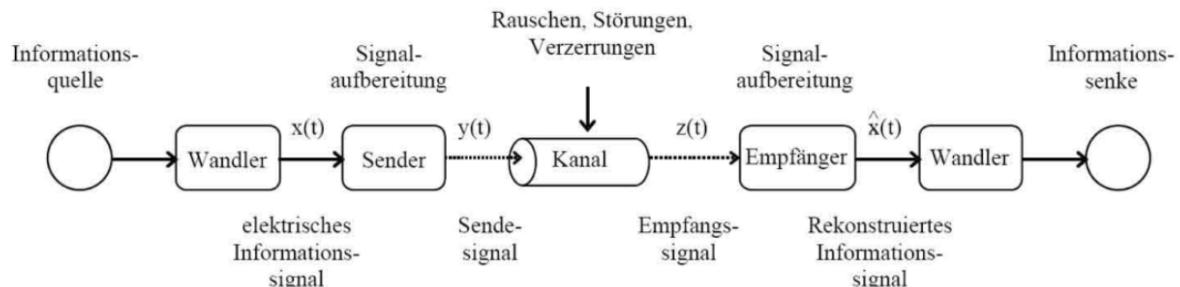


Abbildung 1: Funktionsblöcke einer Punkt-zu-Punkt-Verbindung

- **Simplex-Verbindung:** Die Information fliesst nur von A nach B.
- **Halbduplex-Verbindung:** Es kann nur die eine oder andere Seite Informationen senden.
- **Voll duplex-Verbindung:** Informationen können einander unabhängig voneinander übermittelt werden.

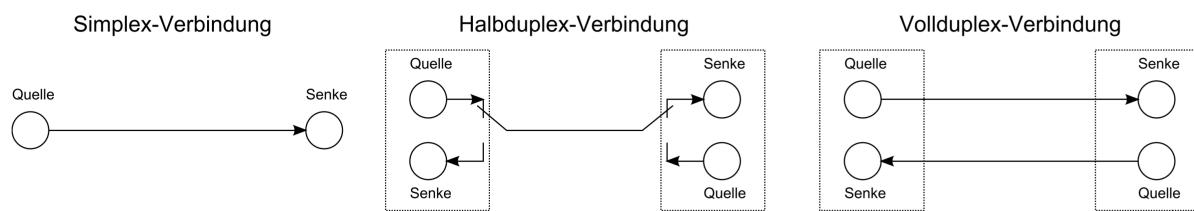


Abbildung 2: Mögliche Verbindungsarten

1.1.2 Kommunikationsnetz

Durch Zusammenführen mehrerer Grundelemente entsteht ein Kommunikationsnetz, an das eine Vielzahl von Teilnehmern angeschlossen werden können.

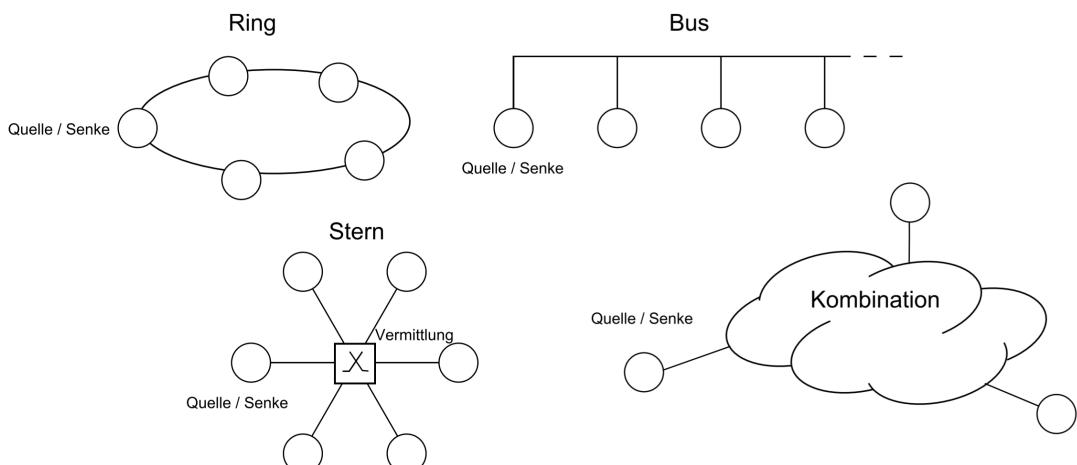


Abbildung 3: Gebräuchliche Netzstrukturen

1.1.3 Übertragungskapazität

Infolge physikalischer Eigenenschaften (endliche Bandbreite, Rauschen/Störungen) hat jeder Übertragungskanal eine begrenzte Kapazität für Informationsübertragung. Die Kapazität C hängt von der verfügbaren *Bandbreite* B und dem Verhältnis zwischen *Signalleistung* S und *Rauschleistung* N (externer Einfluss) ab.

$$C = B \cdot \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right) \quad [bps]$$

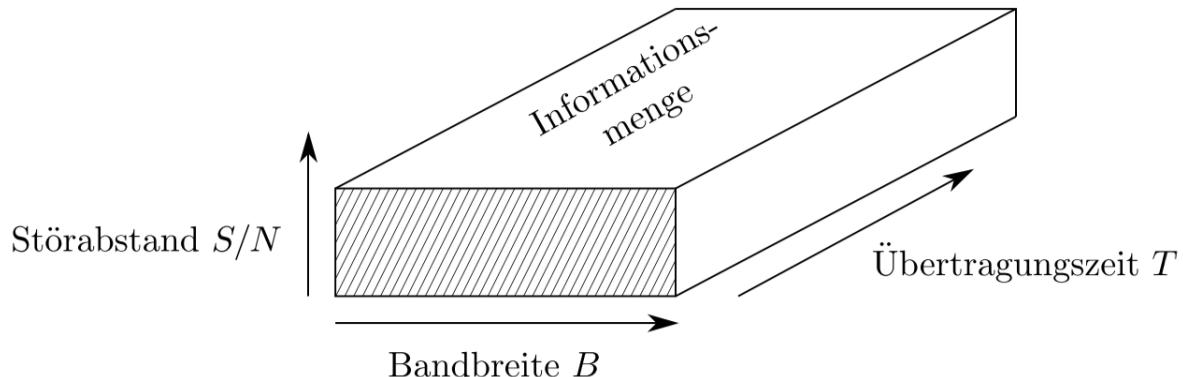


Abbildung 4: Informationsquader

Bei einer Fehlerrate von 10^{-12} ergibt sich 1 -*Bitfehler* in 10^{12} Bits.

Zur mehrfachnutzung eines zur Verfügung stehenden Kanals werden verschiedene Verfahren zur Aufbereitung elektrischer Signale verwendet.

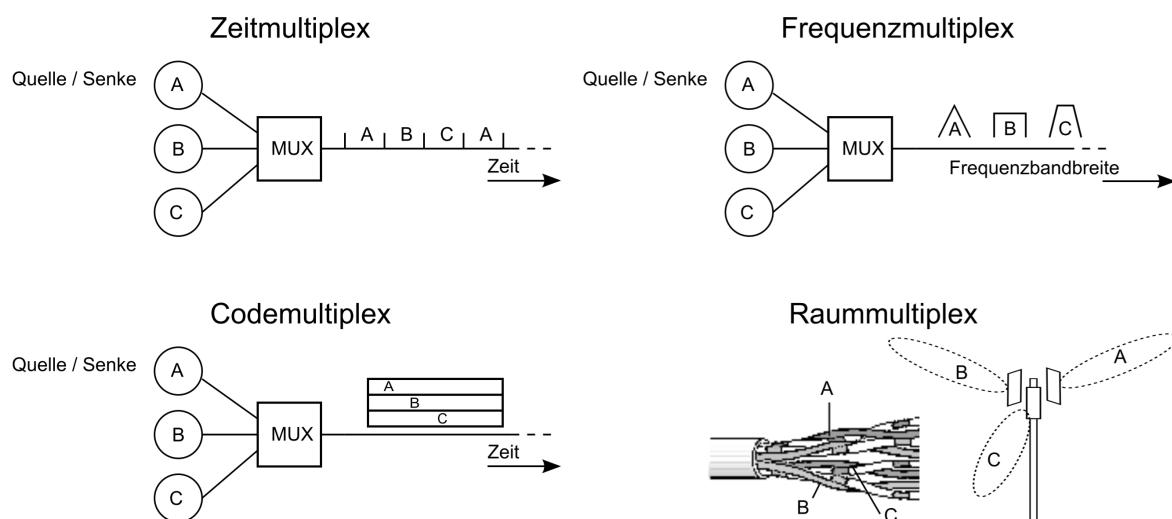
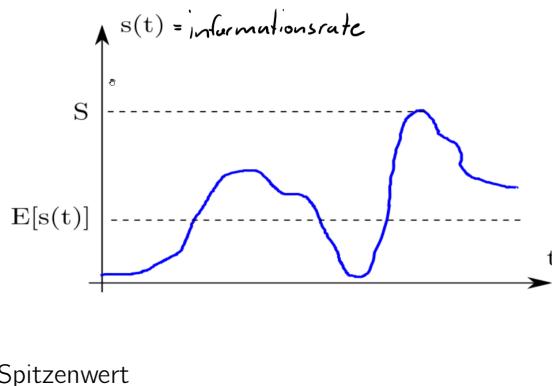


Abbildung 5: Mehrfachausnutzung mittels Modulation

1.2 Informationen

Die Informationsrate einer Quelle ist in der Regel **nicht konstant** (Zufallsprozess).



Spitzenvwert

$$S = \max s(t)$$

Erwartungswert

$$E[s(t)] = \frac{1}{T} \int s(t) dt$$

1.2.1 Qualität eines Übertragungssystems

Störfestigkeit der Übertragung

Störungen dringen zu einem grossen Teil auf dem Übertragungsweg ein.

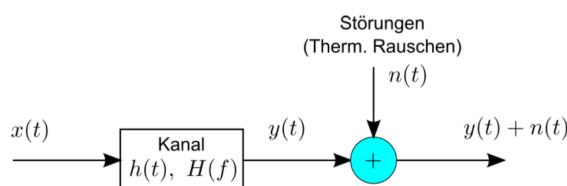


Abbildung 6: Störquellen

Um die Qualität einer Übertragung zu quantifizieren wird der sogenannte **Störabstand** (**Signal to Noise Ratio**) berechnet

$$SNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{S[W]}{N[W]} \right) \quad [dB]$$

Bei digitaler Übertragung wird die **Bitfehlerrate** (**Bit Error Ratio**) oder die **Bitfehlerwarscheinlichkeit** P_e angegeben, welche die Wahrscheinlichkeit angibt, dass ein Zustand falsch detektiert wird.

$$P_e = f \left(\frac{S}{N} \right)$$

Bandbreitenbedarf

Um möglichst viele **Systeme** M in einem Kanal mit **Bandbreite** B_K unterzubringen, sollte der **Bandbreitenbedarf** B_X eines Systems möglichst klein gehalten werden

$$M = \frac{B_K}{B_X}$$

Wiedergabetreue

Die Verzerrung ist bei einem ungestörten Übertragungskanal die Differenz der Signalevel am Ein- und Ausgang

$$\varepsilon(t) = y(t) - x(t)$$

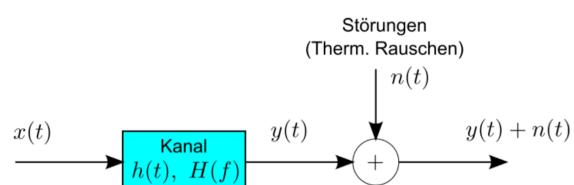


Abbildung 7: Linearer Übertragungskanal

Die Wiedergabe eines Übertragungssystems ist umso besser, je geringer die Signalverzerrung ist. Eine Verzerrungsfreie Übertragung hat die Bedingungen **konstante Verstärkung** und **linearer Phasengang**

Eine **Lineare Verzerrung** liegt vor wenn das Ausgangssignal **keine zusätzlichen Frequenzkomponenten** enthält.

Um die Wiedergabetreue zu messen wird die **Ein-Tonmessung** angewendet, bei welcher das Testsignal $x(t) = \cos(2\pi f_0 t)$ eingespielen wird und man das Ausgangssignal $y(t) = a_1 \cos(\omega_0 t) + a_2 \cos^2(\omega_0 t) + \dots$ erhält. Mit der Trigonometrischen Umformung

$$\cos(\alpha) \cos(\beta) = \frac{1}{2} \cos(\alpha - \beta) + \frac{1}{2} \cos(\alpha + \beta)$$

den Therm

$$y(t) = \underbrace{\left(\frac{a_2}{2} + \frac{3a_4}{8} + \dots \right)}_{A_0[\text{DC-Anteil}]} + \underbrace{\left(a_1 + \frac{3a_3}{4} + \dots \right)}_{A_1} \cos(\omega_0 t) + \underbrace{\left(\frac{a_2}{2} + \frac{a_4}{4} + \dots \right)}_{A_2} \cos(2\omega_0 t) + \dots$$

Zur Beschreibung der Nichtlinearität wird der **Klirrfaktor** k benutzt

$$k = \sqrt{\frac{\text{OberwellenAmplituden}}{\text{GesamtAmplituden(ohneDC)}}}$$

$$= \sqrt{\frac{(A_2)^2 + (A_3)^2 + \dots}{(A_1)^2 + (A_2)^2 + (A_3)^2 + \dots}}$$

Wird die *Zweitonmessung* $x(t) = \cos(\omega_1 t) + \cos(\omega_2 t)$ gemacht, so enthält das Ausgangssignal eines nichtlinearen Systems neben den Oberwellen auch die Terme der Form $(\omega_2 - \omega_1)$, $(\omega_2 + \omega_1)$, $(\omega_2 - 2\omega_1) + \dots$, was man als **Inetmodulationsprodukte** bezeichnet.

Zeittransparenz Latenz

Die *Latenz* beschreibt in einem Kommunikationsnetz die Einflüsse einer *Übertragungsverzögerung* und *Verarbeitungsverzögerung*, wichtige Parameter für Echtzeitdienste.

Die gesamte Verzögerungszeit T_{delay} besteht aus

drei Anteilen

$$T_{delay} = T_a + T_{\bar{u}} + T_v$$

T_a : Ausbreitungsverzögerung (*propagation delay*)
 $T_{\bar{u}}$: Übertragungsverzögerung (*transmission delay*)
 T_v : Verarbeitungsverzögerung (*process delay*)

Ausbreitungsverzögerung *propagation delay*

$$T_a = \frac{\text{Entfernung}[m]}{\text{Ausbreitungsgeschwindigkeit}[\frac{m}{s}]} \quad [s]$$

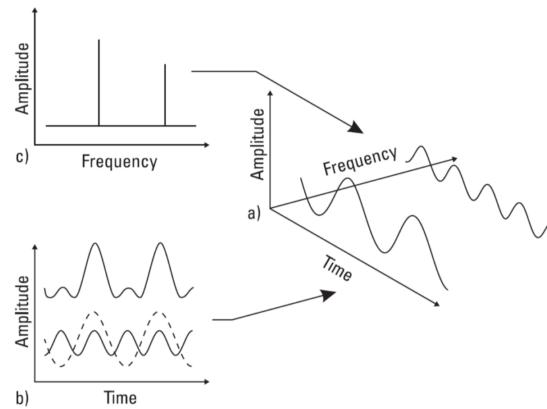
Übertragungsverzögerung *transmission delay*

$$T_{\bar{u}} = \frac{\text{Paketgrösse}[byte]}{\text{Datenrate}[\frac{bytes}{s}]} \quad [s]$$

Die Verarbeitungsverzögerung *process delay* T_v ist vom Verarbeitungssystem abhängig und beschreibt z. B. eine Prozesszeit.

2. Signalanalyse

Die Spektralanalyse ist einer der wichtigsten Methoden der Signalanalyse in der Kommunikationstechnik und basiert auf der Fourier Reihenentwicklung und der Fourier Transformation. Sie erlaubt im Frequenzbereich die Behandlung von ganzen Signalklassen mit ähnlichen Eigenschaften gegenüber der individuellen Analyse jedes einzelnen Signals im Zeitbereich.



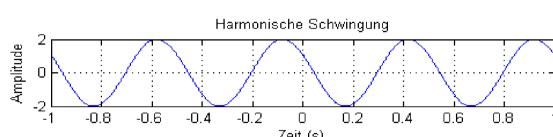
2.1 Deterministische und Zufallssignale

Signale können entweder *deterministisch* mit mathematischen Funktionen beschrieben werden oder sie liegen als *Zufallssignale* vor und nehmen zu jedem Zeitpunkt einen zufälligen Wert an, der einer Gauss-verteilung folgt.

2.1.1 Harmonische Schwingung

Kosinusschwingung als reelle Zeitfunktion

$$s(t) = A \cos(2\pi f t + \varphi)$$

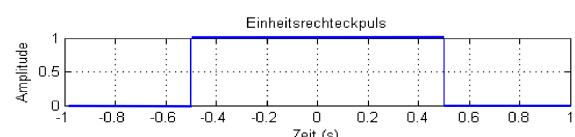


$$+A \sin(\omega t) = +A \cos(\omega t - 90^\circ) = +A \cos\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$-A \cos(\omega t) = +A \cos(\omega t \pm 180^\circ) = +A \cos(\omega t \pm \pi)$$

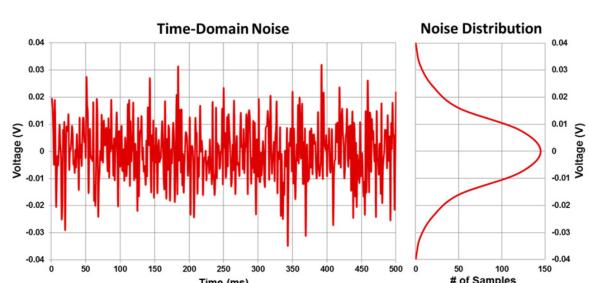
2.1.2 Rechteckpuls

$$\Pi(t) = \begin{cases} 1, & |t| < \frac{1}{2} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$



2.1.3 Zufallssignal

Zufallssignale nehmen zu jedem Zeitpunkt zufällige Werte an und können daher nicht vollständig mathematisch beschrieben werden. Man kann aber für diese Signalklasse statistische Größen wie eine Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion $p(u)$, den Erwartungswert m_u und die Standardabweichung s_u als beschreibende Größen ermitteln



2.2 Komplexe Zeigernotation

Signale (auch Reellwertige) können einfacher anhand der *komplexen Zeigernotation* beschrieben werden

$$S(t) = \underbrace{A \cos(\omega_0 t + \varphi)}_{\text{reelle Schwingung}} \pm j \underbrace{A \sin(\omega_0 t + \varphi)}_{\text{Erweiterung}} = \underbrace{A e^{\pm j(\omega_0 t + \varphi)}}_{\text{komplexer Zeiger}}$$

Es gilt trotz Erweiterung immernoch

$$s(t) = \operatorname{Re} [A e^{\pm j(\omega_0 t + \varphi)}] = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

Aus dieser Zeigernotation kann direkt das **Amplituden- und Phasenspektrum** als **einseitiges Linienspektrum** abgetragen werden

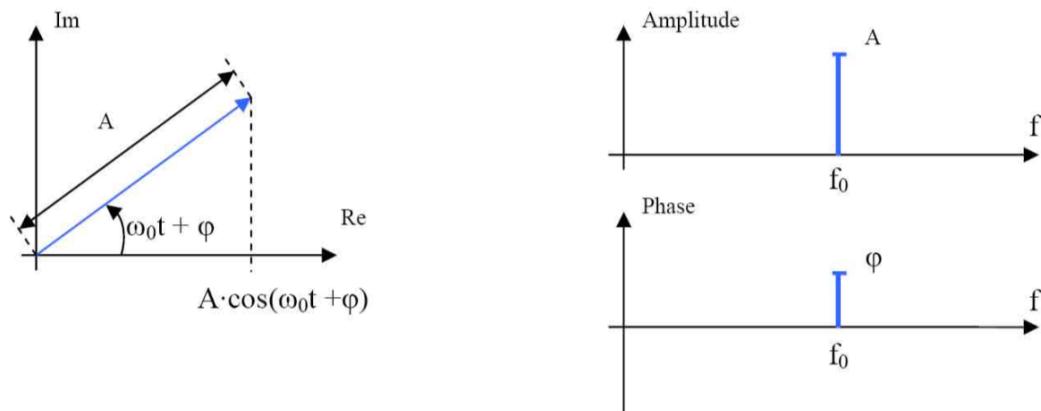


Abbildung 8: Zeigerdiagramm, Amplituden- und Phasenspektrum

2.2.1 Zweiseitige Spektrumsdarstellung

Eine weitere Darstellung ist das **zweiseitige Linienspektrum**, wobei über die komplexe Konjugation das Ganze, komplexe Signal reelwertig gehalten wird

$$s(t) = \underbrace{\frac{A}{2} e^{j(\omega_0 t + \varphi)}}_{\text{Gegenuhrzeigersinn}} + \underbrace{\frac{A}{2} e^{-j(\omega_0 t + \varphi)}}_{\text{Uhrzeigersinn}} = A \cos(\omega_0 t + \varphi)$$

da sich die Komplexen Teile aufheben. Da das *Amplitudenspektrum* stets den Betrag anzeigt, werden negative Werte stets mit einer *Phasenverschiebung* um π aufgetragen.

- Amplitudendiagramm ist *symmetrisch*
- Phasendiagramm ist *punktsymmetrisch*

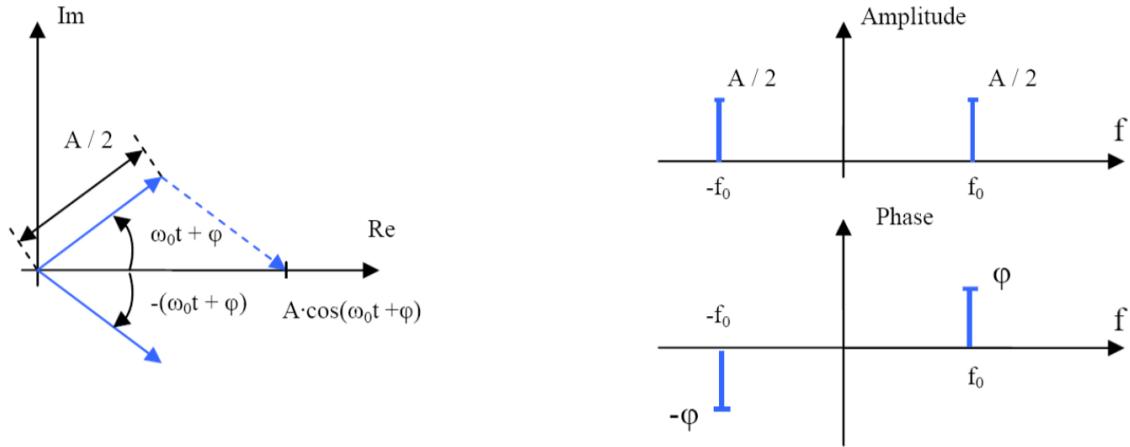


Abbildung 9: Konjugiert komplexe Zeiger und zweiseitiges Linienspektrum

2.3 Periodische Signale

Harmonische Schwingungen und Zeiger gehören zu der allgemeinen Klasse der periodischen Signale, mit der Eigenschaft

$$s(t \pm mT_0) = s(t)$$

mit $-\infty < t < +\infty$ und $m = 1, 2, 3, \dots$

Die Signalform ändert sich also nicht bei einer Verschiebung um m .

2.3.1 Mittlere Leistung

Mittelwert \bar{s}

$$\bar{s} = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) dt$$

Die **Mittlere normierte Leistung** beschreibt die Leistung bezogen auf 1Ω

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} |s(t)|^2 dt$$

Entspricht die Leistung $0 < P < \infty$ so spricht man von einem *periodischen Leistungssignal*.

2.4 sinc-Funktion

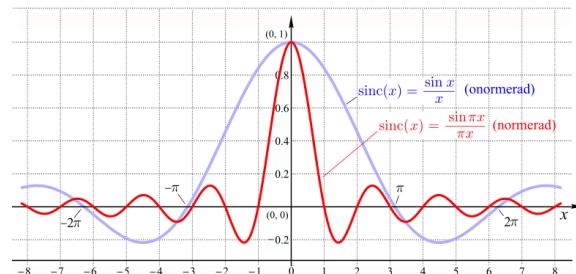
Zur Bestimmung der Fourier-Koeffizienten c_n erhält man oft das Integral

$$\frac{1}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{+\frac{T}{2}} e^{-j\pi f t} dt = -\frac{1}{j2\pi f T} (e^{-j\pi f T} - e^{j\pi f T})$$

was durch die geometrische Beziehung $(e^{j\theta} - e^{-j\theta})/(j2) = \sin(\theta)$ zur *sinc*-Funktion führt

$$si(\pi f T) = \frac{\sin(\pi f T)}{\pi f T} \quad \text{mit } x = f T$$

$$= \text{sinc}(x) = \frac{\sin(\pi x)}{\pi x} = \begin{cases} 1, & x = 0 \\ 0, & x = \pm 1, \pm 2, \dots \end{cases}$$



2.5 Komplexe Fourier Reihe (periodisch)

Ein periodisches Signal $s(t)$ kann mit der *komplexen Fourier Reihenentwicklung* in eine zweiseitige Spektrumsdarstellung gewandelt werden. Die komplexe Fourier Reihe für ein periodisches Leistungssignal der Periode $T_0 = \frac{1}{f_0}$ lautet

$$s(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} c_n e^{jn\omega_0 t} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Die komplexen Koeffizienten c_n lauten

$$c_n = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} s(t) e^{-j n \omega_0 t} dt$$

Der Betrag $|c_n|$ repräsentiert die Amplitude und das Argument $\angle c_n$ entspricht der Phase. Es gilt:

- Alle Frequenzen sind ganzzahlige Vielfache der Grundfrequenz ω_0
- Die Gleichstromkomponente c_0 entspricht \bar{s}
- Ist $s(t)$ reell, so besitzt das zweiseitige *Amplitudenspektrum* $|c_n|$ eine **gerade Symmetrie**
- Ist $s(t)$ reell, so besitzt das zweiseitige *Phasenspektrum* $\angle c_n$ eine **ungerade Symmetrie**

2.5.1 Parseval'sches Leistungstheorem

Die mittlere, normierte Leistung eines periodischen Signals kann im Zeitbereich oder im Frequenzbereich bestimmt werden

$$P = \frac{1}{T_0} \int_{t_0}^{t_0+T_0} |s(t)|^2 dt = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |c_n|^2$$

2.6 Nichtperiodische Energiesignale

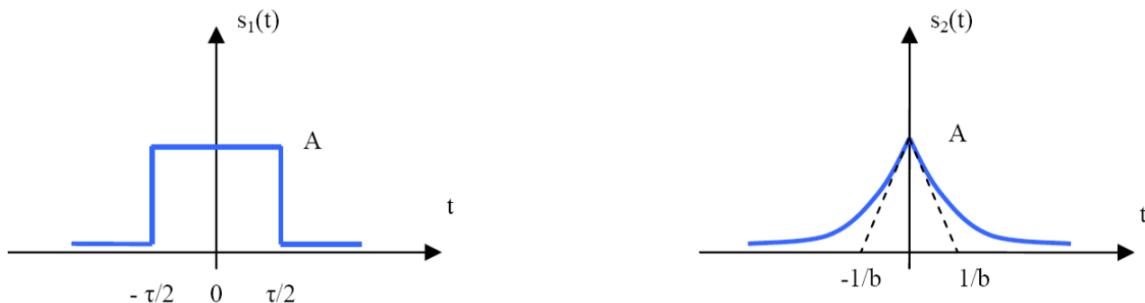


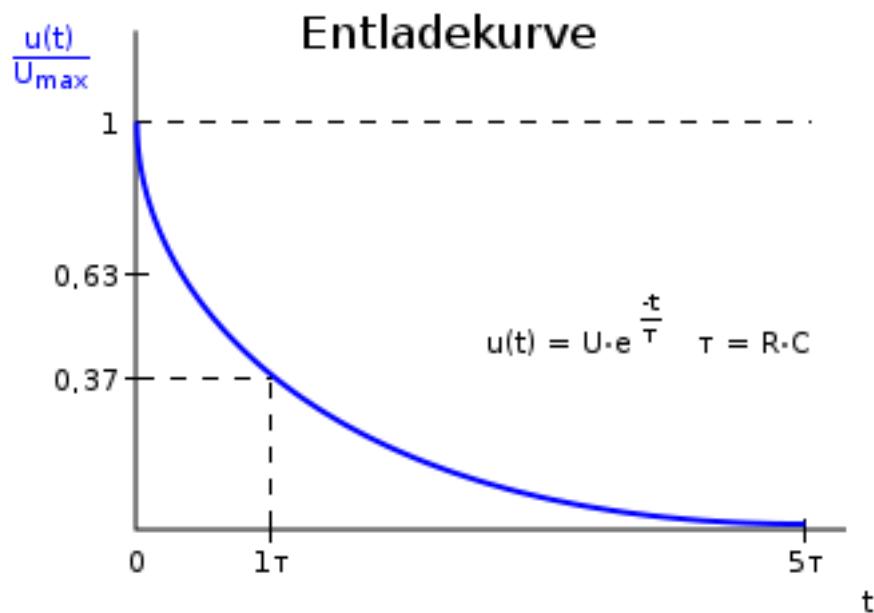
Abbildung 10: Nichtperiodische Signale

Die *normierte Signalenergie* E beschreibt die Energie eines Signals über einen Widerstand von 1Ω

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt$$

Energiesignal

Ist die Energie *endlich*, also $0 < E < \infty$ so handelt es sich um ein **nichtperiodisches Energiesignal**. Auch Signal die vermeintlich unendlich lange andauern können endlich sein, z. B.:



Die Funktion wird zwar Mathematisch nie 0, die Energie ist jedoch Endlich (*Kondensator hat nicht unendlich Energie*)

2.7 Fourier Transformation (nicht periodisch)

Mit der Fourier Transformation werden nicht periodische Signale in ihre Frequenzbestandteile aufgeteilt und man erhält ein **Kontinuierliches Dichtespektrum**. Die Fourier Transformation ist definiert durch

$$S(f) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad \text{mit } \omega = 2\pi f$$

Die Rücktransformation gelingt durch die inverse Fourier Transformation

$$s(t) = \int_{-\infty}^{\infty} S(f) e^{j\omega t} dt \quad \text{mit } \omega = 2\pi f$$

Für die komplexe Funktion $S(f)$ der Fourier Transformation gelten die *spektralen Eigenschaften*

- Das *Amplitudendichtespektrum* entspricht $|S(f)|$
- Das *Phasendichtespektrum* entspricht $\angle S(f)$
- Der Funktionionswert $S(f)|_{f=0}$ entspricht der Nettofläche von $s(t)$
- Ist $s(t)$ reell, so besitzt das *Amplitudenspektrum* $|c_n|$ eine **gerade Symmetrie**
- Ist $s(t)$ reell, so besitzt das *Phasenspektrum* $\angle c_n$ eine **ungerade Symmetrie**

2.7.1 Parseval'sches Energietheorem

Die Signalenergie im Zeitbereich wie auch im Frequenzbereich entspricht demselben Wert, die Beiden Darstellungen beinhalten also dieselben Informationen

$$E = \int_{-\infty}^{\infty} |s(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |S(f)|^2 df$$

2.8 Logarithmische Darstellung

Das Amplitudenspektrum wird oft in der y-Achse logarithmisch dargestellt

$$A_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{A_V}{A_{Ref}} \right)$$

als Bezugswert A_{Ref} wird oft der Effektivwert des Signals oder die Amplitude der Grundschwingung verwendet.

2.9 Korrelation

2.9.1 Autokorrelation

Die *Autokorrelation* macht Angaben über den inneren Zusammenhang einer Funktion $s(t)$. Dies gilt für ein *periodisches Leistungssignal*

$$k_{11}(t) = E[s_1(t - \tau) \cdot s_1(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t - \tau) s_1(t) dt$$

und für ein *Energiesignal*

$$k_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t - \tau) s_1(t) dt$$

Im **Frequenzbereich** erhalten wir die Autokorrelationen eines *periodischen Leistungssignals* durch

$$k_{11} = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T S_1(f) S_1^*(f) df$$

und eines *Energiesignals* über

$$k_{11}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} S_1(f) S_1^*(f) df$$

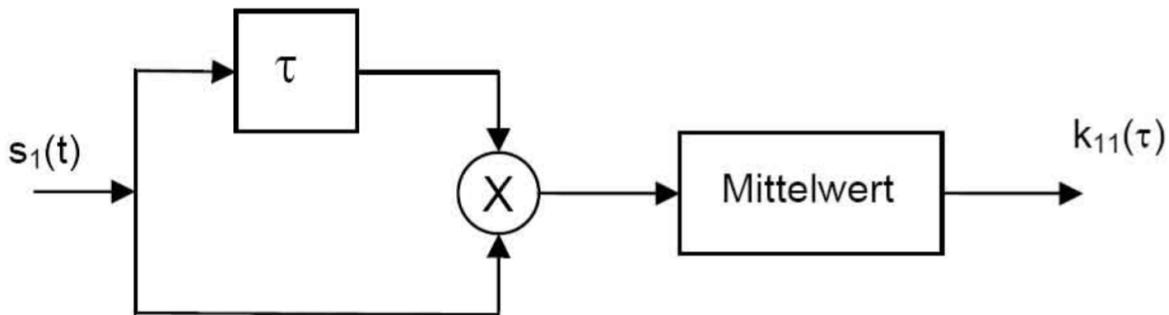


Abbildung 11: Blockdiagramm einer Autokorrelation

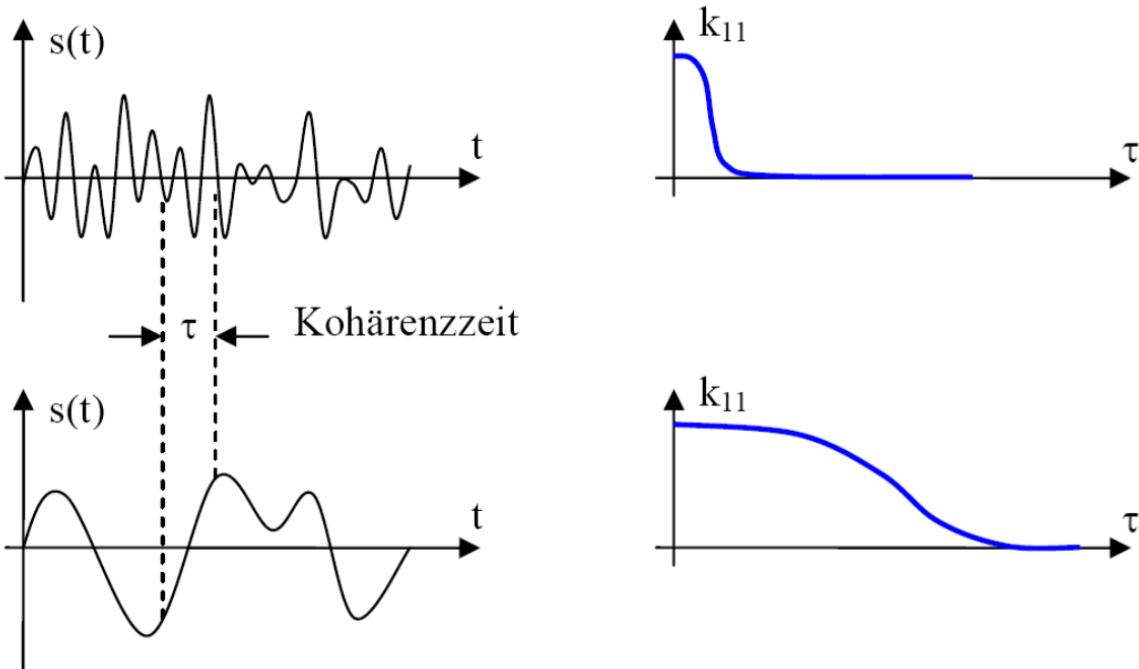
Es gelten die folgenden Eigenschaften:

- AK ist gerade: $k_{11}(\tau) = k_{11}(-\tau)$
- $\lim_{\tau \rightarrow \infty} k_{11}(\tau) = 0$
- Bei $\tau = 0$ erhält man die normierte Leistung (o. Energie): $k_{11}(\tau = 0) = s_1(t)^2 = s_{eff}^2$
- Das Maximum liegt bei $\tau = 0$

- Für periodische Signale $s(t)$ liegt die gleiche Periodendauer wie bei $k_{11}(\tau)$ vor

Kohärenzzeit

Der Bereich von τ , in dem $k_{11} \neq 0$ ist, wird als *Kohärenzzeit* bezeichnet.



Die Kohärenzzeit eines sehr fluktuiativen (= grosse Bandbreite) Signals ist sehr kurz, während diese bei einem langsamen Signal (= keline Bandbreite) eher lang ist. Es gilt also

$$\text{Kohärenzzeit} \propto \frac{1}{\text{Bandbreite}}$$

2.9.2 Kreuzkorrelation

Die *Kreuzkorrelation* macht Angaben über den Zusammenhang zweier Signale $s_1(t)$ und $s_2(t)$. Dabei kann man herausfinden, ob zwei Signale miteinander verwandt sind und gemeinsame Merkmale enthalten. Zudem kann man erkennen ob zwei Signale in Abhängigkeit einer zeitlichen Verschiebung zueinander stehen. Dies gilt für *periodische Leistungssignale*

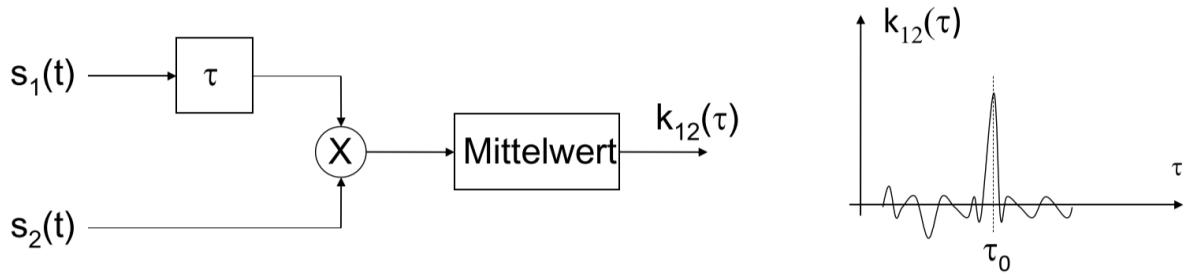
$$k_{12}(t) = E[s_1(t - \tau) \cdot s_2(t)] = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T s_1(t - \tau) s_2(t) dt$$

und für ein *Energiesignal*

$$k_{12}(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} s_1(t - \tau) s_2(t) dt$$

Es gelten die folgenden Eigenschaften:

- KK ist gerade: $k_{12}(\tau) = k_{21}(-\tau)$
- $\lim_{\tau \rightarrow \infty} k_{12}(\tau) = 0$
- Das Maximum liegt bei $\tau = \tau_0$



2.10 Signalabtastung und Rekonstruktion

2.10.1 Idealer Abtastprozess

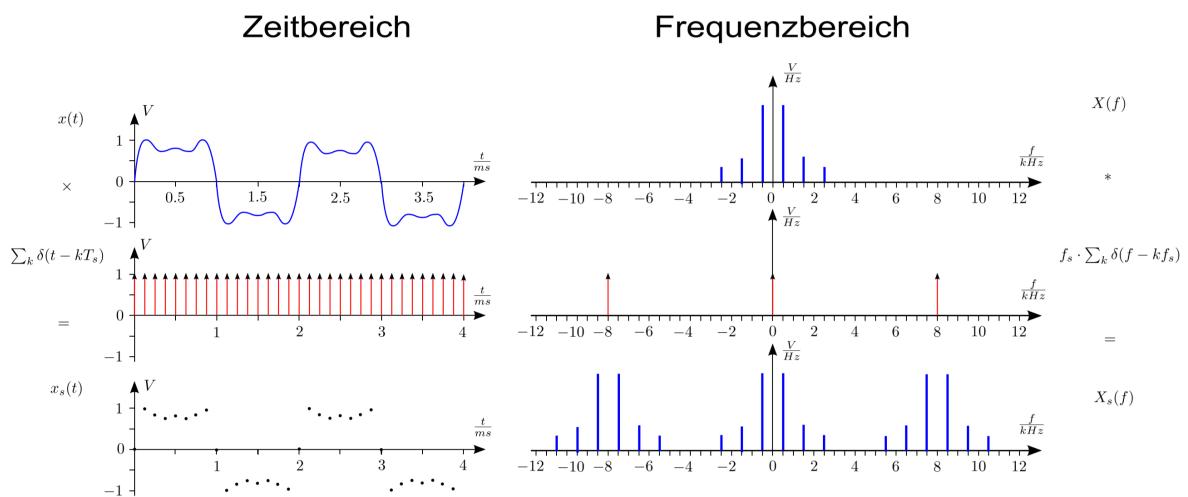
Der Abtastprozess kann als Multiplikation eines analogen Eingangssignals mit einer periodischen Serie von Einheitsimpulsen betrachtet werden

$$x(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(t - kT_s)$$

Was eine Faltung im Frequenzbereich mit einem Impulskamm zur Folge hat

$$X_s(f) = X(f) * \left[f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} \delta(f - kf_s) \right] = f_s \sum_{k=-\infty}^{\infty} X(f - kf_s)$$

Was einer periodischen Fortsetzung des Spektrums zur Folge hat

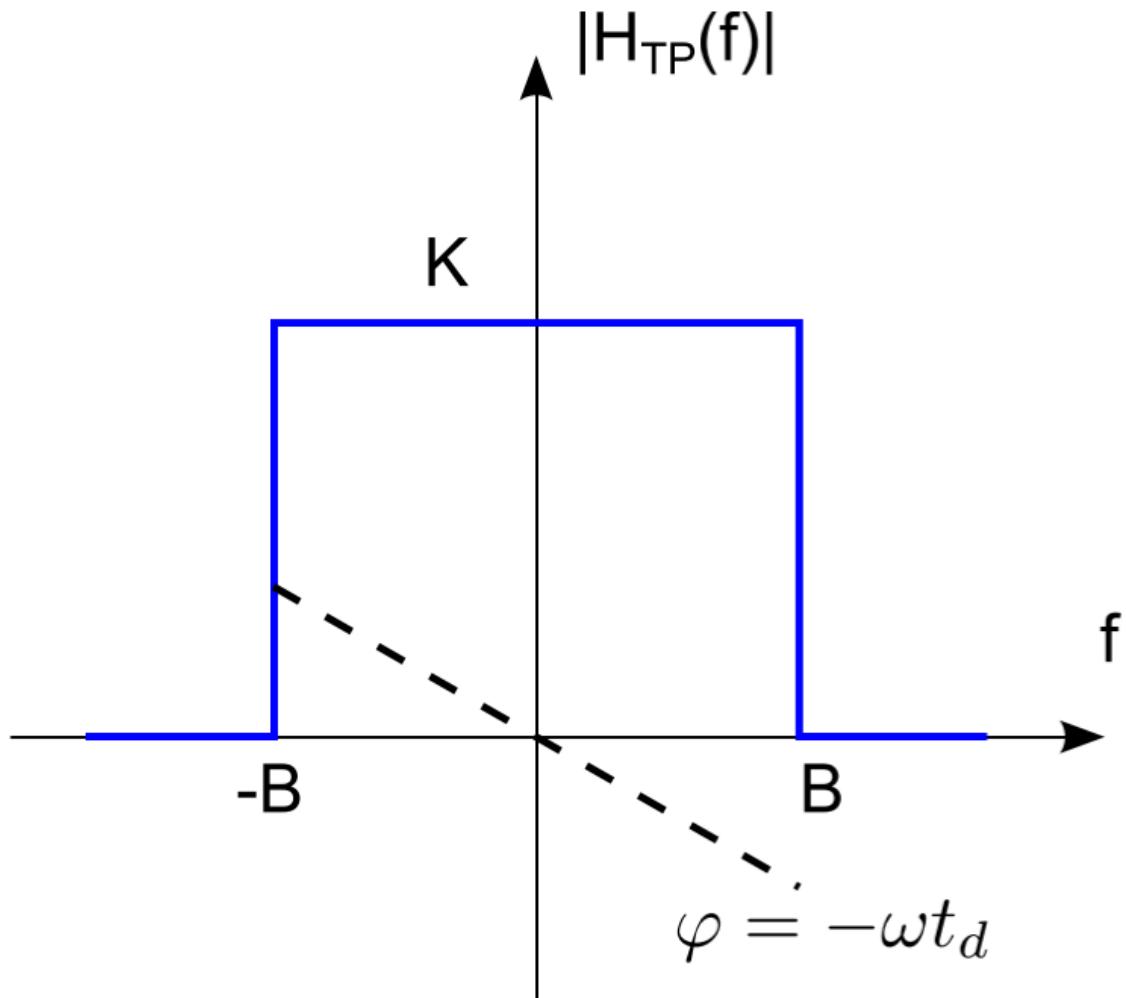


Es sind also Entsprechende Kopien des Spektrums (*Alias*) bei den ganzzahligen Vielfachen der *Abtastfrequenz* f_s zu sehen. Die unverzerrte Rückgewinnung über ein Tiefpassfilter ist nur möglich, wenn das Abtasttheorem, bzw. die *Nyquist-Rate* eingehalten wird

$$f_{s_{min}} > 2f_{Signal_{max}}$$

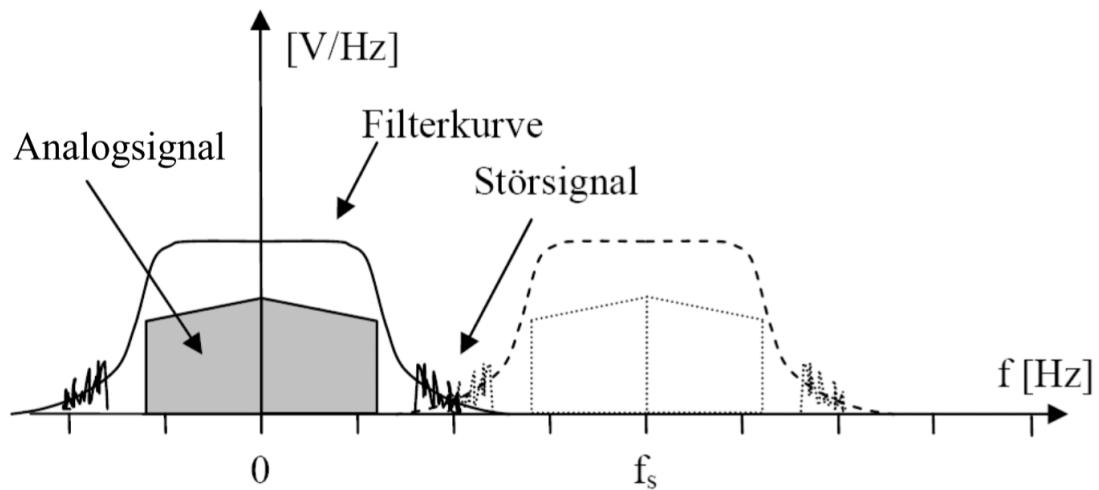
Ein idealer Tiefpass mit einer Verstärkung K , einer Verzögerungszeit t_d und einer Bandbreite B hat eine Übertragungsfunktion von

$$H_{TP}(f) = K \Pi\left(\frac{f}{2B}\right) e^{-j\omega t_d}$$



2.10.2 Analoge Vorfilter

Das analoge Vorfilter (*anti-aliasing Filter*) verhindert das Kopieren eines Störsignals (Ausserhalb der Grenzfrequenz) in den Nutzbereich fallen.



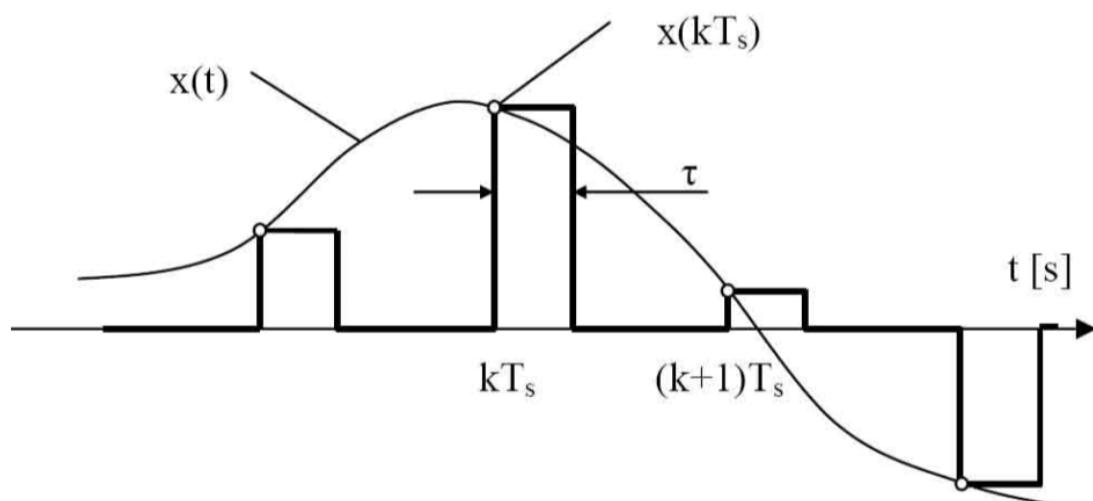
Realisierbare Filter sind nicht ideal. Die korrekte Auslegung des Filters hängt von verschiedenen Gesichtspunkten ab:

- Gewünschte Signalbreite (Grenzfrequenz für den Durchlassbereich f_g)
- Abtastfrequenz f_s
- Gewünschte minimale Sperrdämpfung für Spiegelfrequenzen ($f_{sb} = f_s - f_g$)
- Anforderungen bezüglich Signalverzerrung durch das Filter

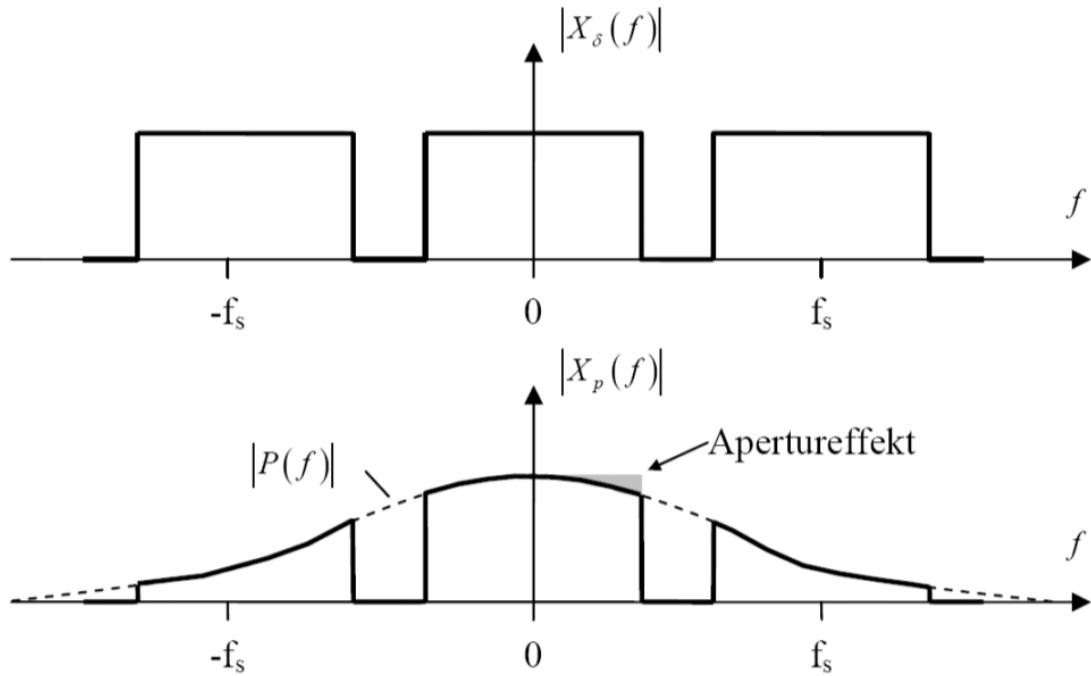
2.10.3 Reale Abtastung - PAM Signal

Reale Abtastungen erfolgen durch die *Sample&Hold*-Technik, so erhält man eine Flat-Top-Abtastung. Dadurch erzeugt man die Zeitfunktion

$$x_p(t) = x(t) \sum_{k=-\infty}^{\infty} p(t - kT_s)$$



Dies induziert einen *Apertureeffekt*, bei welchem eine Dämpfung der höheren Frequenzkomponenten des Signalspektrums

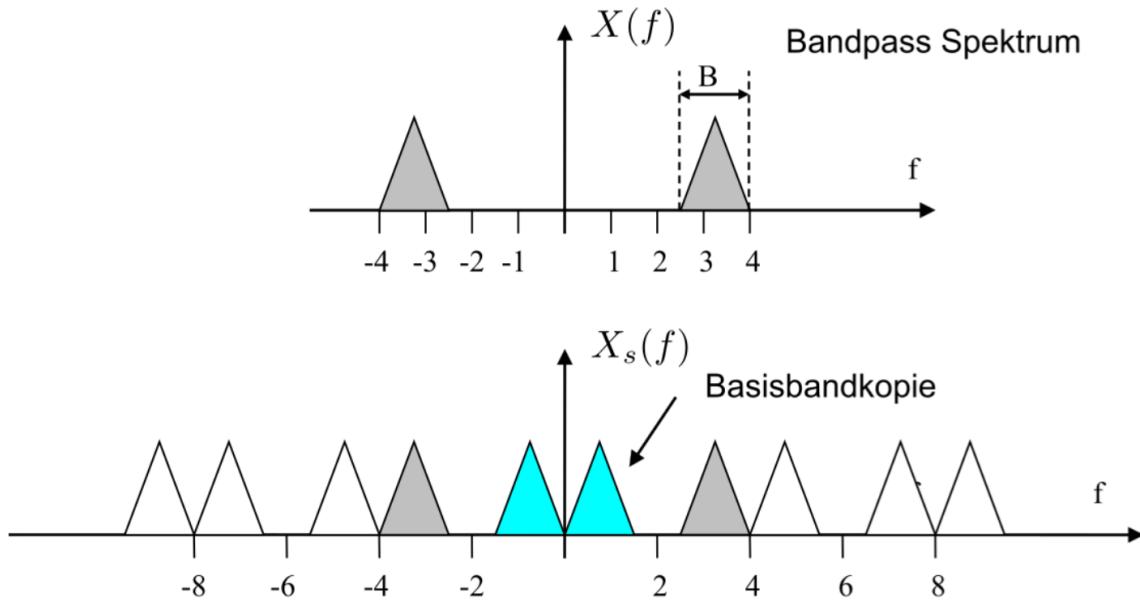


2.10.4 Abtastung von Bandpasssignalen

Besitzt ein Signal ein bandbegrenztes Spektrum mit der Bandbreite B und der maximalen oberen Signalfrequenz $f_{Signal_{max}}$, so kann es mit der Frequenz

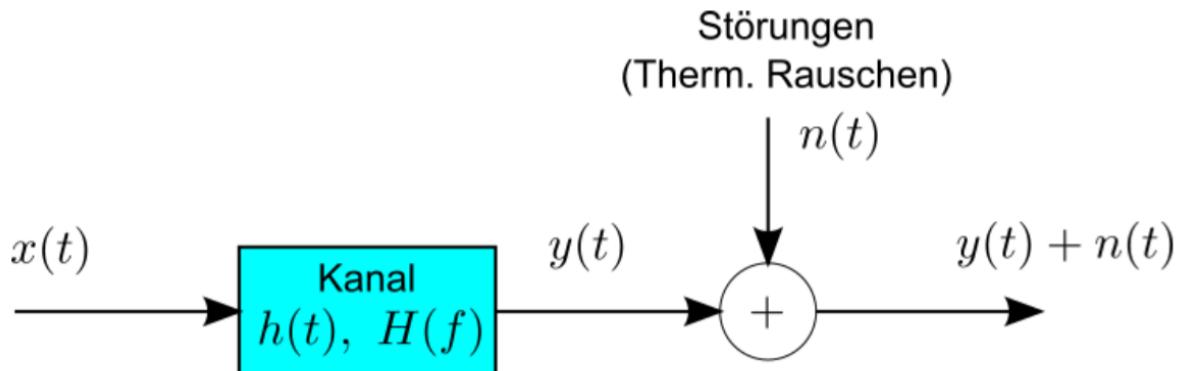
$$f_{Sample} = \frac{2f_{Signal_{max}}}{m}$$

abgetastet werden, ohne das es zu Spektrumsüberlappungen kommt. m ist die grösste Zahl, die das Verhältnis $\frac{f_{Signal_{max}}}{B}$ nicht übersteigt.



3. Leitergebundene Signalübertragung & -Filterung

Es wird hier vor allem vom LTI-Filterkanal gesprochen, und die Störungen die vom Kanal selbst kommen



Die Beschreibung der Übertragungseigenschaften erfolgt im Zeitbereich mithilfe der *Impulsantwort* $h(t)$ und im Frequenzbereich mit dem *komplexen Frequenzgang* $H(f)$. Diese werden folgendermassen ermittelt

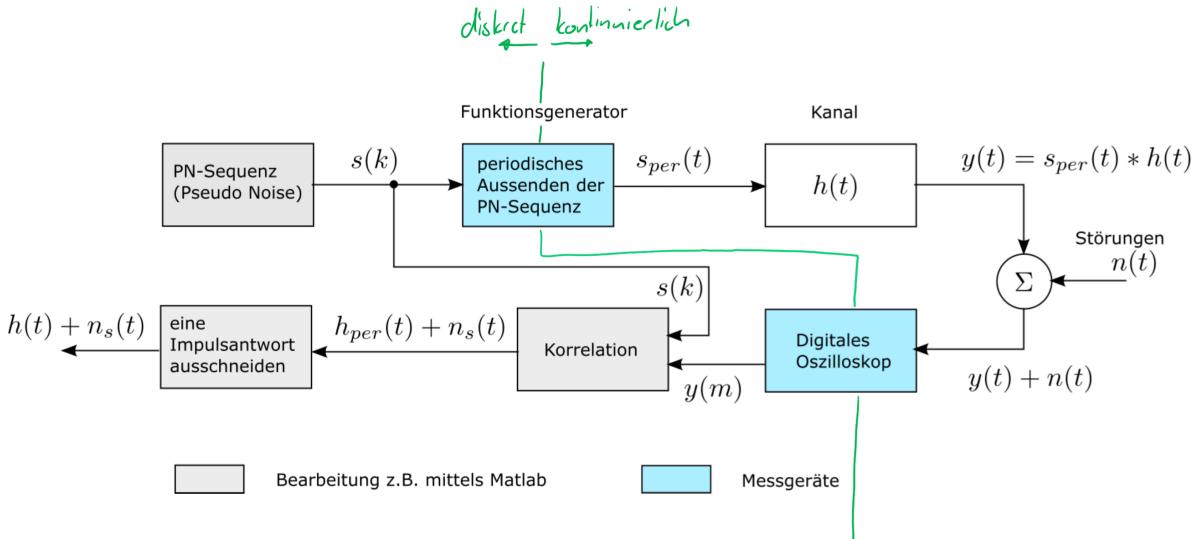
Wie kommt man zur Impulsantwort $h(t)$?

Eingangssignal $x(t)$	Ausgangssignal $y(t)$	Bemerkung
Diracstoss $\delta(t)$	Impulsantwort $h(t)$	- DGL muss bekannt sein - Testsignal für Labor nicht geeignet, da nur sehr geringer Energieinhalt
Schrittspannung (z.B. 0 -> 5V)	Schrittantwort $g(t)$	- Impulsantwort über die Ableitung der Schrittantwort $h(t) = \frac{d}{dt}g(t)$ - Testsignal hat einen hohen Energieinhalt
Frequenzgang $H(f)$	Impulsantwort $h(t)$	- Berechnung mittels Fourier Rücktransformation
Periodische Zufallssequenz $s(t)$ <small>pn-Signal (pseudo noise)</small>	$s(t) * h(t)$	- Messung einer Stossantwort mit Korrelationsmethode (Folie 4)

Wie kommt man zur Übertragungsfunktion $H(f)$?

Eingangssignal $x(t)$	Ausgangssignal $y(t)$	Bemerkung
Harmonische Schwingung $A_x \cos(2\pi ft + \varphi_x)$ <small>Einführung</small>	Harmonische Schwingung $A_y \cos(2\pi ft + \varphi_y)$	- Amplitudengang: $ H(f) = A_y/A_x$ - Phasengang: $\angle H(f) = \varphi_y - \varphi_x$
Impulsantwort $h(t)$	Frequenzgang $H(f)$	- Berechnung mittels Fourier Transformation

Die Ermittlung der Impulsantwort $h(t)$ mittels *Periodischer Zufallssequenz* $s(t)$ erhält man mittels Korrelationsverfahren



3.1 Pegelberechnung

Bei einer verzerrungsfreien Übertragung ist die Ausgangsleistung P_y proportional zur Eingangsleistung P_x , die *Dämpfung* entspricht

$$a = \frac{P_x}{P_y} \quad \text{bzw.} \quad a_{dB} = 10 \log_{10}(a)$$

Können nicht beide Leistungen gleichzeitig bestimmt werden, so wird mit Referenzgrößen gearbeitet

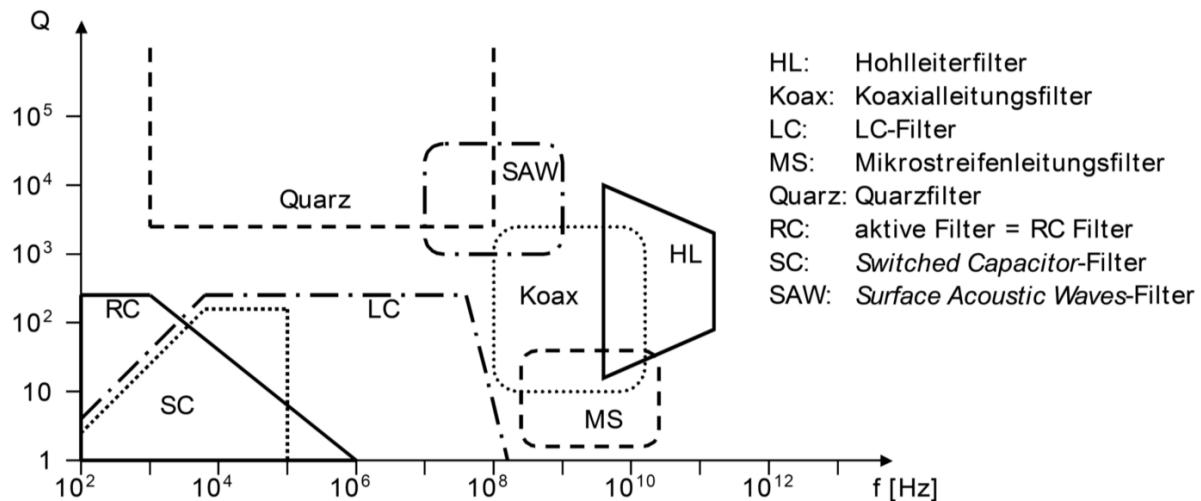
Referenz	Formel	Einheit
$P_{Ref} = 1mW$	$P_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1mW} \right)$	dBm
$P_{Ref} = 1W$	$P_{dB} = 10 \log_{10} \left(\frac{P}{1W} \right)$	dBW
$U_{Ref} = 1V$	$U_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{U}{1V} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{R_{Ref}}{R} \right)$	dBV

Referenz	Formel	Einheit
$E_{Ref} = 1 \frac{\mu V}{m}$	$E_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{P}{1 \frac{\mu V}{m}} \right)$	$dB \frac{\mu V}{m}$

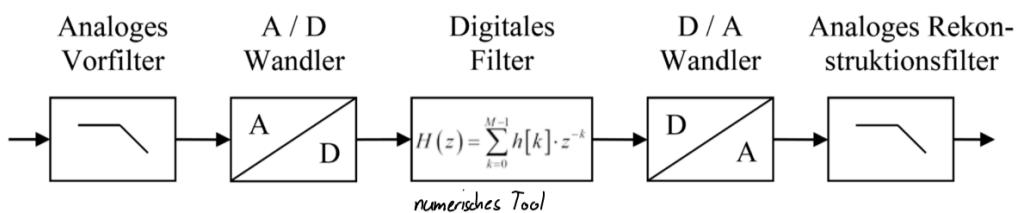
3.2 Filtersysteme

Niederfrequent haben Analoge LC-Filter sehr lange eine dominierende Rolle, wobei dieselben Methoden der Filtersynthese auch auf modernere Filtertechnologien angewendet werden können. Für verschiedene Einsatzbereiche gibt es *verschiedene Filtertechnologien*, wobei auch *Digitale Filter* bis ca. 100MHz analoge Filter nachbilden können, mit dem VOrteil, dass diese anschliessend noch anpassbar sind

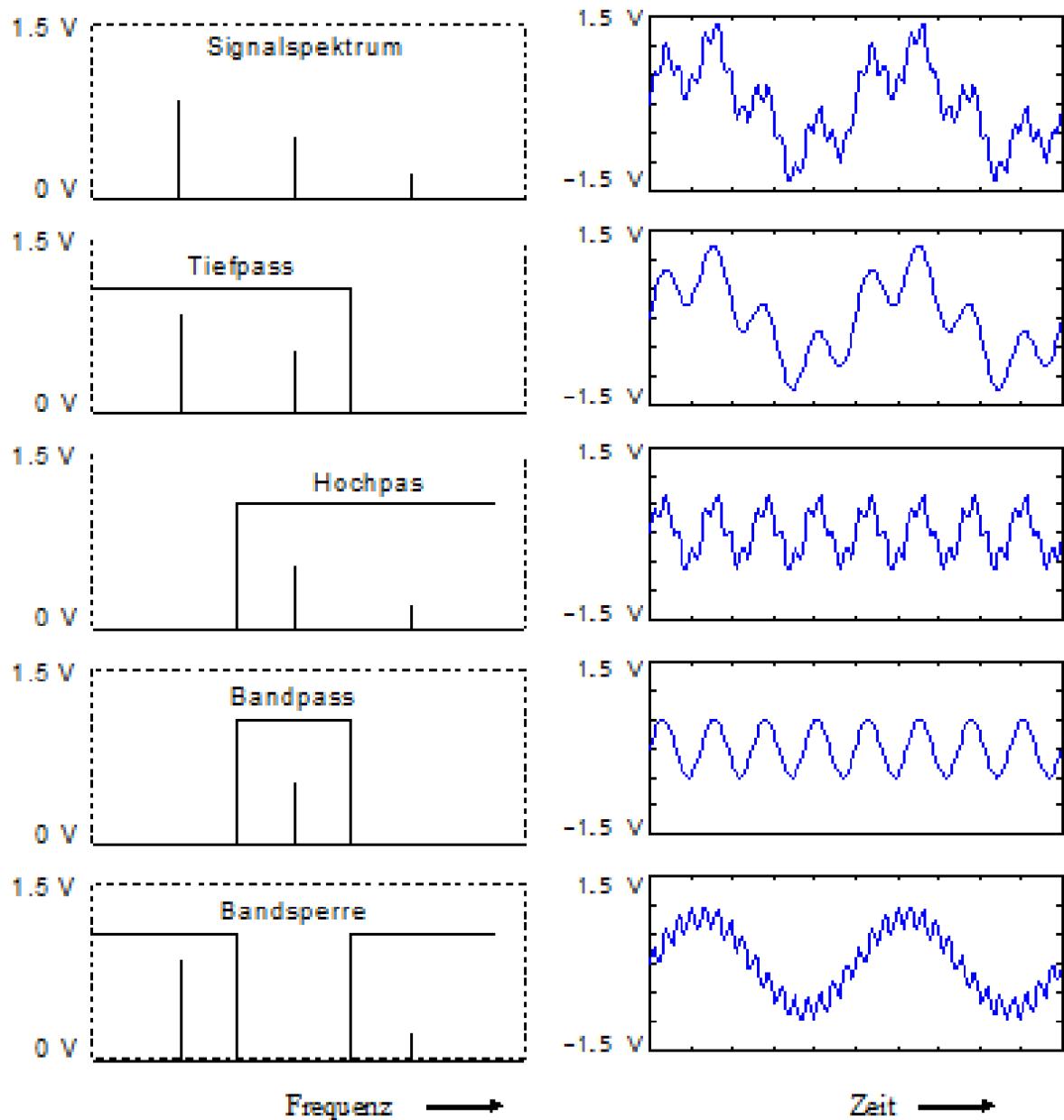
- **Analoge Filtertechnologien**



- **Digitale Filter**



Desweiteren gibt es verschiedene Filterklassifizierungen, welche folgende **ideale Amplitudengänge** aufweisen



3.2.1 Reale Filter - Spezifikation

Reale Filter können keine sauberen 1/0-Übergänge realisieren, wonach Filter mit der *Filtermaske* definiert werden

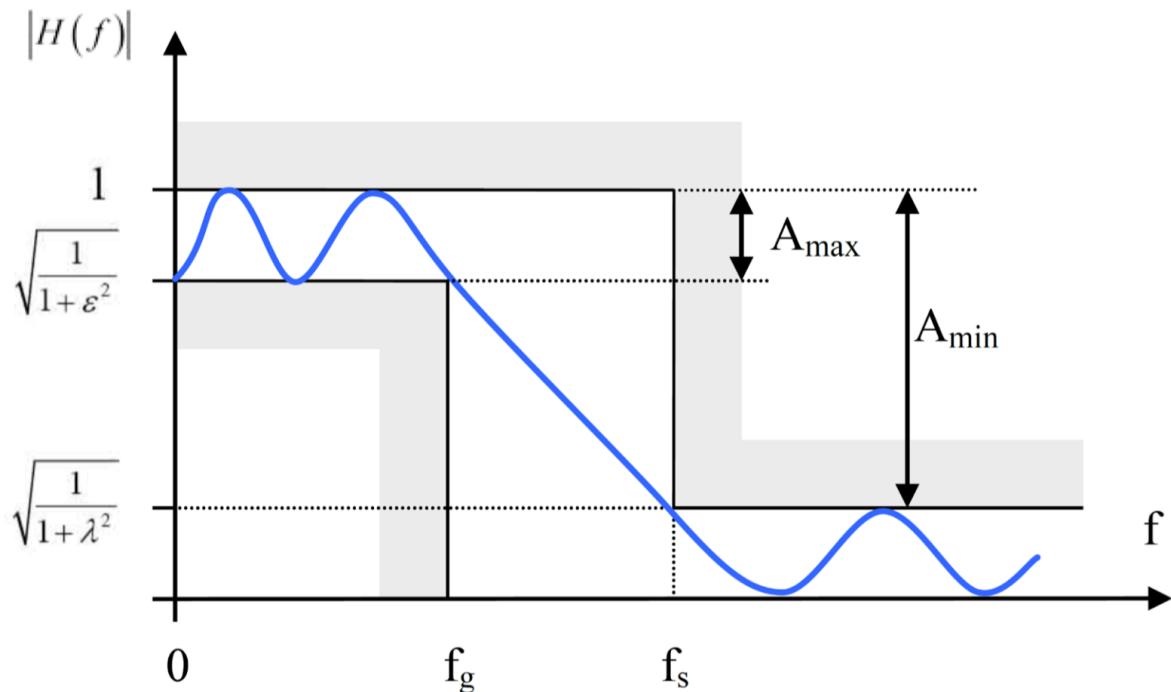
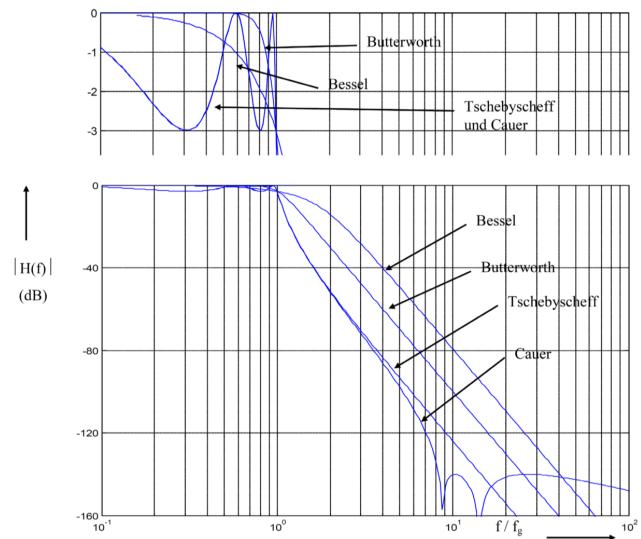


Abbildung 12: Filtermaske eines Tiefpassfilters

Zur Definition von Filtern gibt es verschiedene Approximationsverfahren

- **Butterworth**
 - Maximal flacher Durchlassbereich im Amplitudengang
- **Tschebyscheff**
 - Maximal steiler Übergangsbereich
- **Cauer**
 - Elliptische Funktion
 - Maximal steiler Übergangsbereich
- **Bessel**
 - Maximal flache Gruppenlaufzeit im Durchlassbereich

Abbildung 13: Approximationsverfahren für Filterordnung $n = 5$ und $A_{\max} = 3\text{dB}$

3.3 Leitergebundene Übertragung

Zur bestimmen ob ein Leiter mit der klassischen Schaltungstheorie oder mit Phänomenen der elektromagnetischen Welle betrachtet werden muss, wird der Begriff der elektrischen Länge verwendet

$$\text{Elektrische Länge} = \frac{\ell}{\lambda} \begin{cases} \leq \frac{1}{20} \\ > \frac{1}{20} \end{cases}$$

mit λ : Wellenlänge
 ℓ : Leitungslänge

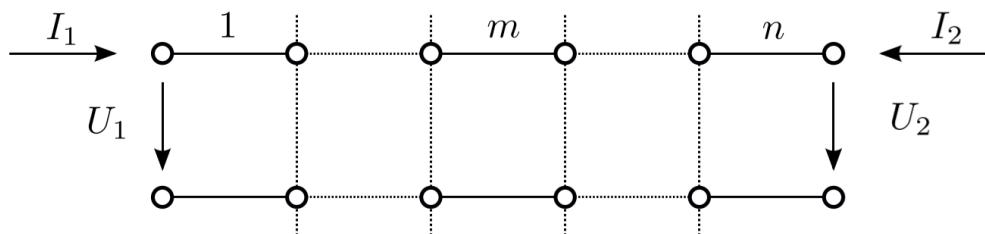
Leitung kann mit der klassischen Schaltungstheorie behandelt werden (meist als ideal).

Phänomene der elektromagnetischen Welle werden wirksam. Leitung muss mit frequenzabhängigen Eigenschaften behandelt werden.

Wobei die Wellenlänge λ über die Geschwindigkeit v der Signalwelle ($\max v_0 = 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$) im Übertragungsmedium mit der Frequenz f verbunden definiert ist durch

$$\lambda = \frac{c}{f} [m]$$

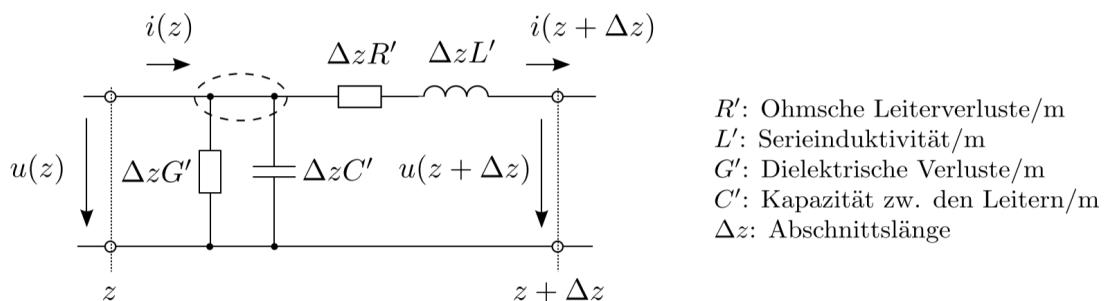
Längshomogene Zweidrahtleitungen aus metallischen Leitern können als Zweitorkette modelliert werden



Wird dabei die Weglänge $\Delta z = \frac{1}{n}$ betrachtet so kann angenommen werden, dass die Längsinduktivität ΔL und die Parallelkapazität ΔC gleichförmig über die Länge Δz verteilt sind. Diese werden in diesem Modell als **Leitungsbeläge** ausgedrückt

$$L' = \frac{\Delta L}{\Delta z} = \frac{L_I}{I} \left[\frac{H}{m} \right] \quad \text{und} \quad C' = \frac{\Delta C}{\Delta z} = \frac{C_I}{I} \left[\frac{F}{m} \right]$$

Werden desweiteren ohmsche Verluste und dielektrische Verluste dargestellt, so erhält man das Ersatzschaltbild einer Leitung



Durch den Grenzwertübergang $\Delta z \rightarrow 0$ erhält man die **Telegraphengleichung**

$$\frac{dI(z)}{dz} = -U(z)(G' + j\omega C') \quad \text{und} \quad \frac{dU(z)}{dz} = -I(z)(R' + j\omega L')$$

Durch gegenseitiges einsetzen erhält man die **Wellengleichung**

$$\frac{d^2 I(z)}{dz^2} = \gamma^2 I(z) \quad \text{und} \quad \frac{d^2 U(z)}{dz^2} = \gamma^2 U(z)$$

mit der **komplexen Ausbreitungskonstante**

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R' + j\omega L')(G' + j\omega C')}$$

α : Dämpfungsbelag in $[\frac{\text{Neper}}{m}]$ (Neper ist ein altes Dämpfungsmass)
 β : Phasenbelag in $\frac{\text{rad}}{m}$

β kann als Positionsabhängige Phasenverschiebung betrachtet werden.

Die allgemeinen Lösungen der Wellengleichungen lauten (V vorwärts laufend, R rückwärts laufend)

$$U(z, t) = (U_V e^{-\gamma z} + U_R e^{\gamma z}) e^{j\omega t}$$

$$I(z, t) = (I_V e^{-\gamma z} + I_R e^{\gamma z}) e^{j\omega t}$$

Die Wellenfront bewegt sich mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit (*propagation velocity*):

$$v = \frac{2\pi f}{\beta} = \frac{\omega}{\beta}$$

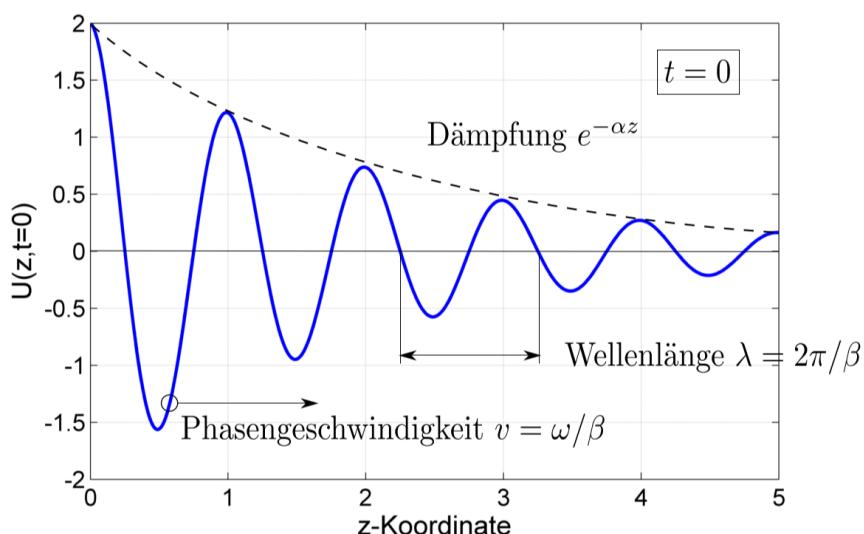
$$\text{Freiraum : } \lambda_0 = \frac{v}{f} = \frac{c_0}{f} \quad \text{Material : } \lambda = \frac{v}{f}$$

c_0, c : Lichtgeschwindigkeit ($299'792'458 \frac{m}{s}$ oder $3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}$)

Umrechnung der Spannungsreduktion von Neper N_p in Dezibel dB erfolgt durch

$$\alpha_{dB/m} = 10 \cdot \log_{10}(r) \cdot \alpha_{Np/m} = 20 \cdot \log_{10}(e) \cdot \alpha_{Np/m} = 8.686 \cdot \alpha_{Np/m}$$

Die Welle hat also eine exponentiell abfallende Form



3.3.1 Charakteristische Leitungsimpedanz Z_0

$$Z_0 = \frac{U(z, t)}{I(z, t)} = \sqrt{\frac{Z'}{Y'}} = \sqrt{\frac{R' + j\omega L'}{G' + j\omega C'}}$$

3.3.2 Leistungsfluss

Die Elektrische Leistung in der *Vorwärtswelle* wird mit den Effektivwerten berechnet

$$P_v = \frac{U_V I_V^*}{2} = \frac{|U_V|^2}{2Z_0}$$

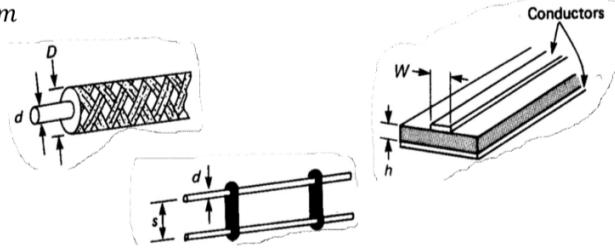
Für die *Rückwertswelle* wechselt das Vorzeichen der charakteristischen Impedanz und somit die Richtung des Leistungsflusses

$$P_R = \frac{U_R I_R^*}{2} = -\frac{|U_R|^2}{2Z_0}$$

3.3.3 Leitergeometrien

Verschiedene Leitergeometrien führen zu unterschiedlichen Impedanzen und Belägen

- Permeabilität der Luft: $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$
- Dielektrizitätskonstante: $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$
- ϵ_r : Dielektrische Konstante
- μ_r : Relative Permeabilität
- σ : Spezifische Leitfähigkeit des Leiters
- σ_d : Spezifische Leitfähigkeit des Dielektrikums
- R_s : Oberflächenwiderstand des Leiters



Wobei der Oberflächenwiderstand allgemein als

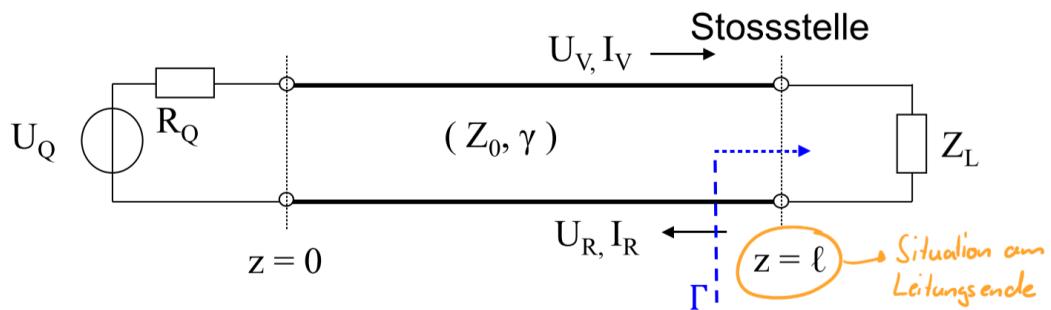
$$R_s = \sqrt{\frac{\pi \mu_{\text{Leiter}} f}{\sigma_{\text{Leiter}}}}$$

definiert ist. Die unterschiedlichen Belagsgrößen sind abhängig von der Leitergeometrie

	Symmetrische Zweidrahtleitung	Koaxialkabel	Leiterbahn
Kapazitätsbelag C' (F/m)	$\frac{\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(2s/d)}$	$\frac{2\pi \epsilon_0 \epsilon_r}{\ln(D/d)}$	$\frac{W \epsilon_0 \epsilon_r}{h}$
Induktivitätsbelag L' (H/m)	$\frac{\mu_0 \ln(2s/d)}{\pi}$	$\frac{\mu_0 \ln(D/d)}{2\pi}$	$\frac{\mu_0 h}{W}$
Widerstandsbelag R' (Ω/m)	$\frac{2R_s}{\pi d} \left(\frac{s/d}{\sqrt{(s/d)^2 - 1}} \right)$	$\frac{R_s}{\pi} \left(\frac{1}{D} + \frac{1}{d} \right)$	$\frac{2R_s}{W}$
Leitwertbelag G' (S/m)	$\frac{\pi \sigma_D}{\ln(2s/d)}$	$\frac{2\pi \sigma_D}{\ln(D/d)}$	$\frac{W \sigma_D}{h}$

3.3.4 Reflexionen an der Last

Entspricht die *Lastimpedanz* Z_L nicht der Leitungsimpedanz Z_0 so entsteht eine **Stosswelle** am Übergang. Es kommt zu einer (Teil-)Reflexion der vorlaufenden Signalwelle. Es wird eine neue rücklaufende Signalwelle erzeugt.



Das Verhältnis der Vor- und Rücklaufenden Amplituden bildet den **Reflexionskoeffizient**

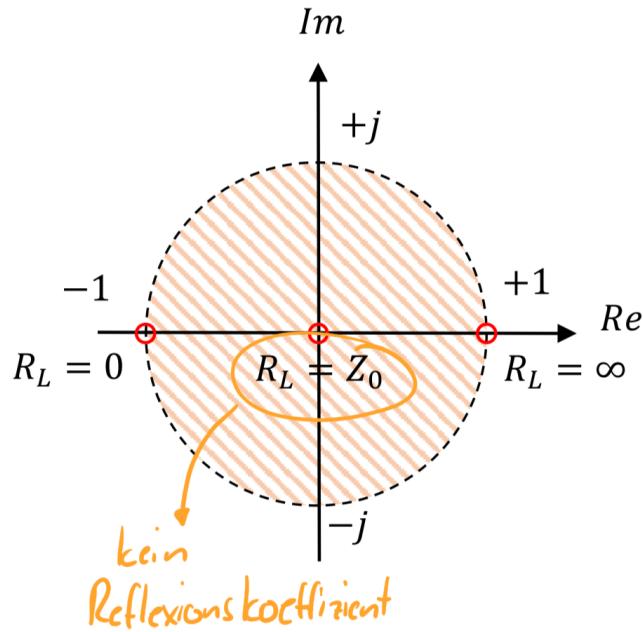
$$\Gamma_{z=\ell} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \frac{U_R}{U_V} = -\frac{I_R}{I_V}$$

$\Gamma_{z=\ell}$: Reflexionskoeffizient \rightarrow je näher an Null, desto besser.

i Spezialfälle Z_L

- $Z_L = 0\Omega \Rightarrow \Gamma = -1 \rightarrow U_{ZL} = 0, I_{ZL} = 2 \cdot I_V$
- $Z_L = \infty \Rightarrow \Gamma = +1 \rightarrow U_{ZL} = 2 \cdot U_V, I_{ZL} = 0$
- $Z_L = Z_0 \Rightarrow \Gamma = 0 \rightarrow U_{ZL} = U_V, I_{ZL} = I_V$

Der Wertebereich von Γ liegt innerhalb des Einheitskreises der komplexen Ebene



Die resultierende Spannung und Strom auf der Leitung ist die Überlagerung von vor- und rücklaufenden Signalwellen

$$U(z) = U_V \cdot e^{-\gamma z} + U_R e^{-\gamma(\ell-z)} = U_V \cdot e^{-\gamma z} (1 + \Gamma_L e^{-2\gamma(\ell-z)})$$

$$I(z) = I_V \cdot e^{-\gamma z} + I_R e^{-\gamma(\ell-z)} = \frac{U_V \cdot e^{-\gamma z}}{Z_0} (1 + \Gamma_L e^{-2\gamma(\ell-z)})$$

Der Reflexionskoeffizient entlang der Leitung entspricht

$$\Gamma(z) = \Gamma_L e^{-2\gamma(\ell-z)}$$

Die Impedanz auf der Leitung an einem beliebigen Punkt z entspricht

$$Z(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\gamma(\ell-z))}{Z_0 + Z_L \tanh(\gamma(\ell-z))}$$

und bei einer verlustlosen Leitung

$$Z(z) = \frac{U(z)}{I(z)} = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan(\beta(\ell-z))}{Z_0 + jZ_L \tan(\beta(\ell-z))}$$

3.3.5 Welligkeitsfaktor

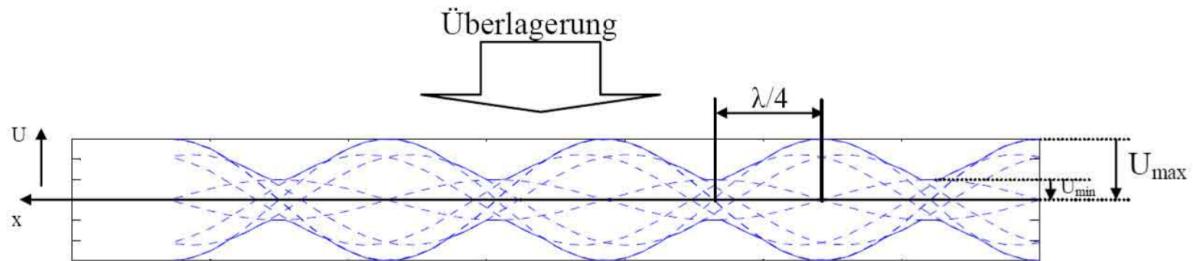
Die Überlagerungen der vor- und rücklaufenden Welle bildet örtliche Maxima und Minima, was zu einer stehenden Welle führt. Der Welligkeitsfaktor ist definiert durch

$$s = \frac{\hat{U}_{max}}{\hat{U}_{min}} = \frac{|U_V| + |U_R|}{|U_V| - |U_R|} = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|}$$

Die Rückflussdämpfung bezeichnet wie viel das rücklaufende Signal gegenüber dem vorlaufenden gedämpft ist

$$a = -\log_{10}(|\Gamma|^2)$$

Die Überlagerungen führen zu einer Hüllkurve



$$P_L = P_V(1 - |\Gamma|^2) \quad (3.1)$$

! Maximale Wirkleistungsübertragung

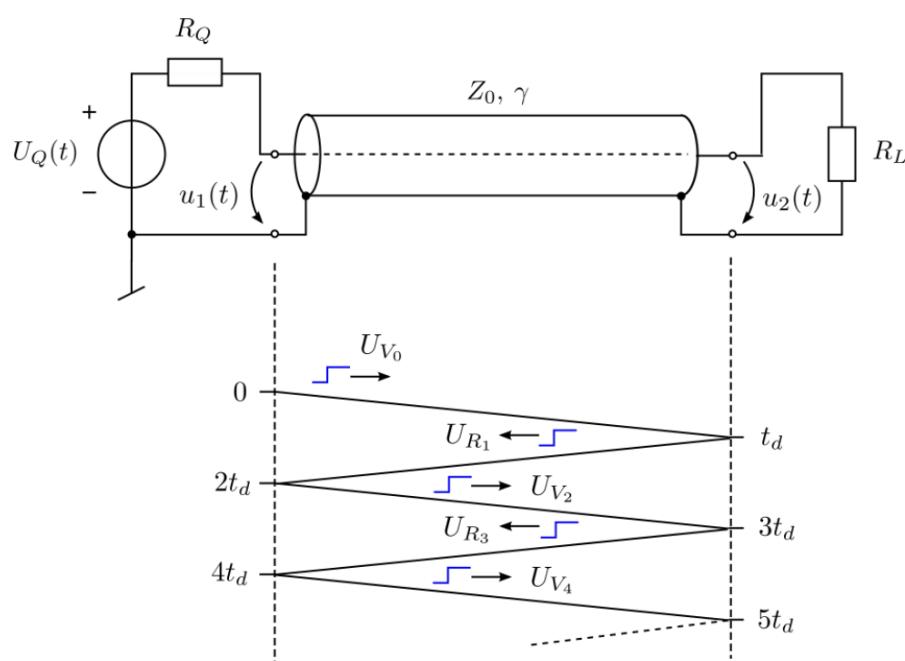
Die maximale Wirkleistungsübertragung von der Leitung zur Last kann nur erreicht werden, wenn Z_0 und Z_L reell und gleich gross sind.

3.3.6 Ausgleichsvorgang an einer Stossstelle

Die Verzögerung durch die Phasengeschwindigkeit des Leiters führt zu einem *verspäteten* Signalverlauf am anderen Ende des Leiters, dies wird mit der Laufzeit t_d dargestellt:

$$t_d = \frac{l}{v} = \frac{\beta \cdot l}{\omega}$$

Hat es unterschiedliche Impedanzen (Leiter-, Innen-, Lastimpedanz), kann es zu einem *Einschwingen* des Signales führen. Grund dafür sind die Reflektionen des Leiters, welches Stücke des Signals hin und her reflektiert, bis es den entsprechenden Wert erreicht.



Beide Enden des Leiters haben je einen Reflexionskoeffizienten: Γ_1 für den Anfang des Leiters (aus Sicht der Quelle) und Γ_2 für das Ende.

$$\Gamma_1 = \frac{R_Q - Z_0}{R_Q + Z_0} \quad \Gamma_2 = \frac{R_L - Z_0}{R_L + Z_0}$$

Die Spannungen $u_1(t)$ & $u_2(t)$ an den beiden Enden des Leiters entsprechen der Aufsummierungen der Reflexionsspannungen.

$$u_1(t) = \sum U_i \quad u_2(t) = \sum U_i$$

Zu Beginn wird das Signal von $U_Q = 1V$ angelegt und es dauert $1 \cdot t_d$ bis die Spannung U_{V0} das Ende des Leiters erreicht.

$$U_{V0} = U_Q \cdot \frac{Z_0}{R_Q + Z_0}$$

Da die Leiter- & Lastimpedanz unterschiedlich ist, wird das Signal mit dem Faktor $e^{-\gamma \cdot l} \cdot \Gamma_2$, wobei in diesem Beispiel mit $\gamma = 0$ gerechnet wird.

$$U_{R_1} = U_{V0} \cdot e^{-\gamma \cdot l} \cdot \Gamma_2$$

Wird zum Zeitpunkt $1 \cdot t_d$ die Spannung $u_2(t)$ mit einem Oszilloskop gemessen, misst man $u_2(t_d) = U_{V0} + U_{R_1} = \frac{4}{3}V$. Da auch die Innen- & Leiterimpedanz unterschiedlich sind, reflektiert das Signal mit dem Faktor $e^{-\gamma \cdot l} \cdot \Gamma_2$ zurück. Dies wiederholt sich, bis die Spannung eingeschwungen ist.

$$U_{V2} = U_{R_1} \cdot e^{-\gamma \cdot l} \cdot \Gamma_1$$

Folgend zeigt eine "Messung" von $u_2(t)$ mit folgenden Widerstandswerten: $R_Q = 0\Omega$, $Z_0 = 50\Omega$, $R_L = 100\Omega$, $l = 1m$, $v = 0.5c_0$

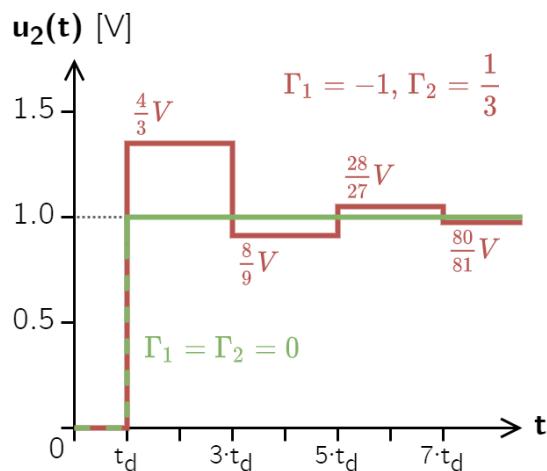


Abbildung 14: Ausgleichsvorgang $u_2(t)$

4. Drahtlose Signalübertragung & -Filterung

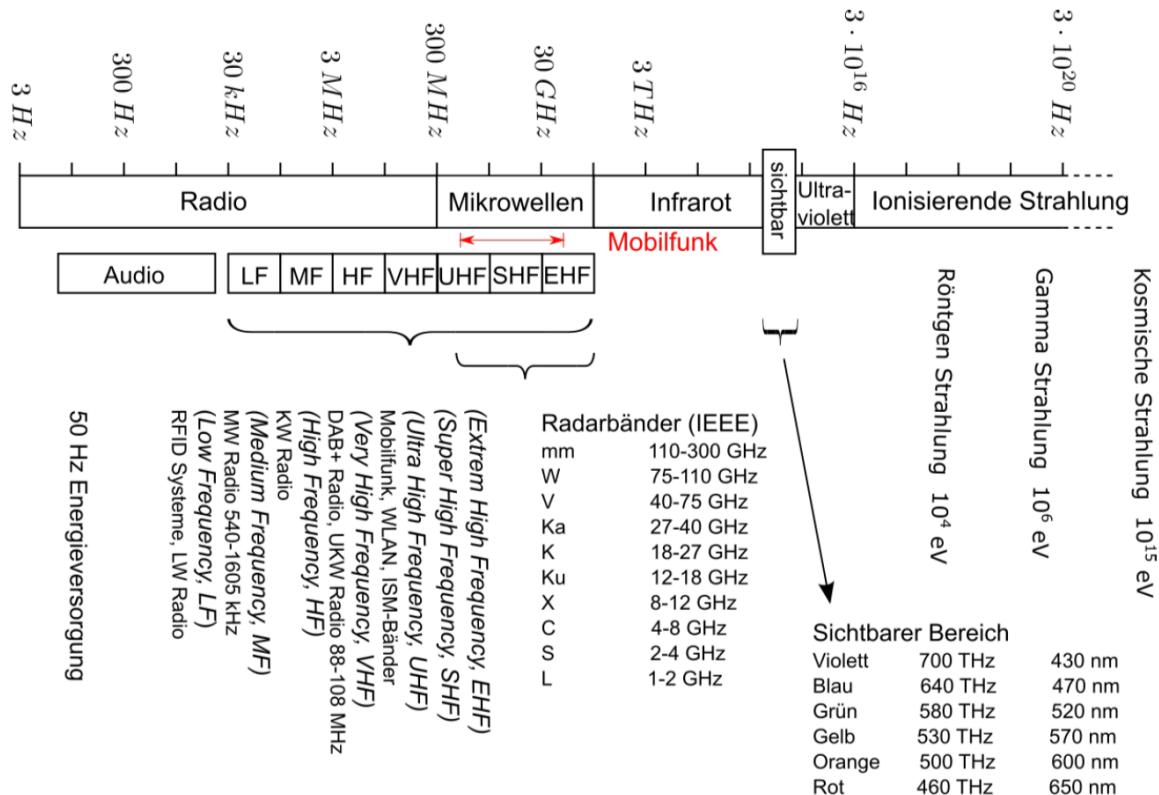
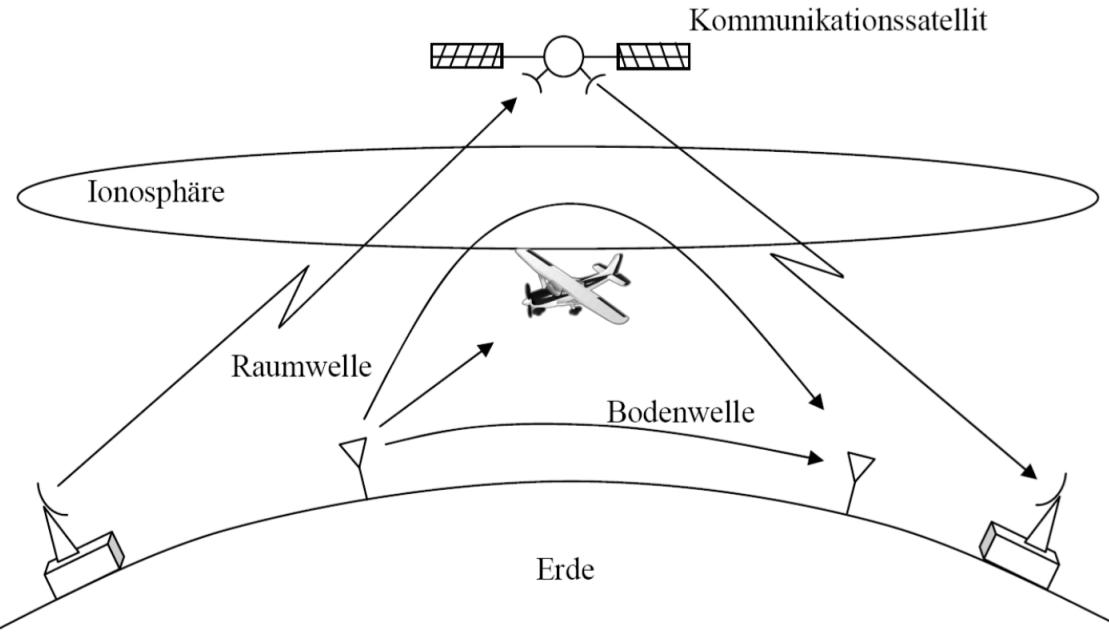


Abbildung 15: Spektrumsbereich

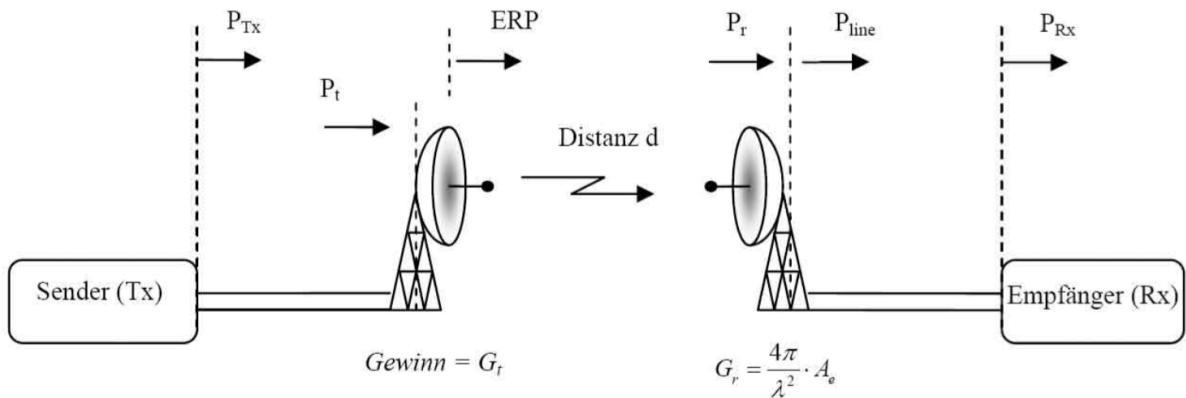
Es gibt verschiedene Ausbreitungsarten, welche zum Teil auch vom Spektrum abhängen

- *Bodenwelle* breitet sich entlang der "Materialgrenze" Luft-Boden aus
- *Direktverbindung* (auch *Line-of-Sight* oder *free space propagation*) im nicht ionisierenden Bereich der Atmosphäre
- *Raumwelle* erfolgt durch die Reflektion am ionisierten Bereich der Atmosphäre, ab ca. **100MHz** durchdringen Wellen die Ionosphäre



4.1 Linkbudget

Beim Entwurf eines Übertragungssystems interessiert primär die Leistung P_{Rx} am Empfängereingang. Diese ist jedoch abhängig von den Verlusten und Gewinnen der Sender, Kabel, Antennen.



Die Leistung am Empfänger kann also erhöht werden durch...

- Sendeleistung P_{Tx} erhöhen
- Verluste der Zubringerkabel minimieren
- Reflexionen an den Übergängen minimieren
- Sende- bzw. Empfangsgewinne G_t und G_r vergrössern

Die Empfangsleistung P_{Rx} muss dabei genügend gross sein, damit das Signal mit einer guten Qualität am Empfängereingang vorliegt. Für eine bessere Übersicht für einen *Systementwurf* wird ein Linkbudget aufgestellt

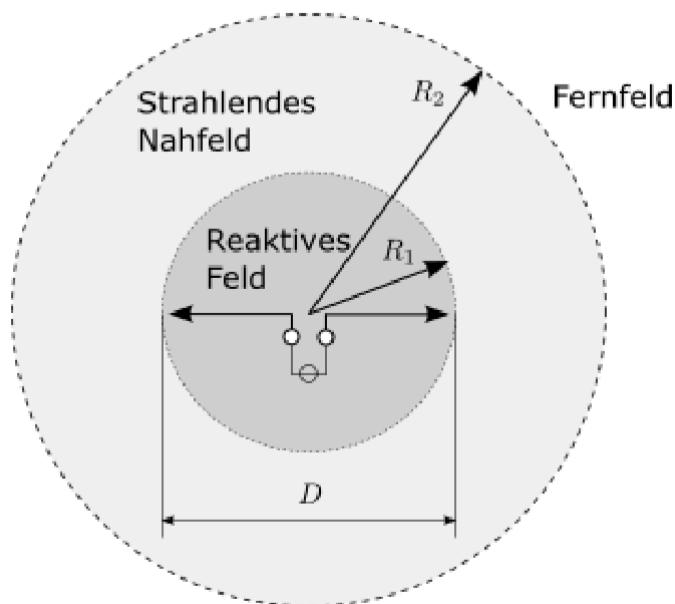
Komponente	Symbol	Beitrag	Leistung
Senderleistung (BT Klasse 2)	P_{Tx}	+4 dBm	2.5 mW
Stecker-, Kabel- und Anpassverluste	- (L_{con} , L_{line} , L_m)	-3.0 dB	
Antennengewinn (z.B. aus Herstellerangaben)	G_{Tx}	+2.5 dBi	
Equivalent Isotropic Radiated Power (eventuell vom Regulator eingeschränkt)	EIRP	$\Sigma = +3.5 \text{ dBm}$	2.2 mW
Freiraumdämpfung für $r = 10 \text{ m}$, $f = 2450 \text{ MHz}$ (Kanalmodell)	- L_{fs}	-60.2 dB	
Verfügbare Leistung am Empfangsort	P_r	$\Sigma = -56.7 \text{ dBm}$	2.4 nW
Polarisationsverluste	- L_p	-3.0 dB	
Antennengewinn	G_{Rx}	+2.5 dBi	
Stecker-, Kabel- und Anpassverluste	- (L_{con} , L_{line} , L_m)	-3.0 dB	
Minimale Empfängerempfindlichkeit	- P_{Rx}	-(-70 dBm)	
System- oder Link-Reserve	Margin	$\Sigma = +9.8 \text{ dB}$	

Abbildung 16: Linkbudget einer Bluetooth Verbindung (2.45 GHz)

4.2 Antenne

4.2.1 Fernfeld Kriterien

Das Feld einer Antenne kann konzeptionell in ein **Nahfeld** und ein **Fernfeld** aufgeteilt werden. Das *Nahfeld* kann nochmals in ein **reaktives Nahfeld** und ein **strahlendes Nahfeld** unterteilt werden.



Im **Fernfeld** erscheint jede Antenne als *Punktstrahler*, die Kugelform kann jedoch vernachlässigt werden und man nimmt für die Ausbreitung eine *ebene Wellenfront* an. Als **Fernfeld** gilt der Bereich ausserhalb R_2 , mit dem Grösseren Wert von

$$R_2 = \frac{2D^2}{\lambda} \quad \text{oder} \quad R_2 = 1.6\lambda$$

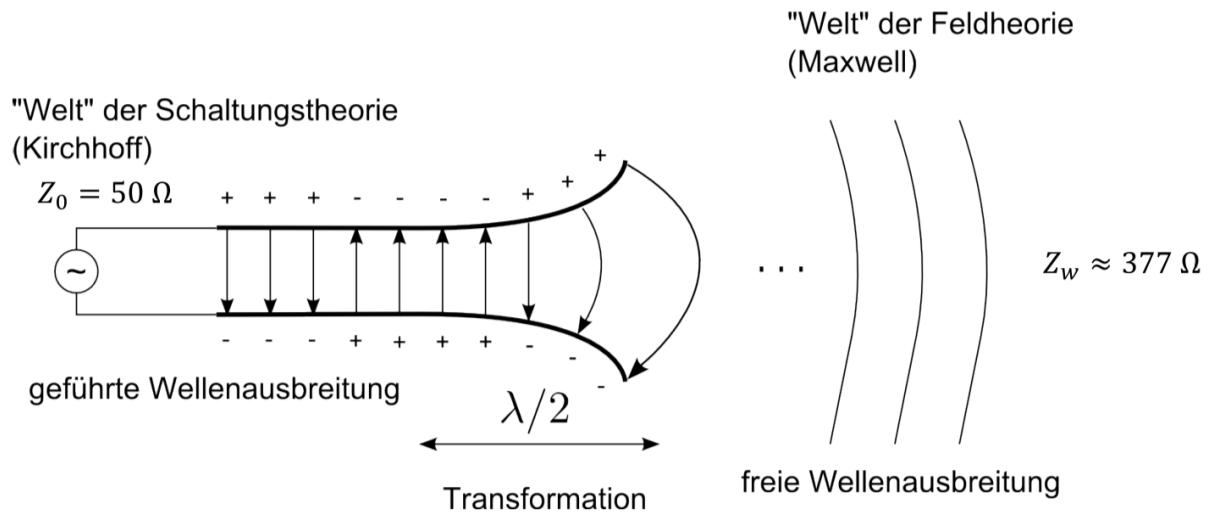
mit D als grösstes Antennenmass.

Der Übergangsbereich des **strahlenden Nahfeldes** hat die untere Grenze R_1 mit

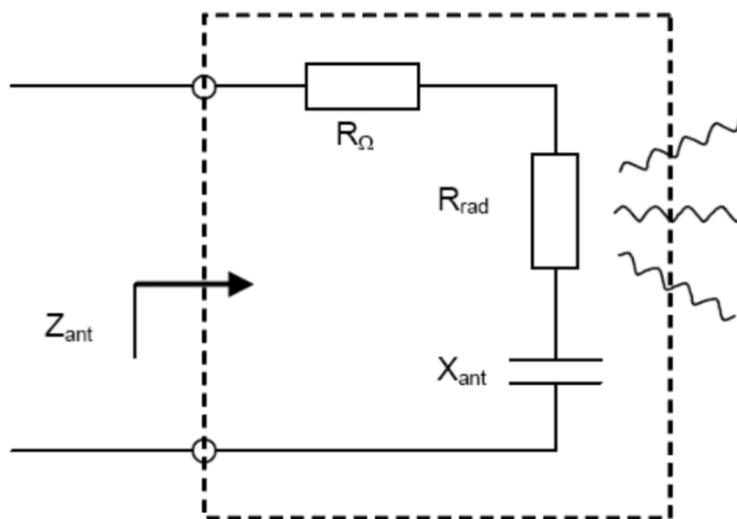
$$R_1 \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

4.2.2 Antennenimpedanz

Antennen können Allgemein als Impedanzwandler zwischen dem Übertrager (*Schaltungstheorie*) Z_0 und der Luft (*Feldtheorie*) $Z_w = \frac{E}{H} \approx 377 \Omega$ angesehen werden.



Die Antennenimpedanz Z_{ant} hängt direkt von der Antennengeometrie ab und kann als Ersatzschaltung dargestellt werden



Die Wichtigsten Eigenschaften sind hierbei

Die **Strahlungseffizienz** η ist definiert durch

$$\eta = \frac{R_{rad}}{R_\Omega + R_{rad}}$$

Wodurch auf den Antennengewinn G geschlossen werden kann

$$G = D \cdot \eta$$

Die abgegebene Leistung P_{ant} hängt direkt von der Anpassung von Zubringerkabel und Antenne ab

$$P_{ant} = P_t(1 - |\Gamma|^2) \quad \text{mit} \quad \Gamma = \frac{Z_{ant} - Z_0}{Z_{ant} + Z_0}$$

Die Reflexion beträgt dabei

$$\Gamma_{dB} = 10 \log_{10} (|\Gamma|^2)$$

Die *relative Bandbreite* B_r ist gegeben durch die Mittenfrequenz f_0 und die Bandbreite B bei xxdB

$$B_r = \frac{B}{f_0}$$

Z_{ant} Antennenimpedanz und Anpassung

R_Ω stellt die ohm'schen Verluste der Antennestruktur dar

R_{rad} entspricht der abgestrahlten *Wirkleistung*

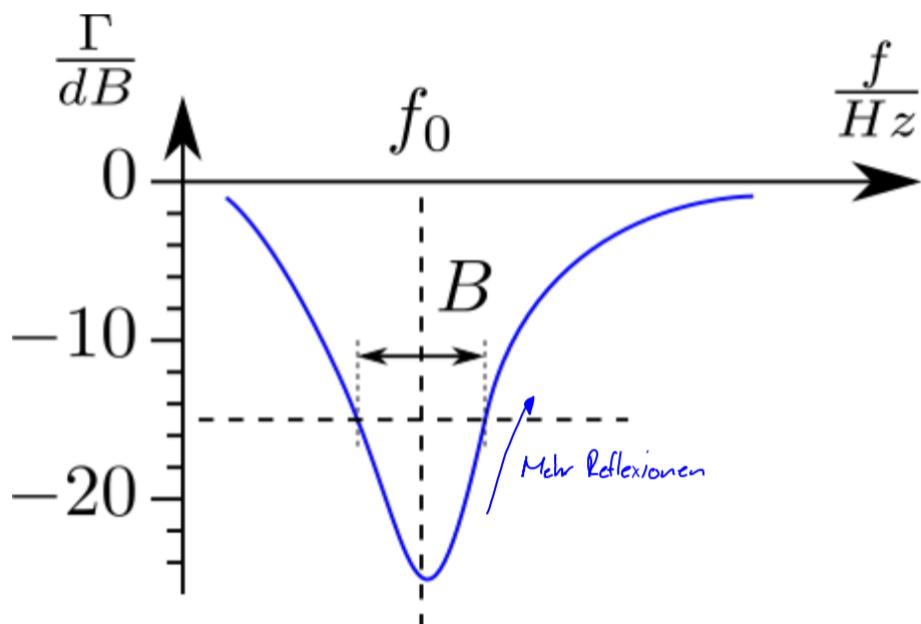
X_{ant} ist der Blindwiderstand, der vom *reaktiven Nahfeld* beeinflusst werden kann

D Richtwirkung (*nicht D als Antennenmass*)

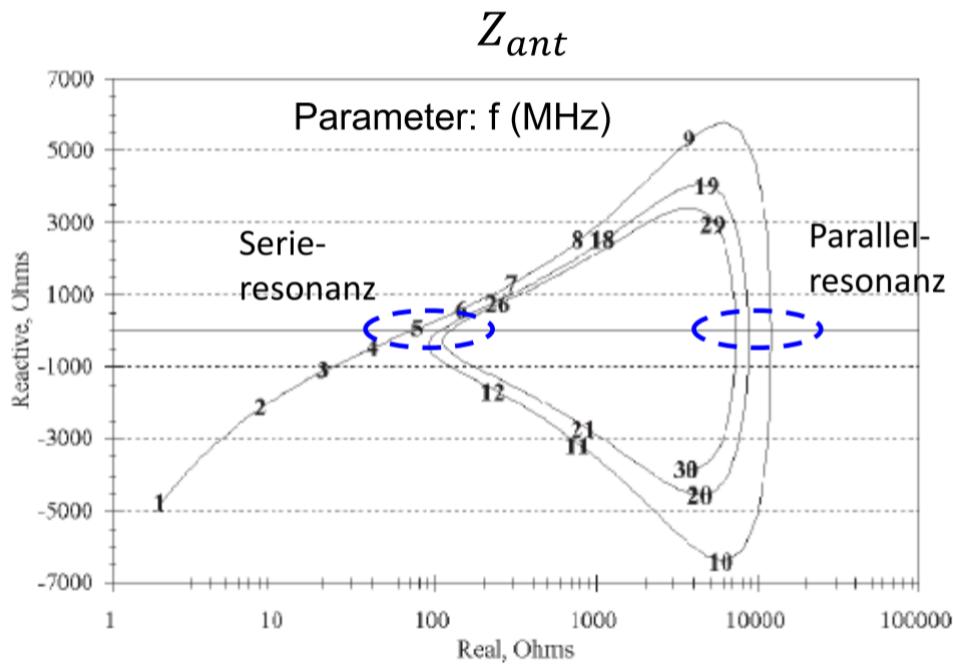
G Antennengewinn

Polarisation

B Bandbreite



Für einen effizienten Betrieb wird die Antenne bei Resonanz, also $X_{ant} = 0$, betrieben. Bei einem **Dipol** wird dies das erste mal bei einer Länge $\ell = \frac{\lambda}{2}$ erreicht und wiederholt sich bei *ganzzahligen Vielfachen* von $\frac{\lambda}{2}$.



4.2.3 Richtcharakteristik

Die Abstrahlcharakteristik wird mit zwei- und dreidimensionalen Diagrammen beschrieben. Der **isotrope Strahler** ist eine (*hypothetisch*) verlustlose Antenne die gleichmäig in alle Richtungen abstrahlt, wobei man im Abstand r die winkelunabhängige Leistungsdichte S_{iso} erhält

$$S_{iso} = \frac{P_{ant}}{4\pi r^2}$$

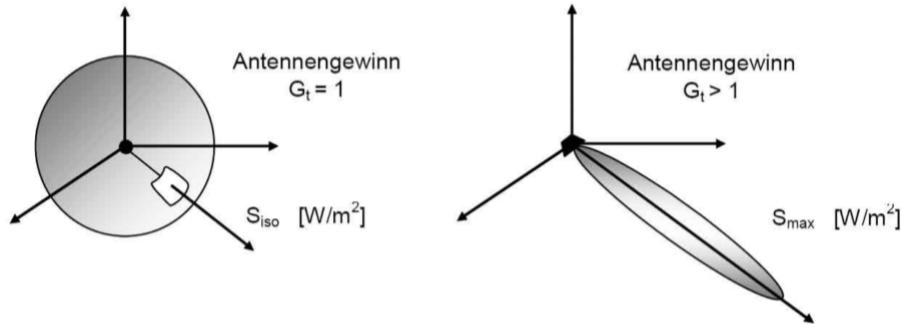
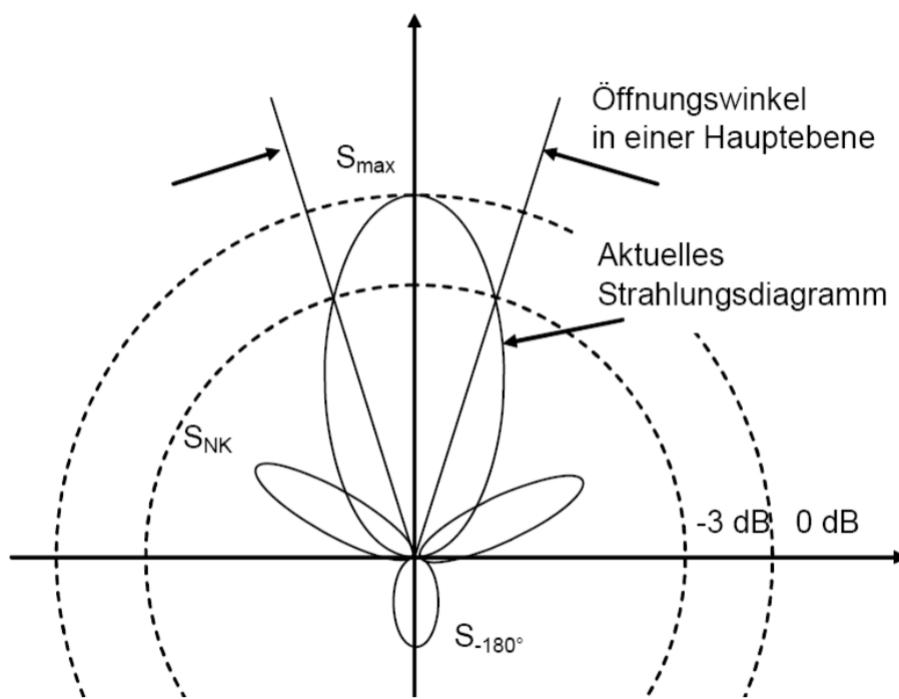


Abbildung 17: Antennengewinn für einen isotropen Strahler und eine gerichtete Antenne

Die Richtwirkung D beträgt beim *isotropen Strahler* 1. Bei einer *dipol-Antenne* gilt $D = 1.64$. Allgemein wird die Richtwirkung über die maximale Leistungsdichte $S(\theta, \varphi)_{max}$ einer gerichteten Antenne bestimmt (wobei $\Delta\theta_{-3dB}$ und $\Delta\varphi_{-3dB}$ den Öffnungswinkel in der Horizontalen- bzw. Vertikalen-Ebene beschreiben)

$$D = \frac{S(\theta, \varphi)_{max}}{S_{iso}} \approx \frac{32400}{\Delta\theta_{-3dB}\Delta\varphi_{-3dB}}$$



und der daraus schliessende Antennengewinn G ist

$$G = D\eta$$

4.2.4 Effektiv abgestrahlte Leistung

Die *Equivalent Isotropically Radiated Power EIRP* beschreibt, dass bei 1kW Leistung an einem *isotropischen Strahler* die Feldstärke H in 1km Entfernung $173 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$ beträgt.

$$EIRP = P_{ant} G_i$$

Die *Effektive Radiated Power ERP* beschreibt, dass bei 1kW Leistung an einem vertikalen *Referenzdipol* die Feldstärke H in 1km Entfernung $222 \frac{\text{mV}}{\text{m}}$ beträgt.

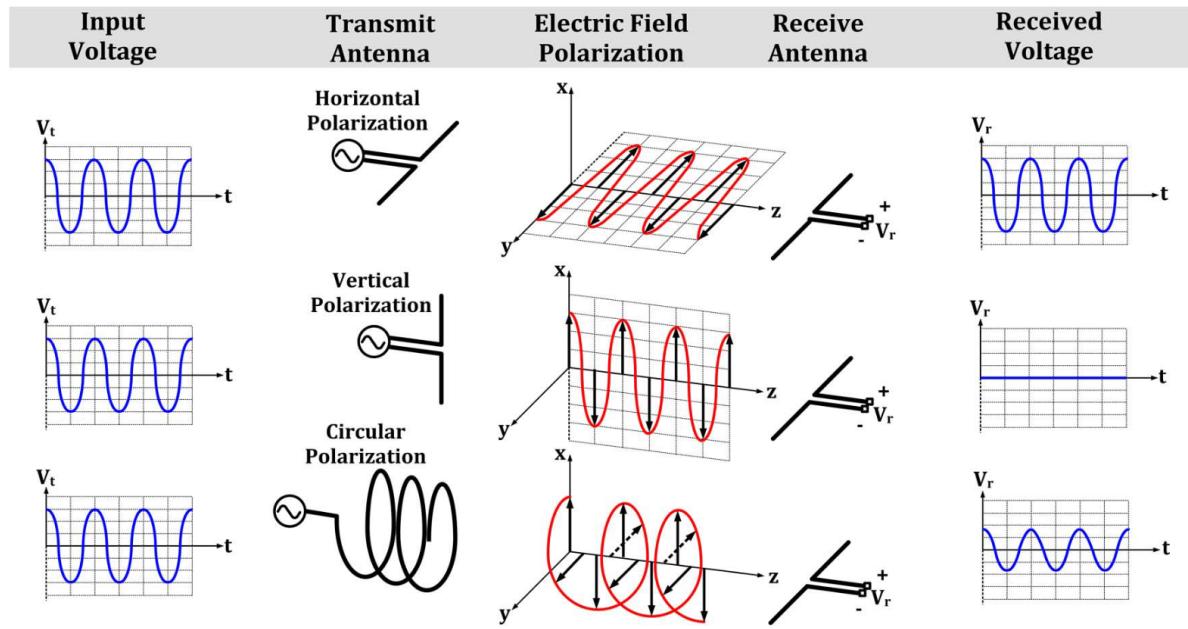
$$ERP = P_{ant} G_d$$

Die beiden Größen haben den direkten Zusammenhang

$$ERP = 0.61EIRP \quad \text{oder} \quad ERP_{dB_i} = EIRP_{dB_i} - 2.2dB$$

4.2.5 Feldpolarisation

Die Polarisation des elektromagnetischen Feldes entspricht der Swingungsebene des E-Feld-Vektors



Wenn die Polarisierung des Feldes nicht mit der Empfängerantenne übereinstimmt, so treten *Polarisationsverluste* L_p im Bezug auf die *Polarisationsrichtung* \vec{e}_E und der *Polarisation der Antenne* \vec{e}_{ant} auf

$$L_p = \frac{1}{|\vec{e}_E \cdot \vec{e}_{ant}|^2}$$

Diese können grob nach folgendem Schema, wobei *RHC* (Right Hand Circular), *LHC* (Left Hand Circular), Vertical und Horizontal gilt. Zudem gelten die 3dB* für alle Kombinationen zwischen linearer und zirkularer Polarisierung.

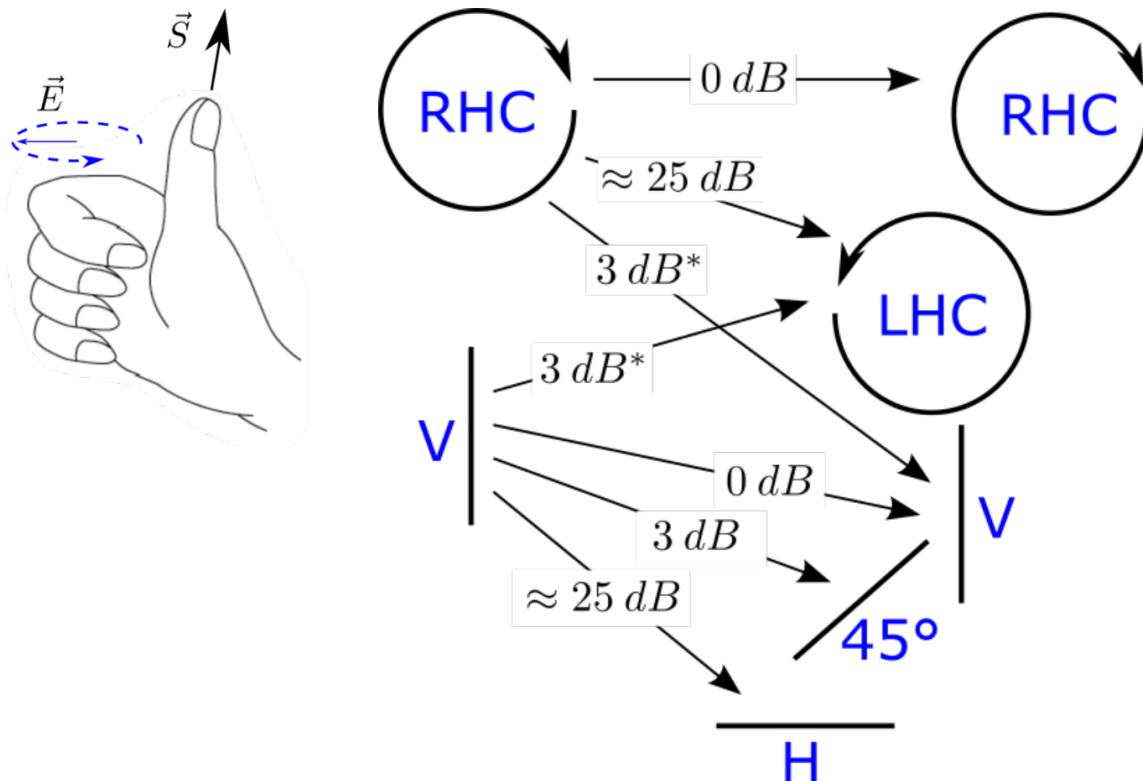


Abbildung 18: Polarisationsverluste zwischen entsprechenden Polarisierungen

4.3 Verfügbare Leistung am Empfangsort

Die verfügbare Leistung P_r ist proportional zur effektiv wirksamen Apertur A_e

$$P_r = S_r(\theta, \varphi) A_e = \frac{E^2}{Z_w} A_e = H^2 Z_w A_e$$

Effektive Apertur der Empfangsantenne

$$A_e = G \frac{\lambda^2}{4\pi}$$

Antennenfaktor

$$AF = \frac{E}{U} = \frac{9.73}{\lambda \sqrt{G}}$$

S_r : Strahlungsleistungsdichte [$\frac{W}{m^2}$]

E : Effektivwert el. Feldstärke [$\frac{V}{m}$]

H : Effektivwert magn. Feldstärke [$\frac{A}{m}$]

Z_w : Wellenimpedanz (Luft: 377Ω)

A_e : Effektive Aperture [m^2]

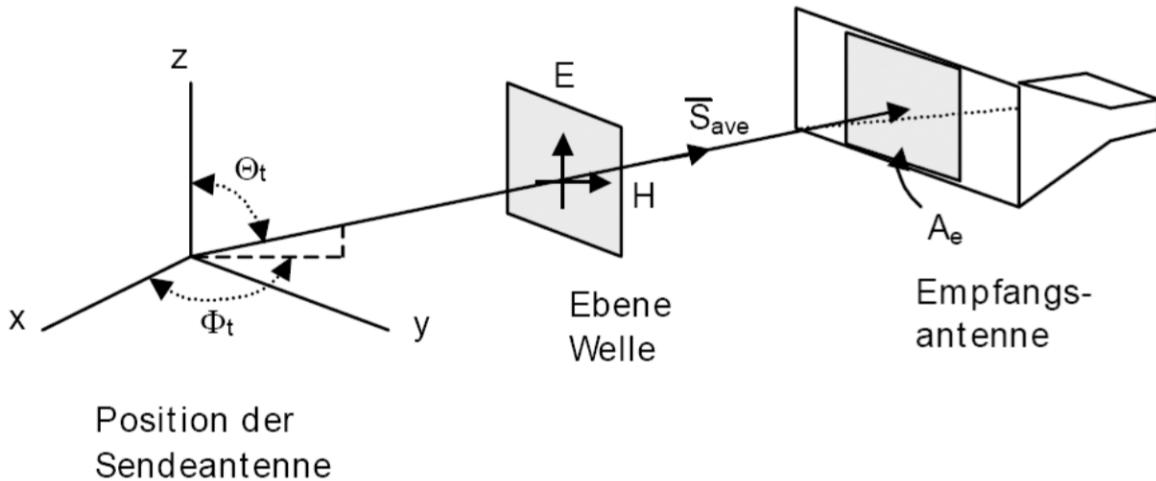
G : Antennengewinn

E : Elektrische Feldstärke [$\frac{V}{m}$]

AF : Antennenfaktor [$\frac{1}{m}$]

U : Signalspannung am Antennenanschluss [V]

λ : Wellenlänge



4.4 Ausbreitungsverluste einer Funkstrecke

! Wichtig

Folgende Betrachtungen gelten nur im **Fernfeld**

4.4.1 Freiraummodell

Die **Freiraumdämpfung** L_{fs} (*Free Space Path Loss*) gilt bei Sichtverbindung, Die EM-Welle wird nicht beeinflusst (idealer Funkkanal).

$$L_{fs} = \frac{P_t}{P_r} = \frac{P_t}{S_r A_e} = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

L_{fs} : Freiraumdämpfung

P_t : Sendeleistung

S_r : Strahlungsdichte am Empfangsort

A_e : Effektive Apertur (*isotroper Strahler*)

r : Distanz

$$L_{fs}[dB] = 32.4 + 20 \log_{10}(f[MHz]) + 20 \log_{10}(r[km]) \quad \lambda: \text{Wellenlänge}$$

4.4.2 Empirisches Kanalmodell

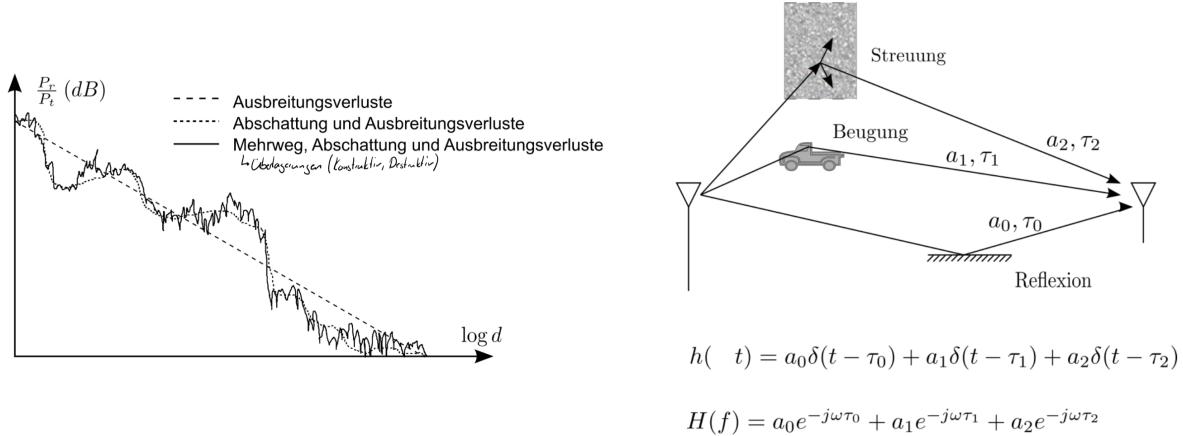
Empirisches Modell für Ausbreitungsverluste (*Power Law Propagation Regime*) ohne direkte Sichtverbindung. Parameter γ des Modells wird mit Hilfe einer Regression aus Messwerten bestimmt oder es werden Typische Werte (siehe Tabelle) angenommen. Die Referenzdistanz d_0 ergibt sich mit der Kalibrierung des Messaufbaus, z.B. $d_0 = 1m$

$$L_M = \left(4\pi \frac{d_0}{\gamma} \right)^2 \left(\frac{r}{d_0} \right)^\gamma \quad \text{oder} \quad L_M[dB] = 32.4 + 20 \log_{10}(f[GHz]) + 10\gamma \log_{10}(r[m])$$

Umfeld	γ Bereich
Makrozellen im Städtebereich (Zellradius 0.5-3 km)	3.7 - 6.5
Mikrozellen im Städtebereich (Zellradien 0.1-0.5 km)	2.7 - 3.5
Bürogebäude, gleiches Stockwerk	1.6 - 3.5
Bürogebäude, mehrere Stockwerke	2 - 6
Einkaufszentren	1.8 - 2.2

Umfeld	γ Bereich
Firmengelände	1.6 - 3.3
Einfamilienhaus	3
Ideale Freiraumdämpfung	2
Modell mit Bodenreflexion	4

Real gesehen spielen jedoch noch viele weitere Faktoren eine Rolle



4.4.3 Zeitvarianter Mehrwegkanal

Starke Signalschwankungen im Bereich einiger Wellenlängen, welche durch die Mehrwegausbreitung zustande kommen, nennt man **Rayleigh Fading Propagation Regime**. Man erhält für die *Signalspannung* $u(t)$ am Empfänger eine Rayleigh Verteilung mit

$$p(u) = \frac{1}{\bar{P}_r} e^{-\frac{u}{\bar{P}_r}}, u \geq 0 \text{ und } \bar{P}_r = 2\sigma^2$$

Mit der Mittleren Empfangsleistung \bar{P}_r des Signals, welche die Ausbreitungsverluste und die Abschattungsverluste beinhaltet. Die Leistungsverteilung folgt

$$p_{u^2}(x) = \frac{1}{\bar{P}_r} e^{-\frac{x}{\bar{P}_r}}, x \geq 0$$

Die Wahrscheinlichkeit für das *Unterschreiten einer minimalen Signalleistung* S_{min}

$$P[u^2 < S_{min}] = \int_0^{S_{min}} p_{u^2}(x) dx$$

Komplementär dazu die *Versorgungswahrscheinlichkeit*

$$P[u^2 \geq S_{min}] = 1 - P[u^2 < S_{min}]$$

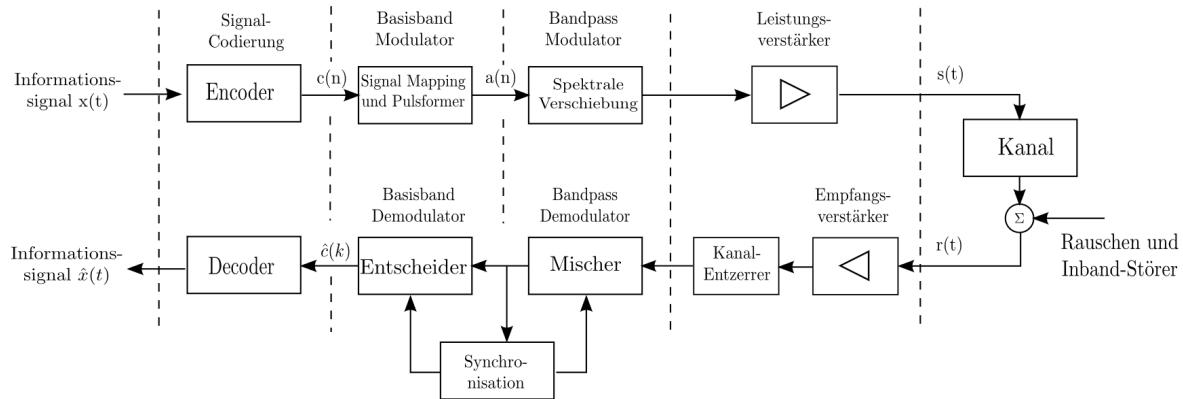
5. Modulation

5.1 Blockdiagramm eines Kommunikationssystems

Bei einer digitale Punkt-zu-Punkt-Übertragung werden Symbole aus einem bestehenden Alphabet versendet. Ein binäres System hat ein Alphabet mit nur zwei Symbolen, ein mehrwertiges System ein Alphabet mit

M verschiedenen Symbolen. Der **Modulator** setzt die Symbolfolge in ein für die Übertragung geeignetes Zeitsignal um. Der **Demodulator** schätzt die ursprüngliche Symbolfolge.

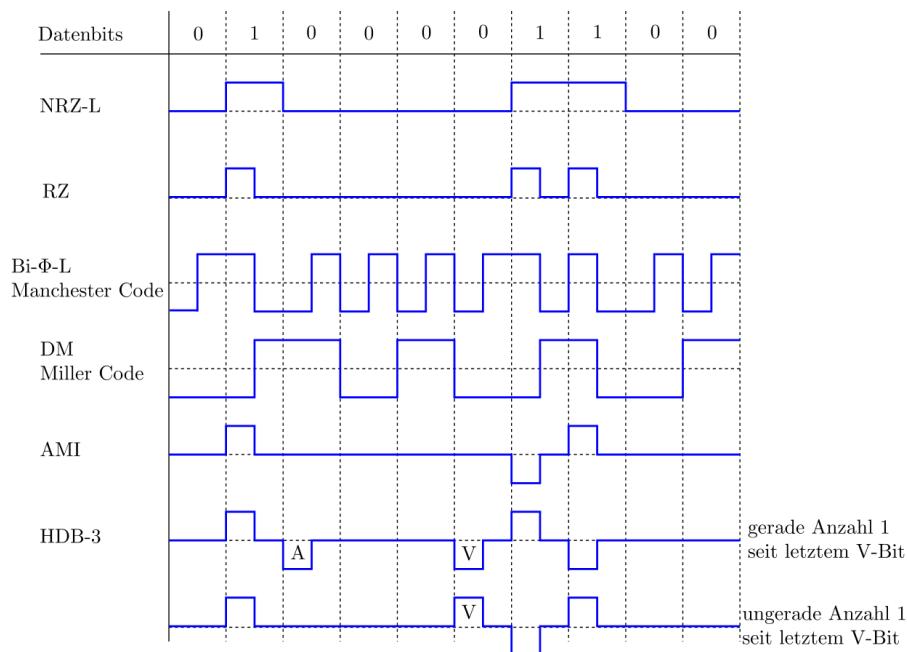
Während der Übertragung wird das Signal verzerrt und es kommt *weisses Rauschen (Gauss verteilte Amplituden)* zum Signal dazu.



5.2 Klassische binäre LeitungsCodes

Das Informationssignal als binärer Datenstrom wird als Leitungscode in einer Pulsfolge abgebildet, die der Charakteristik des Übertragungskanals angepasst ist.

- Non Return to Zero (NRZ) Code
- Bi-Phase, Manchester Code, (10-Mbit/s-Ethernet)
- Delay Modulation (DM), Miller Code
- Alternate Mark Inversion (AMI), modifizierter AMI-Code bei ISDN, (S_0 -Bus)
- High Density Bipolar (HDB-3), Telefonie, PCM30 Bündel



5.3 Basisbandmodulation

Übertragung im Basisband lässt Frequenzkomponenten von 0 Hz bis zu einer oberen Grenzfrequenz f_g zu → Tiefpass Charakteristik.

i Informationssignal Typ

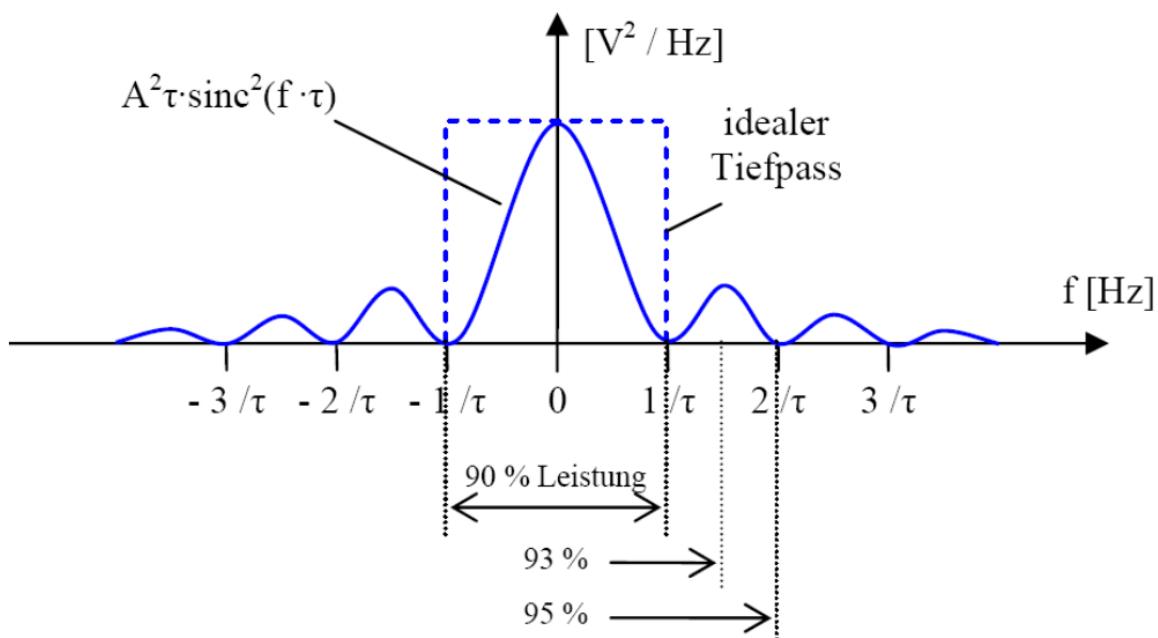
Wenn das Informationssignal in analoger oder digitaler Form vorliegt, werden unterschiedliche Implementierungskonzepte angewendet.

5.3.1 Bandbreitenbegrenzung

Eine informationstragende Pulssequenz stellt ein Zufallssignal dar. die mittlere normierte spektrale Leistungs-dichte einer Serie von polaren Rechteckpulsen für n Datenbits entspricht

$$G(f) = \frac{nA^2\tau^2 \text{sinc}^2(f\tau)}{n\tau} = A^2\tau \text{sinc}^2(f\tau) \quad \left[\frac{\text{V}^2}{\text{Hz}} \right]$$

mit Pulsamplitude A und Pulsbreite τ . Die Qualität ist proportional zur übertragenen AC-Signalleistung, die von der Kanalbandbreite abhängt



5.3.2 Basisbandmodulator

Digitales Symbol, Zahl

$\{0, 1\}$

- Binär: $T_b = T_s$
- 2 Bit pro Symbol: $2T_b = T_s$
- m Bit pro Symbol: $mT_b = T_s$

Bitdauer

T_b [s]

Bitrate

$$r_b = \frac{1}{T_b} \left[\frac{\text{bit}}{1} \right]$$

Beispiel

Physikalisches Symbol, Puls



Symboldauer

T_s [s]

Symbolrate

$$r_s = \frac{1}{T_s} \text{ [baud]}$$

Beispiel

- Amplitudenstufen: $2^1 = 2$
- Amplitudenstufen: $2^2 = 4$
- Amplitudenstufen: 2^m

Tipp

Bit- und Datenrate ist zu unterscheiden, da eine Bitrate die

i Fundamentaler Zusammenhang

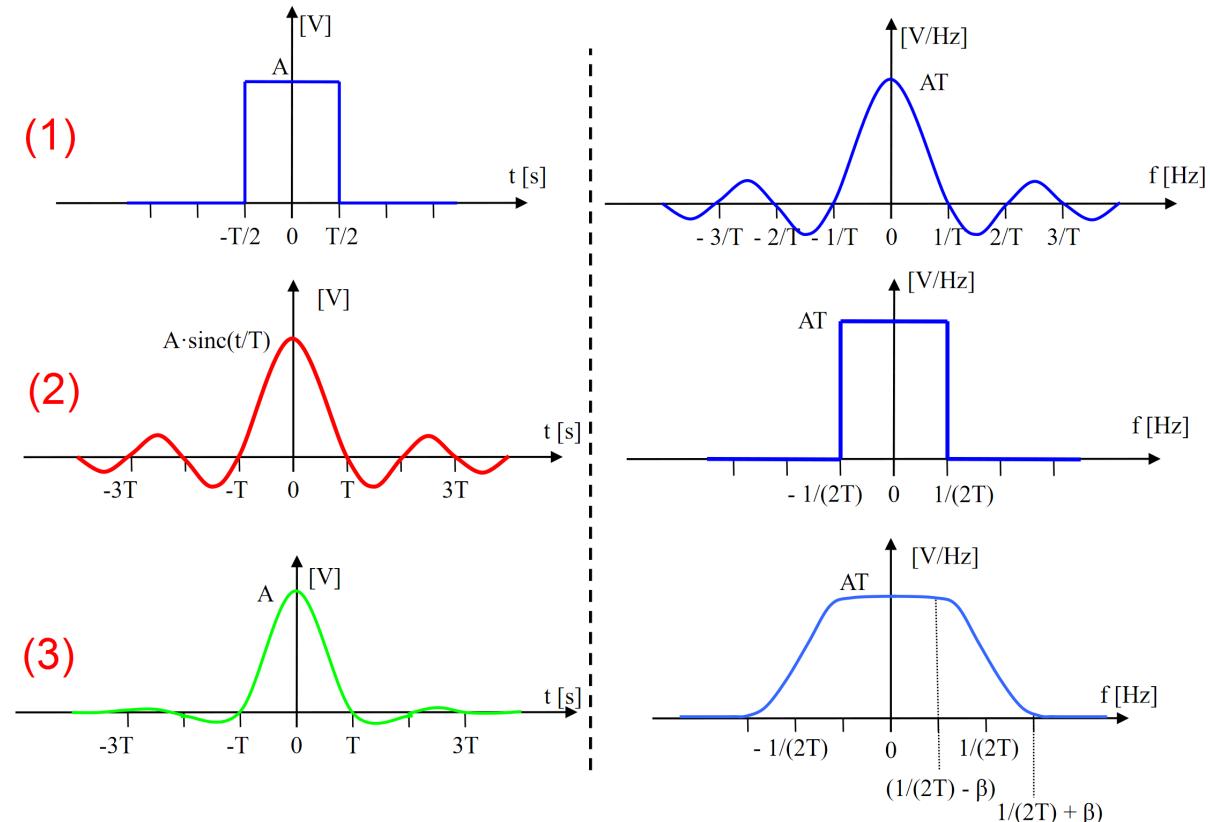
Pulsdauer \cdot Bandbreite \approx konstant

Es gilt also: je **kürzer** der Puls, desto **breiter** die Bandbreite

5.4 Angepasste Pulsformen

Um Pulse mit besseren spektralen Eigenschaften zu erhalten, wird der Rechteckpuls (1) angepasst. Die optimalen spektralen Eigenschaften besitzt ein *sinc*-Puls, welcher eine Bandbreite von T aufweist, jedoch einen unendlichen Puls darstellt.

Zur Entschärfung der zeitlichen Überlappungen wird der **Raised Cosine**-Puls verwendet



Der Impuls hat die Form

$$p(t) = A \text{sinc}(r_b t) \cdot \frac{\cos(2\pi\beta t)}{1 - (4\beta t)^2}$$

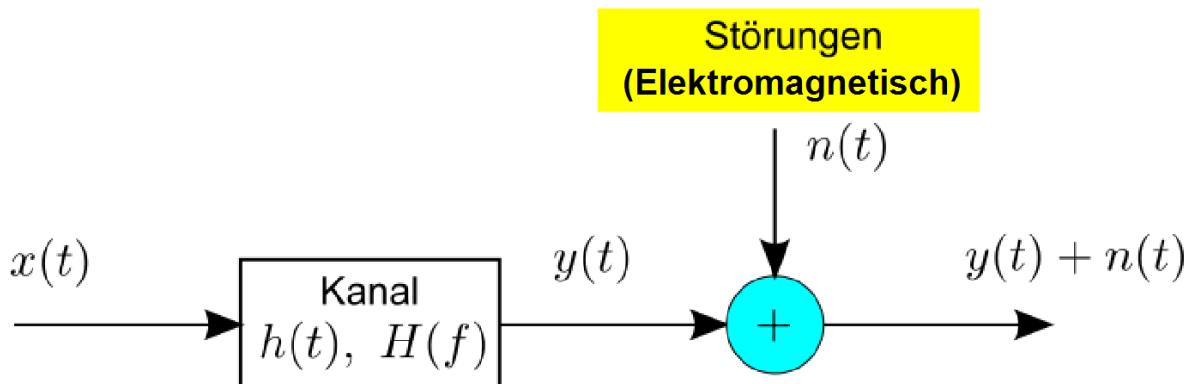
β hängt direkt von der Datenrate r_b , zur einfacheren Handhabung wird der *roll-off*-Faktor α in Prozent

$$\alpha = \frac{2\beta}{r_b} \cdot 100\%$$

Im Frequenzbereich beschreibt der Puls ein Spektrumsverlauf mit \cos^2 -förmige Flanke

$$P(f) = \begin{cases} \frac{1}{r_b} & |f| \leq \frac{r_b}{2} - \beta \\ \frac{1}{r_b} \cos^2 \left(\frac{\pi}{4\beta} (|f| - \frac{r_b}{2} + \beta) \right) & \frac{r_b}{2} - \beta < |f| < \frac{r_b}{2} + \beta \\ 0 & |f| \geq \frac{r_b}{2} + \beta \end{cases}$$

6. Elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)



i Hinweis

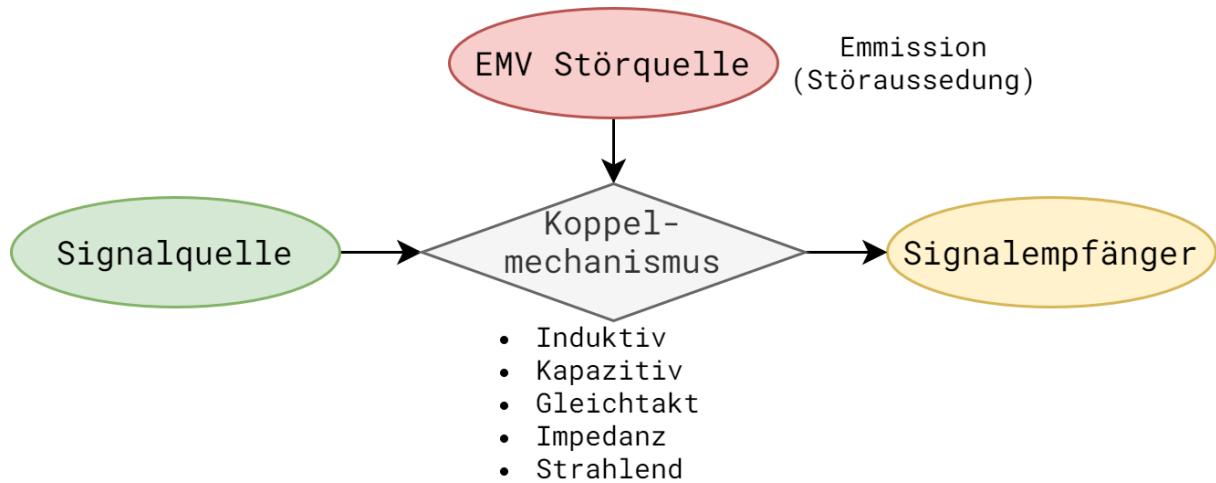
Elektrische Ladungen eines Wechselstroms (i), also der Änderungsrate des Stromes, erzeugen ein elektromagnetische Feld. → Somit ist ein elektronisches System von vielen unterschiedlichen Quellen von Störungen und Rauschen ausgesetzt.

Man unterscheidet diese Rauschquellen in drei Kategorie

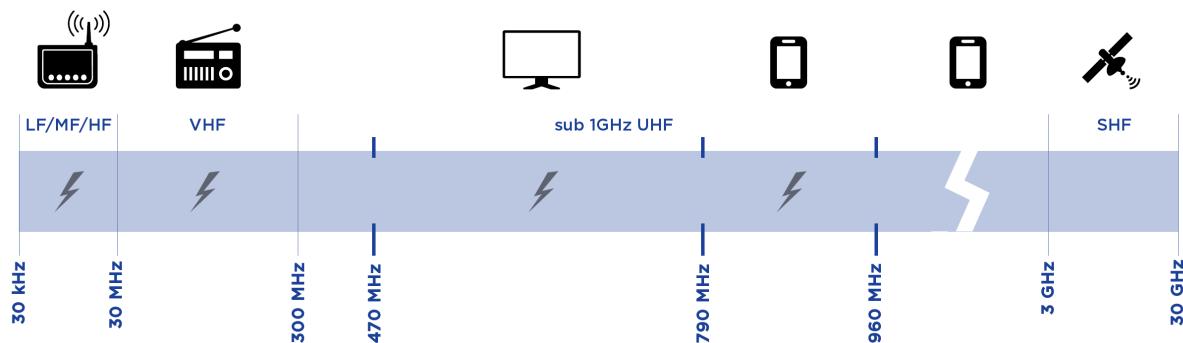
1. **Ausgesendetes Rauschen** – welches zusammen mit dem Nutzsignal empfangen. Diese Störung kann **nicht** vom Nutzsignal unterschieden werden!
2. **Intrinsisches Rauschen** – Rauschen innerhalb der Schaltung (z.B. thermisches Rauschen & Shot-Rauschen von Halbleitern)
3. **Externe Störgeräusche** – Werden vom System aufgefangen (z.B. entstehen durch Gewitterentladungen oder von anderen elektrischen Geräten)

Art	Herkunft
Schmalbandige Störsignale	z.B. Langwellen- und Mittelwellen-Radiosender
Breitbandige Störsignale	Mobilfunksignale, Datenkommunikation mit hoher Datenrate (Übersprechen von benachbarten Übertragungssystemen)
Periodische, pulshafte Störsignale, <u>synchron</u> zur Netzfrequenz	Leistungselektronik in der Antriebssteuerung
Periodische, pulshafte Störsignale, <u>asynchron</u> zur Netzfrequenz	z.B. getaktete Netzteile; diskrete Spektrallinien von 50Hz...200Hz

Art	Herkunft
Nichtperiodisches, pulshafte Rauschen	z.B. Gewitterentladungen; Impulsdauer bis einige Millisekunden
Farbiges Hintergrundrauschen	Verschiedene Quellen mit tiefer spektraler Leistungsdichte ; Zeitkonstante von Minuten bis Stunden



6.1 Elektromagnetisches Spektrum



$$T = \frac{1}{f} \quad \lambda = \frac{v}{f} \quad E = h \cdot f$$

T : Periodendauer

λ : Wellenlänge

f : Frequenz

v : Phasengeschwindigkeit

E : Photonenenergie ; mit der Frequenz übertragbare minimale Energie

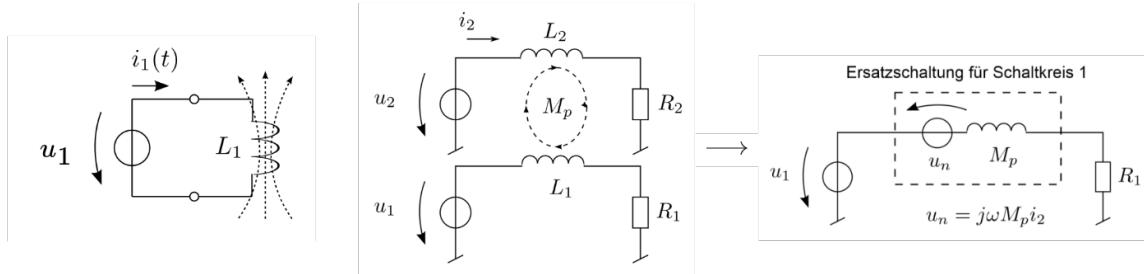
h : Plank'sche Konstante $4.136 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$

6.2 Störquellen

6.2.1 Magnetische Feldenergie

Gespeicherte magnetische Feldenergie im Nahbereich eines Schaltkreises

$$w_m = \frac{1}{2} \cdot L \cdot i^2$$



Für die induzierte Störspannung gilt

$$u_n = j\omega M_p i_2$$

Die parasitäre Gegeninduktivität ist gegeben mit

$$M_p = k \sqrt{L_1 L_2} \quad \text{mit } k \text{ als Koppelfaktor}$$

Ein Magnetfeld hat eine grosse H -Feldkomponente und eine kleine E -Feldkomponente. die Wellenimpedanz $|\eta| = |\frac{E}{H}|$ wird daher sehr klein.

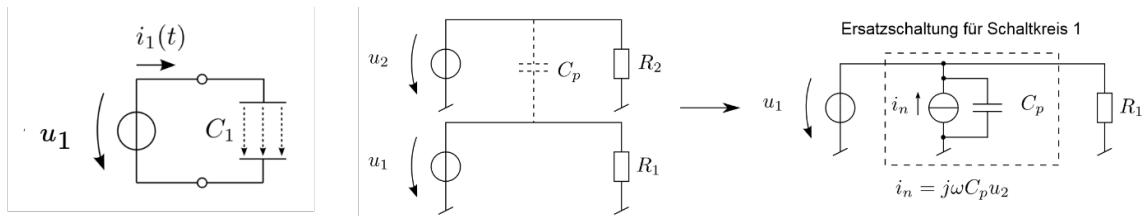
⚠ Erratische Ausfälle

Induktive Kopplung kann zu Erratischen (Nicht konstant vorhandenen) Ausfällen führen, wenn z.B. ein Motor neben dem DUT gestartet wird, treten höhere magnetische Energien auf.

6.2.2 Elektrische Feldenergie

Gespeicherte elektrische Energie im Nahbereich eines Schaltkreises

$$w_e = \frac{1}{2} \cdot C \cdot u^2$$



Für den eingekoppelten Störstrom gilt

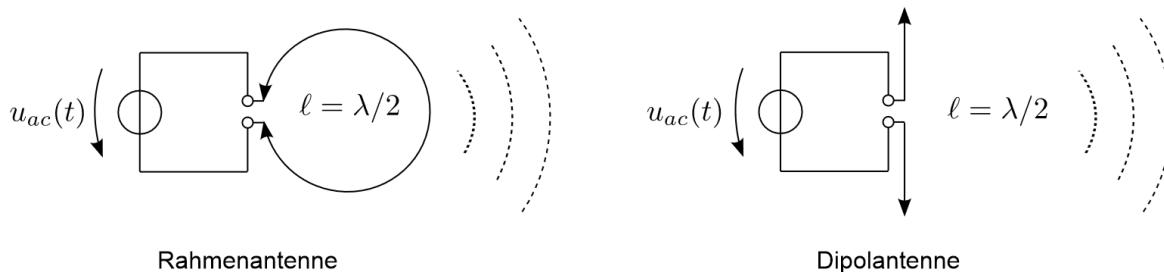
$$i_n = j\omega C_p u_2$$

Ein E -Feld besitzt im Nahfeldbereich eine viel grössere elektrische Feldkomponente gegenüber der magnetischen Feldkomponente. somit wird $|\eta| = |\frac{E}{H}|$ sehr gross.

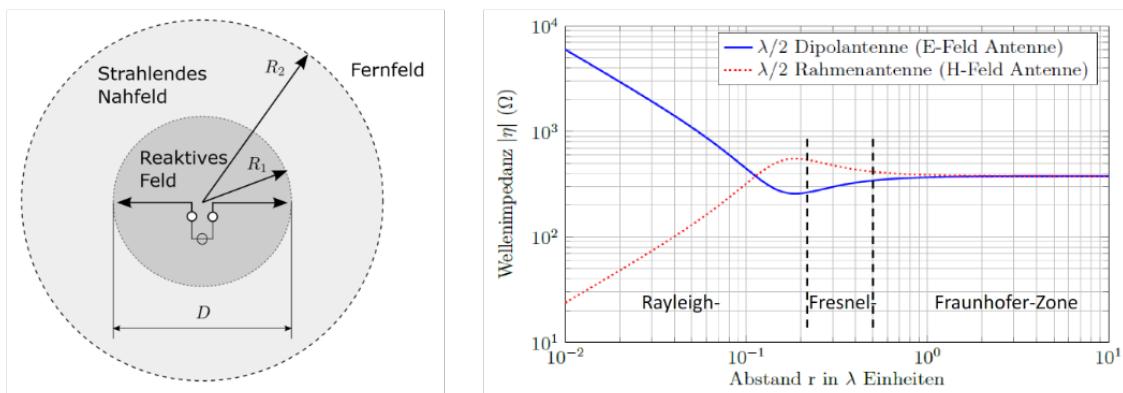
6.2.3 Abgestrahlte Feldenergie

Elektrisch lange Schaltkreise strahlen vermehrt Feldenergie ab

$$\text{Elektrische Länge} = \frac{\text{Physikalische Länge } \ell}{\text{Wellenlänge } \lambda} \quad \text{mit } \lambda = \frac{v}{f} \text{ mit } v \approx 3 \cdot 10^8 \frac{m}{s} \text{ (Vakuum)}$$



Feldzonen und Wellenwiderstand



$$R_1 \approx 0.62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}} \quad R_2 = \max \left(\frac{2D^2}{\lambda}, 1.6\lambda \right) \quad \eta = \frac{E}{H}$$

Tabelle 4: Eigenschaften eines EM-Feldes

	Nahfeld (<i>reaktives Feld</i>)	Fernfeld (<i>Strahlungsfeld</i>)
Energie	<ul style="list-style-type: none"> • speichert Energie • transport mittels induktiver- und kapazitiver-Kopplung 	<ul style="list-style-type: none"> • transportiert abgestrahlte Energie
Existenz	<ul style="list-style-type: none"> • verschwindet, wenn die Quelle ausgeschaltet wird 	<ul style="list-style-type: none"> • breitet sich aus, bis das Feld absorbiert wird
Interaktion	<ul style="list-style-type: none"> • Messen des Feldes ändert U/I des Quellenkreis • Entzug von Feldenergie ändert U/I des Quellenkreis 	<ul style="list-style-type: none"> • entnommene Energie merkt der Sender nicht

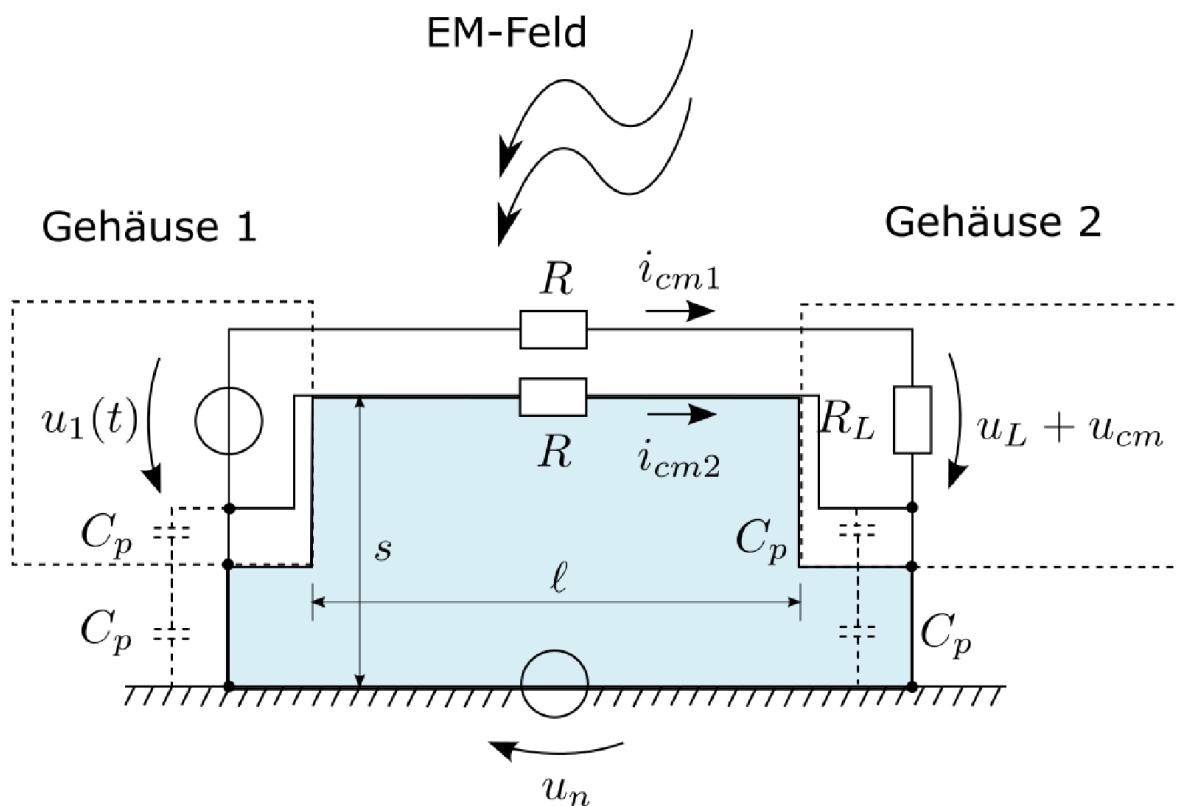
	Nahfeld (<i>reaktives Feld</i>)	Fernfeld (<i>Strahlungsfeld</i>)
Form des Feldes	<ul style="list-style-type: none"> • hängt von Quelle ab 	<ul style="list-style-type: none"> • Kugelwelle • ab grosser Distanz: Ebene Wellenfront
Wellenimpedanz	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig von Erzeugerschaltung 	<ul style="list-style-type: none"> • Abhängig vom Ausbreitungsmaterial (<i>Wellenimpedanz</i>)
Wellenführung	<ul style="list-style-type: none"> • Energieführung mittels Leitungen (<i>transmission line</i>), basierend auf der Kopplung im Nahfeld 	<ul style="list-style-type: none"> • Energieführung mittels Wellenleiter (<i>wave guide</i>), basierend auf Reflexion an Grenzflächen

6.2.4 Gleichtakt-Störung

Das unbeabsichtigte Abstrahlen eines EM-Feldes hängt primär vom Strom ab. Bei der **Gegentaktabstrahlung** haben die Ströme auf dem Hin- und Rückpfad die gleiche Stärke, aber unterschiedliche Vorzeichen. Die Abstrahlung hängt beim Doppelleiter von der Fläche zwischen den Leitern ab (*Rahmenantenne*). Sind beide Leiter nahe beieinander, bewirkt dies eine Abstrahlung nahezu Null ($d \ll \lambda$). Bei der **Gleichtaktabstrahlung** besteht infolge kapazitiver Kopplung alternative Signalpfade oder alternative Rückwege. Dies führt dazu, dass der Rück-Strom i_{r1} im Vergleich zum Hin-Strom i_s aufgrund des "Leck"-Stroms i_{r2} nicht gleich gross sind und es so zu einem Netto-Strom i_{netto} führt (*Stabantenne*).

Störeinkopplung infolge Erdschlaufe

Werden z.B. zwei Gehäuse über Erde miteinander verbunden, kann dies zu einer Rahmenantenne führen, welche Störeinkopplungen hervorbringt.



Die induzierte Spannung in einem **kleinen Loop** ($\ell < \frac{\lambda}{2}$) liegt hierbei bei

$$u(t) = \frac{2\pi\ell s E f}{300} [\text{MHz}]$$

$$u(t) = \pi s E$$

E : Elektrische Feldstärke [$\frac{V}{m}$]

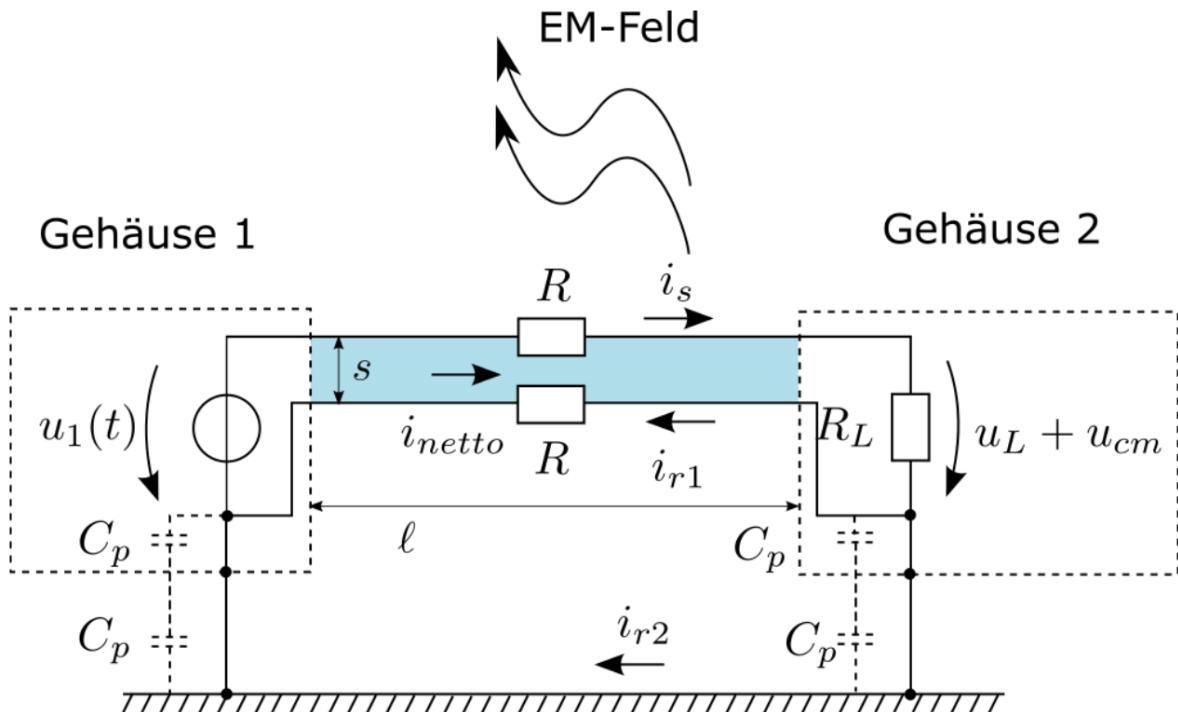
ℓs : Loopfläche [m^2]

f : Frequenz [MHz]

λ : Wellenlänge [m]

Störabstrahlung infolge asymmetrischer Strom

Aufgrund des asymmetrischen Stroms i_{netto} auf der Leitung, entsteht eine Störabstrahlung. Die Ursache für den asymmetrischen Strom findet sich im alternativen Rückweg i_{r2} des Signalstroms über das geerdete Gehäuse.



Die abgestrahlte Feldstärke in einem Punkt P im Fernfeld ist definiert mit

kleiner Dipol ($\ell < \frac{\lambda}{2}$)

$$E = \frac{\eta_0 i_{netto} \ell f}{600d} [\text{MHz}]$$

grosser Dipol ($\ell > \frac{\lambda}{2}$)

$$E = \frac{\eta_0 i_{netto}}{4d}$$

kleiner Loop ($\ell < \frac{\lambda}{2}$)

$$E = \frac{\eta_0 i_{netto} \ell s f^2}{300^2 d} [\text{MHz}]$$

grosser Loop ($\ell > \frac{\lambda}{2}$)

$$E = \frac{\pi \eta_0 i_{netto} s}{600d}$$

E : Elektrische Feldstärke [$\frac{V}{m}$]

ℓs : Loopfläche [m^2]

f : Frequenz [MHz]

λ : Wellenlänge [m]

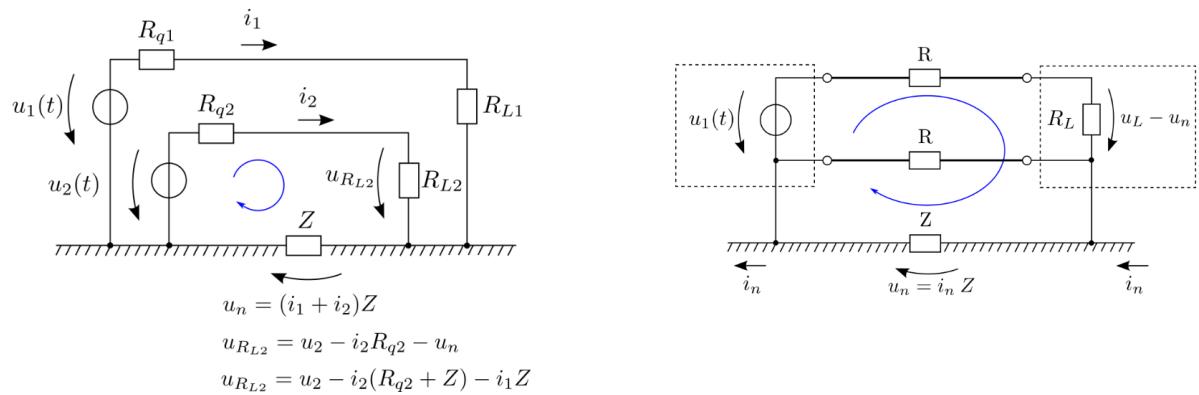
η_0 : Wellenimpedanz (Fern) [377Ω]

i_{netto} : Antennenstrom [A]

d : Distanz zu P [m]

6.2.5 Impedanzkopplung

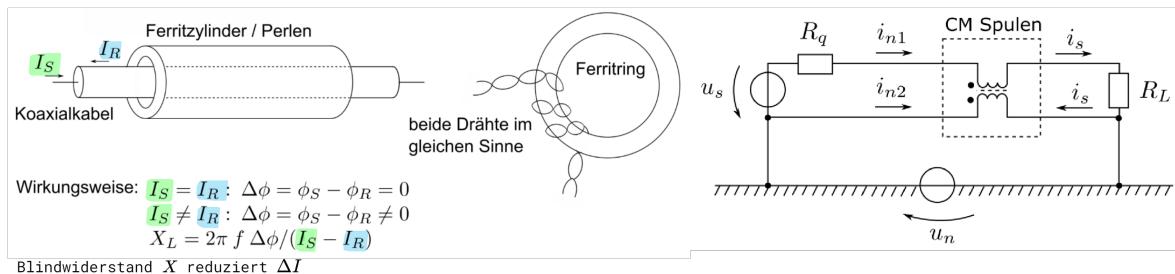
Störeinkopplungen zwischen zwei Schaltkreisen erfolgt über die **gemeinsame Nutzung** des Rückleiters. Des Weiteren kann ein Störstrom i_n im Rückleiter zu einer Störeinkopplung in die symmetrische bzw. asymmetrische Übertragung führen



6.3 Störunterdrückung

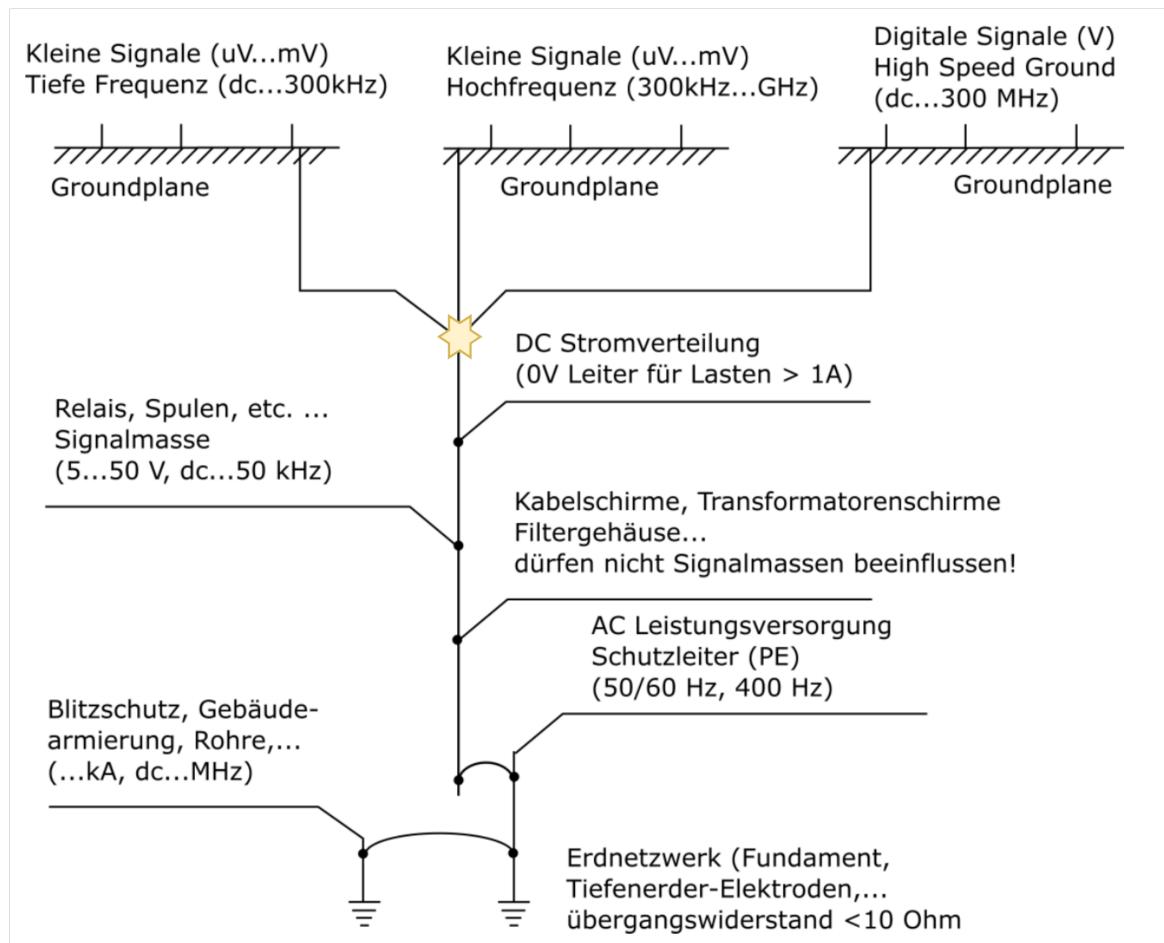
6.3.1 Gleichtakt Störunterdrückung

Zur Unterdrückung von Gleichtaktstörungen werden *Common-Mode-Chokes* oder *Ferritperlen* verwendet. Diese behindern das Magnetfeld, welches entsteht, wenn der Hin- und Rückstrom nicht gleichgross sind ($i_{netto} \neq 0$).



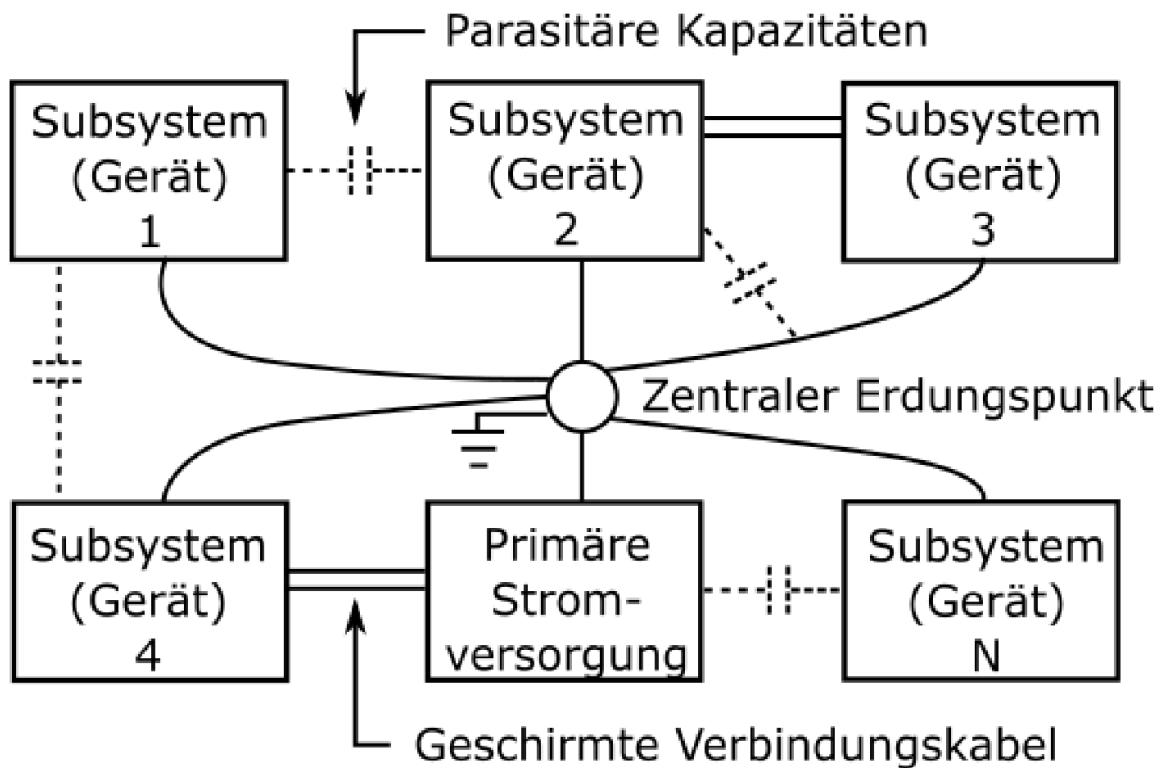
6.3.2 Erdung

Die *Erdung* von Schaltkreisen, Geräten und Systemen muss verschiedene Aufgaben lösen. Um Das Problem der Impedanzkopplung zu reduzieren, bildet man Signalklassen. Die Hirarchie der Erdung für Signalklassen können mit einem Erdungsbaum dargestellt werden.



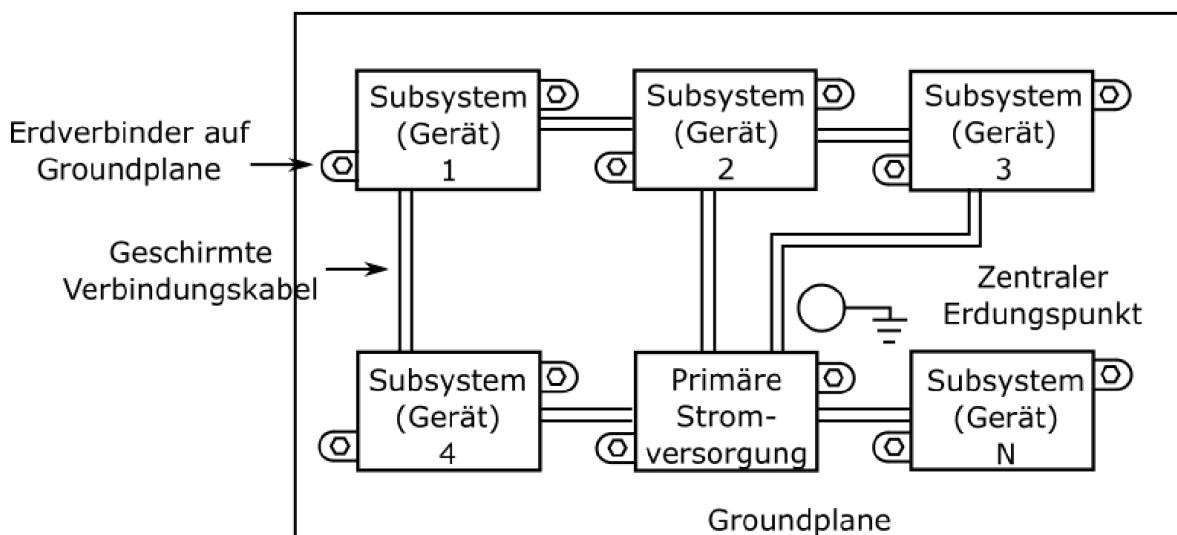
Sternpunkt

Die Verbindung aller Erden auf einen zentralen Erdungspunkt oder Schiene ist aufgrund der auftretenden parasitären Frequenzen nur bis ca. 300kHz geeignet. Oft ist es schwierig eine saubere Sternpunktarchitektur auszulegen, da bei Verbindungen unter den Systemmodulen auch eine gewollt/ungewollte Erdverbindung auftreten kann.



Mehrpunkt-Erdungsschema

Bei Frequenzen über 300kHz ist ein Mehrpunkt-Erdungsschema besser geeignet, da so die parasitären Kapazitäten wegfallen. Hierbei wird eine Groundplane (*Erdungsfläche*) aufgezogen, auf welcher alle Komponenten geerdet werden. Diese Fläche wird anschliessend an einem zentralen Punkt geerdet.

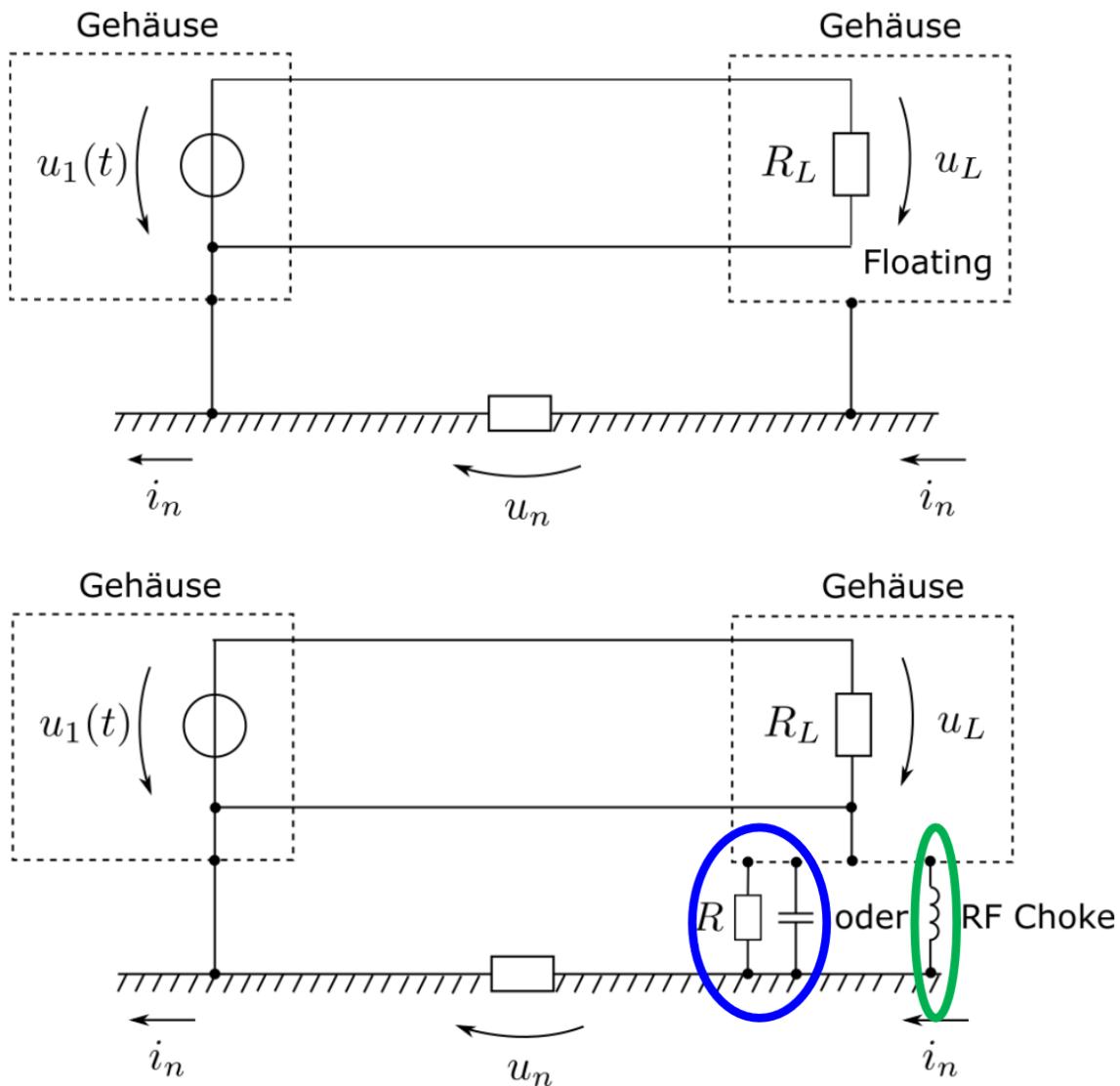


Erdanbindung

Will man **Erdschlaufen verhindern**, so gibt es mehrere Möglichkeiten:

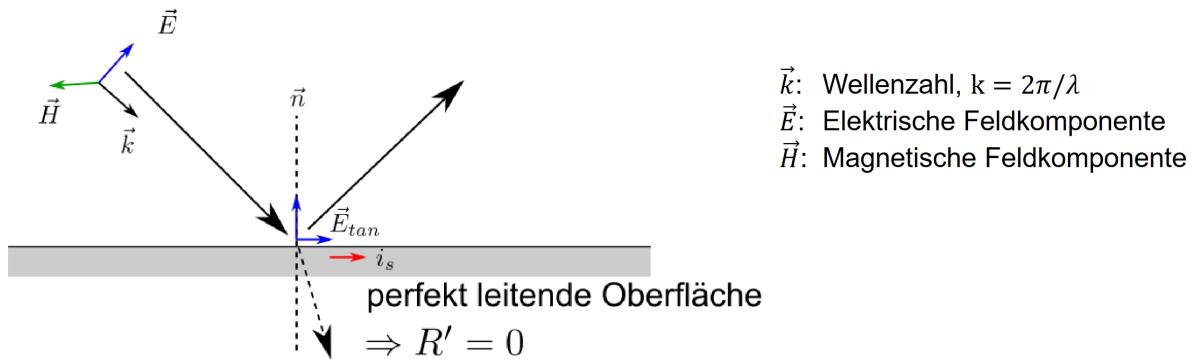
- Eine Seite wird *floating* betrieben
- Niederfrequente Isolation (*Kapazität*)

- Hochfrequente Isolation (*Induktivität*)
- Hochohmiger Widerstand zum verhindern einer statischen Aufladung



6.3.3 Schirmung

Um Elektromagnetische Emission sowie Immission im Fern- wie im Nahfeld zu verhindern, können Schirmungen verwendet werden. Bei einem idealen Schirm handelt es sich hierbei um eine perfekt leitende Oberfläche.



$$\Rightarrow u = i_s R' = 0$$

$$\Rightarrow \vec{E}_{tan} = 0 \text{ da... } u = \int \vec{E}_{tan} \cdot d\ell$$

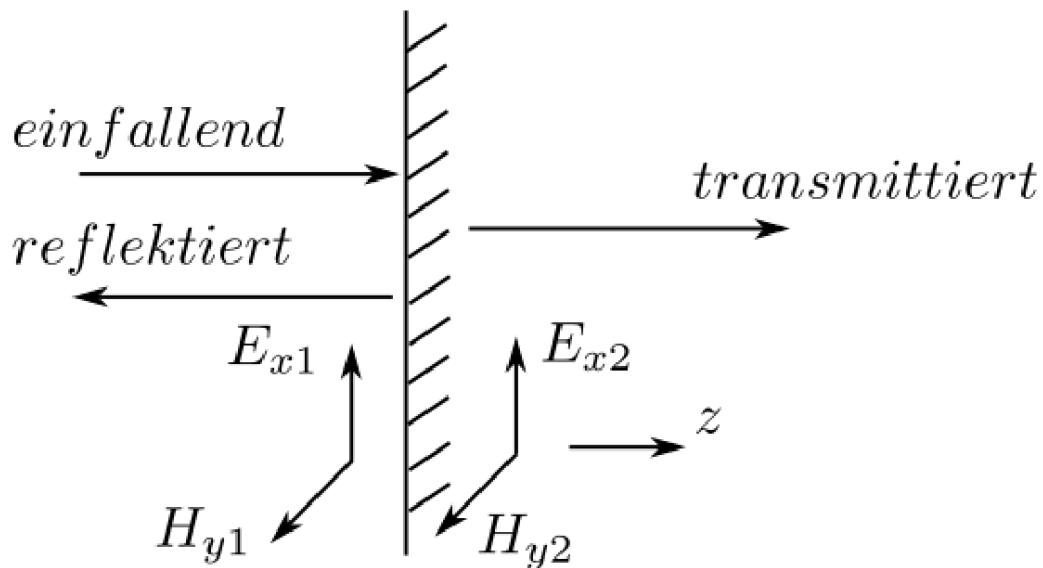
Erreicht eine senkrecht einfallende, ebene Welle die ebene Grenzfläche, so gelten folgende Beziehungen für Kontinuität

Region 1

Wellenimpedanz η_1

Region 2

Wellenimpedanz η_2



Für das eintretende E-Feld E_e gilt

$$E_{x1} = E_e(1 + \Gamma_E) \quad E_{x2} = E_e T$$

Der Reflexionskoeffizient Γ ist

$$\Gamma_E = \frac{\eta_2 - \eta_1}{\eta_2 + \eta_1} = -\Gamma_H$$

Der Transferkoeffizient T ist

$$T = 1 + \Gamma_E = \frac{2\eta_2}{\eta_1 + \eta_2}$$

Die Wellenimpedanz η einer sinusförmigen EM-Welle im Material kann allgemein mit einem komplexen Impedanzbelag \hat{z} und einem komplexen Admittanzbelag \hat{y} beschrieben werden

$$\eta = \sqrt{\frac{\hat{z}}{\hat{y}}}$$

Für einige typische Materialien sind diese Beläge wie folgt gegeben

- $\hat{z} = j\omega\mu_0, \hat{y} = j\omega\epsilon_0$: Freiraum
- $\hat{z} = j\omega\mu_0, \hat{y} = \sigma + j\omega\epsilon_0$: Nichtmagnetische Metalle
- $\hat{z} = j\omega\mu_0, \hat{y} = j\omega\epsilon$: Nichtmetalle
- $\hat{z} = j\omega\mu, \hat{y} = \sigma + j\omega\epsilon$: Ferromagnetische Materialien

Mit

- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Vs}{Am}$: Magnetische Feldkonstante
- $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \frac{As}{Vm}$: Elektrische Feldkonstante
- μ_r : Relative Permeabilität des Materials
- ϵ_r : Relative Permittivität des Materials
- σ : Spezifische Leitfähigkeit des Materials

Skin-Effekt

Alle metallischen Leiter zeigen den Skin Effekt (Stromverdrängung). Nach der Distanz einer Eindringtiefe δ ist die Amplitude auf 37% abgesunken. So ist nach 5 Eindringtiefen δ "nichtsmehr" übrig. Die Feldstärken E und H nehmen dabei exponentiell ab.

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \text{ und } H(x) = H_0 e^{-\frac{x}{\delta}} \text{ mit } \delta = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}}$$

Mit

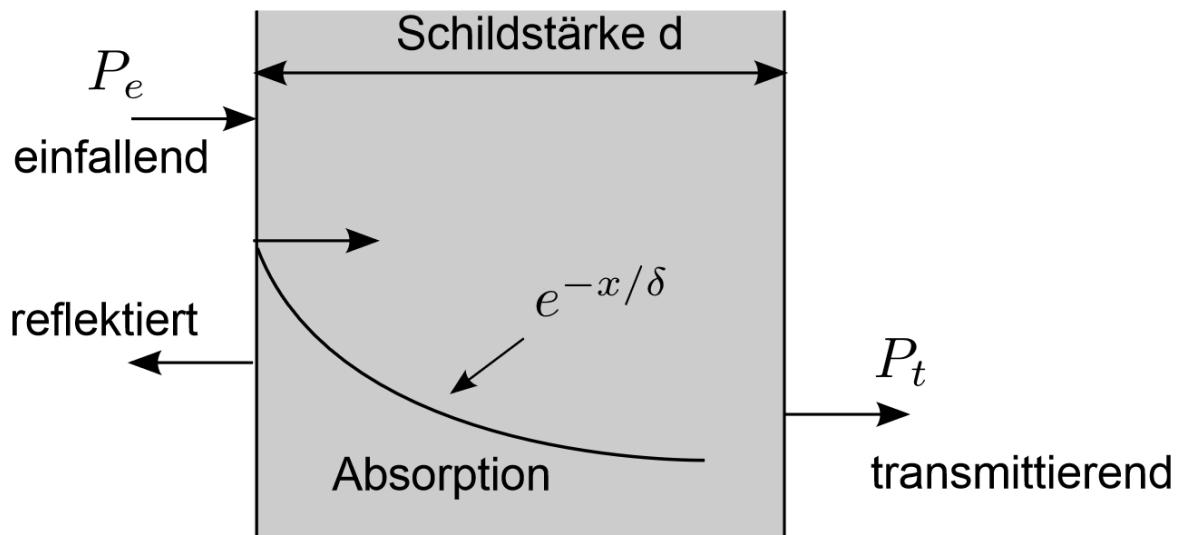
- δ : Eindringtiefe
- f : Frequenz
- μ : Permeabilität
- σ : Spezifische Leitfähigkeit

Schirmung im Fernfeld

EM-Feld wird als ebene Welle angenommen. Die Wellenimpedanz im Freiraum beträgt 377Ω . Für die Schirmung sind zwei Mechanismen relevant, *Reflexion* für tiefe Frequenzen und *Absorption* für hohe Frequenzen. Die Effektivität einer EM-Schirmung wird mit dem Verhältnis der durchgelassenen Signalleistung P_t zur ankommenden Signalleistung P_e bestimmt

$$\text{Schild Effektivität } SE[dB] = -\log_{10} \left(\frac{P_t}{P_e} \right)$$

$$SE[dB] = -20 \log_{10} \left(\frac{E_t}{E_e} \right) = -20 \log_{10} (T_1 \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \cdot T_2) = -20 \log_{10} \left(\frac{4\eta_1\eta_2}{(\eta_1 + \eta_2)^2} \cdot e^{-\frac{d}{\delta}} \right)$$



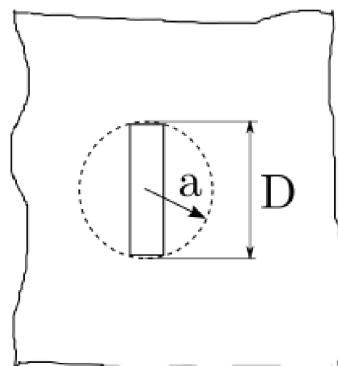
Einfluss von Löchern im Schirm

Zeigt der Schirm Öffnungen (*Löcher, Geflecht, Spalt, ...*), so hängt die Schild Effektivität von der Grösse der Öffnung ab.

Vereinfachte Annahme

Öffnung wird mit einem kleinstmöglichen Kreis mit Durchmesser D umschlossen

- $D > \frac{\lambda}{2}$ EM-Feld passiert die Schirmung ungehindert
- $D < \frac{\lambda}{2}$ Dämpfung nimmt schnell zu
- $D < \frac{\lambda}{10}$ Schildeffektivität kann wie nachfolgend abgeschätzt werden



Fernfeld und Skin-Effekt Eindringtiefe δ **klein** (*best case*)

$$SE_{dB} \approx -10 \log_{10} \left(A_L \left(\frac{a}{\lambda} \right)^4 \right)$$

Nahfeld und Skin-Effekt Eindringtiefe δ **gross** (*worst case*)

$$SE_{dB} \approx -10 \log_{10} \left(16 \left(\frac{a}{\lambda} \right)^2 \right)$$

Schirmung von Wabenstrukturen

$$SE_{sB} \approx 16 \frac{z}{a} - 10 \log_{10}(N)$$

