



SIGNALE UND SYSTEME  
**Signalübertragung**

Studien- und Versuchsaufgaben

*Autoren:* Richard GRÜNERT  
Pascal HAMAIIDIA  
Stefan KLOBE

29.12.2019

# 1 Vorbereitungsaufgaben

## 1.1

Die Grundfrequenz der dargestellten (periodischen) Datenfolge ist

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1 \mu\text{s}} = 1 \text{ MHz}$$

## 1.2

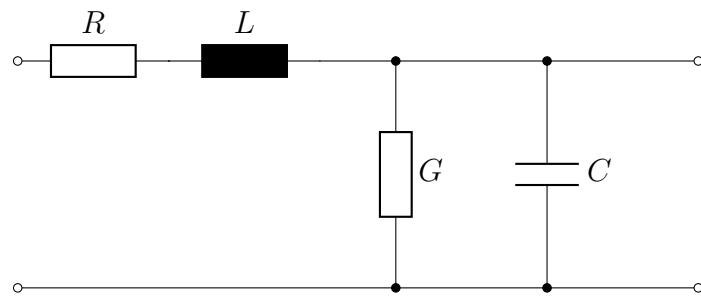


Abbildung 1: Ersatzschaltbild einer Kupferdoppelader

Die Kupferdoppelader kann im Ersatzschaltbild durch einen Widerstand  $R$ , eine Induktivität  $L$ , einem Leitwert  $G$  und eine Kapazität  $C$  modelliert werden, welche alle proportional zur Länge der Leitung sind. Die auf die Leitungslänge bezogenen Parameter des Ersatzschaltbildes werden in der Leitungstheorie auch *Leitungsbeläge* genannt.

Der Widerstand  $R$  der Leitung entsteht durch den spezifischen Widerstand des Materials  $\rho$ , der Querschnittsfläche  $A$  und der Länge  $l$  der Leitung nach

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A},$$

wobei zu beachten ist, dass die gesamte Leitungslänge, also beide Adern bei der Doppelader, als Länge in die Berechnung eingeht. Zudem ist der Widerstandsbelag frequenzabhängig (Skineffekt).

Da die gesamte Doppelader eine Spule mit nur einer Windung darstellt, tritt eine Induktivität  $L$  auf.

$$L = (N^2) \cdot \mu \cdot \frac{A}{l}$$

Praktisch wird weiterhin zwischen einer äußeren Induktivität (magnet. Eigenschaften, Geometrie des Leiters) und einer inneren Induktivität (Wechselfelder innerhalb des Leiters, Skineffekt) unterschieden

Die Kapazität  $C$  entsteht durch die Kondensatorwirkung der zwei dicht beeinanderliegenden Adern.

$$C = \epsilon \cdot \frac{A}{d}$$

Die dielektrischen Verluste zwischen beiden Adern werden durch den Leitwert  $G$  (Ableitungsbelag) gekennzeichnet, welcher auch über den Verlustwinkel  $\delta$  der Kapazität des Dielektrikums bestimmt ist.

Durch frequenzabhängige Elemente ( $L, C$ ) im Ersatzschaltbild wird die Übertragungsfunktion der Doppelader ebenfalls frequenzabhängig und weicht damit von einer idealen, frequenzunabhängigen Leitung ab. Aus dem Ersatzschaltbild lässt sich das Tiefpassverhalten der Doppelader herleiten. Außerdem können durch Bildung eines Schwingkreises unerwünschte Resonanzerscheinungen auftreten.

### 1.3

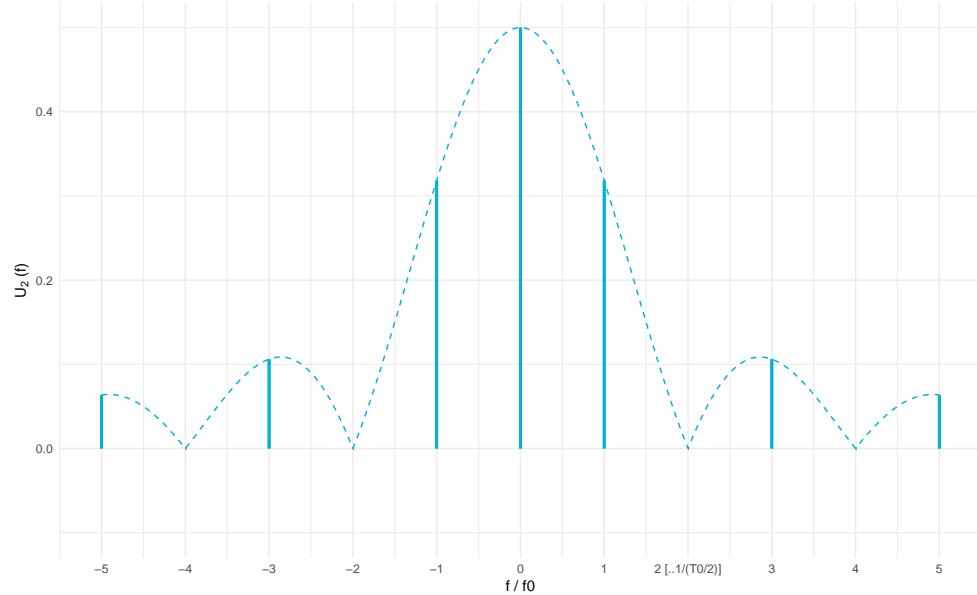


Abbildung 2: Teil des Spektrums der periodischen 1010-Folge mit der Si-Funktion als Einhüllende

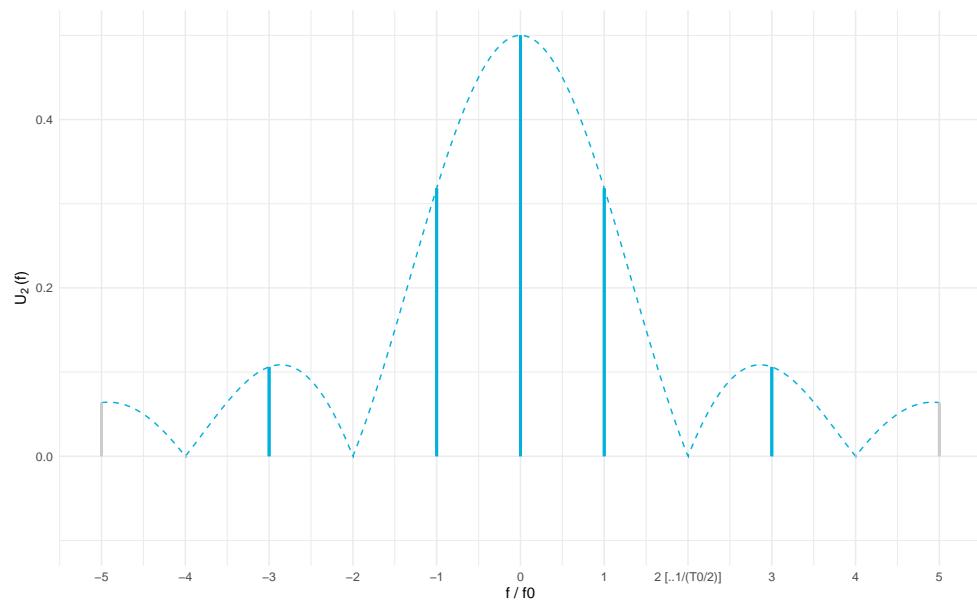


Abbildung 3: Beispielhaftes Spektrum der periodischen 1010-Folge mit TP-Filtercharakteristik der Doppelader

Da hier eine periodische Folge gewählt wurde, entsteht ein diskretes Amplitudenspektrum, welches durch Fouriersynthese wieder in die Ursprungsfolge umgewandelt werden kann. Fehlen nun einige Spektrallinien durch die Tiefpasscharakteristik der Doppelader (in Abb. 3 grau gekennzeichnet), weicht die Folge nach der Synthese von der Originalfolge ab (Abb. 4).

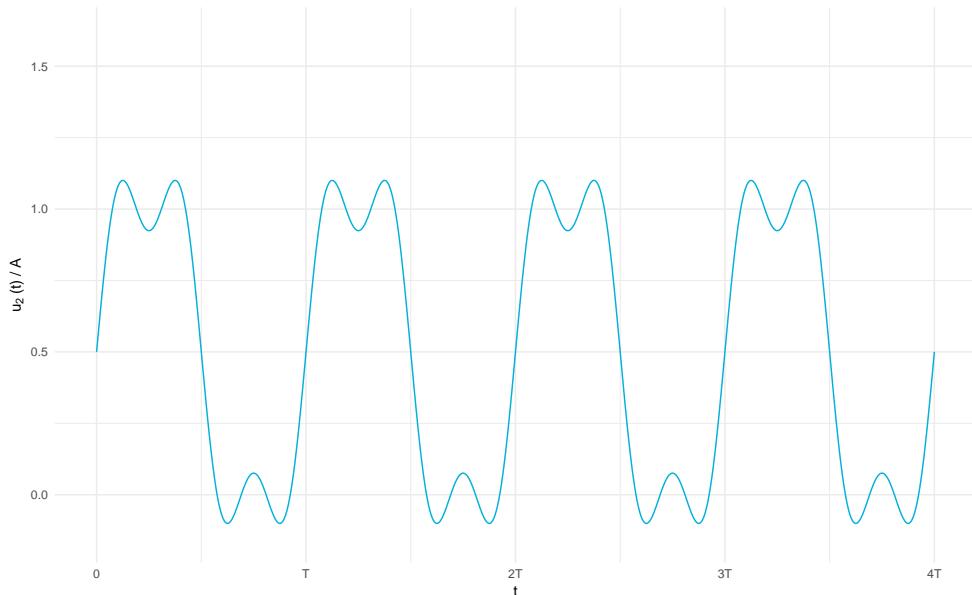


Abbildung 4: Auswirkung des spektralen Verlusts im Zeitbereich

## 1.4

Wie in Abb. 4 zu sehen, ist die empfangene Rechteckfolge uneindeutiger als die Gesendete. Die Wahrscheinlichkeit für eine Fehlinterpretation eines Bits ist daher höher, wodurch fehlerhafte Datenübertragungen zu stande kommen können.

## 1.5

Die Grundfrequenz der 1010-Folge ist die Hälfte der Übertragungsrate von  $f_1 = 704 \text{ kbit/s}$ , da in einer Grundperiode der 1010-Folge bei dieser

Datenrate theoretisch 2 bits übertragen werden könnten.

Das auf die Grundfrequenz normierte Amplitudenspektrum ergibt sich mit dem Tastverhältnis von  $D = 0.5$  zu

$$| \underline{X}_n | = A \cdot \frac{1}{2} \cdot \text{Si}(n\pi \cdot \frac{1}{2})$$

Die periodische 1010-Folge ist zur Messung gut geeignet, da es durch die höchstmögliche Frequenz einer Bitfolge das worst-case-Szenario darstellt.

## 1.6

Wobbeln ist eine Methode der Frequenzanalyse eines Systems und beschreibt das Durchlaufen eines bestimmten Frequenzbereiches mit Sinus-Funktionen.

## 1.7

- a) Der Netzwerkanalysator misst selbstständig mit einer hohen Auflösung durch Wobbeln der Kupferdoppelader. Die Übertragungsfunktion wird danach automatisch dargestellt.
- b) Zur Messung der Übertragungsfunktion wurde die 704 kbit/s-Folge gewählt, da der Abstand der Spektrallinien gegenüber der 2 Mbit/s-Folge geringer ist, was eine höhere Auflösung der Messwerte erlaubt.

Die Messung erfolgte durch Senden einer periodischen 1010-Rechteckfolge mit konstanter Amplitude durch die Kupferdoppelader. Durch die FFT-Analyse am Oszilloskop wurde das gemessene, ausgangsseitige Spektrum mit dem eingangsseitigen Spektrum verglichen. Die Differenzen der Amplituden zu den jeweiligen Frequenzen (in dB) stellen die Übertragungsfunktion der Doppelader dar.

## 2 Versuchsaufgaben

### 2.1



Abbildung 5: Darstellung der 704 kbit/s -Folge im Zeitbereich, gelb: Eingangsseitig, grün: Ausgangsseitig

Aus dem Bild der Signale im Zeitbereich (Abb. 5) lassen sich die Phasenverschiebung und Amplitudenänderung des Ausgangssignals erkennen. Das Ausgangssignal ist durch die vorherige Umformung (Converter) symmetrisch um 0V (kein Gleichanteil) und hat die selbe Frequenz wie das Eingangssignal. Außerdem kann man den Lade-und Entladeeinfluss der Doppeladerkapazität erkennen.



Abbildung 6: Darstellung der 2 Mbit/s -Folge im Zeitbereich, gelb: Eingangsseitig, grün: Ausgangsseitig

In Abb. 6 wurde die Datenübertragungsrate auf 2 Mbit/s erhöht. Man erkennt die stärkere Amplitudenverringerung des Ausgangssignals bei der höheren Frequenz.

Zur Ermittlung der Übertragungsfunktion der Doppelader wurde dann die FFT-Funktion des Oszilloskops verwendet.



Abbildung 7: FFT des Eingangs- und Ausgangssignals mit den Amplitudenwerten

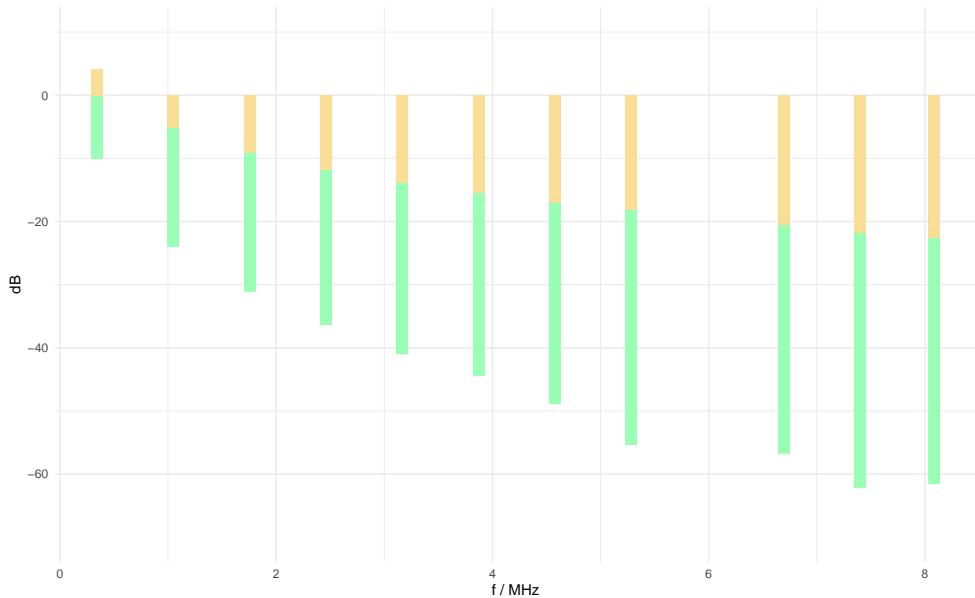


Abbildung 8: Amplitudenvergleich des Eingangs (gelb)- und Ausgangssignals (grün) über der Frequenz

## 2.2