

Bei diesem Versuch geht es um die Übertragungseigenschaften von Vierpolen, Vierpolketten und Kabeln. Die in der Praxis häufig vorkommenden R-C-Spannungsteiler (Differenzier- und Integrierglied bzw. Hoch- und Tiefpaß) werden untersucht, ebenso das L-C-Glied und eine Kette aus solchen Gliedern (Drosselkette). Anhand der Drosselkette werden Eigenschaften von Übertragungsleitungen diskutiert und ermittelt. Schliesslich wird als Grenzfall der Drosselkette mit einem Koaxialkabel experimentiert. Bei den Experimenten spielt die Verwendung eines Oszilloskops eine gewichtige Rolle.

### Aufgaben:

1. Bei dieser Aufgabe werden einfache passive lineare Vierpole, nämlich **R-C-Spannungsteiler**, bezüglich des **Abschwächungsverhältnisses** (unter diesem Aspekt heißen sie 'Hochpaß' bzw. 'Tiefpaß') und der **Phasenverschiebung** (unter diesem Aspekt heißen sie 'Phasenschieber') zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung untersucht.

1.1 Legen Sie sinusförmige Wechselspannung ( $f \cong 1, 7\text{kHz}$ ;  $u_e \cong 8V_{ss}$ ) an die Reihenschaltung von C ( $\approx 1\text{nF}$ ) und R ( $\approx 1 / 10 / 100 / 1000 \text{ k}\Omega$ ) und beobachten Sie als Ausgangsspannung  $u_a$  die Spannung an R oszilloskopisch: **'Hochpaß'**. Der Index „<sub>ss</sub>“ bei der Spannungsangabe  $V_{ss}$  bedeutet, daß der zwischen Maximum und Minimum der Wechselspannung gemessene und am Oszilloskop besonders gut ablesbare Spitze-Spitze-Wert gemeint ist. Er beträgt das  $2\sqrt{2}$ -fache der üblicherweise angegebenen Effektivspannung. Am Zweikanaloszilloskop wird gleichzeitig die Eingangsspannung  $u_e$  dargestellt. Verwenden Sie am Oszilloskopeingang für  $u_a$  den Tastkopf. (Warum?). Messen Sie sowohl den Betrag von  $u_a$  als auch die zeitliche Verschiebung  $\Delta t$  zwischen Ausgangs- und Eingangsspannung, und rechnen Sie um in das Abschwächungsverhältnis  $u_a/u_e$  und die Phasenverschiebung  $\Delta\phi$  in Winkelgrad. Stellen Sie sowohl  $u_a/u_e$  als auch  $\Delta\phi$  über  $\log(f/f_0)$  mit  $f_0 = 1 / 2\pi RC$  dar, und tragen Sie jeweils den berechneten Verlauf dazu ein.

1.2 Wie 1.1, jedoch wird jetzt als Ausgangsspannung  $u_a$  die Spannung an C beobachtet: **'Tiefpaß'**.

2. Dieselben Vierpole wie bei Aufgabe 1 werden benutzt, aber statt sinusförmiger Wechselspannung wird jetzt Dreieck- bzw. Rechteckwechselspannung angelegt. Bei geeigneter Dimensionierung spricht man von **'Differenzier- bzw. Integriergliedern'**.

2.1 Legen Sie **dreieckförmige** Wechselspannung ( $f \cong 1, 7\text{kHz}$ ;  $u_e \cong 8V_{ss}$ ) an die Reihenschaltung von C ( $\approx 1\text{nF}$ ) und R (wie bei 1.1) und beobachten Sie als Ausgangsspannung  $u_a$  die Spannung an R oszilloskopisch: **'Differenzierglied'**, falls  $f/f_0 \ll 1$ . Am Zweikanaloszilloskop wird gleichzeitig die Eingangsspannung  $u_e$  dargestellt. Verwenden Sie am Oszilloskopeingang für  $u_a$  den Tastkopf. Vergleichen Sie die Meßergebnisse mit Rechenergebnissen.

2.2 Wie 2.1, jedoch wird jetzt als Ausgangsspannung  $u_a$  die Spannung an C beobachtet: **'Integrierglied'**, falls  $f/f_0 \gg 1$ . Statt dreieckförmiger ist hier **rechteckförmige** Wechselspannung zweckmäßig.

2.3 Es ist interessant, außer den in den Aufgaben verlangten R-C-Kombinationen weitere zu verwenden oder etwa das Differenzierglied mit Rechteck- und das Integrierglied mit Dreieckspannung zu betreiben oder bei festem R und C die Frequenz der angelegten Spannung über weite Bereiche zu variieren. Machen Sie solche Untersuchungen.

3. Hier geht es um längssymmetrische **Vierpole** aus (idealisiert) reinen Blindwiderständen und ihre **Übertragungseigenschaften** (Betrag und Phase von  $u_a/u_e$ ) sowie um die Wirkung der Verkettung mehrerer gleicher Vierpole. Dabei wird die **'Drosselkette'** untersucht, die einerseits als 'Impulsverzögerer' sowie als 'Tiefpaß mit steiler Flanke' praktische Bedeutung hat und andererseits das Funktionieren eines Kabels (Aufgabe 4) leichter verständlich macht.

3.1 Bestimmen Sie den **charakteristischen Widerstand**  $Z_0(f \ll f_0)$  einer Drosselkette bei relativ geringer Frequenz. Legen Sie dazu an die sechsgliedrige Kette rechteckförmige Wechselspannung

( $f \cong 20\text{kHz}$ ;  $u_e \cong 6V_{SS}$ ) und beobachten Sie oszilloskopisch das Eingangssignal. Schalten Sie den regelbaren Lastwiderstand  $Z_A$  ('Abschlußwiderstand') der Kette ein, und stellen Sie ihn so ein, daß die beobachtete Spannung das im wesentlichen unverfälschte Rechteck ist, das möglichst wenig durch **Reflexionen** vom Kettenende beeinträchtigt wird.

**3.2** Bestimmen Sie die **Grenzfrequenz**  $f_0$  der Drosselkette. Legen Sie dazu an die 6-gliedrige Kette sinusförmige Wechselspannung ( $f$  bis 1MHz;  $u \sim 6V_{SS}$ ). Stellen Sie den Lastwiderstand anfangs auf  $Z_0(f \ll f_0)$  ein. Beobachten Sie zunächst die Eingangsspannung an der Kette, und überzeugen Sie sich davon, daß der Generator eine nahezu frequenzunabhängige Spannung liefert. Beobachten Sie dann die Ausgangsspannung der Kette beim Erhöhen der Frequenz. Dabei muß der Lastwiderstand  $Z_A$  entsprechend der theoretischen Frequenzabhängigkeit von  $Z_0$  ( $f/f_0$ ) nachgeregelt werden, um Reflexionen zu vermeiden. Suchen Sie jenen Frequenzbereich, in dem sich  $u_a$  stark mit  $f$  ändert, und lesen Sie die Grenzfrequenz  $f_0$  von der Generatorskala ab (etwa an der Stelle  $u_a/u_e = 1/10$ ).

**3.3** Berechnen Sie aus  $Z_0$  ( $f \ll f_0$ ) und  $f_0$  die **Kapazität**  $C/2 + C/2$  und die **Induktivität**  $L$  jedes Kettengliedes. Vergleichen Sie die Ergebnisse mit den angegebenen Daten der Bauelemente.

**3.4** Untersuchen Sie mit Hilfe des Zweikanaloszilloskops die **Phasenverschiebung** zwischen Ausgangs- und Eingangssignal in Abhängigkeit von der Frequenz (Sinusförmige Wechselspannung;  $f \sim 10 / 100 / 300 / 500 / 600 / 650 / 690$  kHz) sowohl für das einzelne  $\pi$ -Glied als auch für die 6-gliedrige Kette. Sorgen Sie jeweils für reflexionsfreien Abschluß der Kette. Rechnen Sie aus der am Oszilloskop abgelesenen zeitlichen Verschiebung um auf die Verschiebung im Bogenmaß. Überzeugen Sie sich davon, daß bei der Grenzfrequenz die Phasenverschiebung über einen Vierpol gerade gleich  $\pi$  ist, und davon, daß bei einer  $n$ -gliedrigen Kette von Vierpolen gegenüber dem einzelnen Vierpol die Phasenverschiebung etwa  $n$ -fach wird. Sie können durch geschickte Benutzung des Zweikanaloszilloskops recht genau jene Frequenzen einstellen, die bei der 6-gliedrigen Kette Phasenverschiebungen von  $\pi$ ,  $2\pi$ ,  $3\pi$ ,  $4\pi$  und  $5\pi$  ergeben. Ermitteln Sie aus diesen fünf Frequenzen nochmals die Grenzfrequenz  $f_0$ .

**3.5** Erzwingen Sie Reflexionen vom Kettenende ( $Z_A = 0\Omega$ ), vermeiden Sie weitgehend Reflexionen am Kettenanfang (200 $\Omega$ -Steckwiderstand anstelle des Kurzschlußsteckers zwischen Generator und Kettenanfang einfügen) und verwenden Sie rechteckförmige Wechselspannung (ca. 20kHz). Welche **Signalform** erwarten Sie am Kettenanfang? Vergleichen Sie Vorhersage und Beobachtung.

**4.** Die Vierpolkette aus einzelnen Gliedern wird jetzt ersetzt durch eine **homogene Leitung**, nämlich ein übliches **Koaxialkabel**, wie es z.B. zur Impulsübertragung verwendet wird. Einige der Messungen an der Vierpolkette werden an dem Kabel in entsprechender Weise ausgeführt, um die Verwandtschaft zu erkennen.

**4.1** Bestimmen Sie den **charakteristischen Widerstand**  $Z_0$  des Kabels, der wegen der sehr geringen Verluste als praktisch frequenzunabhängig angenommen werden darf. Wie 3.1, jedoch Kabel statt Vierpolkette und rechteckförmige Wechselspannung mit  $f \sim 1.1$  MHz.

**4.2** Bestimmen Sie die **Verzögerungszeit**  $\tau'$  pro Längeneinheit des Kabels durch gleichzeitige Beobachtung von Eingangs- und Ausgangs-Rechteckspannung am Oszilloskop (Zeitachsendehnung maximal).

**4.3** Bestimmen Sie die Verzögerungszeit  $\tau'$  pro Längeneinheit des Kabels in einer zu Aufgabe 3.5 analogen Weise:  $Z_A = 0\Omega$  einstellen und die **Überlagerung von Generatorsignal (1MHz) und reflektiertem Signal** am Kabeleingang beobachten.

**4.4** Vergleichen Sie die aus verschiedenen Messungen und aus geometrischen Kabeldaten gewonnenen Ergebnisse für die relative **Dielektrizitätskonstante**,  $\epsilon\{C_\ell, r_i, r_a\}$ ;  $\epsilon\{\tau'\}$ ;  $\epsilon\{Z_0(f \ll f_0), r_i, r_a\}$ .

**Zubehör:**

**Funktionsgenerator:** GW-Instek SFG-2104, für Sinus-, Rechteck- und Dreiecksspannungen (0,1 Hz bis 4 MHz)

**Osilloskop:** Tektronix TDS2002B ( $R_e \approx 1 \text{ M}\Omega$ ;  $C_e \approx 20 \text{ pF}$ ) oder Hameg 205-2 ( $R_e \approx 1 \text{ M}\Omega$ ;  $C_e \approx 47 \text{ pF}$ );  
 $R_e(\text{Tastkopf}) \approx 10 \text{ M}\Omega$

**Steckkästchen** mit Bananenbuchsen für RC-Glieder

**Steckelemente**  $220\Omega$ ; sowie 1; 10; 100;  $1000 \text{ k}\Omega \pm 2\%$  und 1; 10; 100;  $1000 \text{ nF} \pm 2\%$

**Drosselkette** aus  $\{1+5\}$   $\pi$ -Gliedern ( $C/2 = 1 \text{ nF}$ ;  $L = 96 \mu\text{H}$ ;  $C/2 = 1 \text{ nF}$ ) mit vorschaltbarem Serienwiderstand ( $200\Omega$ ) und mit abschaltbarem einstellbarem Lastwiderstand (bis  $500 \Omega$ )

**Koaxial-Kabel** (Typ RG174/U;  $\ell = 10,0 \text{ m}$ ;  $C_\ell = 925 \text{ pF}$ ;  $r_i = 0,5 \text{ mm}$ ;  $r_a = 1,75 \text{ mm}$ ) mit abschaltbarem einstellbarem Lastwiderstand (max.  $100 \Omega$ )

**Verbindungskabel** (Koaxialkabel mit BNC-Steckern und Laborleitungen mit Bananensteckern)

**Übergangsstücke** (Koaxial  $\rightarrow$  Banane, Banane  $\rightarrow$  Koaxial).

**Literatur****zu Drosselkette und Kabel:**

Bergmann, Schaefer: *Lehrbuch der Experimentalphysik*, Bd. 2.: 9.Aufl., de Gruyter, 2006

Demtröder: *Experimentalphysik 2: Elektrizität und Optik*, 4. Aufl. Springer, 2006

Vilbig: *Lehrbuch der HF-Technik* (1960): Bd.1, Kap. 2 und 3

Crawford: *Berkeley-Physik-Kurs 3* (Schwingungen und Wellen)

Meyers Physik-Lexikon: 'Leitung'

Jüngst: *Vorbereitungshilfe zu 'Vierpole und Leitungen'*

**zu R-C-Gliedern:**

Ch. Weddigen, W. Jüngst: *Elektronik; Eine Einführung für Naturwissenschaftler und Ingenieure...*, 2. Aufl. Springer 1993

Surina, Klasche: *Angew. Impulstechnik*, Par.3

Speiser: *Impulsschaltungen* (1967), 3.1 bis 3.4

Tietze, Schenk: *Halbleiterschaltungstechnik*