

# **Analoge Schaltungstechnik**

## **(SC)**

Martin J. W. Schubert

# Struktur

## Analoge Schaltungstechnik

1. Grundlagen

2. LeistungsElektronische Schaltungen

3. FETs in Logik-Schaltungen

4. Analoge Schaltungsblöcke

5. OpAmp-Design

6. OpAmp-Verwendung

7. Lineare Rückkopplungsschleifen

analoge Signale

## Vertiefungen

LZI-Systeme

Schaltkr. Analyse

Elekt. Bauelemente

Abgrenzungen: Die Vorlesung „Analoge Schaltungstechnik (SC)“ befasst sich nicht mit

- Hochfrequenztechnik, also Reflexionen oder räumlichen Wellen der Art  $e^{j(\omega t - k \cdot x)}$ , sondern nur mit zeitveränderlichen Größen der Art  $e^{j\omega t}$ .
- Energie-Erzeugung, Transort oder -Speicherung.

# Inhaltsverzeichnis

## 1. Grundlagen

- 1.1 LZI-Systeme und 4 Grundaxiome der Signalverarbeitung
  - 1.1.1 Zeitinvarianz
  - 1.1.2 Linearität
  - 1.1.3 Kausalität
  - 1.1.4 Stabilität
- 1.2 Zusammenhang von Impuls- und Sprung-Antwort bei LZI-Systemen
- 1.3 Darstellung elektrischer Größen
  - 1.3.1 Mathematische Voraussetzung: komplexe Zahlen
  - 1.3.2 Darstellung elektrischer Größen als komplexe Zahlen
  - 1.3.3 Effektivwerte
    - 1.3.3.1 Ermittlung des Effektivwertes
    - 1.3.3.2 Effektivwerte einiger häufig verwendeter Signalformen
    - 1.3.3.2 Übungen zur Effektivwert-Berechnung
  - 1.3.3 Definition von Bel, Dezibel und Neper
- 1.4 Bode-Diagramme
  - 1.4.1 Mathematische Grundlagen
  - 1.4.2 Pole und Nullstellen in Übertragungsfunktionen
    - 1.4.2.1 Pole im Orts- und Bode-Diagramm
    - 1.4.2.2 Nullstellen im Orts- und Bode-Diagramm
    - 1.4.2.3 Faktorisieren von Übertragungsfunktionen in Pole und Nullstellen
    - 1.4.2.4 Konjugiert-komplexes Nullstellen-Paar auf der  $j\omega$ -Achse
    - 1.4.2.4 Konjugiert-komplexes Polpaar auf der  $j\omega$ -Achse
    - 1.4.2.6 Inversion der Übertragungsfunktion
    - 1.4.2.6 Äquivalentes Eingangsrauschen als Qualitätskriterium
- 1.5 Schaltkreisanalyse: Techniken und Werkzeuge
  - 1.5.1 Kategorisierung der Analysemethoden
  - 1.5.2 Grundlagen einer textuellen *Spice* - Schaltungsbeschreibung
  - 1.5.3 *Spice* - Analysen
    - 1.5.3.1 .OP: Arbeitspunkt- (engl. operating point) Berechnung
    - 1.5.3.2 .DC: Statische Großsignal-Analyse
    - 1.5.3.3 .TRAN: Dynamische Großsignal-, Zeitbereichs- (engl. Time Domain) Analyse
- 1.6 Elektrische Symbole und Zeichen
  - 1.6.1 Quellen
    - 1.6.1.1 .Normierte Symbole für Quellen
    - 1.6.1.2 Andere übliche Symbole für Quellen
  - 1.6.2 Halbleiter-Bauelemente
    - 1.6.2.1 .Transistorsymbole, mit denen wir arbeiten
    - 1.6.2.2 Varianten: ähnliche Transistorsymbole
    - 1.6.2.3 Symbole mit mehreren Transistoren
- 1.7 Spannung, Strom und Ladung
  - 1.7.1 Kirchhoff'sche Maschenregel (Lit.: KVL: Kirchhoff's Voltage Law)
  - 1.7.2 Kirchhoff'sche Knotenregel (Lit.: KCL: Kirchhoff's Current Law)
  - 1.7.3 Ströme und Ladungen eines Bauelementes
  - 1.7.4 Ströme und Ladungen einer Schaltung
  - 1.7.5 Spannungs- und Stromteiler
    - 1.7.5.1 .Formeln zur Berechnung von Spannungs- und Stromteilern
    - 1.7.5.2 Anwendung von Spannungsteiler zur Impedanzmessung
    - 1.7.5.3 Parallelschaltung von Widerstand und Leitwert
  - 1.7.6 Energie-Quellen und -Senken
    - 1.7.6.1 Identifikation von Energie-Quellen und -Senken
    - 1.7.6.2 Umwandlung von linearen Netzwerken nach Norton und Thévenin
    - 1.7.6.3 Spannungsquelle mit Spannungsteiler realisieren
- 1.8 Lineare Überlagerung (Superposition) in linearen Netzwerken
  - 1.8.1 Anwendung auf beliebige lineare Netzwerke
  - 1.8.2 R2R-Leiter: Multipler Spannungsteiler und D/A-Wandler
- 1.9 Verstärkung – Leistung – Bandbreite
  - 1.9.1 Grundprinzip der Spannungsverstärkung
  - 1.9.2 Indirekte Messung von Strom und Leistungsverstärkung
  - 1.9.3 Verstärkungs-Bandbreite-Produkt
- 1.10 Miller-Effekt Herleitung
  - 1.11.1 Miller-Effekt Herleitung
- 1.11 Referenzen

## 2. Leistungselektronische Schaltungen

(Ausschlüsse: **Erzeugung, Übertragung, Speicherung, ...** )

(Alternativen: **Leistungselektronik, Schaltungen zum arbeiten mit / bereitstelle, / bearbeiten / verarbeiten von Energie, Leistungselektronische Schaltungen**)

- 2.1 Schaltertechniken für hohe Effizien?
- 2.2 Halbleiterschalter
  - 2.1.1 Transistoren als Schalter
  - 2.1.2 Dioden als Schalter
  - 2.1.3 MOSFET im Diode Emulation Mode (DEM)
  - 2.1.3 MOSFET als Verpolschutz (engl.: Reverse Polarity Protection)
  - 2.1.2 Reale Schalter
- 2.3 Schaltmodule
  - 2.3.1 Halbbrücke
    - 2.3.1.1 Halbbrücke mit komplementären MOSFETs
    - 2.3.1.1 Halbbrücke mit zwei N-MOSFETs und Ladungspumpe
  - 2.3.2 Voll- oder H-Brücke
  - 2.3.3 Dreifach-Halbbrücke
  - 2.3.4 Hochspannungs-Schaltmodule
- 2.4 Gleichspannungs-Wandler
  - 2.4.1 Tiefsetzsteller Wärmeumwandlung (LDO)
  - 2.4.2 Energieerhaltende Gleichspannungswandler (DC/DC Converter)
    - 2.4.2.1 Tiefsetzsteller mit ausgeglichener Leistungsbilanz:  $P_{in} \approx P_{out}$
    - 2.4.2.2 Hochsetzsteller bzw. Aufwärtswandler (engl.: Step-Up , Boost Converter)
    - 2.4.2.3 Kombiniertes Aufwärts- / Abwärts-Wandler
    - 2.4.2.4 DC/DC – Inverter (z.B. TPS63700)
    - 2.4.2.5 Schaltung mit Transformator
- 2.5 Referenzen

## 3. FETs in Logik-Schaltungen

- 3.1 MOSFETs als Schalter
  - 3.1.1 Generelle Eigenschaften
  - 3.1.2 NMOS-Schalter in programmierbarer Logik (veraltet)
  - 3.1.3 Transmission Gate: Komplementärer (=ergänzender) MOSFETs
- 3.2 Bipolar / CMOS (BiCMOS) Technologiebeispiel
  - 3.2.1 Vergleich der Vor- und Nachteile verschiedener Logiktechnologien
  - 3.2.2 Beispiel einer BiCMOS-Technologie und -Schaltung
- 3.3 CMOS-Technologie: Eigenschaften und technische Bedeutung
- 3.4 *Miller*-Effekt in der Digitaltechnik
- 3.5 Referenzen

## 4. Analoge Grundschaltungen

- 4.1 Großsignal- und Kleinsignal-Modelle
  - 4.1.1 Erstellung eines Kleinsignal-Modells
  - 4.1.2 Die Grundschaltungen von Bipolar- und Feldeffekt-Transistoren
  - 4.1.3 Kleinsignal-Modelle für Emmitter- und Source-Schaltung
  - 4.1.4 Kleinsignal-Impedanzen des FETs gegen Masse
  - 4.1.5 Kleinsignal-Impedanzen des BJTs gegen Masse
- 4.2 Grundschaltungen des BJTs
  - 4.2.1 Emmitter-Schaltung
    - 4.2.1.1 Emmitter-Schaltung mit Lastwiderstand  $\rightarrow \infty$  ( $\rightarrow$  Stromquelle als Last)
    - 4.2.1.2 Emmitter-Schaltung mit endlichem Lastwiderstand -und  $r_{CE} \rightarrow \infty$
    - 4.2.1.3 Emmitter-Schaltung mit Lastwiderstand -und  $r_{CE}$  endlich
    - 4.2.1.4 Emmitter-Schaltung mit aktiver Last (typisch für integrierte Schaltungen)
  - 4.2.2 Basis-Schaltung
  - 4.2.3 Kollektor-Schaltung (Emmitter-Folger)
  - 4.2.4 Varianten der Emmitter-Schaltung
    - 4.2.4.1 Emmitter-Schaltung mit Emmitter-Widerstand
    - 4.2.4.2 Emmitter-Schaltung mit induktiver Last
  - 4.2.5 Verstärkerstufe mit einzeltem BJT in Emitterschaltung
- 4.3 Grundschaltungen des FETs
  - 4.3.1 Source-Schaltung
    - 4.3.1.1 Source-Schaltung mit Lastwiderstand  $\rightarrow \infty$  ( $\rightarrow$  Stromquelle als Last)
    - 4.3.1.2 Source -Schaltung mit endlichem Lastwiderstand -und  $r_{DS} \rightarrow \infty$
    - 4.3.1.3 Source -Schaltung mit Lastwiderstand -und  $r_{DS}$  endlich
    - 4.3.1.4 Source -Schaltung mit aktiver Last (typisch für integrierte Schaltungen)
  - 4.3.2 Gate-Schaltung
  - 4.3.3 Drain-Schaltung (Source-Folger)
- 4.4 Verstärkerstufen mit einzeltem JFET
  - 4.4.1 Diskrete Verstärkerstufe mit JFET in Source-Schaltung
    - 4.4.1.1 Einstellung des Arbeitspunktes an Gate und Source
    - 4.4.1.2 Berechnung des Drain-Stroms  $I_{Da}$  für  $R_L=0$
    - 4.4.1.3 Berechnung des Drain-Stroms  $I_{Da}$  für  $R_L \rightarrow \infty$
    - 4.4.1.4 JFET in Source-Schaltung mit beliebiger Last  $Z_L$
    - 4.4.1.5 Berechnung der Mindestwerte für die Kapazitäten
  - 4.4.2 Diskrete Verstärkerstufe mit JFET in Source-Schaltung
    - 4.4.2.1 Einfachste Version des Source-Folgers
    - 4.4.2.2 Ausgangswiderstand und maximale Ausgangsamplitude getrennt einstellen
    - 4.4.2.3 Erhöhung des Eingangswiderstandes mittels Bootstrap - Schaltung
- 4.5 Kopplung und Klassifizierung von Verstärkerstufen
  - 4.5.1 Kopplungsprinzipien
  - 4.5.2 Details zur kapazitiven Kopplung
  - 4.5.3 Klassifizierung von Verstärkerstufen
- 4.4 Miller-Effekt
  - 4.4.1 Miller-Effekt Anwendungen
    - 4.4.1.1 Miller-Effekt mit negativer Rückkopplung
    - 4.4.1.2 Kaskadenschaltung zur Reduktion des Miller-Effekts
    - 4.4.1.3 Miller-Effekt mit positiver Rückkopplung: Bootstrapping
    - 4.4.1.4 Großsignalanwendung des Miller-Effekts in der Digitaltechnik
- 4.5 Realisierung häufig benötigter Schaltungsfunktionen
  - 4.5.1 Stromquellen
    - 4.5.1.1 Widerstand als Stromquelle
    - 4.5.1.2 Induktivität als Stromquelle
    - 4.5.1.3 Transistor als Stromquelle
    - 4.5.1.4 Selbstleitender FET als Stromquelle
    - 4.5.1.5 Widerstand als Stromquelle
    - 4.5.1.6 Einfache Stromspiel mit BJTs (Strom-Quellen und -Senken)
    - 4.5.1.7 Verringerung des Basisstromfehlers beim bipolaren Stromspiegel
    - 4.5.1.8 Stromquellen mit Source- / Emmitter-Widerständen
    - 4.5.1.9 Kaskadierter Stromspiegel mit MOSFETs und BJTs
    - 4.5.1.10 Wilson-Stromspiegel mit MOSFETs und BJTs
    - 4.5.1.11 Stromspiegel mit Schwellenstrom
    - 4.5.1.12 Stromspiegel mit  $I_{out} = (M/N) \cdot I_{in}$
    - 4.5.1.13 Ausnutzen der unendlichen Impedanz einer idealen Stromquelle
  - 4.5.2 Treibende Spannungsquellen
    - 4.5.2.1 Batterie als treibende Spannungsquelle
    - 4.5.2.2 Widerstand, Dioden, Zenerdioden als treibende Spannungsquellen
    - 4.5.2.3 Geschaltete Kapazitäten als treibende Spannungsquellen
    - 4.5.2.4 BJT mit 2 Widerständen als treibende Spannungsquelle
    - 4.5.2.5 Geschachtelte BJTs als treibende Spannungsquelle
- 4.6 Geschaltete Kapazitäten
  - 1.11.1 Quer geschaltete Kapazität als äquivalenter Leitwert
  - 1.11.2 Quer geschaltete Kapazität als treibende Spannungsquelle
  - 1.11.3 Längs geschaltete Kapazität als äquivalenter Leitwert
- 4.7 Referenzen

## 5. OpAmp-Design

## 6. OpAmp-Verwendung

## 7. Lineare Rückkopplungsschleifen

### ~~2.1 Einfache Transistor-Modelle~~

#### ~~2.1.1 Modelle des BJTs (Bipolar Junction Transistor)~~

#### ~~2.1.2 Modelle des FETs (Field Effect Transistor)~~

##### ~~2.1.2.1 Eingangs-Charakteristik des Feldeffekttransistors~~

##### ~~2.1.2.2 Übertragungs-Charakteristik des Feldeffekttransistors~~

##### ~~2.1.2.3 Ausgangs-Charakteristik des Feldeffekttransistors~~

##### ~~2.1.2.4 Einfachste Modellgleichungen für MOSFET und JFET~~

#### ~~2.1.3 Die Grundsaltungen von Bipolar- und Feldeffekt-Transistoren~~

#### ~~2.1.4 Dynamische und statische Groß- und Kleinsignal-Modelle~~

## Einleitung

Die Vorlesung „Analoge Schaltungstechnik“ gliedert sich grob in die drei Bereiche: Schaltungen

1. zur Verarbeitung analoger Signale,
2. analoge Aspekte digitaler Schalter und Logikgatter sowie
3. Schaltungen zur Bereitstellung von Energie wie DC/DC-Wandler.

Abgrenzung:

Analoge Signale werden hier als Funktionen der Zeit wie  $U = \hat{U} \cdot e^{j\omega t}$  oder der Frequenz wie  $U(s=j\omega)$  betrachtet, nicht aber als Funktion des Ortes wie in  $U = \hat{U} \cdot e^{j(\omega t - k \cdot x)}$ . Dadurch sind Hochfrequenzeffekte wie Ausbreitung und Reflexion von Wellen ausgeschlossen. Auch Bereiche der Erzeugung oder Fernübertragung elektrischer Energie sind nicht Gegenstand dieser Veranstaltung.