

# Elektronische Schaltungen – Hochfrequenzschaltungen und Leistungselektronik

## Vorlesung 1

Prof. Nils Weimann

IW / Bauelemente der Höchstfrequenzelektronik (BHE)  
nils.weimann@uni-due.de

09.04.2025



## Ziele der Vorlesung

- ▶ wie wird aus einem Transistor eine Schaltung für reale Anwendungen?
- ▶ was sind Grundsaltungen?
- ▶ welche Schaltung für welche Anwendung?

## Struktur der Vorlesung (1)

1. kurze Wiederholung: passive Elemente, physikalisches Prinzip der Dioden und Transistoren
2. Bipolartransistor (BJT): Grundsaltungen, Konstantstromquelle, Darlington-Schaltung, Differenzverstärker, Rauschen
3. Feldeffekttransistor (FET): Grundsaltungen, Stromquelle, Differenzverstärker, steuerbarer Widerstand
4. Operationsverstärker: Eigenschaften, Gegenkopplung, interner Aufbau, Frequenzgang
5. Analogrechner und gesteuerte Quellen
6. Aktive Filter: Tiefpass, Bandpass, Hochpass, switched capacitor

## Struktur der Vorlesung (2)

7. Oszillatoren: LC, Quarz, Wien-Brücke, Colpitts, Gegentakt
8. Breitbandverstärker (1): Frequenzabhängigkeit, Kaskode, Differenz- und Symmetrische Verstärker
9. Breitbandverstärker (2): Spannungsfolger, Operationsverstärker, Transimpedanz- und Cherry-Hooper-Verstärker
10. Leistungsverstärker (1): Emitter- und Sourcefolger, komplementäre, Dimensionierung, Ansteuerschaltung
11. Stromversorgung: lineare Regler, Referenzspannung, Schaltregler
12. DA- und AD-Wandler: Prinzipien und Schaltkreise

## Integriertes Praktikum

- ▶ Die Vorlesung “Elektronische Schaltungen” wird durch ein Praktikum ergänzt, das 3 Versuche umfasst
- ▶ Messung und Analyse von digitalen Grundsaltungen
- ▶ Schaltverhalten von Bipolartransistoren
- ▶ Untersuchung von Verstärkerschaltungen auf Basis von Feldeffekttransistoren mittels einfacher Modelle und eines Schaltkreissimulators

## Aufwand

- ▶ eigenständige Vorbereitung  
Vorlesung und Übung 90 min pro Woche
- ▶ Teilnahme Vorlesung und Übung 3 h pro Woche
- ▶ Nachbereitung 90 min pro Woche
- ▶ wöchentlich: **6 h**
- ▶ dazu Praktikum  
3 Versuche  
je 8 h inkl. Vorbereitung

## Prüfungsleistung

- ▶ Teilnahme am Praktikum
- ▶ schriftliche Klausur, basierend auf Vorlesungsinhalten und Übungsaufgaben

## Organisation: Übung zur Vorlesung

- ▶ Leitung: M.Sc. Robin Kreß [robin.kress@uni-due.de](mailto:robin.kress@uni-due.de)  
Pooya Alibeigloo
- ▶ findet statt jeweils im Anschluss an die Vorlesung, Mi 10:00 – 11:00 Uhr
- ▶ Übungsaufgaben werden über Moodle bereitgestellt (bitte etwas vorbereiten)
- ▶ Betreute Bearbeitung während der Übung
- ▶ Lösungen sind über Moodle zum Nacharbeiten verfügbar

## Organisation: integriertes Praktikum

- ▶ Leitung: M.Sc. Robin Kreß [robin.kress@uni-due.de](mailto:robin.kress@uni-due.de)  
Pooya Alibeigloo
- ▶ Termine nach Vereinbarung, in Geb. LT (ZHO, Lotharstraße 55)
- ▶ Materialien zur Vorbereitung werden bereitgestellt
- ▶ Antestat, Betreute Bearbeitung während des Praktikums, Abtestat

## Organisation: Kontakt

- ▶ Prof. Nils Weimann (Vorlesung) [nils.weimann@uni-due.de](mailto:nils.weimann@uni-due.de)
- ▶ M.Sc. Robin Kreß (Übungsleitung) [robin.kress@uni-due.de](mailto:robin.kress@uni-due.de)
- ▶ Pooya Alibeigloo (Betreuung) [pooya.alibeigloo@uni-due.de](mailto:pooya.alibeigloo@uni-due.de)
- ▶ Termine nach Vereinbarung (per Email)  
in Geb. LT (ZHO, Lotharstraße 55) oder per Zoom

## Organisation: LSF-Seite

für EIT

<https://campus.uni-due.de/lsf/rds?state=verpublish&status=init&vmfile=no&publishid=397937&moduleCall=webInfo&publishConfFile=webInfo&publishSubDir=veranstaltung>



## Organisation: LSF-Seite

für PO 15

<https://campus.uni-due.de/lsf/rds?state=verpublish&status=init&vmfile=no&publishid=397903&moduleCall=webInfo&publishConfFile=webInfo&publishSubDir=veranstaltung>



## Organisation: Moodle-Seite

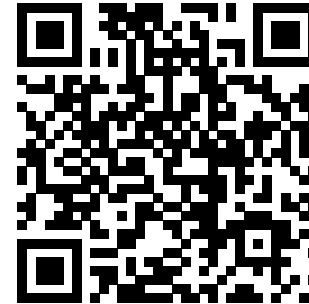
<https://moodle.uni-due.de/course/view.php?id=45208>



Moodle-Einschreibung **automatisch** nach Belegung in LSF

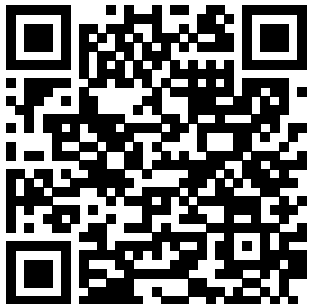
## Organisation: Literatur zur Vorlesung

- ▶ Lehrbuch "Halbleiter-Schaltungstechnik", U. Tietze, Ch. Schenk, 10. Aufl. (1999); verfügbar digital unter <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-662-07639-2>



## Organization: Textbook for the lecture

- ▶ Textbook "Electronic Circuits", U. Tietze, Ch. Schenk, E. Gamm, 2. Aufl. (2008); available at <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-540-78655-9>



## Organisation: Folien und Aufzeichnungen

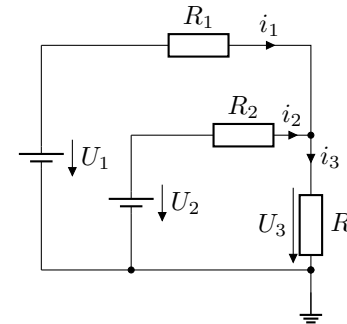
- ▶ Folien verfügbar als Handout auf der Moodle-Webseite (Foliensatz ist in Entstehung)
- ▶ Aufzeichnung erstmal nicht geplant, Meinungsbild?

## Einführung: verwendete Größen

- **Spannung**  $U$  zwischen zwei Punkten wird als  $U_{xy}$  bezeichnet, mit  $U_{yx} = -U_{xy}$
- **Potential**  $V$  ist die Spannung bezogen auf den Bezugspunkt 0,  $V_x = U_{x0}$ , mit  $U_{xy} = V_x - V_y$
- **Strom**  $I$  ist gerichtet und wird in Zeichnungen mit einem Pfeil versehen (technische Stromrichtung)

## Einführung: verwendete Größen

- **Ohmsches Gesetz** beschreibt Zusammenhang  $U = R \cdot I$  zwischen Strom und Spannung in einem Kreis



- Knotenregel, Maschenregel  $\Rightarrow \frac{U_1 - U_3}{R_1} + \frac{U_2 - U_3}{R_2} - \frac{U_3}{R_3} = 0$

## Einführung: Wechselstromkreis

- Knoten- und Maschenregeln gelten für beliebig zeitabhängige Größen, solange  $\lambda \gg$  Schaltkreisabmessungen (dies gilt nicht bei HF-Schaltkreisen  $\rightarrow$  Phase ist hier ortsveränderlich)
- Großbuchstaben (*uppercase*) für beliebig zeitabhängige Größen, z.B.

$$U = U(t)$$

- sinusförmige Wechselspannungen als Kleinbuchstaben (*lowercase*),

$$u = \hat{U} \sin(\omega t + \varphi_u)$$

mit Scheitelwert  $\hat{U}$ , Effektivwert  $U_{eff} = \hat{U}/\sqrt{2}$  und Spitze-Spitze-Spannung  $U_{SS} = 2\hat{U}$

## Einführung: komplexe Größen

- Rechnen mit Winkelfunktionen ( $\sin$ ,  $\cos$ , ...) ist schwer, mit Exponentialfunktionen aber einfach

$$e^{j\alpha} = \cos \alpha + j \sin \alpha$$

- Sinusfunktion als Imaginärteil

$$\sin \alpha = \Im(e^{j\alpha})$$

- daher sinusabhängige Signale schreiben als

$$u = \hat{U} \cdot \Im\{e^{j(\omega t + \varphi_u)}\} = \Im\{\underline{U} e^{j\omega t}\}$$

mit komplexer Amplitude  $\underline{U} = \hat{U} \cdot e^{j\varphi_u}$

## Einführung: komplexe Größen

- Betrag der komplexen Amplitude ist gleich dem Scheitelwert

$$|\underline{U}| = \hat{U} \cdot |e^{j\varphi_u}| = \hat{U}$$

- Entsprechende Definitionen für alle weiteren zeitabhängigen Größen, z.B. Strom

$$I, I(t), i, \hat{I}, \underline{I}$$

## Einführung: komplexe Größen

- komplexer Widerstand  $\equiv$  Impedanz

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}}{\underline{I}} = \frac{\hat{U}}{\hat{I}} e^{j(\varphi_u - \varphi_i)} = |\underline{Z}| e^{j\varphi}$$

- Phase  $\varphi = \varphi_u - \varphi_i$  beschreibt “Winkel” zwischen Strom und Spannung
- eilt die Spannung dem Strom voraus, ist  $\varphi$  positiv

## Einführung: komplexe Impedanz

- ohmscher Widerstand

$$\underline{Z}_R = R$$

- Kapazität

$$\underline{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = \frac{-j}{\omega C}$$

- Induktivität

$$\underline{Z}_L = j\omega L$$

## Einführung: Verstärkung

- komplexer Verstärkungsfaktor

$$\underline{A} = \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = \frac{\hat{U}_a \cdot e^{j\varphi_a}}{\hat{U}_e \cdot e^{j\varphi_e}} = \frac{\hat{U}_a}{\hat{U}_e} \cdot e^{j(\varphi_a - \varphi_e)} = |\underline{A}| \cdot e^{j\varphi}$$

- mit der Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung
- eilt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung voraus, ist  $\varphi$  positiv; eilt sie nach, ist  $\varphi$  negativ

## Einführung: Logarithmisches Spannungsverhältnis

- ▶ logarithmisches Spannungsverhältnis

$$|\underline{A}|^{\#} = 20 \text{ dB} \cdot \log \frac{\underline{U}_a}{\underline{U}_e} = 20 \text{ dB} \cdot \log |\underline{A}|$$

- ▶ mit der Phasenverschiebung  $\varphi$  zwischen Eingangs- und Ausgangsspannung
- ▶ eilt die Ausgangsspannung der Eingangsspannung voraus, ist  $\varphi$  positiv; eilt sie nach, ist  $\varphi$  negativ

## Einführung: weiteres

- ▶ Logarithmen: der Logarithmus einer benannten Zahl (mit Einheit) ist nicht definiert. Deshalb schreiben wir z.B. für die Frequenz nicht  $\log f$  sondern  $\log (f/\text{Hz})$
- ▶ Differenzen von Logarithmen: Der Ausdruck  $\log \Delta f = \log f_2 - \log f_1$  ist eindeutig definiert, weil er sich in den Ausdruck  $\log (f_2/f_1)$  umformen lässt
- ▶ Rechenregeln für Logarithmus

$$\log (a \cdot b) = \log a + \log b \quad (1)$$

$$\log (x^a) = a \cdot \log x \quad (2)$$

$$\log_a(x) = \log(x)/\log(a) \quad (3)$$

## Einführung: Rechenzeichen

- ▶ Differentiation nach der Zeit

$$\frac{dU}{dt} = \dot{U}$$

- ▶ Proportionalität  $\sim$  oder  $\propto$
- ▶ ungefähre Übereinstimmung  $\approx$
- ▶ Definition  $\equiv$
- ▶ Parallelschaltung

$$R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

## Passive Netzwerke

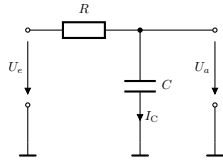
Tiefpass

Hochpass

Schwingkreis

## Tiefpass: Netzwerk

- ▶ einfachster Tiefpass als RC Netzwerk



- ▶ Spannungsteiler

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{1/j\omega C}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

- ▶ Frequenzgang und Phasenverschiebung

$$|\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}} \quad \text{und} \quad \varphi = -\arctan(\omega RC)$$

## Tiefpass: Grenzfrequenz

- ▶ 3 dB Grenzfrequenz: Leistung fällt um Faktor 2 ab, Amplitude  $|\underline{A}|$  um Faktor  $1/\sqrt{2}$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} = |\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + \omega^2 R^2 C^2}}$$

- ▶ quadrieren ergibt Grenzfrequenz  $f_g$

$$f_g = \frac{1}{2\pi} \omega_g = \frac{1}{2\pi RC}$$

## Tiefpass: Frequenzgang

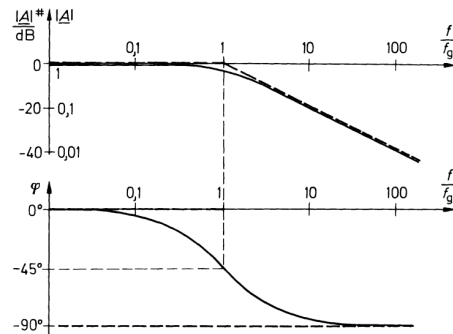
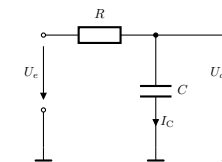


Abbildung: Bode-Diagramm – Tiefpass

- ▶ Grenzfrequenz  $f_g = \frac{1}{2\pi} \omega_g = \frac{1}{2\pi RC}$
- ▶ Abfall von  $|\underline{A}|^\#$  mit 20 dB/dec ausgehend von  $f_g$

## Tiefpass: Zeitbereich



- ▶ Knotenregel  $\frac{U_e - U_a}{R} - I_C = 0$
- ▶ mit diff. Kondensatorladung  $I_C = C \dot{U}_a$

$$RC \dot{U}_a + U_a = U_e$$



## Tiefpass: Zeitbereich

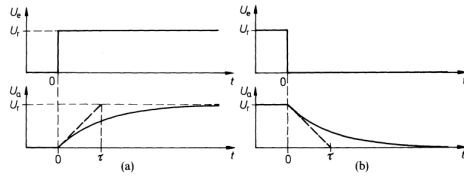


Abbildung: Sprungantwort – Tiefpass

### ► Differentialgleichung

$$RC\dot{U}_a + U_a = U_e = \begin{cases} U_r & t > 0 \\ 0 & t < 0 \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{(a)} \\ \text{(b)} \end{matrix}$$

## Tiefpass: Zeitbereich

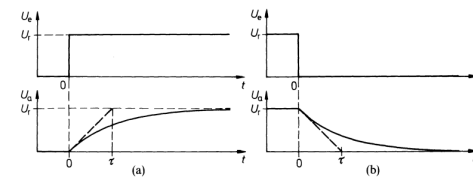


Abbildung: Sprungantwort – Tiefpass

- Lösung (a)  $U_a(t) = U_r \left(1 - e^{-\frac{t}{RC}}\right)$
- Lösung (b)  $U_a(t) = U_r e^{-\frac{t}{RC}}$
- mit Zeitkonstante  $\tau = RC$
- *Integrator*

## Tiefpass: Anstiegszeit

### ► Anstiegszeit der Antwort auf Rechteckimpuls am Eingang

$$t_a = t_{90\%} - t_{10\%} = \tau (\ln 0,9 - \ln 0,1) = \tau \ln 9 \approx 2,2\tau$$

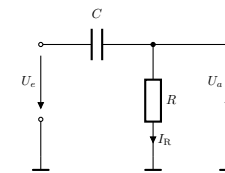
### ► mit der Grenzfrequenz der Verstärkung $f_g = 1/(2\pi\tau)$ folgt

$$t_a \approx \frac{1}{3f_g}$$

- praktische Bedeutung: "instantane" Bandbreite des Systems
- z.B. Bandbreite Breitbandverstärker vs. Transistor-Grenzfrequenz

## Hochpass: Netzwerk

### ► einfachster Hochpass als RC Netzwerk



### ► Spannungsteiler

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = \frac{R}{R + 1/j\omega C} = \frac{1}{1 + 1/(j\omega RC)}$$

### ► Frequenzgang und Phasenverschiebung

$$|\underline{A}| = \frac{1}{\sqrt{1 + 1/(\omega^2 R^2 C^2)}} \quad \text{und} \quad \varphi = +\arctan\left(\frac{1}{\omega RC}\right)$$

## Hochpass: Grenzfrequenz

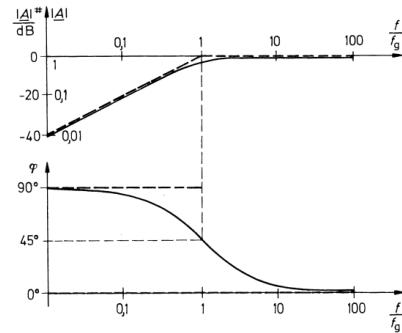
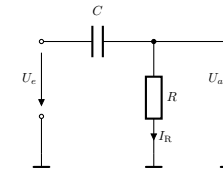


Abbildung: Bode-Diagramm – Hochpass

- Grenzfrequenz  $f_g = \frac{1}{2\pi\omega_g} = \frac{1}{2\pi RC}$
- Anstieg von  $|A|^\#$  mit 20 dB/dec von DC bis  $f_g$

## Hochpass: Zeitbereich



- Knotenregel  $C \cdot \frac{d}{dt}(U_e - U_a) - \frac{U_a}{R} = 0$
- mit Randbedingung  $\dot{U}_e = 0$  folgt DGL.

$$RC\dot{U}_a + U_a = 0$$

- Lösung  $U_a(t) = U_{a0} \cdot e^{-\frac{t}{RC}}$

## Hochpass: Sprungantwort

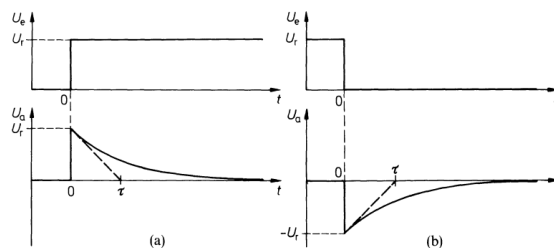
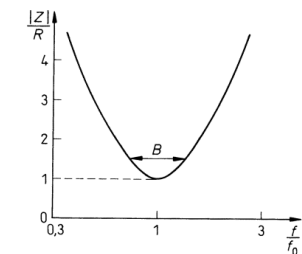
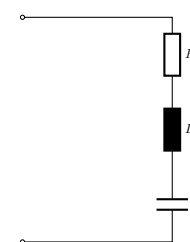


Abbildung: Sprungantwort – Hochpass

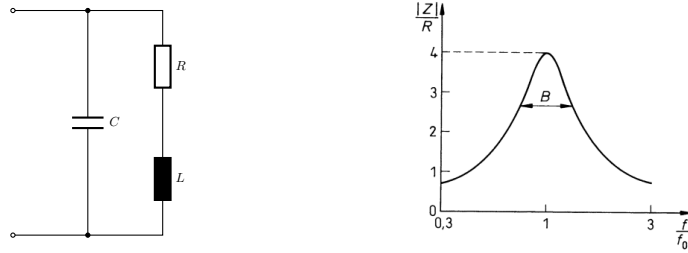
- Differentiator für NF-Signale ( $f \ll 1/RC$ )
- Koppelglied für hochfrequente Signale (DC-Block)

## Schwingkreis: Parallel



- Resonanzfrequenz  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1/(2\pi\sqrt{LC})$
- Impedanz  $\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)$
- Resonanzwiderstand  $\underline{Z}_0 = R$
- Bandbreite  $B = \frac{R}{2\pi L}$  und Güte  $Q = \frac{f_0}{B} = \frac{1}{R}\sqrt{\frac{L}{C}}$

## Schwingkreis: Serie



- ▶ Resonanzfrequenz  $f_0 = \omega_0/2\pi = 1/(2\pi\sqrt{LC})$
- ▶ Impedanz  $\underline{Z} = \frac{R + j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC} \approx \frac{j\omega L}{1 + j\omega RC - \omega^2 LC}$
- ▶ Resonanzwiderstand  $\underline{Z}_0 \approx \frac{L}{RC} = Q^2 R$
- ▶ Bandbreite  $B \approx \frac{R}{2\pi L}$  und Güte  $Q = \frac{f_0}{B} \approx \frac{1}{R} \sqrt{\frac{L}{C}}$

Danke für Ihre Teilnahme