

Zusammenfassung Elektronik für Physiker

Mladen Ivkovic
mladen.ivkovic@uzh.ch

Mai 2014

Anmerkung des Autoren

- Dieses Dokument dient zur Präsenzübungsvorbereitung für meine Kommilitonen und Kommilitoninnen. Ich habe mich stark an der Vorlesung, gehalten von Achim Vollhardt, und am Skript von Prof. Ulrich Straumann orientiert. Das Skript befindet sich auf <http://www.physik.uzh.ch/lectures/elektronik/elektronikscript.pdf>, Stand 02.05.2014
- Dieses Dokument ist nach bestem Wissen und Gewissen erstellt. Unvollständigigkeiten und Fehler sind möglich und wahrscheinlich. (Grammatik und Orthographie sowieso. lol)
- Alle Abbildungen stammen aus Prof. Straumanns Skript.
- Das PDF 'Mögliche Themen für Präsenzübung (30-45 min)' stammt von <http://www.physik.uzh.ch/lectures/elektronik/uebung.pdf>, Stand 02.05.2014
- Anmerkungen für diejenigen, die sich mit diesem Dokument für die Prüfung vorbereiten wollen:
 - Es existiert ein weiteres Dokument, 'Zusammenfassung Elektronik Massgeschneidert', welches nur die im PDF 'Mögliche Themen für Präsenzübung (30-45 min)' vorkommenden Themen enthält.
 - Das Kapitel 1.4 'SPICE Simulationen' wurde ausgelassen.
 - Das Kapitel 2.3.4 'Zenerdioden' wurde ausgelassen.
 - Das Kapitel 3 'Signale und Systeme' wurde ausgelassen.
 - Das Kapitel 4.2.2., 4.2.3, 4.2.4, 4.2.5 und 4.2.6 wurden ausgelassen.

Mögliche Themen für Präsenzübung (30-45 min):

Identifikation eines Tiefpasses
Berechnung Grenzfrequenz, Funktionsbereich

Zeichne den inneren Aufbau eines NPN-Transistors
Skizziere die $I_c(U_{ce})$ Kennlinie

Zeichne den Inneren Aufbau eines n-Kanal J-FET
Skizziere die $I_d(U_{ds})$ Kennlinie

Zeichne einen npn-Emitterfolger
Für welche Anwendung wird er gebraucht?

Zeichne das Schaltzeichen eines Operationsverstärkers
Definiere Leerlaufverstärkung
Zeichne die Schaltung eines nichtinvertierenden Verstärkers mit Verstärkung
 $+10$
Zeichne einen Transkonduktanzwandler

1 Strom, Spannung, Widerstand

1.1 Komplexe Widerstände, passive Bauelemente

1.1.1 Komplexe Spannungen und Ströme

- Das **Ohm'sche Gesetz** $\frac{U}{I} = \text{const.} = R$ gilt für zeitlich konstante Spannungen U und Ströme I . Spannungen und Ströme sind im allgemeinen beliebige zeitabhängige Funktionen $U(t)$ und $I(t)$.
- **Satz von Fourier**: Jede zeitabhängige Funktion kann als Summe harmonischer Funktionen beschrieben werden. Also auch $U(t)$ und $I(t)$. Diese werden als komplexe Funktionen geschrieben:

$$\widetilde{U}(t) = U_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_u)} = U_0 \cdot e^{i\omega t} e^{i\varphi_u} \quad (1.1)$$

$$\widetilde{I}(t) = I_0 \cdot e^{i(\omega t + \varphi_I)} = I_0 \cdot e^{i\omega t} e^{i\varphi_I} \quad (1.2)$$

- $\omega = 2\pi\nu$ heisst **Kreisfrequenz**; φ_u und φ_I sind die **Phasen** der Spannung und des Stromes.
- U_0 und I_0 , die Beträge der komplexen Funktionen, entsprechen den **reellen Amplituden (Scheitelwerten)**. $U_0 e^{i\varphi}$ und $I_0 e^{i\varphi}$ sind die Spannung und Stromstärke bei $t = 0$ und werden **komplexe Amplituden** genannt.
- Der **Effektivwert** der Spannung wird durch:

$$U_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T U^2(t) dt} \quad (1.3)$$

definiert. Es ist der quadratische Mittelwert (r.m.s., root mean square).

- Für die **Leistung** gilt:

$$\overline{P} = \overline{U \cdot I} = \frac{\overline{U^2}}{R} = \frac{U_{eff}^2}{R} \quad (1.4)$$

$$P = U_{eff} \cdot I_{eff} \cdot \cos\varphi \quad \text{mit } \varphi = \varphi_u - \varphi_I \quad (1.5)$$

- Das Verhältnis zwischen Scheitelwert und Effektivwert wird als **Scheitelfaktor** k_s (engl. crest factor) bezeichnet: $k_s := \frac{U_0}{U_{eff}}$
Für sinusförmige Wechselspannungen ist $k_s = \sqrt{2}$, für Rechteckspannungen ist $k_s = 1$, für Dreieck- oder Sägezahnschwingungen ist $k_s = \sqrt{3}$.

1.1.2 Das Ohm'sche Gesetz

- Die **Impedanz** oder **Wechselstromwiderstand** \widetilde{Z} ist das Verhältnis zwischen Potentialunterschied (Spannung) an den Anschlüssen eines beliebigen Elementes und dem Strom: $\widetilde{Z} := \frac{\widetilde{U}}{\widetilde{I}}$
- Das Ohm'sche Gesetz besagt, dass die Impedanz **zeitunabhängig** und komplex ist.

$$\widetilde{Z} = R + iX \quad (1.6)$$

$$\widetilde{Z} = Z_0 e^{i\varphi}, \varphi = \varphi_u - \varphi_I \quad (1.7)$$

Dabei ist R der **Wirkwiderstand**, X der **Blindwiderstand** und Z_0 der **Scheinwiderstand**.

- Es gelten die gleichen **Rechenregeln** wie bei reellen Widerständen¹: Bei Serieschaltung addieren sich die Widerstände, bei Parallelschaltung addieren sich die Inversen der Widerstände.

1.1.3 Reelle Widerstände, Induktivitäten, Kapazitäten

	reelle Widerstände	Induktivitäten	Kapazitäten
Spannung	$U_R = I \cdot R$	$U_L = L \cdot \frac{\partial I}{\partial t}$	$U_C = \frac{1}{C} \cdot Q$ $Q = \int I(t) dt$
Impedanz	$Z_R = \frac{U_0}{I_0} = R$	$Z_L = \frac{U_L}{I} = i \cdot \omega L$	$Z_C = \frac{U_C}{I} = \frac{1}{i\omega C}$
Scheinwiderstand	R	$Z_{0L} = \omega L$	$Z_{0C} = \frac{1}{\omega C}$
Phasenverschiebung	keine	$+\frac{\pi}{2}$	$-\frac{\pi}{2}$

- Alle passiven linearen elektrischen Netzwerke können aus den drei Grundzweipolen reeller Widerstand, Induktivität und Kapazität aufgebaut werden.
- Bei **Induktivitäten** entsteht bei einem zeitabhängigem Strom eine magnetisch induzierte Spannung. *Der Strom eilt der Spannung um $\frac{\pi}{2}$ nach.*
- Bei **Kapazitäten** wird der Kondensator mit einem Strom geladen. *Der Strom folgt der Spannung um $\frac{-\pi}{2}$ hinterher.*
- Die Schaltkreise für den Hoch- und Tiefpass sind in den Abbildungen 4.4 und 4.1 dargestellt. Eselsbrücke: Hochpass \rightarrow Kondensator hoch, Tiefpass \rightarrow Kondensator tief. Im Grunde genommen ist der einzige Unterschied zwischen Hoch- und Tiefpass, wo das die Ausgangsspannung gemessen wird: Der Schaltkreis beinhaltet einen Kondensator und einen Widerstand in Serie geschaltet zu einer Wechselstromquelle. Beim Hochpass wird die Ausgangsspannung über den Widerstand gemessen, beim Tiefpass über den Kondensator. Bei tiefen Frequenzen ist Z_C gross. Also haben wir einen grossen Spannungsabfall über C . Bei hohen Frequenzen ist Z_C klein, also haben wir einen grossen Spannungsabfall über R .
- **Tiefpass**
 - Mit grösseren Frequenzen sinkt Z_C . Die Ausgangsspannung wird umso kleiner, je höher die Frequenz ist.
 - Gesamtwiderstand: Serieschaltung $Z = R + \frac{1}{i\omega C}$.
 - Strom: $I = \frac{U_{in}}{Z}$.
 - Ausgangsspannung (= Spannung über Kondensator): $U_{out} = I \cdot 1/i\omega C$.
 - Das Verhältnis von Ausgangs- zu Eingangsspannung bezeichnet man auch als **Übertragungsfunktion** $G := \frac{U_{out}}{U_{in}}$. Als Funktion von ω spricht man auch vom **Frequenzgang** $G(\omega)$. Für unseren Tiefpass gilt:

$$G(\omega) = \frac{1}{1 + i\omega RC} \quad (1.8)$$

- Der Betrag $|G(\omega)|$ und Argument (Phase φ) werden graphisch im **Bodediagramm** dargestellt. Siehe dazu Abb. 4.2.
- das **Verstärkungsmass** ist $A(\omega) = 20 \log_{10} |G(\omega)|$
- Die **Grenzfrequenz** $f_g := \frac{\omega_g}{2\pi}$ ist bei unserem Tiefpass $f_g = \frac{1}{2\pi RC}$. Bei dieser ist der Frequenzgang auf $1/\sqrt{2}$ gefallen. Für Frequenzen oberhalb der Grenzfrequenz nimmt der Frequenzgang linear mit $1/\omega$ ab. Bei der Grenzfrequenz ist die Phase um 45° verschoben, für $\omega \gg \omega_g$ um 90° . Man spricht deshalb von einem **Integrator**, da aus $U_{in} = \cos(\omega t) \rightarrow U_{out} = \frac{1}{\omega} \sin(\omega t)$ ²

¹Reelle Widerstände kann man als komplexe Widerstände mit $\varphi = 0$ betrachten.

²Das $\frac{1}{\omega}$ kommt durch die Impedanz zustande...

- Die **Antwort** unseres Tiefpasses auf einen Sprung der Höhe U_0 ist $U_{out} = U_0 \cdot (1 - e^{-\frac{t}{RC}})$. Vgl. Abb. 4.3
- Die **Aufstiegszeit** von 10% auf 90% der Eingangsspannung ist $t_a \approx 2.2\tau \approx \frac{1}{3f_g}$.
- Der Tiefpass eignet sich als gleitender **Mittelwertbildner** mit der charakteristischen Zeit $\tau = RC$. Schnellere Änderungen werden im Kondensator aufintegriert, langsamere werden übertragen. Man kann also Tiefpässe für die Glättung von unruhigen oder mit höheren Frequenzen verrauschten Signalen einsetzen.

- **Hochpass**

- Bei kleinen Frequenzen wird die Impedanz der Kapazität immer grösser, so dass die Ausgangsspannung kleiner wird. Bei grossen Frequenzen wird die Impedanz klein, so dass die Ausgangsspannung gleich der Eingangsspannung wird.
- Frequenzgang: $G(\omega) = \frac{1}{1 + \frac{1}{i\omega RC}}$
- Das Bodediagramm ist gegenüber dem Tiefpass an der Grenzfrequenz gespiegelt. Siehe Abb. 4.5
- Für sehr kleine Frequenzen wird aus $U_{in} = \sin(\omega t) \rightarrow U_{out} = \omega \cdot \cos(\omega t)$. Der Hochpass wirkt bei kleinen Frequenzen differenzierend.
- Die Sprungantwort des Hochpasses ist $U_{out} = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$.
- Der Hochpass kommt insbesondere dort zur Anwendung, wo von einem Signal ein Gleichspannungsanteil entkoppelt werden muss.

- **Oszilloskop-Tastkopf**

- Die **Ordnung** eines Tiefpasses ist die Anzahl frequenzabhängiger Bauteile.
- Das Schaltschema eines passiven Tastkopfs ist in Abb. 4.8 dargestellt. Im Grunde genommen haben wir in 2 ‘Blöcken’ je einen Kondensator und Widerstand parallel zueinander geschaltet: C_T mit R_K und C_K mit R , zu dem parallel dazu gemessen und in den KO geschickt wird. C_K ist die Kapazität des Koaxialkabels ($\approx 100pF/m$), R der Eingangswiderstand des Oszilloskops (in der Regel $1M\Omega$), R_T der Tastkopfwiderstand (i.d.R. $9M\Omega$) und C_T die Tastkopfkapazität. Diese kann meist abgeglichen werden, so dass $\frac{C_T}{C_K} = \frac{R}{R_T}$. In diesem Fall ergibt sich keine Phasenverschiebung und das Spannungsverhältnis ist frequenzunabhängig.

- **Wien-Brücke**

- Das Schaltschema einer Wien-Brücke ist in Abb. 4.9 dargestellt.
- Die Wien-Brücke besteht aus vier i.A. komplexen Widerständen. Ist die in der Mitte gemessene Spannung null, spricht man von einer abgeglichenen Brücke. Dann ist: $\frac{Z_0}{Z_x} = \frac{Z_1}{Z_2}$. Im Allgemeinen wird die Bedingung nur für eine bestimmte Frequenz erfüllt.
- Die Wienbrücke wird zur präzisen Messung von komplexen Impedanzen verwendet. I.d.R. verwendet man für Z_1 und Z_2 reelle Widerstände und für Z_0 eine Anordnung von Grundzweipolen.

1.1.4 Bauformen

- Ideale R , L und C - Elemente können nicht gebaut werden. Neben Toleranzen in den Widerstandswerten können reale Bauelemente nie rein reell oder imaginär sein. Anschlüsse aller Bauelemente haben eine Induktivität und einen Widerstand. Zwischen den Anschlüssen gibt es immer eine Kapazität.
- Reale Bauelemente werden deshalb durch ein **Ersatzschaltbild** beschrieben, das aus idealen R , L und C besteht.

- Man unterscheidet zwischen **Durchstreckmontage THT** (Trough hole technology) mit Bauelementen mit Drahtanschlüssen für normale Platinenmontage und **Oberflächenmontage SMD** (surface mounted devices) für die SMT (Surface mounted technology), die nur Anschlussflächen besitzen und direkt auf die Oberfläche montiert werden. Die SMT eignet sich viel besser für automatische Bestückungsverfahren und löste einen Miniaturisierungsschub aus.
- Für **Widerstände** ist die Bauform, Belastbarkeit, Präzision und der Temperaturkoeffizient relevant. Der Widerstandswert wird bei THT mit einem Farbcode, bei SMT mit einem Zahlencode angegeben³.
- Zur präzisen Messung von Widerständen dient die **4-Draht-Messung** (vgl. Abb. 4.10) Die Widerstände der Kabel verfälschen bei einer gewöhnlichen Widerstandsmessung den Messwert. Führt man nun den Strom aus einer Konstantstromquelle in einer separaten Leitung dem Widerstand zu und misst den Spannungsabfall über R_x auf einer anderen Leitung, wird das Resultat unabhängig von den R_K .
- Es gibt drei Klassen von **nichtlinearen Widerständen**: PTC, NTC und VDR. **NTC** haben einen negativen Temperaturkoeffizienten, **PTC** einen positiven⁴. **VDR** (Voltage dependant resistor) ändern ihren Widerstand mit der angelegten Spannung. Der Widerstand nimmt exponentiell innert ns mit der Spannung ab.
- **Kondensatoren** bestehen im Prinzip aus zwei leitenden Flächen mit Isolationsmaterial dazwischen mit möglichst grosser Dielektrizitätskonstante ϵ . Sie werden durch den Kapazitätswert, Spannungsfestigkeit, Verlustfaktor und Temperaturkoeffizienten charakterisiert.

1.2 Strom und Spannungsquellen

1.2.1 Reale und lineare Strom- und Spannungsquellen

- Ideale Strom- und Spannungsquellen liefern immer den Gleichen Strom/Spannung unabhängig von der angehängten Last. Ideale Strom- und Spannungsquellen existieren nicht.
- Die Spannung einer realen Spannungsquelle ist abhängig vom abgegebenen Strom. Die Spannung an den Anschlüssen, die **Klemmspannung**, sinkt mit dem abgegebenen Strom.
- Eine **lineare Spannungsquelle** wird durch das Ersatzschaltbild in Abb. 4.11 beschrieben. Man gibt der Spannungsquelle den **Innenwiderstand** R_i in Reihe geschaltet. Die Ausgangsspannung U_K nimmt linear mit dem Strom ab: $U_K = U_0 - I \cdot R_i$. Fliesst kein Strom, spricht man von **Leerlauf** und $U_K = U_0$. Beim **Kurzschluss** ist $U_K = 0$ und der fließende Strom $I = U_0/R$.
- **Lineare Stromquellen** haben einen Innenwiderstand, der parallel zur Stromquelle liegt (Abb. 4.12). Der Ausgangsstrom nimmt bei höherer Spannung ab, da ein immer grösserer Teil des Stromes durch den Innenwiderstand fliesst. Im Kurzschluss fliesst der Quellenstrom I_Q , im Leerlauf beträgt die Spannung $U = I_Q R_i$.
- Da beide Kennlinien linear sind, ist eine Stromquelle I_Q mit Innenwiderstand R_i identisch zu einer Spannungsquelle mit Leerlaufspannung $U_0 = I_Q R_i$ und gleichem Innenwiderstand. **Praktische Spannungs- und Stromquellen** haben höchstens in einem eingeschränkten Bereich eine lineare Charakteristik.

1.2.2 Drehstrom

- Man spricht von **Mehrphasensystemen**, wenn man mehrere Wechselstromkreise fester Frequenz mit fester Phasenbeziehung betrachtet. Symmetrische Mehrphasensysteme haben eine gleichmässig verteilte Phasendifferenz über 2π und die gleiche Spannung.

³Bsp: Zahlencode 471 = $47 \cdot 10^1 = 470\Omega$

⁴NTC: 2 – 6%/K, PTC: 5 – 70%/K

- Beim **Drehstromnetz** sind die Phasen um 120° verschoben. Bei **Dreiecksschaltungen** ist die Effektivspannung 400V, bei **Sternschaltung** 230V (vgl. Abb.4.13). Der symmetrische Nullpunkt ist der **Neutralleiter** und spannungslos. Bei symmetrischer Last ist er auch stromlos. Da Lasten selten symmetrisch sind, wird noch eine **Schutzerdung** installiert.

1.3 Die Kirchhoff'schen Regeln

- **Knotenregel:** In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Ströme null. (Ladungserhaltung)
- **Maschenregel:** In einem geschlossenen Stromkreis ist die Summe aller Spannungen null. (Energieerhaltung)
- **Konventionen:**
 - Positive Ströme fließen vom Knoten weg.
 - Positiver Spannungsabfall entlang positiver Stromrichtung.
 - Gleichspannungsquellen werden von + nach - positiv gerechnet.

1.4 Endliche Leitungen

- Leitungen dienen der Übertragung elektrischer Signale und Energie. Da Leitungen endlicher Länge mit angelegter Spannung und durchfließendem Strom elektromagnetisch mit sich selbst und der Umgebung wechselwirken, können die Eigenschaften von Leitungen mit einer geeigneten Ersatzschaltung aus Grundzweipolen beschrieben werden. Abb. 4.14 zeigt eine solche, die in der Praxis die meisten Fälle beschreibt. L , R , C und G sind hier die Größen pro Leitungslänge.⁵
- Die Spannung U in einem Kabel verhält sich wie gedämpfte Wellen entlang dem Leiter: $U(x, t) = U_0 e^{i\omega t - \gamma x}$ mit $\gamma = \alpha + i\beta = \sqrt{(R + i\omega L)(G + i\omega C)}$.⁶
 α ist die Dämpfung, $\beta = 2\pi/\lambda$ ist die Wellenzahl. Die Phasengeschwindigkeit ist $v = \omega/\beta = f \cdot \lambda$.
- Das Verhältnis von Spannung zu Strom in der Leitung analog dem ohm'schen Gesetz nennt man den **Wellenwiderstand** oder die **Wellenimpedanz**:

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{R + i\omega L}{G + i\omega C}} \quad (1.9)$$

⁵ L ist die Selbstinduktivität, R der ohm'sche Widerstand, C die Kapazität zwischen Signal- und Masseleitung und G der Leitwert der Isolation = 1/Verlustwiderstand

⁶Herleitung siehe Straumann-Skript S. 21f

2 Halbleiter-Bauelemente

2.1 Halbleiter und ihre Dotierung

- Die **Fermienergie** ϵ_F ist die Grenze, ab welcher die Energieniveaus nicht mehr belegt sind. Die **Fermifunktion** beschreibt die Belegungsdichte der Zustände mit Energie E als Funktion der Temperatur: $f(E) = \frac{1}{1 + \exp[(E - \epsilon_F)/kT]}$
- Bringen wir viele Atome in einem Gitter unter, dann kombinieren die diskreten Energieniveaus in gemeinsame Energiebänder. Das **Valenzband** ist direkt unter der Fermienergie, das darüberliegende ist das **Leitungsband**. Ist $T \neq 0$, werden einzelne Elektronen in das Leitungsband gehoben. So entstehen n_e **Leitungselektronen** im Leitungsband und n_p **Löcher** im Valenzband.
- Bei reinen Halbleitern (= intrinsische Leitung) ist $n_p = n_e$. Der wesentliche Trick in der Halbleiterelektronik besteht in der **Dotierung**. Hierbei werden minimal kleine Mengen von 3 oder 5-wertigen Atomen als Verunreinigung in das Gitter der 4-wertigen Siliziumatome eingebracht.¹ n-Dotierung führt zu zusätzlicher Elektronenleitung und erhöht ϵ_F ². p-Dotierung führt zu zusätzlicher Lochleitung und senkt die Fermienergie.
- Die **Majoritätsleitung** (die durch die Dotierung hervorgerufene Leitung) ist ab einer gewissen Temperatur konstant, wenn alle dotierten Ladungsträger sich im Leitungsband befinden.

2.2 Die pn-Grenzschicht

- Es ist heute möglich, sehr kleine Strukturen von verschiedenen dotierten Bereichen in Silizium herzustellen. Der Übergangsbereich zwischen p- und n-dotierten Halbleiterbereichen (**pn junction**) stellt das zentrale Element der Halbleitertechnik dar.
- 'Klebt' man zuvor isolierte p- und n-dotierte Bereiche aufeinander, diffundieren die Löcher und die Elektronen in den anderen Bereich. So entsteht eine Ladung, da den dotierten Gitterstellen Ladungsträger fehlen. Diese Ladung hat ein elektrisches Feld und somit ein Potenzial (**Diffusionspotential**) zur Folge, welches der Diffusion entgegenwirkt. Es bildet sich ein Gleichgewicht, die Fermienergie wird konstant. (Vgl. Abb. 4.15). Der Grenzbereich hat eine wesentlich reduzierte Leitungsdichte, man spricht von der **Verarmungszone (depletion region)** oder von der hochohmigen **Sperrschicht**.
- Wird an diesem Halbleiterübergang eine externe Spannung angelegt, verschieben sich die Potentiale der Energieniveaus und die Fermienergie der beiden Seiten gegeneinander. Legt man eine negative Spannung (**reverse bias**, Minus an der p-Seite) an, so wird der Potenzialwall vergrößert. Ein kleiner, stark temperaturabhängiger **Sperrstrom** I_r entsteht unabhängig von der angelegten Spannung, denn der Grund für diesen ist zufällige Leitungsträger-Diffusion. Legt man eine positive Spannung (**forward bias**, Plus an der p-Seite) an, so wird der Potentialwall abgebaut. Der Strom ist nun exponentiell von der angelegten Spannung abhängig:

$$I = I_r \cdot (e^{eU/kT} - 1) \quad (2.1)$$

Diese Gleichung wird auch **Diodengleichung** genannt, der Strom **Diffusionsstrom**. Diese einseitige Leitung der Grenzschicht ist die Grundlage der Funktion aller junction-Halbleiterelemente.

¹Silizium wird am häufigsten verwendet. 3- bzw. 5-wertige Atome sind Atome mit 3 bzw. 5 Valenzelektronen.

²da sich zusätzliche Elektronenzustände ergeben.

- Mit wachsender Spannung vergrößert sich die Breite der Sperrschicht. Die Sperrschicht dehnt sich umso mehr in einen Bereich aus, je kleiner dessen Dotierung im Vergleich zur anderen Seite ist. Die **Sperrschichtdicke** hängt von \sqrt{U} ab.
- Die Kapazität der Sperrschicht hängt von der Fläche und der Sperrschichtdicke ab. Für schnelle Schaltungen braucht man kleine Kapazitäten. Da die Dicke von \sqrt{U} abhängt, kann man die Kapazität mit der Sperrspannung steuern.

2.3 Dioden und ihre Anwendungen

- Die einfachsten Halbleiterelemente mit einem pn-Übergang sind **Dioden**. Die p-Seite heisst **Anode**, die n-Seite heisst **Kathode** (mit Ring gekennzeichnet; von dieser Seite fließt kein Strom). Charakteristische Eigenschaften sind maximale Sperrspannung, Sperrstrom bei Raumtemperatur, Kapazität und Schaltgeschwindigkeit und maximaler Vorwärtsstrom.
- Der Sperrstrom ist höher als von der Dotierung erwartet und etwas Spannungsabhängig. Das liegt an der thermischen Erzeugung von Elektronen-Lochpaaren im Sperrbereich und nimmt mit der Sperrschichtdicke zu. Bei sehr grossen Vorwärtsströmen beginnt sich das Halbleitermaterial wie ein ohm'scher Widerstand zu verhalten. Bei grossen Sperrspannungen bricht die Sperrschicht zusammen und die Diode wird schnell leitend. Die Diodenkennlinie ist in Abb. 4.16 dargestellt.
- **Gleichrichter**
 - Gleichrichter 'verwandeln' Wechselstrom in Gleichstrom. Man unterscheidet zwischen Vollwellen- und Halbwellengleichrichter.
 - Beim **Halbwellengleichrichter** wird nur eine der Halbwellen der Wechselspannung verwendet. Ein Kondensator wird auf die Spitzenspannung der Wechselspannung aufgeladen und sorgt dafür, dass auch in der Pause weiter Strom fließt. (Vgl. Abb. 4.17)
 - Beim **Vollwellengleichrichter** werden beide Halbwellen benutzt. Die Pausen zwischen den Spannungsspitzen sind kürzer, es benötigt einen halb so grossen Kondensator, aber es geht doppelte Diodendurchlassspannung verloren. Schaltkreis siehe Abb. 4.18
- Zur Erzeugung hoher Sperrspannungen baut man **pin-Dioden**, welche aus einer p-dotierten, nicht-dotierten (intrinsischen) und einer n-dotierten Schicht bestehen. Die dotierten Schichten sind stark dotiert. So lassen sich grosse Ströme und dennoch hohe Sperrspannungen durch den i-Abstand erreichen.

2.4 Bipolare Transistoren

- Ein **Transistor** besteht aus 3 Elektroden, es dient zum Verstärken oder Schalten eines Signals. Unter **bipolaren Transistoren** versteht man solche, die aus 3 unterschiedlich dotierten Halbleiterzonen bestehen. Man unterscheidet zwischen npn- und pnp- Transistoren, je nach Dotierungsfolge. Die beiden pn-Übergänge verhalten sich wie zwei entgegengesetzte Dioden, diese Beschreibung gibt aber nicht die gesamte Funktionalität wieder. (Siehe Abb. 4.19)
- Normalerweise wird die Basis-Emitterdiode (BE) in Vorwärtsrichtung und die Kollektor-Basisdiode (BC) in Sperrrichtung betrieben. Dadurch driften Elektronen vom stark dotierten Emitter in die Basisschicht. Da diese sehr schwach dotiert und sehr dünn ist, reicht die Sperrschicht der BC-Diode nahe an die CE-Übergangsschicht heran, s.d. viele Elektronen in die BC-Sperrschicht driften können. Dort werden sie durch das E-Feld Richtung Kollektor abgesaugt³ und erzeugen so einen CE-Strom. Der zentrale Punkt ist, dass dieser Strom durch die Spannung an der BE-Diode gesteuert werden kann: diese ist durch den Basisstrom und die Diodenkennlinie des pn-Übergangs bei BE gegeben.

³Meine Interpretation: Durch die angelegte Sperrspannung über BC. Wo kein Strom fließen sollte, da man bei p-Dotierung schlecht noch Elektronen abziehen kann, und jetzt 'plötzlich' Elektronen vom Emitter da sind, gibts Strom... Eselsbrücke: emitter emitts, collector collects. (Greetings from captain obvious.)

- Den bipolare Transistor beschreibt man deshalb am zwecksmässigsten als **Stromverstärker**. Das Verhältnis $\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B}$ (Strom über C über Strom über B) heisst die **Stromverstärkung** des Transistors (Werte zwischen 10 und 1000).
- Die sich ergebende **Ausgangskennlinie** ist in Abb. 4.20 dargestellt. Im normalen Betrieb rechts der gestrichelten Linie ist $U_{CB} > 0$, die BC-Diode also gesperrt. Der Kollektorstrom I_C wird vom Basisstrom gesteuert und hängt nur leicht von der CE-Spannung ab, der differentielle Ausgangswiderstand ist klein. Links von der gestrichelten Linie beginnt die BC-Diode zu leiten, I_C wird unabhängig vom Basisstrom I_B , es findet keine Steuerung mehr statt. (Sättigungsbetrieb)
- Bipolare Transistoren haben eine hohe Steilheit, relativ gute Parameterstabilität sowie hohe Geschwindigkeit.

2.5 Feldeffekt-Transistoren

- Bei Feldeffekt-Transistoren (**FET**) handelt es sich um Halbleiter, die im Gegensatz zu bipolaren Transistoren mit einem elektrischen Feld (d.h. leistungslos) gesteuert werden, ohne dass in der Steuerelektrode ein nennenswerter Strom fliesst. Die Steuerung des Stromes im **Kanal** zwischen **Drain** und **Source** erfolgt durch eine Steuerelektrode, das **Gate**.
- Schematischer Aufbau eines FET: Abb. 4.21. Das Bild links zeigt einen gesperrten n-Kanal FET, der auf einem p-dotierten Substrat (**Bulk**) aufgebaut ist. Wird nun an das isolierte Gate eine positivere Spannung angelegt, werden sich unterhalb des Gates Elektronen sammeln, die vorerst die Löcher des Bulks kompensieren. Wird die Spannung weiter erhöht, bildet sich ab der 'threshold voltage' V_T ein Überschuss an Elektronen, man erhält eine zusätzliche n-Schicht unter dem Gate, den **n-Kanal**, welcher die Source und Drain leitend verbindet (rechts). Bei kleinen Drain-Source Strömen lässt sich so der Kanalwiderstand steuern. Bei grösseren Strömen ergibt sich durch den Spannungsabfall zwischen source und drain ein ortsabhängiges elektrisches Feld, das gegen drain hin immer kleiner wird, der Kanal wird immer dünner. Damit wird der Strom begrenzt, es ergibt sich ein Sättigungseffekt. Die DS-Spannung, bei der die Sättigung beginnt, heisst **Kniespannung** U_K .
- Man unterscheidet **SperrschichtFET (junction FET, JFET)** und **MOSFET (Metal Oxide on Semiconductor Field Effect Transistor)**. Während bei JFETs eine normale pn-Sperrschicht die Isolation zwischen Gate und Kanal darstellt, hat ein MOSFET eine dünne SiO_2 -Schicht als Isolator, was einen viel höheren Isolationswiderstand ergibt.
- MOSFETs gibt es **selbstleitend** (depletion) und **selbstsperrend** (enhancement), je nach dem ob bei Gatespannung null der Kanal leitet oder nicht (Vgl. Abb. 4.22). Sie sind meistens selbstsperrend. JFETs sind meistens selbstleitend.
- Die Ausgangskennlinie für FETs ist in Abb. 4.23 dargestellt. Links der Kniespannung (gestrichelte Linie) bestimmt die Gatespannung den Widerstand, rechts davon befindet sich der Sättigungsbereich, wo der Strom fast konstant wird und der FET also als gesteuerte Stromquelle arbeitet.
- Vergleich FET - bipolar:
 - Irgendwas komisches, sich widersprechendes mit Widerstand (S.46)
 - Im Sättigungsbereich steigen die Kurven beim FET weniger (grösserer Ausgangswiderstand, also bessere Stromquelle)
 - Mit bipolaren lassen sich grössere Verstärkungen erreichen.
 - Mit FETs lassen sich höhere Maximalfrequenzen erreichen.
 - Bei kleinen Ausgangsspannungen verhält sich der FET wie ein steuerbarer ohm'scher Widerstand. Der bipolare geht in Sättigung und ist nicht mehr linear steuerbar.

2.6 Transistoren-Grundsaltungen

- Den 3 Anschlüssen entsprechend gibt es drei Grundsaltungen, wobei der Name jeweils der gemeinsame Referenzpol für Ein- und Ausgangsspannung kennzeichnet: Emitterschaltung (Source-schaltung), Kollektorschaltung (Drainschaltung), Basisschaltung (Gateschaltung).
- Die **Emitterschaltung** (FET: Sourceschaltung) erlaubt die grösste Verstärkung. Anwendungen: Gesteuerter Spannungsteiler, Konstantstromquelle, Stromspiegel, Differenzverstärker.
- **Basis- bzw. Gateschaltungen** haben keine grossen Stromverstärkungen, können aber zur Entkopplung von Ein- und Ausgang und somit dem Unschädlichmachen der Millerkapazität⁴ verwendet werden.
- Die **Kollektorschaltung** wird auch **Emitterfolger (Sourcefolger)** genannt, da der Emitter jeweils etwa 0.6V tiefer als die Basis liegt und demnach deren Signal mit einem um 0.6V tieferen Wert folgt. Die Spannungsverstärkung ist hier zwar 1, jedoch gibt es einen grossen Eingangs- und kleinen Ausgangswiderstand, so dass der Emitterfolger als Impedanzwandler⁵ eingesetzt wird. Schaltkreis: Abb. 4.24

⁴Millereffekt: Vergrösserung der Eingangskapazität eines invertierenden Verstärkers.

⁵Ein Impedanzwandler passt die Impedanz einer Quelle an die eines Verbrauchers an.

3 Analoge Schaltungstechnik

3.1 Operationsverstärker: Aufbau und Kennwerte

- Ein **Operationsverstärker** ist ein Verstärker mit grosser Verstärkung. Er hat zwei Eingänge V_+ und V_- und einen Ausgang V_0 . Seine Verstärkung A_0 soll möglichst hoch sein, sie liegt bei kleinen Frequenzen im Bereich von $10^4 - 10^5$ und ist definiert durch

$$V_0 = A_0 \cdot V_d \quad \text{mit } V_d = V_+ - V_- \quad (3.1)$$

während der Eingangsstrom möglichst klein sein soll. Sie sind als integrierte Schaltungen in verschiedensten Bauformen erhältlich.

- Der **Ausgangssteuerbereich** ist der Wertebereich der Ausgangsspannung ($\approx 0.2 - 3V$ unter der Versorgungsspannung.) Der **Ausgangswiderstand** ist typisch $10 - 1000\Omega$ (kann verändert werden). Verschiedene Parameter werden sowohl in Differenzbetrieb als auch im Gleichtaktbetrieb¹ angegeben. Die Differenzverstärkung A_d soll möglichst gross, die Gleichtaktverstärkung A_g möglichst klein sein. Das Verhältnis A_d/A_g nennt man **Gleichtaktunterdrückung**.
- Die Verstärkung nimmt bei hoher Frequenz ab. Der Effekt macht sich ab einer **Grenzfrequenz** bemerkbar. Bei der **Transitfrequenz** f_T ist die Verstärkung gerade 1. Der Frequenzgang wird von der externen Beschaltung beeinflusst.

3.2 Anwendungen von Operationsverstärkern

- Beim **invertierenden** Verstärker wird der Eingang an V_- angeschlossen, V_+ liegt auf Masse (Abb. 4.25). Der Gegenkopplungswiderstand R_2 bewirkt, dass der Regelkreis geschlossen ist. Wird V_- von null verschieden, wird der Ausgang sich um die Verstärkung A_0 auf die Gegenseite bewegen, als Resultat wird die Spannung V_- auf null geregelt. Den Punkt V_- bezeichnet man als virtuelle Masse, solange der Regelkreis funktioniert, ist $V_- \approx 0$. Die Eingangsimpedanz dieses Verstärkers ist gerade R_1 , also relativ klein. Der **nichtinvertierende** Verstärker hat im Gegensatz dazu einen sehr hohen Eingangswiderstand, der durch den Aufbau der Operationsverstärkers gegeben ist (Abb. 4.26)²
- Der **Impedanzwandler** ist ein nichtinvertierender Verstärker und dient zur Umwandlung einer hochohmigen Spannungsquelle in eine niederohmige. Der **Transimpedanzverstärker** (Abb. 4.27) wandelt einen Strom in eine Spannung um. Es wird $U_0 = R \cdot I$. Der Eingangswiderstand ist klein. Transimpedanzverstärker kommen insbesondere als Verstärker für Sensoren, die einen Strom liefern, zum Einsatz. **Transadmittanzverstärker** stellen eine spannungsgesteuerte Stromquelle dar: Der Ausgangswiderstand wird $R \cdot A_0$, der Strom $I = U/R$. Transadmittanzverstärker werden besonders z.B. für das Ansteuern von Leuchtdioden zur Signalübertragung benutzt.
- Die **Leerlaufverstärkung** (Large Signal Voltage Gain) gibt die Verstärkung an, die man ohne Rückkopplung erhält.³

¹Ein Differenzverstärker ist ein elektronischer Verstärker mit zwei Eingängen, bei dem nicht ein einzelnes Signal, sondern die Differenz der beiden Eingangssignale verstärkt wird. Bei Gleichtaktbetrieb werden beide Signale um den gleichen Betrag geändert.

²Für Verstärkung = +10: Setze ein: $R_1 =, R_2 =, U_0 =, U_i =$

³Rückkopplung ist ein Mechanismus in signalverstärkenden oder informationsverarbeitenden Systemen, bei dem ein Teil der Ausgangsgrösse direkt oder in modifizierter Form auf den Eingang des Systems zurückgeführt wird.

- Weitere Anwendungen von Operationsverstärkern wäre als **Strommonitor, analoger Addierer und Subtrahierer, exponentieller und logarithmischer Verstärker, Integrator, Differentiator und Komparator.**

4 Sensoren

4.1 Licht

- **Sensoren** oder **Messfühler** dienen der Umformung der zu messenden physikalischen Grösse in eine elektrische Spannung, Strom oder Widerstandsänderung, die von Elektronik und Datenakquisitionssystemen weiterverarbeitet werden können.
- **Strahlungsdetektoren** beruhen grundsätzlich auf dem **inneren und äusseren Photoeffekt**. Beim äusseren Photoeffekt wird die Energie des einfallenden Photons benutzt, um die Austrittsarbeit zu überwinden und das Elektron herauszulösen, welches mit einem externen Detektor nachgewiesen werden kann. Beim inneren Photoeffekt wird die Energie dazu benutzt, um z.B. in einem Halbleiter den Unterschied zwischen Valenz- und Leitungsband zu überwinden und so zusätzliche Leitungsträger zu erzeugen.
- **Photovervielfacher** oder **Photomultiplier** funktionieren nach dem Prinzip des äusseren Photoeffekts. Emittierte Elektronen werden durch weitere Elektroden beschleunigt, wobei sie aus diesen Elektroden Sekundärelektronen auslösen. Die Gesamtverstärkung beträgt $10^6 - 10^8$. Photovervielfacher werden für schnelle und zeitgenaue Signale benutzt und wo bestes Signal/Rausch-Verhältnis gefordert ist. Sie eignen sich nicht für genaue Amplitudenmessungen. Zudem erzeugen nur ca. 20% der Photonen an der Elektrode ein Elektron. Für Systeme mit vielen Kanälen sind sie zu gross, zu teuer und zu unhandlich.
- **Photodioden** bestehen aus einer pn-Halbleitergrenzschicht, man verwendet z.B. leicht dotiertes n-Basismaterial mit einer stark dotierten, sehr dünnen, durchsichtigen p-Schicht darüber. Das ergibt eine dicke Sperrschicht, die sich vor allem auf der n-Seite befindet. Die darin zu Elektron-Loch-Paaren konvertierenden Photonen erzeugen einen zum normalen Sperrstrom zusätzlichen Photostrom $I_p h$. Der Photostrom nimmt mit der Wellenlänge zu. Die Dioden-Kennlinie verschiebt sich parallel in Stromrichtung. Photodioden lassen sich für schnelle Signale, für Stromsignale und als Solarzellen benutzen. Bei der Solarzelle wird die Leistung $P = U \cdot I$ maximiert, jedoch ist die Sonneneinstrahlung variabel, so dass ein maximum power point tracker installiert wird.
- Mit **Phototransistoren** kann das Photosignal verstärkt werden. Einfallendes Licht erzeugt hier einen Basis-Emitterstrom. **Avalanche-Photodioden** sind prinzipiell wie p.i.n.-Dioden aufgebaut, erlauben aber hohe Sperrspannungen, s.d. im Inneren Stossionisation und mit dem entstehenden Lawineneffekt eine Signalverstärkung bis 10^4 möglich wird. **Photoleiter** oder **Photowiderstände** bestehen aus einem einfachen Halbleiter. Lichteinstrahlung ändert die Leitfähigkeit infolge Ladungsträgererzeugung.
- Anwendungen von Lichtdetektoren sind Lichtschranken, Füllstandanzeiger, Drehwinkel- und Neigungswinkelmesser.

4.2 Temperatur

- **Metalle** haben einen positiven Temperaturkoeffizienten (PTC). Besonders linear verhält sich Platin. Mit steigender Temperatur steigt auch ihr Widerstand.
- **Halbleiterwiderstände** haben normalerweise negative Temperaturkoeffizienten (NTC), da bei höherer Temperatur entsprechend der Fermifunktion mehr Leitungsträger vorhanden sind.
- **Thermoelemente** beruhen auf dem Seebeckeffekt, der die temperaturabhängige Spannung am Übergang zweier verschiedener Metalle beschreibt.

4.3 Druck und Kräfte

- Der **piezoelektrische Effekt** kommt durch die relative Verschiebung von ungleich geladenen Atomschichten innerhalb eines Kristalles zustande, die eine elektrische Spannung erzeugt. Piezodruckmesser gibt es in allen Formen, z.B. auch als Unterlagscheiben.
- Bei **Dehnungsmessstreifen** verändert die Dehnung des Drahtes (da die Querschnittsfläche kleiner wird) den Widerstand. Dieser nimmt bei Ausdehnung zu.
- Eine einfache Form von Druckmessern ist ein Plattenkondensator, bei dem der Druck den Plattenabstand ändert.

Anhang - Bilder und Graphen

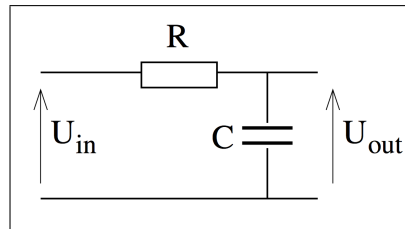


Abbildung 4.1: Tiefpass

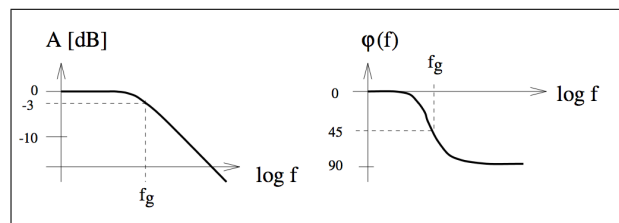


Abbildung 4.2: Bodediagramm Tiefpass

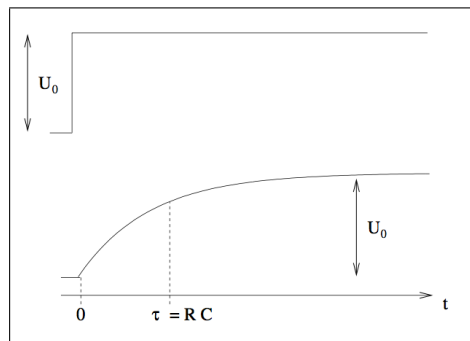


Abbildung 4.3: Sprungantwort des Tiefpasses

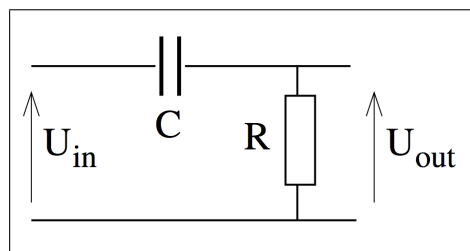


Abbildung 4.4: Hochpass

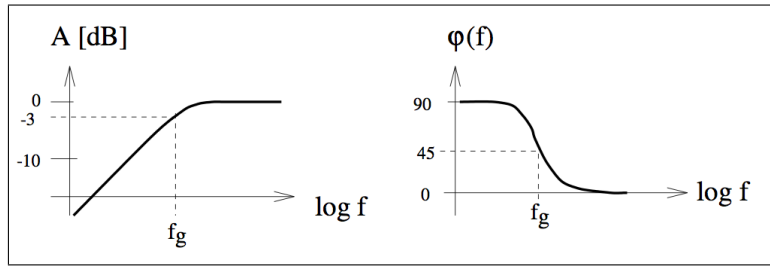


Abbildung 4.5: Bodediagramm Hochpass

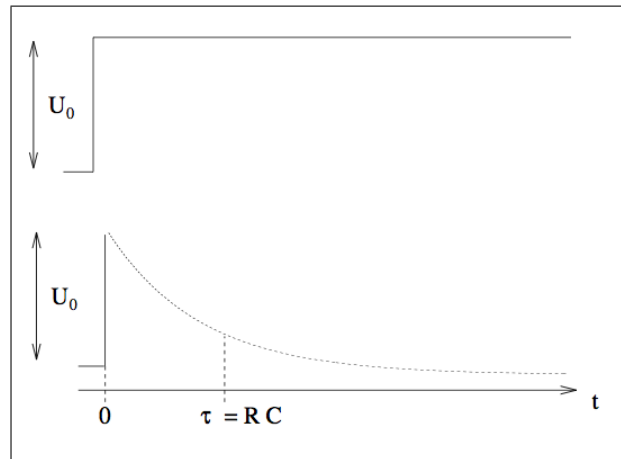


Abbildung 4.6: Sprungantwort des Hochpasses

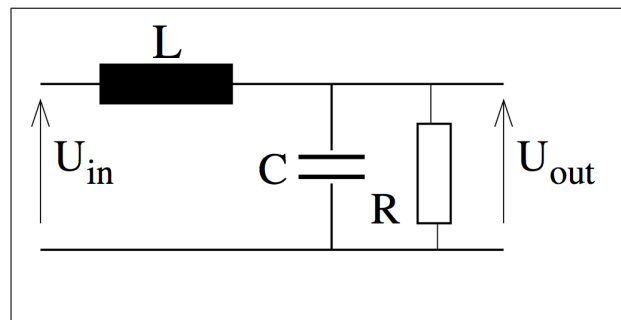


Abbildung 4.7: LCR-Tiefpass

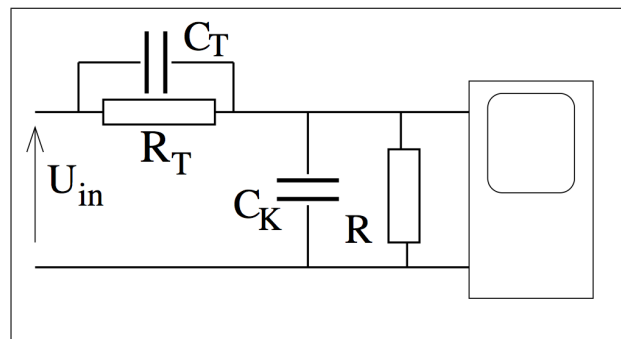


Abbildung 4.8: Tastkopf

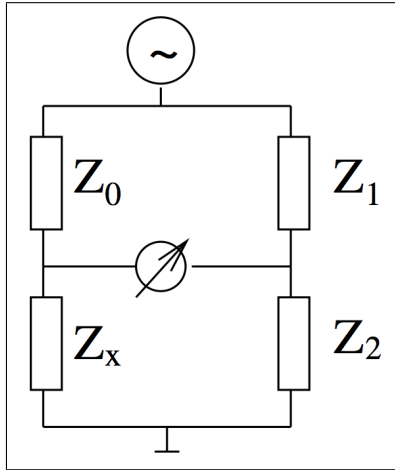


Abbildung 4.9: Wien-Brücke

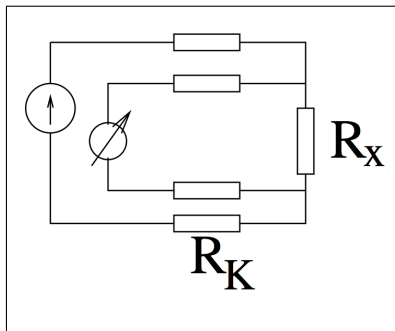


Abbildung 4.10: Kelvinschaltung für die 4-Draht-Messung

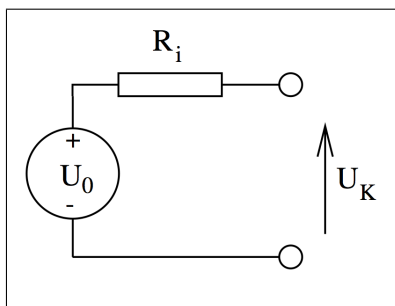


Abbildung 4.11: Schaltbild für eine lineare Spannungsquelle

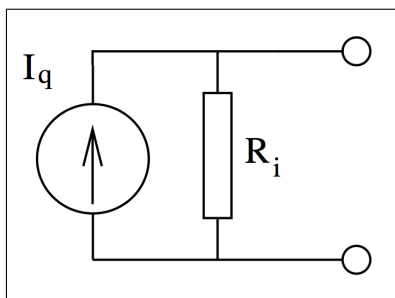


Abbildung 4.12: Schaltbild für eine lineare Stromquelle

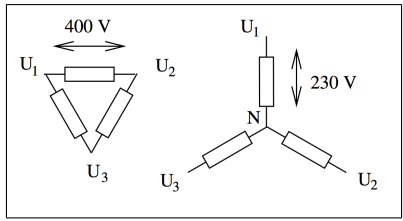


Abbildung 4.13: Dreiecksschaltung und Sternschaltung mit Effektivspannungen

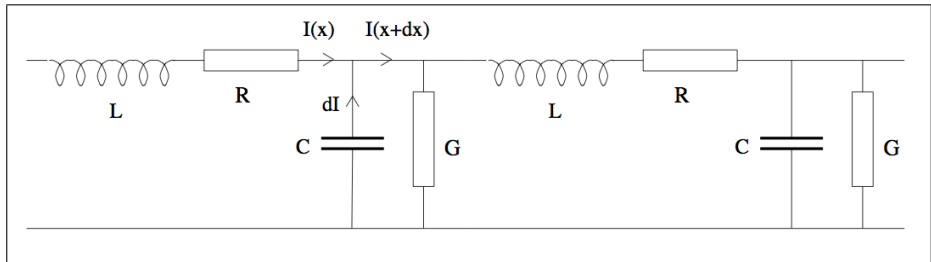


Abbildung 4.14: Ersatzschaltung für endliche Leitungen

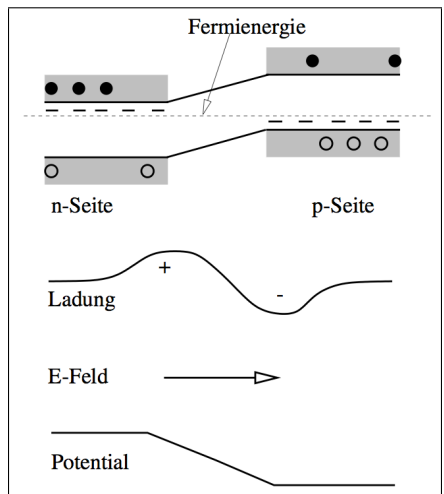


Abbildung 4.15: pn-Dotierung

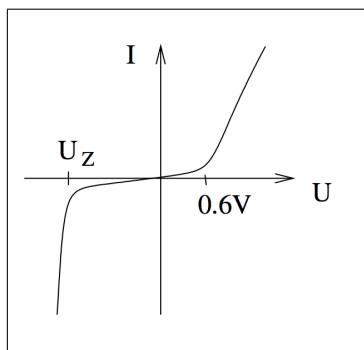


Abbildung 4.16: Diodenkennlinie

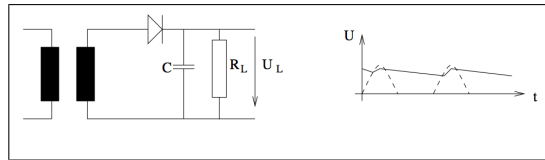


Abbildung 4.17: Halbwellengleichrichter

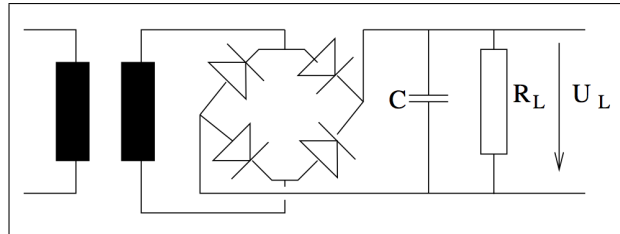


Abbildung 4.18: Vollwellengleichrichter

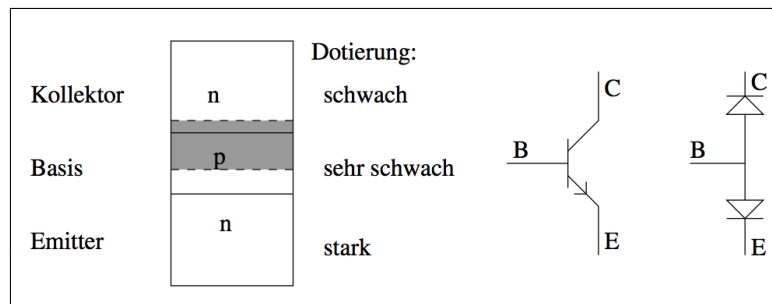


Abbildung 4.19: Ein npn-Transistor

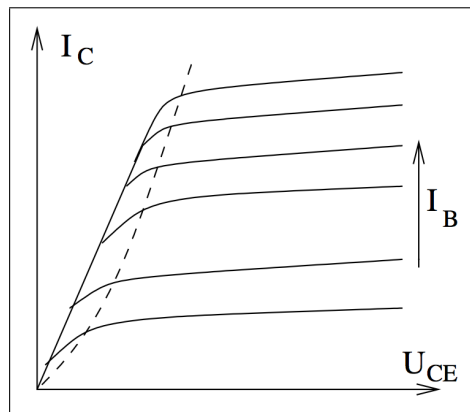


Abbildung 4.20: npn-Transistor Kennlinie

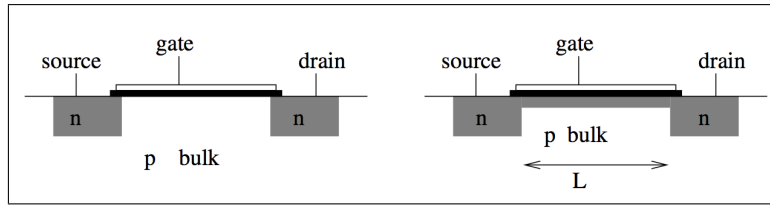


Abbildung 4.21: Ein FET

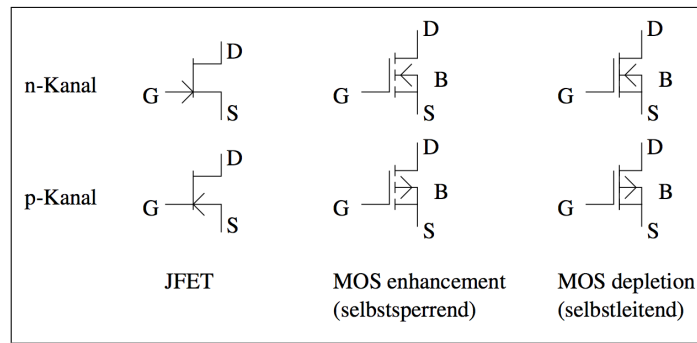


Abbildung 4.22: MOSFETs

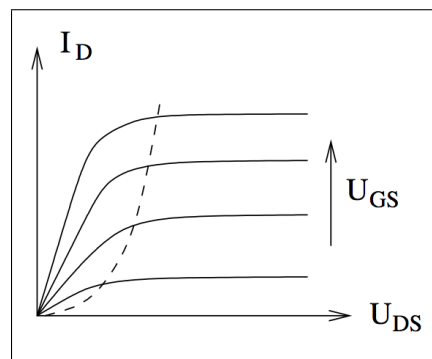


Abbildung 4.23: FET Kennlinie

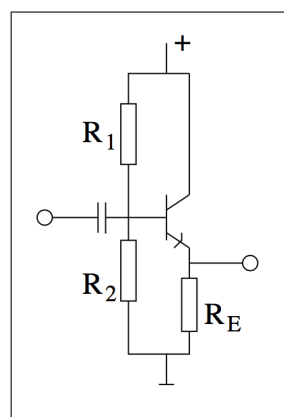


Abbildung 4.24: Schaltkreis Emitterfolger

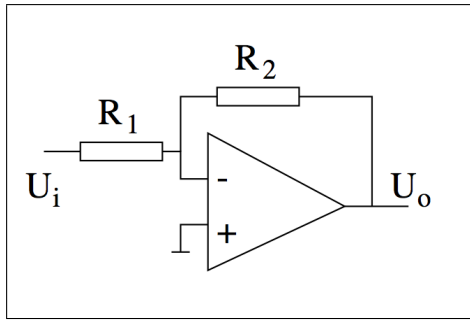


Abbildung 4.25: invertierender Operationsverstärker

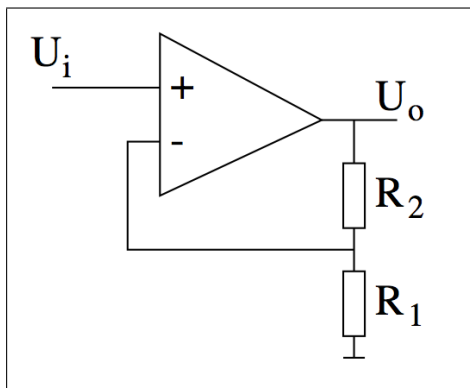


Abbildung 4.26: nichtinvertierender Operationsverstärker

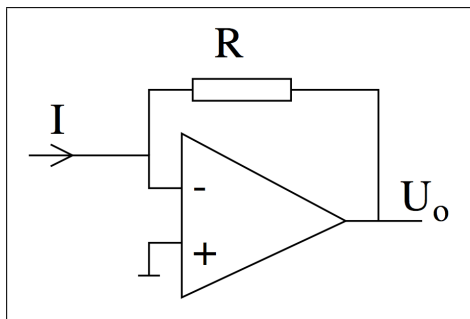


Abbildung 4.27: Transimpedanzverstärker