

# Grundpraktikum 2: Halbleiterbauelemente

30. Mai 2022

## 1 Aufgaben

0. Einführendes Experiment zum Umgang mit Oszilloskopen (wird von Betreuer:in vor Ort erklärt)
1. Aufnahme und graphische Darstellung der Kennlinie einer Zenerdiode.
2. Aufnahme und graphische Darstellung der  $I_D - U_{GS}$  Kennlinie eines Feldeffekttransistors (FET) für konstante Spannung  $U_{DS}$  mit Hilfe des X/Y Modus eines Oszilloskops.
3. Realisierung und Charakterisierung einiger Grundschaltungen mit Hilfe eines Operationsverstärkers:
  - Invertierender Verstärker
  - Nichtinvertierender Verstärker
  - Integrator

### Geräte

Funktionsgenerator, Oszilloskop, Gleichspannungsnetzteil, Zenerdiode, Feldeffekttransistor, Multimeter, Platine mit Operationsverstärker plus Widerstände und Kondensator

## Literatur

- [1] Wikipedia
- [2] Ulrich Tietze, Christoph Schenk, *Halbleiter-Schaltungstechnik*, Springer-Verlag, November 2000, ISBN: 3540641920 Cambridge Univ. Press; ISBN: 0521370957
- [3] Erwin Bärmer, *Elemente der Angewandten Elektronik*, Vieweg, ISBN: 3528010908
- [4] Paul Horowitz, Winfield Hill, *The Art of Electronics*, Vieweg, ISBN: 3528340908

### Fragen zum Verständnis-Check

Was ist ein PN Übergang?

Wie kann man mit Hilfe des PN Übergangs die Funktionsweise einer Diode erklären?

Was ist der Unterschied zwischen einer Z-Diode und einer Diode?

Wie kann man die Funktionsweise eines Transistors mittels PN Übergang erklären?

Was sind die zwei wichtigsten Funktionen eines Transistors?

Was sind die wichtigsten Merkmale eines Operationsverstärkers?

Fun knowledge: wieviele Transistoren sind im Prozessor deines Computers verbaut?

## 2 Diode, Zenerdiode

### 2.1 Diode

In Abb. 1 ist die Spannungs-Strom-Kennlinie einer Diode dargestellt. Wird eine Spannung  $U$  an die Diode angelegt so ist sie in Durchlassbetrieb beschalten wenn der Pluspol der Spannung am p-dotierten Teil und der Minuspol am n-dotierten Teil anliegt. In diesem Fall steigt der Strom der durch die Diode fließt ab der sogenannten "Durchlassspannung" exponentiell an. Entsprechend nimmt der Widerstand mit steigender Spannung stark ab. Wird die Polarität der angelegten Spannung jedoch umgedreht (negativer Spannungsbereich in Abb.1)) so befindet sich die Diode im Sperrbetrieb. Es fließt ein sehr kleiner Sperrstrom, der bis zur Durchbruchspannung annähernd konstant ist. Ein Durchbruch führt zur thermischen Zerstörung der Diode.

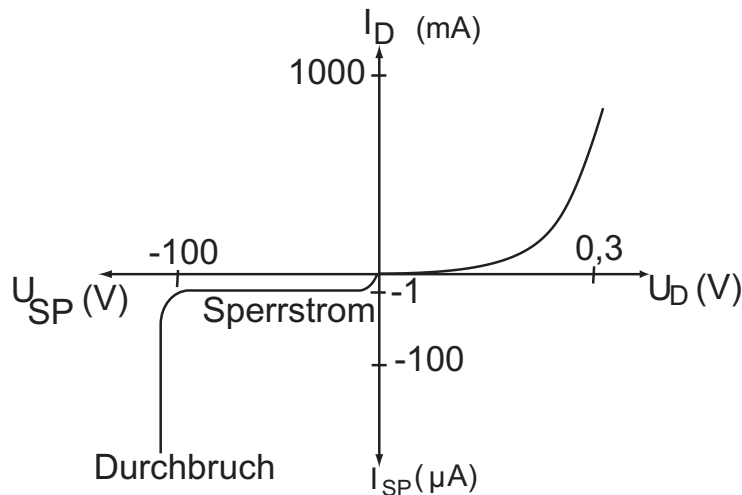


Abbildung 1: Spannungs-Strom-Kennlinie einer Germanium-Diode. Das Material der Diode kann am absoluten Wert der Durchlassspannung erahnt werden. Zur besseren Übersichtlichkeit sind der positive und der negative Bereich der x-Achse in unterschiedlichen Skalen dargestellt.

### 2.2 Z-diode

Die Z-Diode unterscheidet sich von einer herkömmlichen Diode in der stärkeren Dotierung der p und n Schicht. Dies führt zu teilweise stark unterschiedlichem Verhalten. Die Kennlinie einer Zenerdiode (siehe Abb. 2) verläuft im Durchlassbereich ähnlich wie bei der Diode. Im Sperrbereich zeigt sich ein stark verändertes Verhalten. Bei kleinen Spannungen fließt ein kleiner Sperrstrom (Zener Effekt) bis die Zenerspannung  $U_Z$  (charakteristische Spannung einer Z-Diode) erreicht wird. Das starke Ansteigen des Stromes jenseits der Zenerspannung wird durch die hohe Dotierung des Halbleiters erreicht. Die durch die Sperrspannung in der Grenzschicht erzeugten elektrischen Feldstärken sind dann groß genug, um eine unmittelbare Elektronenauslösung an den Störstellen oder Gitteratomen hervorzurufen. Es tritt eine lawinenartige Ladungsträgervielfachung, ähnlich wie bei der Gasentladung, ein. Für eine ausführliche Erklärung, insbesondere für das Auftreten dieses *Zenereffektes* bei kleinen Durchbruchspannungen (Tunneleffekt) wird hier auf die Quellen [1] - [4] verwiesen.

Die Hauptanwendungen der Z-Diode sind Spannungsstabilisierung, Spannungsschutz (Amplitudenbegrenzung) und Nullpunktsunterdrückung.

Ein möglicher Schaltplan der zur Charakterisierung einer Z-Diode verwendet werden kann ist in Abbildung 8 dargestellt.

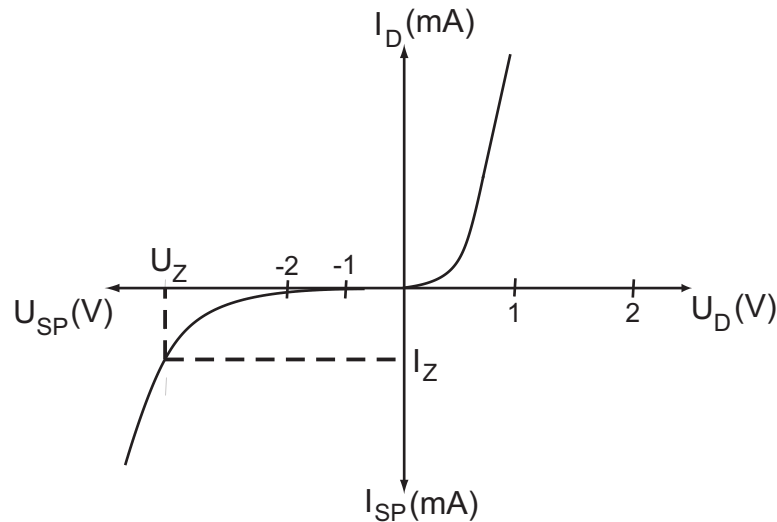


Abbildung 2: Spannungs-Strom-Kennlinie einer Zenerdiode. Im Gegensatz zur Diode kann die Z-Diode in Sperrrichtung betrieben werden. Typische Zenerspannungen befinden sich im Bereich von einigen Volt.

### 3 Feldeffekttransistor (FET)

Ein Transistor besteht in seinem einfachsten Aufbau aus drei dotierten Schichten (pnp oder npn) und kann vereinfacht als eine Antiserienschaltung zweier Dioden gesehen werden. Der Feldeffekttransistor (FET) ist eine spezielle Form des Transistors mit einem technisch etwas komplexeren Aufbau, was zu neuen Eigenschaften führt. Er kann generell in zwei Klassen - den Junction FET und den MOSFET - eingeteilt werden, die sich leicht in ihrem Aufbau, und entsprechend in ihren Anwendungsgebieten, unterscheiden. In diesem Versuch wird ausschließlich mit dem Junction-FET gearbeitet. Aus diesem Grund werden hier die genauen Unterschiede nicht näher erläutert.

Der FET ist eine Halbleitertriode, deren drei Anschlüsse - Gate, Drain und Source - und Verschaltung in Abb. 3 (a) skizziert sind. Eine relativ kleine Gate-Source-Spannung  $U_{GS}$  wird angelegt, um einen relativ großen Drain-Source-Strom  $I_D$  zu steuern, der von der Drain-Source-Spannung  $U_{DS}$  gespeist wird. Die entsprechende Kennlinie ist in Abb. 3 (b) ersichtlich.

Der FET vereint die Vorteile des Bipolartransistors (niedrige Betriebsspannung, keine Heizung, geringer Stromverbrauch, sofortige Betriebsbereitschaft, kleine Abmessungen, mechanische Stabilität, niedrige Kosten) und die der Elektronenröhre (hoher Eingangswiderstand, hoher Innenwiderstand, keine Steuerleistung) in sich.

Der hohe Eingangswiderstand wird durch den besonderen Aufbau des FET erreicht und entspricht einem p-n-Übergang in Sperrrichtung (siehe Abb. 3 (a)). Der Steuerungseffekt wird durch das Einschnürring des Leitungschanals (Abstoßung  $e^-e^-$ ) und der daraus folgenden Vergrößerung des Widerstandes  $R_{DS}$  verursacht. Eine Verringerung der Steuerspannung  $U_{GS}$  bewirkt eine Verringerung des Drainstromes  $I_{DS}$ , da der Sperrbereich im FET größer wird (Kanal wird enger). In Abbildung 3 (b) ist die Abhängigkeit des Drainstromes von der Steuerspannung (Kennlinie eines FET) dargestellt.

Ein möglicher Schaltplan, der zur Charakterisierung eines FET verwendet werden kann, ist in Abbildung 9 dargestellt. Der rechteckige strichlierte Bereich beinhaltet den FET mit seinen drei Anschlüssen und einen Vorwiderstand.

VERSTÄNDNIS-CHECK: Wieso kann man einen FET auch als *Spannungs-gesteuerte Stromquelle* bezeichnen?

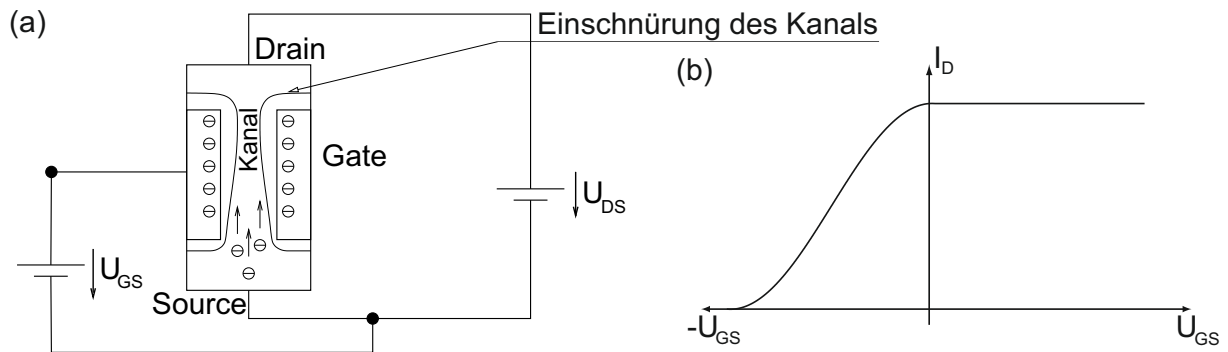


Abbildung 3: (a) Aufbau eines JFET-Feldeffekttransistors, Kanal: n-Halbleiter, Gate: p-Halbleiter. Das Gate (auf Deutsch: Gatter) lässt je nach anliegender Spannung ( $U_{GS}$ ) mehr oder weniger Ladungsträger von der Source (auf Deutsch: Quelle) zum Drain (auf Deutsch: Abfluss). Eine andere als die eingezeichnete Polarität für  $U_{GS}$  entspricht einer Diode in Durchlassrichtung und kann ohne Vorwiderstand zu einer Zerstörung des FET führen (Schutzwiderstand). (b) Kennlinie eines JFETS: Drainstrom gegen Gate-Source Spannung bei konstanter Drain-Source-Spannung.

## 4 Der Operationsverstärker, operational amplifier, OP, OPV, OPamp

Operationsverstärker (OPV) werden meist als integrierte Schaltkreise hergestellt. Anwendung finden sie vor allem in der analogen Signalverarbeitung (z.B. Regelverstärker oder aktive Filter). In der Digitaltechnik verwendet man Operationsverstärker z.B. zur Realisierung von Kippschaltungen, Schwellwertschalter und Digital-Analog-Umsetzer. In Abbildung 4 sind allgemeine Informationen eines OPV dargestellt.

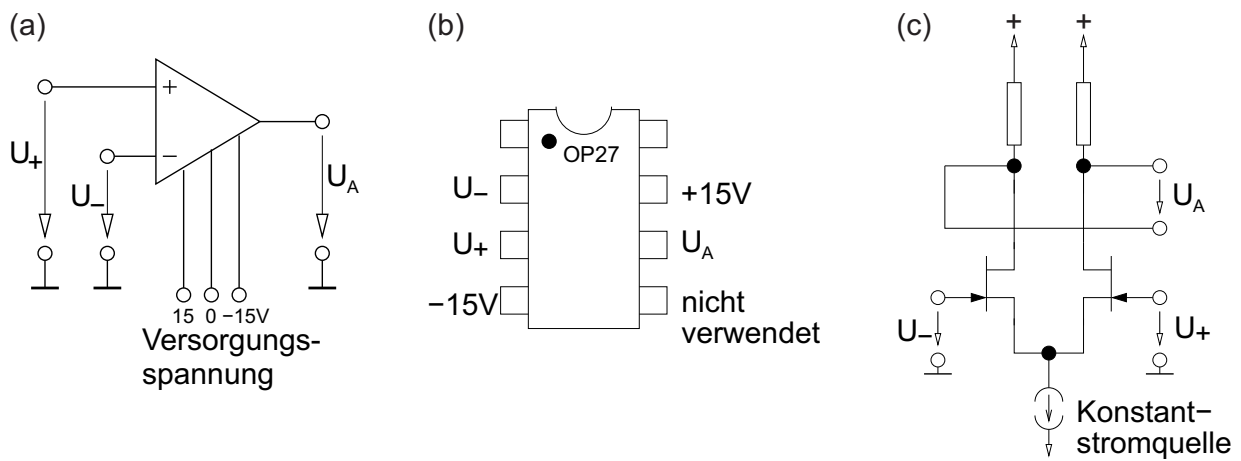


Abbildung 4: (a) Schaltzeichen/Symbol des Operationsverstärkers. An den nicht-invertierenden und den invertierenden Eingang sind die entsprechenden Spannung  $U_+$  und  $U_-$  angelegt. Die Versorgungsspannung des OPV limitiert die maximal zulässige Ausgangsspannung  $U_A$ . (b) Aussehen eines OPV als elektronisches Bauteil mit entsprechendem Beispiel einer möglichen Pinbelegung und (c) vereinfachter symbolischer Aufbau eines OPV bestehend aus zwei FETs an deren Gates die Eingangsspannungen angelegt sind.

### 4.1 Eigenschaften des OPV

Beim Operationsverstärker handelt es sich um einen Differenzverstärker, das bedeutet, dass zwei Eingänge vorhanden sind, und die Differenz der daran anliegenden Spannungen  $U_+$  und  $U_-$  am Ausgang  $U_A$  verstärkt

wird (siehe Abb. 4 (a)):

$$U_A = A \cdot \underbrace{(U_+ - U_-)}_{\text{Differenz}} \quad (1)$$

Der Verstärkungsfaktor  $A$  ist theoretisch unendlich, nimmt in der Praxis allerdings endliche Werte (kann in der Größenordnung von  $10^6$  liegen) an. Eine sehr wichtige Eigenschaft des OPV ist, dass folgende Relation für die Eingangsströme gilt:

$$I_+ \approx I_- \approx 0 \quad (2)$$

Da die Kenntniss dieser zwei Eigenschaften ausreicht um den Großteil der Schaltungen zu verstehen, welche mit OPV's realisiert werden können, verweisen wir für weitere Details und komplexere Schaltungen auf weiterführende Literatur (Quellen [1] - [4]).

Operationsverstärker benötigen meist eine positive und eine negative Versorgungsspannung gegenüber dem Bezugspotential der Ausgangsspannung  $U_A$  (z.B. Masse). Typische Versorgungsspannungen betragen zwischen  $\pm 5$  V und  $\pm 18$  V (In diesem Versuch verwenden wir  $\pm 15$  V).

## 4.2 Grundsaltungen des OP

Häufig werden Operationsverstärker mit ohmschen und kapazitiven Widerständen beschaltet. Meist darf der OP als ein idealer Verstärker mit unendlich großem Spannungsverstärkungsfaktor  $A$  (infinite gain approximation), unendlich großem Eingangswiderstand und sehr kleinem Ausgangswiderstand betrachtet werden. Generell lassen sich die Grundsaltungen in zwei Kategorien unterteilen.

**Gegenkopplung:** Bei Schaltungen mit Gegenkopplung gibt es immer eine Verbindung des Ausgangs mit dem  $U_-$ -Eingang. Dies bewirkt, dass der Ausgang dem Eingangssignal *entgegenwirkt*.

**Mitkopplung:** Bei der Mitkopplung erfolgt die Rückkopplung auf den  $U_+$ -Eingang. Diese Art der Schaltung entspricht den Kippschaltungen (z.B. Schmitt-Trigger).

### Invertierender Verstärker (Umkehrverstärker)

Abb. 5 (a) zeigt die Schaltung eines invertierenden Verstärkers. Ein Eingangssignal  $U_E$  wird durch die dort illustrierte Zusammenschaltung der Widerstände und dem OVP Verstärkt und invertiert. Da der

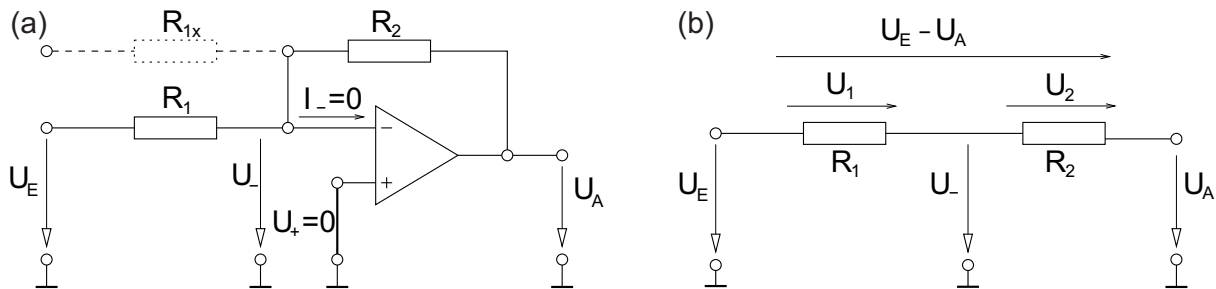


Abbildung 5: (a) Invertierender Verstärker. Die Wahl der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  bestimmt den Verstärkungsfaktor der Schaltung. Der Strom  $I_-$  und die Spannung  $U_-$  werden vom OPV auf den Wert 0 A bzw. 0 V gehalten. (b) Vereinfachtes Schaltbild des invertierenden Verstärkers.

invertierende Eingang des OPV's hochohmig ist und  $I_- = 0$ , können die beiden Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  als Reihenschaltung betrachtet werden. Dieses Verhalten wird in Abb. 5 (b) durch ein vereinfachtes Schaltbild veranschaulicht. Mit dem Wissen der Funktionweise eines OPV und dem korrekten Anwenden der Maschenregel, kann folgendes Hergeleitet werden:

$$U_A = A \cdot (U_+ - U_-), \quad U_+ = 0, \quad I = \frac{U_E - U_A}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

$$\Rightarrow U_A \approx U_E \cdot \frac{-R_2}{R_1} \quad (4)$$

Die Spannungsverstärkung der Schaltung ist somit gleich dem Widerstandsverhältnis  $-R_2/R_1$ . Für die Spannung  $U_-$  folgt außerdem:

$$U_- = U_E - U_1 = U_E - \frac{U_E - (U_E \frac{-R_2}{R_1})}{R_1 + R_2} \cdot R_1 = 0 = U_+ \quad (5)$$

**Wenn ein Operationsverstärker *gegengekoppelt* wird dann ändert sich das Ausgangssignal derart, dass am invertierenden Eingang  $U_-$  die gleiche Spannung anliegt, wie am nichtinvertierenden Eingang  $U_+$  (eine geringe Differenz existiert trotzdem, sie entspricht  $U_A/A \ll U_A$ ).**

Der invertierende Verstärker kann leicht in einen *Summierverstärker* erweitert werden. Dabei dient der OPV zur Addition und Verstärkung mehrerer Spannungen. Wie in Abb. 5 (a) angedeutet, werden dazu die verschiedenen Eingangsspannungen an zu  $R_1$  parallele Widerstände angelegt. Die einzelnen Eingangsspannungen werden je nach Wahl der Eingangswiderstände  $R_{1x}$  verschieden verstärkt (Realisierung eines Analog-Digital-Wandlers, hier 2-bit).

### Nichtinvertierender Verstärker

Ein nichtinvertierender Verstärker ist ein weiteres Beispiel für eine gegengekoppelte Schaltung. In Abb. 6 (a) ist das Schaltbild eines nichtinvertierenden Verstärkers dargestellt. ähnlich wie beim invertierenden Ver-

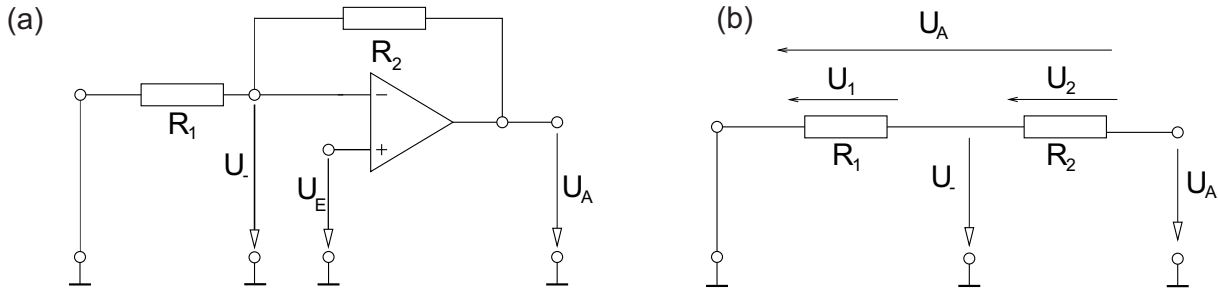


Abbildung 6: (a) Nichtinvertierender Verstärker. Der Verstärkungsfaktor wird durch die Wahl der Widerstände  $R_1$  und  $R_2$  festgelegt. Im Gegensatz zum invertierenden Verstärker wird hier der invertierte Eingang – des OPVs auf das Massepotential gelegt (anstelle des nicht-invertierten Einganges). (b) Vereinfachtes Schaltbild des nicht invertierenden Verstärkers.

stärker (siehe Abb. 5) handelt es sich um eine Reihenschaltung aus den Widerständen  $R_1$  und  $R_2$  (siehe Abb. 6 (b)), weshalb sich die Ausgangsspannung  $U_A$  auf gleiche Weise bestimmen lässt:

$$U_A = A \cdot (U_+ - U_-), \quad U_+ = U_E, \quad I = \frac{U_A}{R_1 + R_2}, \quad U_- = U_1 = U_A \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

$$\Rightarrow U_A = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \cdot U_E \quad (7)$$

Der nichtinvertierende Verstärker kann daher als Spannungsfolger (Impedanzwandler) benutzt werden. Dazu wählt man  $R_2 = 0$  und  $R_1 = \infty$  und daher  $U_A = U_E$ . Der Eingangswiderstand der Gesamtschaltung ist sehr hochohmig, weshalb das eingangsseitige Signal  $U_E$  nicht belastet wird. Der Ausgangsinnenwiderstand ist klein und damit kann der Spannungsfolger ohne Spannungseinbruch große Lasten treiben.

### Integrierer

Ein Integrierer lässt sich realisieren, wenn der Widerstand  $R_2$  beim invertierenden Verstärker (siehe Abb. 5) durch einen Kondensator  $C_2$  ersetzt wird (siehe Abb. 7). Beim invertierenden Verstärker wurde gezeigt, dass bei Gegenkoppelung  $U_- \approx U_+$  gilt (wenn keine Sättigung auftritt). Da beim betrachteten Integrierer aus Abb. 7 der  $U_+$ -Eingang auf Masse liegt, kann man also davon ausgehen, dass am Widerstand  $R_1$  die Spannung  $U_E$  anliegt und vom Strom  $I_1 = U_E/R_1$  durchflossen wird. Da kein Strom in den OP hineinfließt

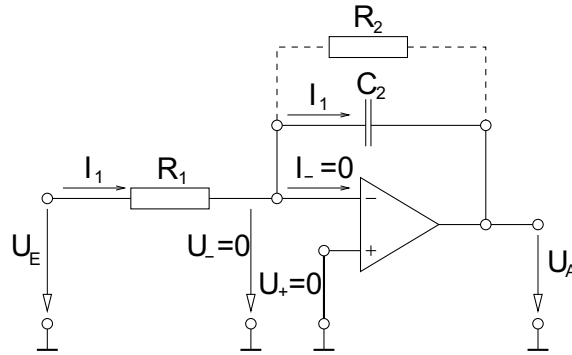


Abbildung 7: Schaltbild eines Integrierers. Die Gegenkopplung erfolgt hier über einen Kondensator  $C$  (und optional einen parallel geschalteten Widerstand  $R$ ).

(für  $f < f_0$ , wird anschließend beschrieben), ist dies gerade der Strom der den Kondensator auflädt. Die Spannung die am Kondensator anliegt lässt sich folgendermaßen ausdrücken:

$$U(t) = \frac{1}{C_2} \cdot Q = \frac{1}{C_2} \cdot \int I(t) dt = \frac{1}{C_2} \cdot \int \frac{U_E(t)}{R_1} dt \quad (8)$$

Dies entspricht gleichzeitig dem Ausgangssignal  $U_A$ . Bei rechteckförmiger Eingangsspannung erhält man somit eine Dreieck-Ausgangsspannung. Für eine sinusförmige Eingangsspannung ist die Ausgangsspannung auch sinusförmig, in der Phase aber um  $90^\circ$  verschoben und in der Amplitude für Frequenzen  $f > f_0 = 1/(2\pi \cdot R_1 \cdot C_2)$  abgeschwächt und für Frequenzen  $f < f_0$  verstärkt. Der Integrierer wirkt ähnlich wie ein Tiefpass.

Tatsächlich lassen sich mit OPVs besonders einfach Filterschaltungen im Niederfrequenz-Bereich herstellen, z.B. Tiefpassfilter zur Glättung eines Mess-Signals bei gleichzeitiger Verstärkung. Man nennt Filterschaltungen, welche einen Verstärker enthalten, *aktive Filter*. Ergänzt man einen Integrierer mit einem Widerstand  $R_2$  (siehe Abb. 7), so erhält man einen Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz  $f_g = 1/(2\pi \cdot R_2 \cdot C_2)$  und dem Verstärkungsfaktor  $V = R_2/R_1$  für  $f \ll f_g$ .

## 5 Zur Versuchsdurchführung

### 5.1 Aufgabe 1: Kennlinie Z Diode

Messe die Spannungs-Strom Kennlinie einer Zenerdiode ( $U_z = 3.3 \text{ V}$ ,  $P = 0.5 \text{ W}$ ) und vergleiche sie mit der theoretischen Kennlinie aus Abb. 2. Benutze dafür, wie in Abb. 8 abgebildet, 2 Multimeter und eine Spannungsversorgung. Verwende einen ohmschen Widerstand ( $R = 4.7 \text{ } \Omega$ ,  $P = 2 \text{ W}$ ) zur Strombegrenzung. Bestimme aus der Kennlinie die Durchlassspannung, die Zenerspannung und den Zenerstrom der Z-Diode.

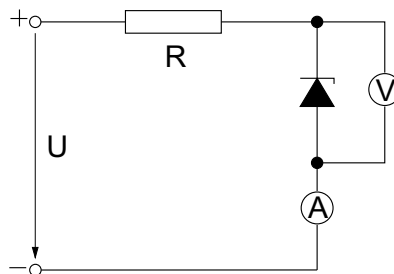


Abbildung 8: Schaltung zur Messung der Kennlinie einer Z-Diode. Das Anlegen der Eingangsspannung  $U$  hat einen Stromfluss durch den Widerstand  $R$  und die Z-Diode zur Folge. Zur Aufnahme der Kennlinie wird ein Voltmeter parallel und ein Amperemeter in Reihe zur Z-Diode geschaltet.

**ACHTUNG:** Die maximal zulässige Leistung der Bauteile darf nicht überschritten werden. Berechne den maximal zulässigen Spannungsabfall (und Strom) am Vorwiderstand  $R$  und diskutiere das Ergebnis mit der dich betreuenden Person.

## 5.2 Aufgabe 2: Kennlinie FET

Um die Kennlinie eines FETs zu messen soll die Schaltung in Abb. 9 aufgebaut werden. Ein Netzgerät soll als Spannungsquelle für die Drain-Source Spannung dienen. Im Gegensatz zur Aufnahme der Kennlinie der Z-Diode soll hier die X/Y Funktion des Oszilloskops zu Hilfe genommen werden. Die Gate-Source Spannung soll mit Hilfe eines Funktionsgenerators im Bereich  $-2\text{ V} < U_{GS} < 2\text{ V}$  variiert werden (x-Achse der Kennlinie). Die Spannung die über dem Widerstand  $R = 100\ \Omega$  abgegriffen wird ist proportional zum Drain-Source Strom  $I_{DS}$  (y-Achse der Kennlinie).

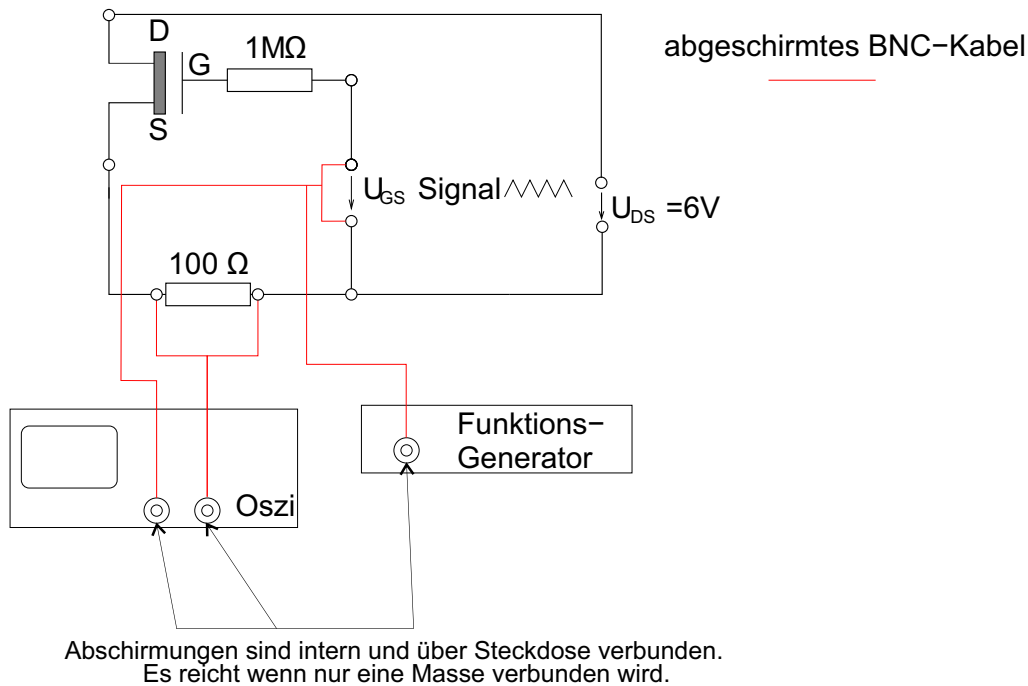


Abbildung 9: Schaltung zur Aufnahme der Kennlinie eines FET. Am Gate (G) wird ein Widerstand von  $R_1 = 1\text{ M}\Omega$  zur Strombegrenzung zugeschaltet. Ein Funktionsgenerator soll dann die Gate-Source Spannung  $U_{GS}$  bereitstellen. Zwischen dem Masseanschluss des Funktionsgenerators und der Source (S) des FET soll ein Widerstand von  $R_2 = 100\ \Omega$  eingefügt werden. Wird ein Oszilloskop parallel zu diesem Widerstand geschaltet, kann die Spannung (proportional zum Drain-Source Strom) gemessen werden. Die Drain-Source Spannung  $U_{DS}$  wird durch ein Netzteil bereitgestellt.

Wird das Oszilloskop nun in den X/Y Modus gebracht, sollte das Bild in etwa mit dem Diagramm in Abb. 10 übereinstimmen. Betrachte, wie die Kurve sich verhält, falls  $U_{DS} \approx 3\text{ V}$ ,  $6\text{ V}$ ,  $10\text{ V}$  und diskutiere/begründe die Ergebnisse. Bestimme außerdem den maximal fließenden Drain-Source Strom anhand der Kennlinie am Oszilloskop.

**ACHTUNG:** Die Erdungspunkte (Massen) der Osziloscopausgänge sind intern miteinander Verbunden (überprüfe diese Aussage). Der + pol der Spannungserzeugenden Geräte soll niemals mit einem Massepunkt direkt Verbunden sein.



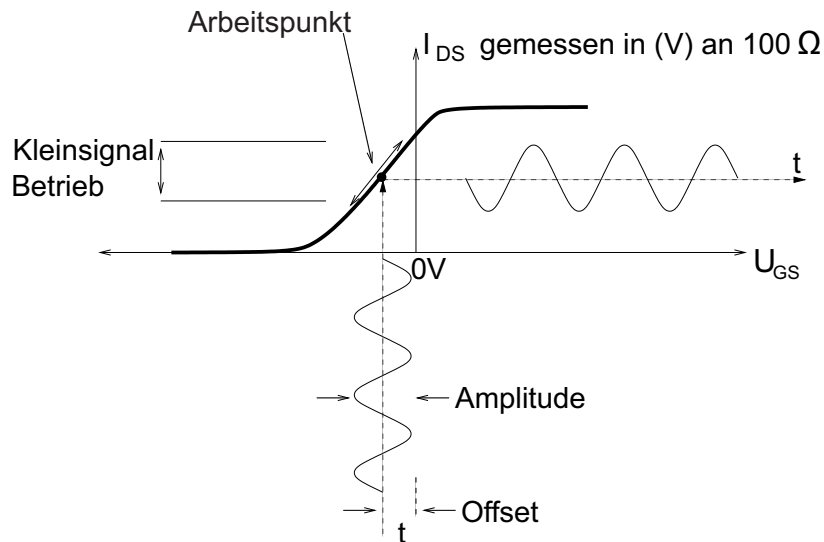


Abbildung 10: Typische Kennlinie eines FET. Hier ist der Drain-Source Strom  $I_{DS}$  in Abhängigkeit der Gate-Source Spannung  $U_{GS}$  dargestellt. In Anlehnung an Abb. 9 wird der Strom gemessen indem der Spannungsabfall an einem Widerstand  $R = 100\ \Omega$  gemessen. Die Sinusförmigen Signale in x- bzw. y- Richtung zeigen die Zeitabhängigen Spannungen, die am jeweiligen Kanal des Oszilloskops anliegen sollen. Der Arbeitspunkt zeigt den Punkt in dem eine Schaltung üblicherweise betrieben wird.

### 5.3 Aufgabe 3: Charakterisierung OPV

Hier sollen die Schaltungen die in Abb. 5 bis 7 abgebildet und erklärt sind einzeln aufgebaut werden. Um die Funktion des OPV gut ersichtlich zu machen wird als Signalquelle  $U_E$  ein Funktionsgenerator verwendet. Die Ausgangsspannung  $U_A$  ist mit der Eingangsspannung zu vergleichen. Bestimme, anhand der Messung, den exakten Verstärkungsfaktor der Schaltungen aus Abb. 5 und 6, und vergleiche ihn mit dem errechneten Wert. Diskutiere die Ergebnisse.

Wird der OPV als Integrierer verschaltet (siehe Abb. 7) soll jeweils eine rechteckige und eine sinusförmige Spannung am Eingang angelegt werden. Diskutiere die Form und die Amplitude der Ausgangsspannung.