



ulm university universität  
**uulm**

# Grundpraktikum der Elektrotechnik

## Versuch 9: Julius Edgar Lilienfeld

Institut für Mikroelektronik  
Universität Ulm





# Grundpraktikum Elektrotechnik

## Versuch 9: Julius Edgar Lilienfeld

### Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
2.1	Der Transistor . . . . .	1
2.2	Kennlinienfelder . . . . .	5
2.3	Vierpolparameter und Spannungsverstärkung $A_V$ . . . . .	6
2.4	Arbeitspunktstabilisierung . . . . .	8
2.5	Kleinsignalersatzschaltbild . . . . .	8
2.6	Grundsaltungen . . . . .	9
<b>3</b>	<b>Vorbereitende Aufgaben &amp; Fragen</b>	<b>11</b>
3.1	Allgemeine Fragen . . . . .	11
3.2	Verstärker . . . . .	11
3.3	Class-A Endstufe . . . . .	12
<b>4</b>	<b>Versuchsdurchführung</b>	<b>13</b>
4.1	Allgemeine Hinweise . . . . .	13
4.2	Messung der Kennlinienfelder . . . . .	13
4.3	Verstärker . . . . .	14
4.4	Class-A Endstufe . . . . .	14
<b>5</b>	<b>Evaluation</b>	<b>15</b>

# 1 Einleitung

Transistoren sind aktive Bauelemente, d. h. im Gegensatz zu passiven Bauelementen verfügen Sie über eine eigene Energiequelle und können den Signalfluss verstärken. Neben der Verstärkung dienen sie u. a. zur Schwingungserzeugung, werden in Regel- und Schaltwerken, sowie in der Digitaltechnik verwendet.

In diesem Versuch soll der Einsatz des Transistors als lineares Verstärkerelement vorgestellt werden. Sie werden dabei im wesentlichen zwei verschiedene Schaltungen untersuchen. Die Common-Source oder auch Sourceschaltung und die Common-Drain oder auch Drainschaltung. Erstgenannte Schaltung dient zur Signalverstärkung. Größere Signalamplituden sind weniger störanfällig (Rauschen, kapazitive Kopplung) und lassen sich leichter in nachfolgenden Stufen verarbeiten. Die zweite Schaltung dient als einfache Endstufe und soll die benötigte Ausgangssignalleistung für eine ohmsche Last wie z. B. einen Lautsprecher liefern.

Es soll in erster Linie auf die Transistorbauteiltechnik eingegangen werden, für die nur die an den Anschlüssen messbaren Transistoreigenschaften relevant sind. Auf eine eingehende Untersuchung der physikalischen Vorgänge im Transistor und der zugehörigen Halbleiterphysik soll hierbei verzichtet werden, da diese für die durchzuführenden Versuche nicht erforderlich ist. Jedoch soll Ihnen eine grobe Idee von den Vorgängen im Transistor vermittelt werden, damit Sie eine Vorstellung davon bekommen, warum ein Transistor auf eine bestimmte Art und Weise beschaltet werden muss.

**Hinweis:** Zur erfolgreichen Durchführung dieses Versuchs ist es notwendig das Skript vollständig zu studieren und alle vorbereitenden Aufgaben zu beantworten. Sollten Sie hierfür Ergänzungen der theoretischen Grundlagen benötigen, ist zusätzliche Literatur vor Durchführung des Versuchs hinzuzuziehen.

## 2 Grundlagen

### 2.1 Der Transistor

Prinzipiell werden Transistoren zunächst nach Funktionsweise (z. B. Feldeffekttransistor oder Bipolartransistor) und verwendetem Halbleitermaterial (Silizium, Germanium, Gallium-Arsenid) unterschieden.

Dieser Versuch beschränkt sich dabei auf die Feldeffekttransistoren. Der Feldeffekt wurde 1925 von Julius Edgar Lilienfeld entdeckt und zum ersten Mal beschrieben. Kurz darauf ließ er das Konstruktionsprinzip und die Funktionsweise eines Feldeffekttransistors (FET) patentieren, obwohl dieser zum damaligen Zeitpunkt nicht hergestellt werden konnte, da Verfahren zur Erzeugung von einkristallinem dotierten Halbleitermaterial fehlten. Der Transistor war also noch weitgehend ein Gedankenexperiment basierend auf den Gesetzen der Halbleiterphysik. So wurde der erste FET erst in den 60er Jahren des vergangenen Jahrhunderts realisiert, obgleich es mittlerweile Hinweise gibt, die darauf hindeuten, dass es W. B. Shockley (dem Erfinder des Bipolartransistors) gelang, funktionsfähige Transistoren basierend auf den Patenten von Lilienfeld herzustellen, er es jedoch unterließ, diese Ergebnisse zu publizieren.

Die zwei Haupttypen des FET sind der Sperrschicht-FET (SFET oder auch JFET) und der Isolierschicht-FET (IGFET), dessen bekanntester Vertreter der MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor) ist.

Im weiteren Verlauf des Versuchs wird ausschließlich der MOSFET betrachtet. Der MOSFET (Abb. 1) besitzt die vier Anschlüsse Gate, Source, Drain und Bulk (Substrat).

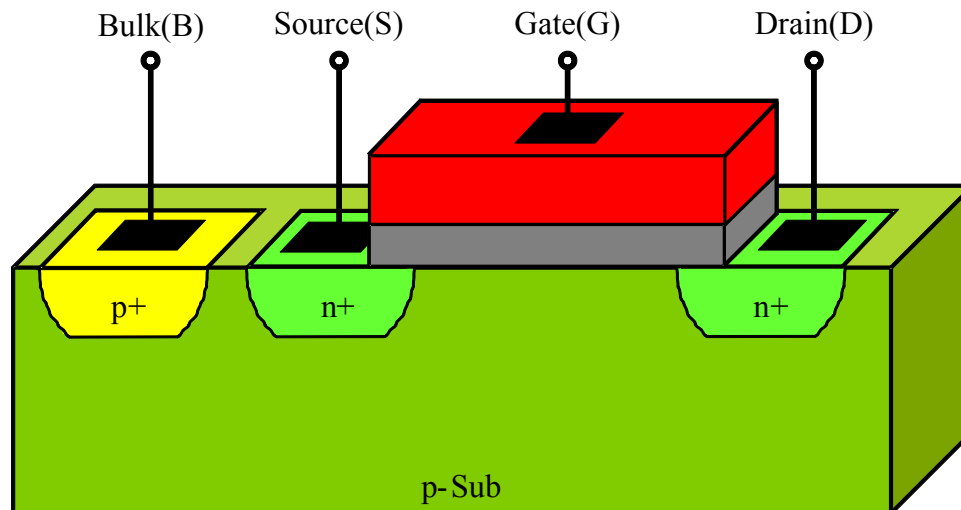


Abbildung 1: Schrägbild - NMOS-Transistor

Im folgenden wird davon ausgegangen, dass Bulk und Source kurzgeschlossen sind, also  $U_{BS} = 0\text{ V}$  gilt, was bei diskreten FETs meist der Fall ist, womit sich die Zahl der Anschlüsse auf drei reduziert.

Der FET ist eine spannungsgesteuerte Stromquelle. Die Ladungsträger fließen dabei von der Source zum Drain, wobei das Steuerpotential am Gate anliegt. Je nachdem, ob es sich bei den Ladungsträgern um Elektronen oder Löcher (Defektelektronen) handelt, unterscheidet man n-Kanal (Elektronen) und p-Kanal (Löcher) MOSFETs. Da immer nur ein Ladungsträgertyp zum Stromfluß beiträgt, gehört der FET auch zur Klasse der Unipolartransistoren. Abbildung 2 zeigt einen n-MOSFET im Querschnitt, wobei dieser in Planartechnik hergestellt wurde und zu den Lateraltransistoren gehört, d.h. der Strom  $I_{DS}$  fließt horizontal zur Waferoberfläche.

Es existieren zwei p-n-Übergänge zwischen Source (S) bzw. Drain (D) und Bulk (Sub), die jederzeit in Sperrrichtung gehalten werden müssen. Für den Fall, dass S und Sub kurzgeschlossen sind, muss deshalb D stets auf einem höheren Potential liegen als Source. Die Bedeutung von p bzw. n kennen Sie bereits von den Dioden.  $n^+$  bezeichnet hier ein Volumen mit besonders hoher Dotierung und damit auch Elektronendichte. Der Stromfluß kann nun über die Spannung zwischen Source und Gate (G, rote Schicht, Standard: Polysilizium)  $U_{GS}$  beeinflusst werden. Bei  $U_{GS} = 0\text{ V}$  werden Source und Drain durch die beiden Raumladungszonen voneinander getrennt und der Stromfluß wird unterbunden. Erhöht man nun langsam  $U_{GS} > 0\text{ V}$  (siehe Abbildung 3), so werden Elektronen aus dem Substrat angezogen, welche die Löcher im Substrat unter der Si-Oxid-Schicht (grau) kompensieren. Es bildet sich somit eine weitere Raumladungszone, in der keine freien Ladungsträger existieren, und der Ladungsfluß zwischen Source und Drain ist weiterhin unterbrochen.

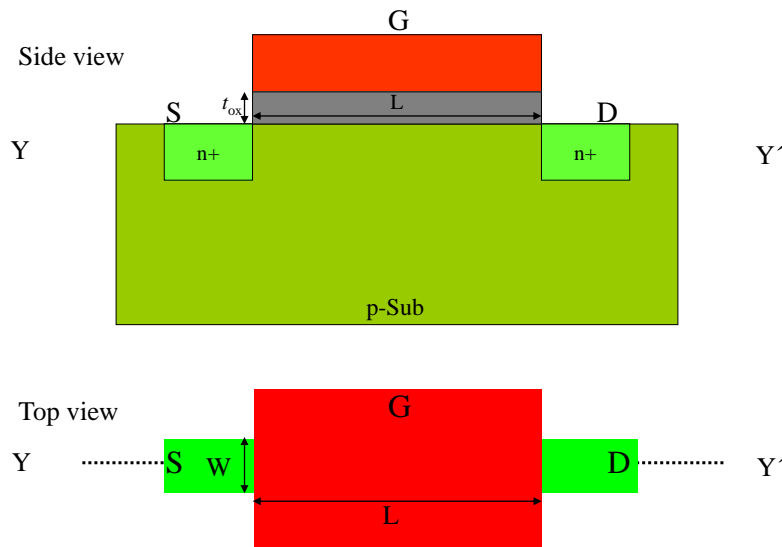


Abbildung 2: n-MOSFET im Querschnitt und Grundriss.

Wird  $U_{GS}$  weiter erhöht und erreicht die sogenannte Schwellspannung (Threshold)  $U_{TH}$ , also  $U_{GS} = U_{TH}$ , kommt es an der Schnittstelle zwischen Substrat und Oxid zur Ladungsträgerinversion. Das bedeutet, dass im ursprünglich p-dotierten Substrat der Betrag der Elektronendichte dem der Löcherdichte des p-Bulks gleicht. Majoritäts- und Minoritätsladungsträger tauschen ihre Rollen. Es entsteht ein Kanal zwischen Source und Drain mit Elektronen als Ladungsträger und Strom kann fließen. Durch weitere Herleitung ergeben sich drei relevante Arbeitsbereiche des MOSFETs, siehe Abbildung 4 und Tabelle 1. Die angegebenen Zusammenhänge in der Tabelle sind eine sehr einfache Näherung, welche für dieses Praktikum ausreichend ist. Im Laufe Ihres Studiums werden Sie die hier besprochenen Näherungen erweitern und damit ihre Gültigkeit erweitern. Für die Formelzeichen in der Tabelle gelten folgende Zusammenhänge:

- $W$ : Breite des FETs ( $\mu\text{m}$ )
- $L$ : Länge des FETs ( $\mu\text{m}$ )
- $\beta$ :  $\mu \cdot C_{ox}$
- $\mu$ : Mobilität der Ladungsträger ( $\text{cm}^2/(\text{Vs})$ )
- $C_{ox}$ : Gatekapazitätsdichte ( $\text{C}/\text{cm}^2$ )

Tabelle 1: Arbeitsbereiche des FETs

	Bedingung	Drainstrom
Sperrbereich	$U_{GS} < U_{TH}$	$I_D = 0$
Linearbereich/ Triodenbereich	$U_{GS} - U_{TH} > U_{DS} > 0$	$I_D = \beta \frac{W}{L} \cdot \left( (U_{GS} - U_{TH}) \cdot U_{DS} - \frac{U_{DS}^2}{2} \right)$
Abschnürbereich	$U_{DS} > U_{GS} - U_{TH} > 0$	$I_D = \frac{\beta}{2} \frac{W}{L} \cdot (U_{GS} - U_{TH})^2$

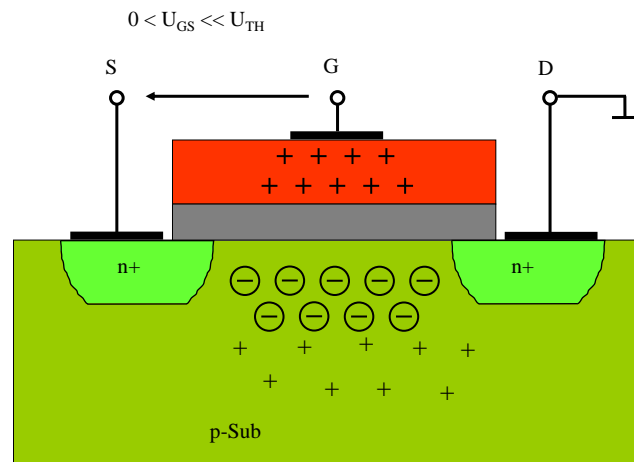


Abbildung 3: MOSFET im Subthreshold-Betrieb.

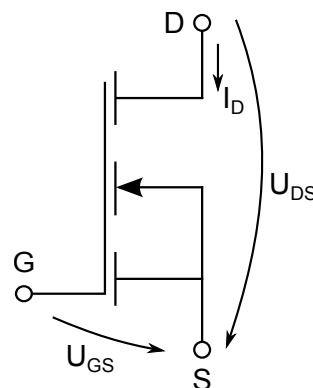


Abbildung 4: n-MOSFET mit üblicher Pfeilung.

Neben den n-MOS, gibt es die komplementären p-MOS Transistoren. Sie arbeiten nach dem gleichen Prinzip, nur mit Löchern als stromleitende Ladungsträger, jedoch kehren sich sämtliche Vorzeichen der Spannungen und Ströme um, die das Verhalten des Transistors charakterisieren. In Abbildung 2 werden die p-Bereiche zu n-Bereiche und umgekehrt.

Abschließend sollen noch die selbst-leitenden Transistoren erwähnt werden, auch als Verarmungstyp (depletion) bezeichnet. Bei ihnen dreht sich im Vergleich zu den bisher besprochenen selbst-sperrenden Transistoren (enhancement) das Vorzeichen von  $U_{TH}$  um, die Übertragungskennlinie in Abbildung 6b verschiebt sich nach links, was dazu führt, dass bei  $U_{GS} = 0\text{ V}$  bereits Strom fließen kann. Die verwendeten Schaltbildsymbole werden in Abbildung 5 aufgelistet.

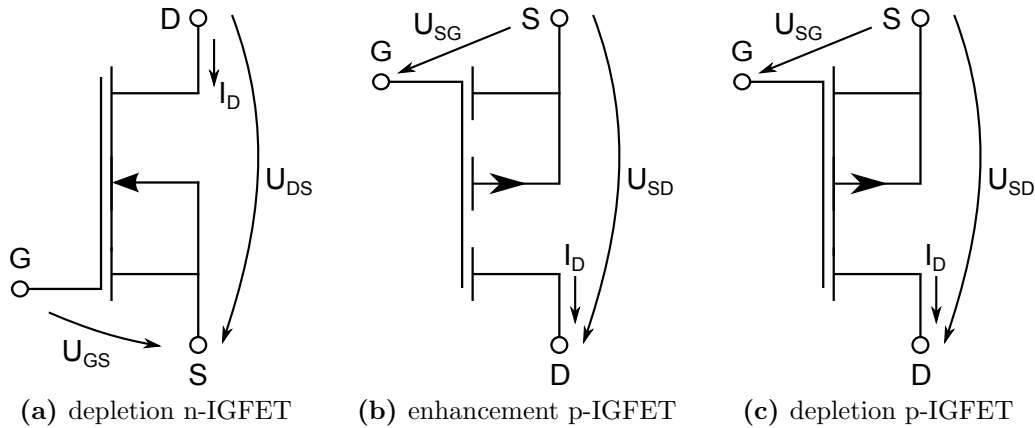


Abbildung 5: Transistortypen und ihre Schaltbildsymbole

## 2.2 Kennlinienfelder

Für die praktische Schaltungstechnik sind die physikalischen Vorgänge im Innern des Transistors weitgehend irrelevant. Hier interessiert die Spannungs-/Stromcharakteristik zwischen seinen Anschlüssen, welche rein phänomenologisch durch die Gleichungen in Tabelle 1 und durch seine Kennlinienfelder beschrieben wird. Für den FET sind zwei Kennlinien relevant. Die Übertragungskennlinie  $I_D = f(U_{GS})|_{U_{DS}}$  (siehe Abbildung 6b) und die Ausgangskennlinie  $I_D = f(U_{DS})|_{U_{GS}}$  (siehe Abbildung 6a).

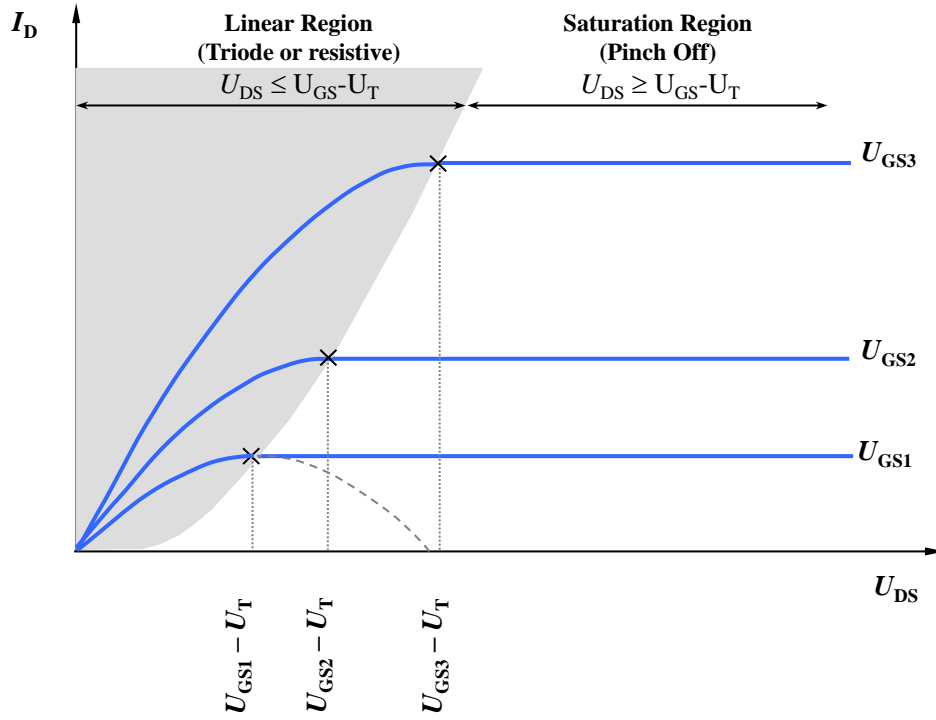
Man erkennt, dass ein FET grundsätzlich ein nicht-lineares Bauelement ist. Ziel dieses Versuchs ist es jedoch, lineare Verstärker zu konstruieren. Außerdem sind lineare Netzwerke weit einfacher zu berechnen, als nicht-lineare, sodass es wünschenswert ist, den Transistor mit ausreichender Genauigkeit als lineares Bauteil zu beschreiben.

Dafür ist es notwendig, den Transistor als erstes in einen vorteilhaften Betriebspunkt, auch Arbeitspunkt genannt, zu bringen. Dies ist ein bestimmter Punkt im Kennlinienfeld und wird vollständig festgelegt durch die Parameter  $I_D$ ,  $U_{DS}$  und  $U_{GS}$ , wobei jeweils zwei frei wählbar sind. Die Linearisierung des FET erfolgt nun durch partielle Differentiation der Gleichungen in Tabelle 1 bzw. durch Bestimmung der Steigung der Tangente am Arbeitspunkt der jeweiligen Kennlinie.

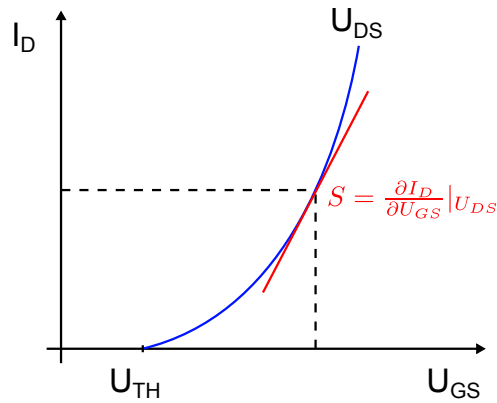
Welcher Arbeitspunkt als vorteilhaft bezeichnet werden kann, hängt von den Anforderungen der Anwendung ab. Dies können u. a. sein:

- Aussteuerbereich
- nicht-lineare Verzerrungen
- Betriebsspannung
- Spannungsverstärkung  $A_V$
- Verlustleistung  $P_V = U_{DS} \cdot I_D < P_{V,max}$
- Frequenzgang





(a) Ausgangskennlinienfeld



(b) Übertragungskennlinie

Abbildung 6: Kennlinienfelder des FET

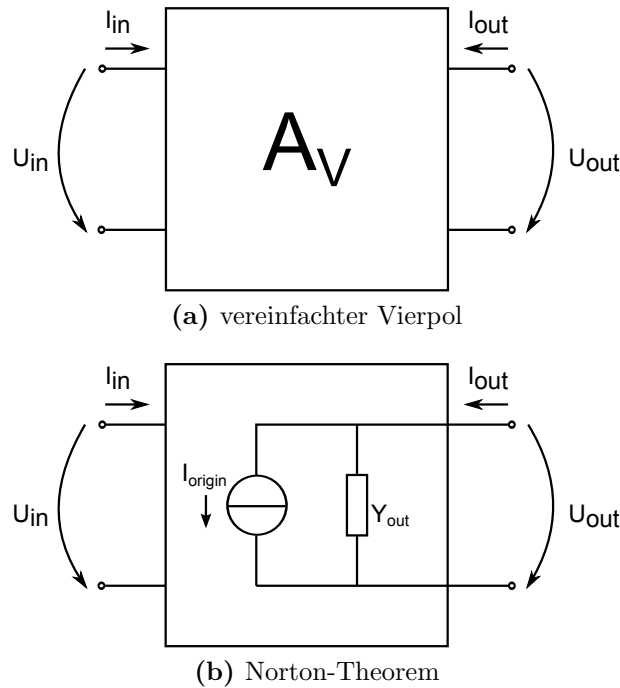
## 2.3 Vierpolparameter und Spannungsverstärkung $A_V$

Die Spannungsverstärkung eines generischen Vierpols (siehe Abbildung 7a) wird in der Regel mit  $A_V$  beschrieben.  $A_V$  ist definiert als

$$A_V = \frac{U_{\text{out}}}{U_{\text{in}}}. \quad (1)$$

Vollständig beschrieben, sind alle Ströme und Spannungen des Vierpols frequenzabhängige komplexe Funktionen im Bildbereich von sogenannten Integraltransformationen, die man mit einem Unterstrich darstellt. Da hier keine Vierpoltheorie betrieben werden soll und an dieser Stelle nur die Amplituden interessieren, wird eine vereinfachte Notation verwendet.

Nach dem Norton-Theorem kann jedes lineare Netzwerk als ideale Stromquelle samt parallelem Innenwiderstand (hier als Ausgangsadmittanz  $Y_{\text{out}}$  dargestellt) beschrieben werden, also auch der Verstärker (siehe Abbildung 7).



**Abbildung 7:** Herleitung der Spannungsverstärkung

Es gilt:

$$U_{\text{out}} = -\frac{I_{\text{origin}}}{Y_{\text{out}}} \quad \text{mit} \quad I_{\text{origin}} = I_{\text{out}}|_{U_{\text{out}}=0 \text{ V}}, \quad (2)$$

$I_{\text{origin}}$  ist also der ausgangsseitige Kurzschlußstrom.

$$Y_{\text{out}} = \frac{I_{\text{out}}}{U_{\text{out}}}|_{I_{\text{origin}}=0 \text{ mA}} \quad \Rightarrow \quad R_{\text{out}} = \frac{1}{Y_{\text{out}}} \quad (3)$$

wird auch Ausgangswiderstand genannt.

Mit  $G_m := \frac{I_{\text{origin}}}{U_{\text{in}}}$  (Transkonduktanz, bei Transistoren Steilheit  $S$  genannt), folgt

$$U_{\text{out}} = -G_m \cdot U_{\text{in}} \cdot R_{\text{out}} \quad (4)$$

und somit

$$\boxed{A_V = -G_m \cdot R_{\text{out}}} \quad (5)$$

Für weitere hier relevante Kleinsignalparameter eines Vierpols gilt:

1. Eingangswiderstand:

$$R_{\text{in}} = \frac{U_{\text{in}}}{I_{\text{in}}}|_{I_{\text{out}}=0 \text{ mA}} \quad (6)$$

2. Ausgangswiderstand:

$$R_{\text{out}} = \left. \frac{U_{\text{out}}}{I_{\text{out}}} \right|_{I_{\text{in}}=0 \text{ mA}} \quad (7)$$

3. Transkonduktanz:

$$G_{\text{m}} = \left. \frac{I_{\text{out}}}{U_{\text{in}}} \right|_{U_{\text{out}}=0 \text{ V}} \quad (8)$$

Die Nebenbedingungen ergeben sich aus den Vierpolgleichungen. Ein genaues Verständnis ihres Ursprungs ist für den Versuch nicht nötig, jedoch müssen Sie in Kleinsignalersatzschaltbildern unbedingt berücksichtigt werden, da sie in der Schaltung jeweils Kurzschlüsse oder Leerläufe darstellen.

## 2.4 Arbeitspunktstabilisierung

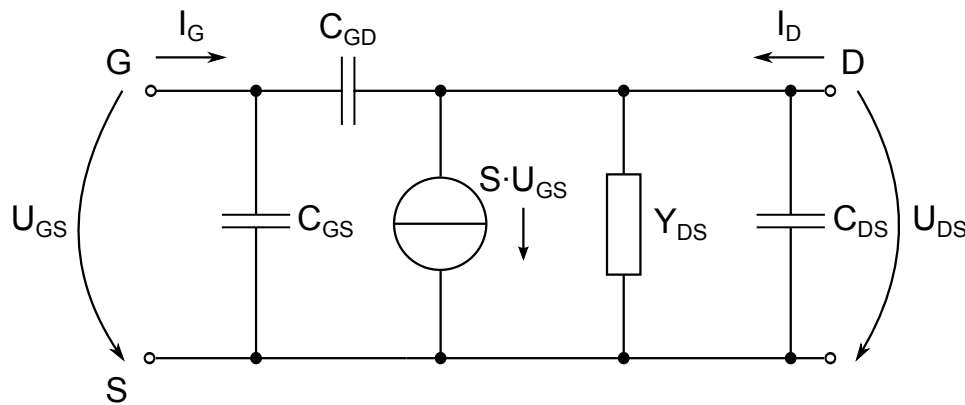
Der Arbeitspunkt soll möglichst unabhängig von Temperatur-, Langzeitschwankungen, Exemplarstreuung und Betriebsspannungsschwankungen korrekt eingestellt werden.

Um dies zu erreichen, wird die sogenannte Gegenkopplung verwendet, welche ein sehr wichtiges und komplexes Thema darstellt. Die Grundidee hierbei ist, einen Teil des Ausgangssignals eines linearen (Verstärker-)Netzwerks auf dessen Eingang zurückzuführen und zwar mittels eines Gegenkoppelnetzwerkes. Dieses Thema soll und kann an dieser Stelle nicht vertiefend erläutert werden. Doch unterscheidet man zwei wesentliche Gegenkopplungsarten. Die Stromgegenkopplung (AGK) und die Spannungsgegenkopplung (VGK). Charakteristisch für die VGK ist, dass ein Teil der Ausgangsspannung zurückgeführt wird und diese Gegenkopplung bei ausgangsseitigem Kurzschluß verschwindet. Bei der AGK wird ein Teil des Ausgangsstroms auf den Eingang geführt und diese Gegenkopplung wird bei ausgangsseitigem Leerlauf außer Kraft gesetzt.

## 2.5 Kleinsignalersatzschaltbild

Nach Wahl eines Arbeitspunktes und Durchführung der Linearisierung des Transistorverhaltens um diesen Arbeitspunkt, wird das sogenannte Kleinsignalersatzschaltbild (ESB) des Transistors konstruiert. Dieses ist ein lineares Netzwerk und gilt lediglich für kleine Signale, welche den Arbeitspunkt des Transistors vernachlässigbar beeinflussen. Je nach Komplexität des Ersatzschaltbildes wird das Wechselstromverhalten (AC) des Transistors in beschränkten Frequenzintervallen korrekt modelliert. Für den FET wird das (hier leicht vereinfachte)  $\pi$  - ESB nach dem US-Ingenieur Giacoletto verwendet, siehe Abbildung 8.  $\pi$  - ESB deshalb, weil die Admittanzen des Netzwerks nach dem Muster eines  $\pi$  angeordnet sind. Wie in Abbildung 8 zu sehen ist, beinhaltet das Kleinsignal-ESB einige Kapazitäten. Hierbei handelt es sich um parasitäre Kapazitäten eines Transistors, die intrinsisch vorhanden sind, auf deren Ursache hier aber nicht eingegangen werden soll. Im Datenblatt eines MOSFETs sind die parasitären Kapazitäten meist folgendermaßen angegeben:

$$\begin{aligned} C_{\text{iss}} &= C_{\text{GS}} + C_{\text{GD}} \\ C_{\text{oss}} &= C_{\text{GD}} + C_{\text{DS}} \\ C_{\text{rss}} &= C_{\text{GD}} \end{aligned}$$



**Abbildung 8:** n-MOSFET Kleinsignal-ESB mit üblicher Pfeilung.

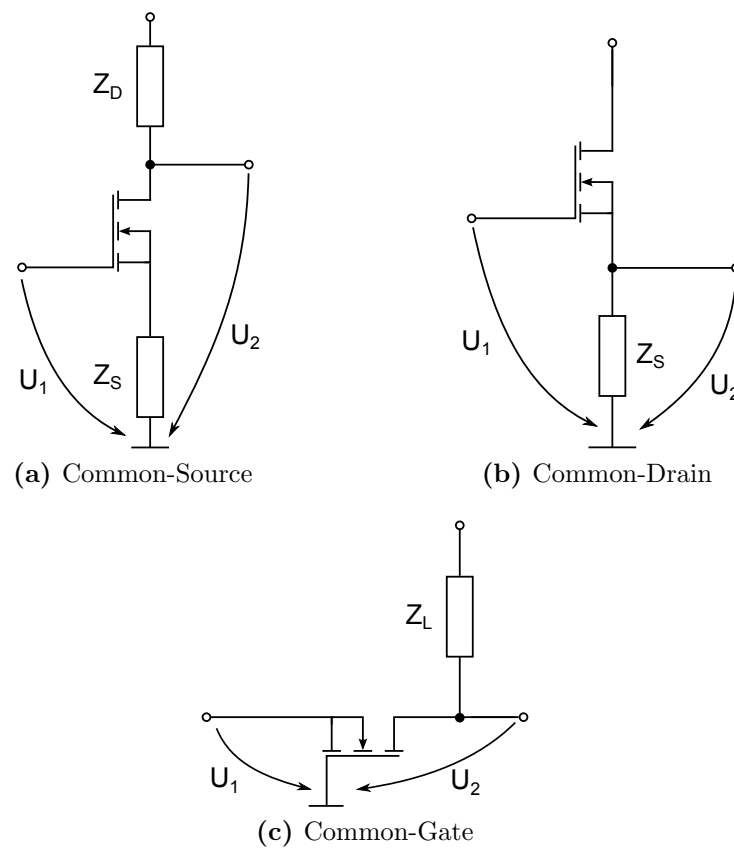
Diese Kapazitäten schränken bei hohen Frequenzen die Funktionalität ein, können bei niedrigen Frequenzen (NF-Bereich,  $< 20 \text{ kHz}$ ) jedoch durch Leerläufe ersetzt werden, da hier ihre Impedanz sehr groß wird.

$Y_{DS} = \frac{1}{r_{ds}}$  ist die Ausgangsadmittanz des Transistors. Idealerweise beträgt sie  $0 \text{ S}$ , da somit  $S \cdot U_{GS}$  eine ideale gesteuerte Stromquelle darstellt.

DC-Stromquellen werden in Kleinsignalschaltungen durch Leerläufe (unendlicher Widerstand) ersetzt. DC-Spannungsquellen werden durch Kurzschlüsse (Widerstand  $0 \Omega$ ) ersetzt. Dies gilt natürlich nicht für gesteuerte Quellen.

## 2.6 Grundsaltungen

Ein Transistor kann auf drei verschiedene Arten beschaltet werden, siehe Abbildung. 9. Die Schaltungen werden nach der Klemme (dem Anschluß) benannt, der dem Ausgangs- und dem Eingangskreis gemein ist. Die verschiedenen relevanten Schaltungseigenschaften wie Spannungsverstärkung  $A_V$ , (differentieller) Kleinsignalausgangswiderstand  $R_{out}$ , Transkonduktanz  $G_m$  oder Frequenzgang können durch Einsetzen des ESB in diesen Schaltungen bestimmt werden.

**Abbildung 9:** Transistor-Grundsaltungen

### 3 Vorbereitende Aufgaben & Fragen

#### 3.1 Allgemeine Fragen

1. Was passiert in einem Transistor wenn  $U_{GS} \geq U_{TH}$  ist?
2. Welche Arbeitsbereiche gibt es bei einem Transistor?
3. Skizzieren Sie einen p-MOS Transistor und erklären Sie anschaulich seine Funktionsweise.
4. Welche spezielle Eigenschaft besitzt der Transistor in Sättigung?
5. Zwischen welchen Gegenkopplungsarten wird im Allgemeinen unterschieden?
6. Warum geschieht die Ansteuerung beim MOSFET nahezu leistungslos?

#### 3.2 Verstärker

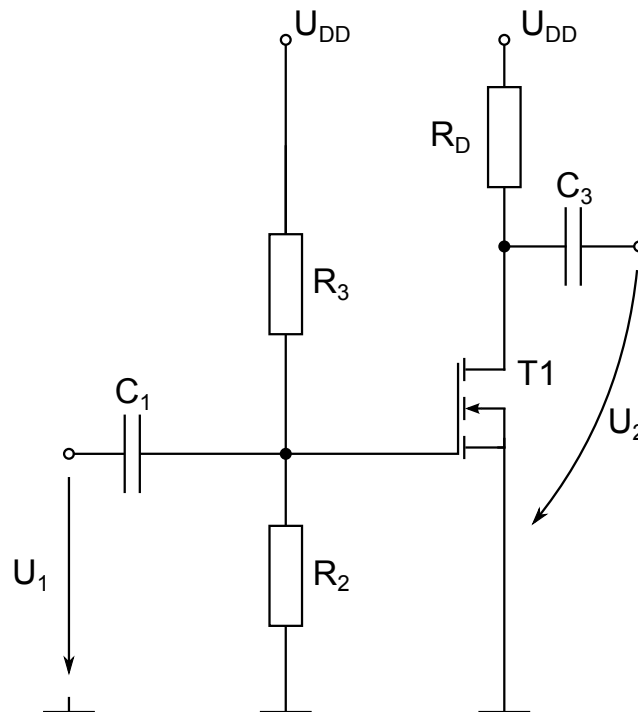


Abbildung 10: Verstärkernetzwerk

Abbildung 10 zeigt eine zu untersuchende Verstärkerschaltung.

1. Welche Art von Transistor wird hier verwendet ?
2. Welches Kennlinienfeld eines Transistors ist relevant für  $Y_{DS} := \frac{\partial I_D}{\partial U_{DS}}$ ? Welcher geometrischen Größe entspricht  $Y_{DS}$  im Kennlinienfeld ? Welche elektrotechnische Größe bezeichnet  $Y_{DS}$  ?
3. Um welche Grundschaltung handelt es sich hierbei ?

$C_1$  und  $C_3$  sind Koppelkondensatoren, die den (DC-) Arbeitspunkt des Verstärkers von der Quelle bzw. der Last trennen, deren Impedanz für die zu verarbeitenden Signalfrequenzen jedoch vernachlässigt werden kann ( $Z \approx 0 \Omega$ ).

4. Wie ersetzen Sie diese Kondensatoren im Schaltbild bei Wechselspannung?
5. Berechnen Sie die Impedanz von  $C_1 = C_3 = 2.2 \mu\text{F}$  bei einer Frequenz von 1 kHz.

### 3.3 Class-A Endstufe

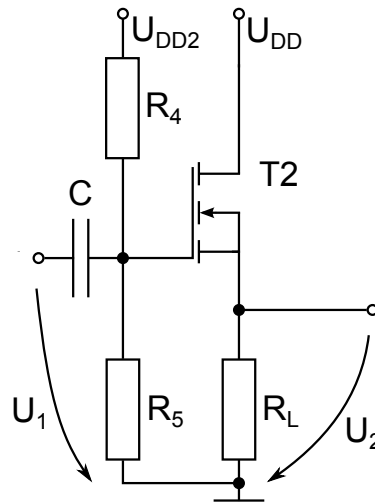


Abbildung 11: Class-A Endstufe

Um einen Kopfhörer mit  $R_L = 40\ \Omega$  zu treiben, soll die Class-A Endstufe aus Abbildung 11 verwendet werden.

1. Um welche Grundschaltung handelt es sich hier?
2. Welche Art der Gegenkopplung liegt hier vor? Kurze Begründung!
3. Weshalb kann diese Schaltung als Endstufe bezeichnet werden? Begründung!

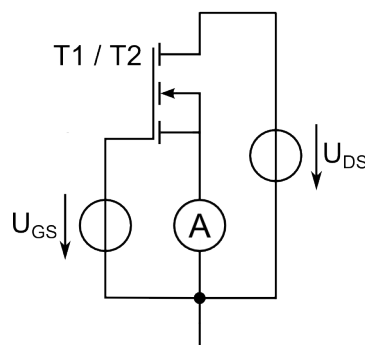
## 4 Versuchsdurchführung

### 4.1 Allgemeine Hinweise

1. Verwenden Sie in allen Versuchen den externen Frequenzgenerator.
2. Verwenden Sie außerdem **nicht** die Matlab-GUI.
3. **Wichtig:** Achten Sie auf den korrekten Anschluss aller Massepotentiale in ihren aufgebauten Schaltungen. Sämtliche Massepotentiale aller Teilschaltungen werden sternförmig direkt an den Anschlüssen der DC-Quellen zusammengeführt, nicht auf dem Steckbrett! Die Massen der DC-Quellen können mit kurzen Kabeln auf ein gemeinsames Bezugspotential gebracht werden. Achten Sie auch darauf keine geschlossenen Masseschleifen zu bauen. Die Massen der beiden Oszilloskop-Kanäle sind intern verbunden. Deshalb sollten Sie nur einen Kanal auf Masse legen. Würden Sie beide belegen, würden Sie wahrscheinlich folgende Schleife konstruieren: DC-Quelle  $\rightarrow$  Frequenzgenerator  $\rightarrow$  Oszilloskop  $\rightarrow$  DC-Quelle.

### 4.2 Messung der Kennlinienfelder

In diesem ersten Versuchsteil sollen verschiedene Kennlinien für zwei unterschiedliche Transistoren aufgenommen werden.



**Abbildung 12:** Messaufbau zur Charakterisierung der FETs.

Hierzu verwenden Sie die Messschaltung nach Abb. 12. T1 bezeichnet den Transistor BS270 und T2 den IPP60R950C6 von Infineon.

Nehmen Sie die Kennlinie  $I_D = f(U_{GS})|_{U_{DS}}$  auf. D.h. Sie messen den Drainstrom in Abhängigkeit von  $U_{GS}$  bei konstanter Drain-Source-Spannung  $U_{DS}$ . Den Drainstrom  $I_D$  messen Sie mit einem Multimeter und achten Sie darauf einen Strom von  $I_{D,max} = 400 \text{ mA}$  nicht zu überschreiten.  $U_{DS}$  halten Sie dabei konstant auf 3 V (T1).

Nehmen Sie für beide Transistoren 10 geeignete Messwerte auf und stellen Sie diese in einem Diagramm dar. (Bei T2 legen Sie für  $U_{DS}$  konstant 4 V an).

1. Wie groß ist jeweils  $U_{TH}$ ?
2. Bestimmen Sie Steilheit des Transistors T1 bei 40 mA...80 mA.



Im Weiteren nehmen Sie die Ausgangskennlinie  $I_D = f(U_{DS})|_{U_{GS}}$  der beiden Transistoren auf. Diesmal halten Sie  $U_{GS}$  auf konstant 3 V (T1) und erhöhen  $U_{DS}$  schrittweise von 0 bis 8 V. Überschreiten Sie 8 V jedoch nicht und erzeugen Sie keine negativen  $U_{DS}$ . Nehmen Sie auch hier für beide Transistoren 10 geeignete Messwerte auf und stellen Sie diese in einem Diagramm dar. (Bei T2 müssen für  $U_{GS}$  4 V anliegen). Sollten Sie einen Abriss der Kennlinie beobachten, ist dies entweder auf Überhitzung oder falsche Beschaltung zurückzuführen.

Bestimmen Sie den Ausgangswiderstand  $r_{DS}$  von T1 (Hinweis: Sättigungsbereich).

### 4.3 Verstärker

Bauen Sie nun die Verstärkerschaltung nach Abb. 10 mit dem Transistor T1 (BS270) auf. Der Arbeitspunkt soll eine minimale Verlustleistung, einen großen Aussteuerbereich und einen hohen Ausgangswiderstand aufweisen. Der Betriebsmodus ist durch die Schaltung vorgegeben. Bauen Sie die Schaltung mit den folgenden Bauteilen auf:  $C_1 = C_3 = 2.2 \mu\text{F}$ ,  $R_D = 440 \Omega$ ,  $R_2 = 1.3 \text{ k}\Omega$ ,  $R_3 = 10 \text{ k}\Omega$ . Setzen Sie  $U_{DD}$  auf 24 V. Bei korrekter Verschaltung sollte sich ein Drainstrom von ca. 50 mA ergeben. Schließen Sie den externen Funktionsgenerator, das Oszilloskop und die Spannungsversorgung an, nachdem Sie alle drei Geräte korrekt konfiguriert haben. Achten Sie besonders auf die **Strombegrenzung** der Spannungsversorgung.

1. Messen Sie den Amplitudengang  $20 \text{ dB} \cdot \log_{10} \left( \left| \frac{U_2(f)}{U_1(f)} \right| \right)$ 
  - (a) für Frequenzen zwischen 100 Hz und 4 MHz.
  - (b) mit 2 Messpunkten pro Dekade.
  - (c) Frequenzgenerator: 100 mV<sub>pp</sub>, Sinus, deaktivierter Offset.
  - (d) Achten Sie bei höheren Frequenzen auf einen möglichen Abfall dieser Eingangsamplitude. Regeln Sie bei Bedarf nach.
2. Stellen Sie den gemessenen Amplitudengang in einem Diagramm dar. Wie groß ist  $A_V$  bei 1 kHz?

Die Bandbreite eines Verstärkers ist definiert als 3 dB Abfall der Verstärkung im Vergleich zu niedrigen Frequenzen, die als DC angenommen werden können, bzw. als Reduzierung der Ausgangsspannung  $U_2$  um den Faktor  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ . Ein Betrieb des Verstärkers jenseits seiner Bandbreite ist gewöhnlich nicht zu empfehlen, da er seine Funktion in diesem Frequenzbereich nicht mehr erfüllen kann.

3. Wie groß ist die Bandbreite des Verstärkers?

### 4.4 Class-A Endstufe

Bauen Sie nun die Endstufe nach Abb. 11 mit dem Transistor T2 (IPP 60) auf. Der Widerstand  $R_L$  der Kopfhörer beträgt  $40 \Omega$  pro Kanal. Wählen Sie einen entsprechenden Widerstand von  $47 \Omega$  für ihre Messungen. Erst im letzten Schritt wird der Sourcewiderstand durch den Kopfhörer ersetzt. Diese einfache Endstufe weist eine hohe Verlustleistung auf, die in der angeschlossenen Last in Wärme umgewandelt wird. Um die Kopfhörer nicht zu beschädigen, soll  $I_D$  auf 100 mA begrenzt werden.

1. Bauen Sie die Schaltung auf mit  $U_{DD} = 7\text{ V}$ ,  $U_{DD2} = 7\text{ V}$ ,  $Z_L = 47\ \Omega$ ,  $R_5 = 1\text{ M}\Omega$  und  $R_4 = 100\text{ k}\Omega$ ,  $C = 2.2\ \mu\text{F}$ , regeln Sie bei Bedarf  $U_{DD2}$  nach, um  $I_D$  auf  $100\text{ mA}$  zu beschränken.
2. Messen Sie die Verstärkung bei  $20\text{ kHz}$  und einer Ausgangsamplitude des Frequenzgenerators von  $500\text{ mV}$  ( $1\text{ V}_{pp}$ ), Sinus.
3. Bauen Sie nun einen vollständigen Signalpfad bestehend aus Verstärker und Endstufe, indem Sie den Ausgang des Verstärkers aus Teilaufgabe 4.3 mit dem Eingang der Endstufe über den Koppelkondensator  $C$  verbinden.
4. Ersetzen Sie den Sourcewiderstand durch den Kopfhörer (regeln Sie unter Umständen  $U_{DD2}$  nach, um  $I_D$  auf  $100\text{ mA}$  zu beschränken - achten Sie beim Verwenden der Kopfhörer auf die Lautstärke - setzen Sie die Kopfhörer erst auf, wenn die Schaltung funktioniert!) und fahren Sie langsam das Frequenzintervall  $50\text{ Hz} \dots 20\text{ kHz}$  durch bei einer Lastamplitude von  $500\text{ mV}$ , Sinus. Sie sollten einen entsprechenden störfreien Ton hören.  $440\text{ Hz}$  entsprechen dem Kammerton 'a' (eingestrichenes a), der als Referenz zum Einstimmen von Musikinstrumenten verwendet wird.

## 5 Evaluation

Auf der Moodleseite gibt es zu jedem Versuch eine Umfrage zur Evaluation. Bitte helfen Sie die Qualität des Praktikums zu verbessern, indem Sie uns Rückmeldung geben wie Sie die Versuchsdurchführung empfunden haben!

Loggen Sie Sich beide einzeln vom Praktikumsrechner aus ein und beantworten Sie die Umfrage noch direkt nach der Versuchsdurchführung bevor Sie das Praktikum verlassen!