

# Elektrotechnisches Versuchspraktikum

Für Bachelor-Studierende der Studiengänge Elektrotechnik (ET, 3. Semester), Elektrotechnik my Track (ET my Track, 5. Semester), Allgemeine Ingenieurwissenschaften (AIW 5. Semester), Engineering Science (ES 5. Semester) und Technomathematik (TM 5. Semester)

Versuch Nr.: 2

Halbleiter-Bauelemente

Ort: Gebäude I, DE 22, Raum 0051

Allgemeine Informationen unter:

<https://www.tuhh.de/mtec/teaching/e-praktikum>

Stand der Versuchsbeschreibung: 11.10.2022

# Das Wichtigste in Kürze

## Worum geht es?

In diesem Versuch wird das elektrische Verhalten von wichtigen Halbleiterbauelementen untersucht.

## Was wird gemacht?

Es wird je eine Schaltung mit Dioden, Transistor und Feldeffekttransistor auf ihre Funktionsweise untersucht.

## Welche Apparaturen und Instrumente werden verwendet?

Es werden verschiedene Netzteile für die Spannungsversorgung, ein Funktionsgenerator zur Erzeugung vorgegebener, zeitabhängiger Signale und ein Oszilloskop zur Darstellung der zu untersuchenden Signale verwendet.

## Was lernt man dabei?

Das Schalt- und Verstärkungsverhalten der untersuchten Halbleiterbauelemente wird erlernt, sowie der Umgang mit den verwendeten Messgeräten.

## Warum ist das wichtig?

Dioden, Transistoren und Feldeffekttransistoren sind die wohl momentan am meisten verwendeten Halbleiterbauelemente in der Elektrotechnik. Das Verständnis ihres grundsätzlichen Verhaltens in typischen Schaltungen ist von großer Bedeutung. Die richtige Anwendung von Messgeräten, hier speziell dem Oszilloskop, ist für praktische Arbeiten unerlässlich.

## Was wird von den Studenten erwartet?

Vollständige Durcharbeitung der Versuchsunterlagen - inklusive der Beschreibung der Versuchsdurchführungen - und **schriftliche** Beantwortung der Fragen in Teil D, **bevor** der Versuch stattfindet.

**Institut für Hochfrequenztechnik**  
**Technische Universität Hamburg-Harburg**  
**Stand: 15.05.2017**

## Inhaltsverzeichnis

<b>A</b>	<b>Einleitung</b>	<b>3</b>
<b>B</b>	<b>Theorie</b>	<b>3</b>
B.1	Metall, Halbleiter, Isolator . . . . .	3
B.1.1	Metallische Stromleiter . . . . .	3
B.1.2	Eigenleitung in Isolatoren und Halbleitern . . . . .	3
B.1.3	Störstellenleitung in Halbleitern . . . . .	5
B.2	pn-Übergang . . . . .	5
B.2.1	pn-Übergang ohne äußere Spannung . . . . .	5
B.2.2	pn-Übergang mit äußerer Spannung in Sperrrichtung . . . . .	6
B.2.3	pn-Übergang mit äußerer Spannung in Durchlassrichtung . . . . .	7
B.3	Transistor . . . . .	8
B.3.1	Betrieb mit leerlaufender Basis . . . . .	9
B.3.2	Betrieb des Transistors mit Basisstrom . . . . .	10
B.3.3	Transistorkennlinie und Arbeitspunkt . . . . .	11
B.4	Feldeffekttransistor . . . . .	13
<b>C</b>	<b>Durchführung</b>	<b>15</b>
<b>D</b>	<b>Fragen zur Theorie und Durchführung des Versuchs</b>	<b>28</b>
<b>E</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>28</b>

## A Einleitung

In diesem Versuch sollen Halbleiter-Bauelemente in ihrer Wirkungsweise und ihren wichtigsten Anwendungen untersucht werden. Die Diode ist ein Zweisicht-Halbleiter und dient zur Gleichrichtung von Wechselfsignalen (z.B. Leistungsgleichrichter in der Starkstromtechnik oder Empfänger von Signalen in der Nachrichtentechnik). Der Bipolartransistor weist 3 Schichten auf und dient hauptsächlich zur Verstärkung (von Gleichstrom bis zu Wechselströmen von  $10^9$  Hz), aber auch als Schalter oder Generator. Der Feldeffekttransistor besteht aus einem n- oder p-leitendem Halbleitermaterial, in das zwei sperrschichtfreie Anschlüsse eingebracht sind. Über einen dritten kann der Stromfluss im Idealfall leistungslos gesteuert werden. Die Funktion aller 3 Bauelemente beruht auf dem Mechanismus der Stromleitung in den sogenannten „Halbleitern“. Im Folgenden soll zunächst die Theorie des Ladungsträgertransports im Halbleiter (zur intensiven Vorbereitung des Praktikums wird auf [1] und [2] verwiesen) und die Funktionsweisen von Diode, Bipolar- und Feldeffekttransistor wiederholt werden. In mehreren Versuchsaufbauten werden dann typische Anwendungen dieser Halbleiter-Bauelemente messtechnisch untersucht. Dazu stehen die entsprechenden Versuchsschaltungen mit einer Ausnahme zur Verfügung. Eine Verstärkerschaltung mit Bipolartransistor ist von jedem Praktikumssteilnehmer selbst zu erstellen und im Anschluss zu vermessen.

## B Theorie

### B.1 Metall, Halbleiter, Isolator

Die Festkörper teilt man hinsichtlich der Stromleitung in diese 3 Gruppen ein. Wesentliches Merkmal ist die spezifische Leitfähigkeit, die bei Isolierstoffen extrem niedrig ist (z.B.  $10^{-22}$  Sm/mm<sup>2</sup> bei Bernstein oder  $10^{-18}$  Sm/mm<sup>2</sup> bei Mineralöl), während sie bei Metallen um viele Größenordnungen höher liegt (z.B. bei Kupfer mit 56 Sm/mm<sup>2</sup>). Dazwischen liegen die als Halbleiter bezeichneten Materialien, deren Leitfähigkeit durch unten noch besprochene Maßnahmen über mehrere Größenordnungen gezielt eingestellt werden kann. Dabei kennt man Element-Halbleiter wie Germanium oder Silizium und Verbindungs-Halbleiter wie Gallium-Arsenid.

#### B.1.1 Metallische Stromleiter

Etwa ein Elektron je Atom nimmt am Leitungsvorgang (= Ladungstransport) teil. Dabei gibt es etwa  $10^{23}$  Atome je cm<sup>3</sup>. Die Elektronen bewegen sich frei und ungeordnet („Wimmelbewegung“, sogenanntes „Elektronengas“) zwischen den unbeweglichen Atomrümpfen des Kristallgitters. Legt man ein elektrisches Feld durch eine Potentialdifferenz an, so bildet sich eine Vorzugsrichtung heraus: Es fließt ein *Elektronenstrom*.

#### B.1.2 Eigenleitung in Isolatoren und Halbleitern

Bei Isolatoren sind fast alle Elektronen an „ihr“ Atom gebunden, d.h. ortsfest. Dieser Zustand ist über weite Bereiche von Einflussgrößen wie Temperatur oder elektrisches Feld nicht zu verändern. Die Leitfähigkeit ist praktisch Null.

Der Unterschied zu Halbleitern ist nicht prinzipieller sondern nur gradueller Natur. Bei sehr tiefen Temperaturen ist auch deren Leitfähigkeit sehr gering. Sie nimmt aber mit der Temperatur stark zu. Den Transportvorgang kann man sich am Beispiel der Element-Halbleiter Ge oder Si folgendermaßen veranschaulichen:

Beide Elemente besitzen 4 Valenzelektronen: Sie sind vierwertig. Sie kristallisieren im Diamantgitter, bei dem jedes Atom über jeweils eine „Brücke“ aus 2 Elektronen an 4 Nachbaratome gebunden ist [1], [2]. Die Bindung ist vollständig beim absoluten Temperaturnullpunkt  $T = 0$ , der Halbleiter ist ein idealer Isolator. Durch Erwärmung (Energiezufuhr) werden zunehmend mehr Elektronen aus den Bindungen befreit und damit beweglich. Das hat aber nun eine eigentümliche Konsequenz: Wenn das Elektron seinen Platz verlässt (z.B. wegen eines angelegten elektrischen Feldes), hinterlässt es im Gitter ein *Loch* = *Defektelektron* = *positive Ladung*. Es hat sich damit ein Ladungsträgerpaar gebildet: *Generation*. Natürlich kann eine positive Überschussladung auch durch ein anderes freies Elektron kompensiert werden, das den Platz des Loches im Gitter einnimmt. Ein Ladungsträgerpaar verschwindet damit: *Rekombination*. Beide Prozesse stehen miteinander im Gleichgewicht, sodass im stationären Zustand eine bestimmte Anzahl von Elektron-Loch-Paaren für den Leitungsvorgang zur Verfügung stehen. Diese Zahl wächst mit der Temperatur.

In Bild 1 ist ein Leitungsvorgang schematisch dargestellt. Ein Elektron verlässt seinen Gitterplatz und bewegt sich frei. Das entstandene Loch wird nach einer gewissen Zeit von einem Valenzelektron eines Nachbaratoms aufgefüllt, wobei allerdings ein neues Loch entsteht. Diese Vorgänge können sich fortpflanzen, der Halbleiterkristall zeigt die sogenannte „Eigenleitung“ unter Einwirkung eines äußeren elektrischen Feldes. Eigentümliches Merkmal ist, dass beide Ladungsträgersorten additiv zum Ladungstransport beitragen: Der *Elektronenstrom* bewirkt eine Wanderung negativer Ladung, der *Löcherstrom* eine scheinbare Wanderung positiver Ladung. Dabei bewegen sich nicht die „ionisierten“ Gitteratome, sondern es wandert der Ionisierungszustand. Für einen äußeren Beobachter stellt sich das als eine Bewegung positiver Ladung dar, die dem Elektronenstrom überlagert ist.

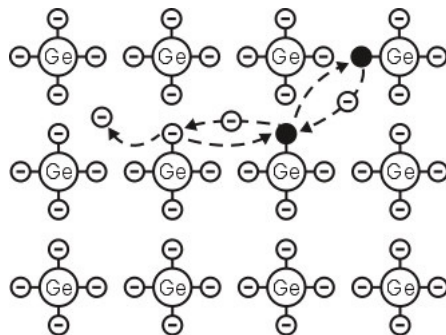


Bild 1: Eigenleitung im Ge-Kristall

Elektrische Leitung aufgrund der Paarbildung von Ladungsträgern nennt man *Eigenleitung*. An ihr sind damit stets gleich viele Elektronen wie Löcher beteiligt. Die Ladungsträgerdichte, d.h. die Anzahl der Ladungsträger pro Volumeneinheit, ist gleich der Eigenlei-

tungsdichte  $n_i$ . Sie beträgt bei Ge (Si) bei Zimmertemperatur  $2,4 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$  ( $1,5 \cdot 10^{13} \text{cm}^{-3}$ ), sodass z.B. von den  $4,4 \cdot 10^{22}$  Ge-Atomen je  $\text{cm}^{-3}$  nur von etwa jedem  $10^9$ -ten Atom ein freies Elektron zur Verfügung gestellt wird. (Man vergleiche mit Metallen: Jedes Atom stellt im Mittel etwa ein Elektron zur Verfügung.) Der Eigenleitungseffekt ist folglich sehr gering und konnte auch erst beobachtet werden, als man Halbleiterkristalle höchster Reinheit herstellen konnte. Verunreinigungen überdecken nämlich diesen Effekt, wie im Folgenden veranschaulicht werden soll.

### B.1.3 Störstellenleitung in Halbleitern

Die Leitfähigkeit von Halbleitern kann um viele Größenordnungen dadurch gesteigert werden, dass man das Material durch die Zugabe von Fremdatomen „verunreinigt“. Das nennt man *Dotieren*. Dabei werden entweder fünfwertige Atome wie z.B. Antimon oder dreiwertige wie z.B. Indium in das Wirtsgitter eingebaut. Technisch geschieht das beispielsweise durch Legieren oder Eindiffundieren des Dotierstoffes. Eine ausführliche Beschreibung der Störstellenleitung in Halbleitern findet man in der Literatur z.B. in [1] und [2].

Auch bei dotierten Halbleitern entstehen und verschwinden dauernd zusätzliche Ladungsträgerpaare, die zur Eigenleitfähigkeit führen. Sie wird jedoch durch die Störstellen-Leitfähigkeit meist um viele Größenordnungen übertroffen. Andererseits sind aber durch den Prozess der Generation in einem z.B. n-dotierten Halbleiter auch freie Löcher enthalten, wie in einem p-dotierten Halbleiter auch freie Elektronen enthalten sind. Die gesamte Leitfähigkeit setzt sich daher aus einem Anteil infolge der freien Elektronen und einem anderen infolge der freien Löcher zusammen. Man bezeichnet die Ladungsträger, die durch die Dotierung im Halbleiter vorhanden sind, als *Majoritätsträger*, die freien Ladungsträger mit entgegengesetztem Vorzeichen als *Minoritätsträger*. Bei nicht zu großen Strömen gilt [2]

$$n \cdot p = n_i^2.$$

Darin bedeuten  $n$  und  $p$  die Dichten der Elektronen und Löcher und  $n_i$  die im Abschnitt B.1.2 eingeführte Eigenleitungsdichte. Während in einem undotierten Halbleiter  $n = p$  gilt, hat man in einem dotierten Halbleiter nur ein Hundertstel so viel Minoritätsträger wie Majoritätsträger, wenn man mit  $10 n_i$  Fremdatomen dotiert.

## B.2 pn-Übergang

Ein pn-Übergang ist ein Gebiet, in dem ein p-Leiter und ein n-Leiter flächig aneinander grenzen. Er kann z.B. durch einen Diffusionsprozess erzeugt werden. Es wird im folgenden gezeigt, dass die Strom-Spannungs-Kennlinie des pn-Überganges einen Sperr- und einen Durchlassbereich aufweist: Es entsteht eine *Diode*.

### B.2.1 pn-Übergang ohne äußere Spannung

Am pn-Übergang treten große Konzentrationsgradienten der freien Ladungsträger auf, die auf der einen Seite Majoritätsträger, auf der anderen aber Minoritätsträger sind. Aufgrund ihrer thermischen Wimmelbewegung dringen dann Elektronen aus dem n-Leiter in

den p-Leiter und umgekehrt Löcher aus dem p-Leiter in den n-Leiter ein. Das ist in Bild 2 skizziert. Dieser Vorgang heißt *Diffusion*. Dadurch entsteht eine Grenzschicht, bestehend aus negativen Raumladungen in der p- und positiven Raumladungen in der n-Zone. Die Raumladungsverteilung führt zu einem Potentialunterschied, der Diffusionsspannung  $U_D$ , die der Ladungsträgerdiffusion entgegenwirkt. Dieser Gleichgewichtsprozess führt dazu, dass die Ladungsträgerdichte in der Grenzschicht nur so groß ist wie die Eigenleitendichte. Die Grenzschicht ist folglich sehr hochohmig. Die Grenzschichtweite stellt sich im Rahmen des Gleichgewichtsprozesses ein ([1] und [2]).

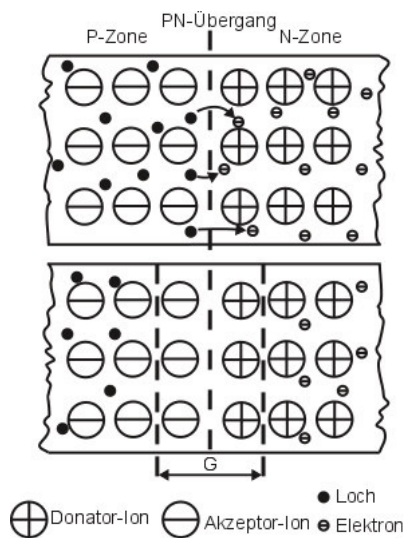


Bild 2: Ausbildung der Grenzschicht G beim pn-Übergang

### B.2.2 pn-Übergang mit äußerer Spannung in Sperrrichtung

Als Ausgangspunkt zeigt Bild 3 nochmals den pn-Übergang ohne äußere Spannung. Legt man nun an den Kristall eine Spannung  $U$  so an, dass der Pluspol der Spannungsquelle mit der n-Zone, der Minuspol mit der p-Zone verbunden ist, so stellen sich die in Bild 4 skizzierten Verhältnisse ein. Die äußere Spannung  $U$  hat den gleichen Richtungssinn wie die Diffusionsspannung  $U_D$ . Hierdurch werden bewegliche Ladungsträger von den Rändern der Grenzschicht abgezogen.

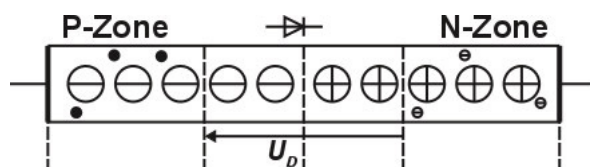


Bild 3: pn-Übergang ohne äußere Spannung

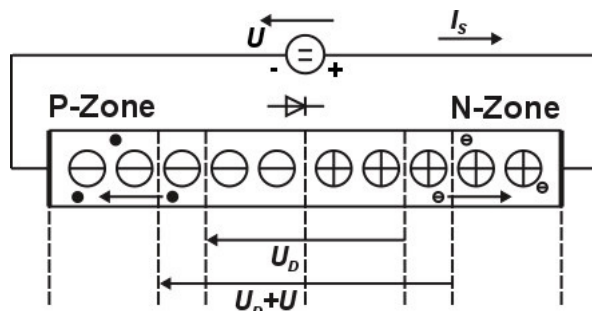


Bild 4: pn-Übergang mit Spannung in Sperrrichtung

Die Raumladungszone verbreitert sich. Im äußeren Stromkreis fließt nur der kleine Sperrstrom  $I_S$ . Es fließen Löcher aus der n-Zone (Minoritätsträger) hinüber in die p-Zone. Die Sperrstromdichte beträgt bei Raumtemperatur für Ge etwa  $0,2 \text{ mA/cm}^2$  für Si etwa  $0,002 \text{ mA/cm}^2$ .

### B.2.3 pn-Übergang mit äußerer Spannung in Durchlassrichtung

Polt man die äußere Spannungsquelle so, dass ihr Pluspol mit der p-Zone verbunden ist ( $U < U_D$ ), wird die Grenzschicht schmäler (Bild 5) bis sie bei  $U = U_D$  ganz abgebaut ist.

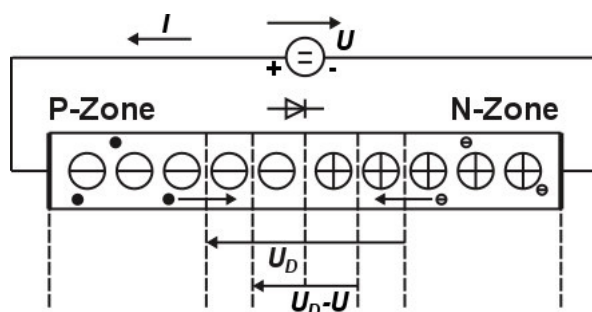


Bild 5: pn-Übergang mit Spannung in Durchlassrichtung

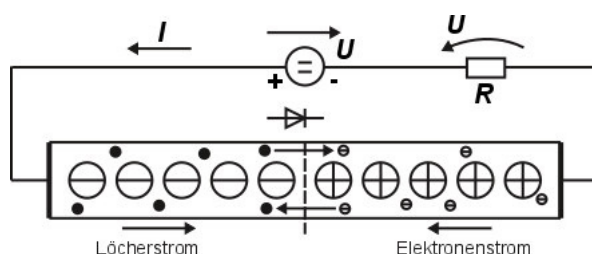


Bild 6: pn-Übergang mit Spannung und Stromfluss in Durchlassrichtung

Nach dem Abbau der Grenzschicht ( $U > U_D$ ; Bild 6) besitzt der Halbleiter nur noch den geringen *Bahnwiderstand*, sodass die Stromstärke im Wesentlichen durch den äußeren Widerstand  $R$  bestimmt wird. Dieses Verhalten wird durch die Diodenkennlinie von Bild 7 dargestellt.



Sie wird durch die Gleichung

$$I = I_S \left[ e^{\left(\frac{U}{nU_T}\right)} - 1 \right], \quad U_T = 26\text{mV} \quad (1)$$

beschrieben, in der  $I_S$  den in Abschnitt B.2.2 eingeführten Sperrstrom und  $U_T$  die sogenannte „Temperaturspannung“ bedeuten. Sie ist proportional zur absoluten Temperatur und hat bei Raumtemperatur den in der Gleichung angegebenen Zahlenwert. Die Größe „ $n$ “ ist der Idealitätsfaktor, mit dem man Effekte beschreibt, die in dieser einfachen Darstellung nicht berücksichtigt worden sind. Für ihn gilt  $1 < n < 2$ .

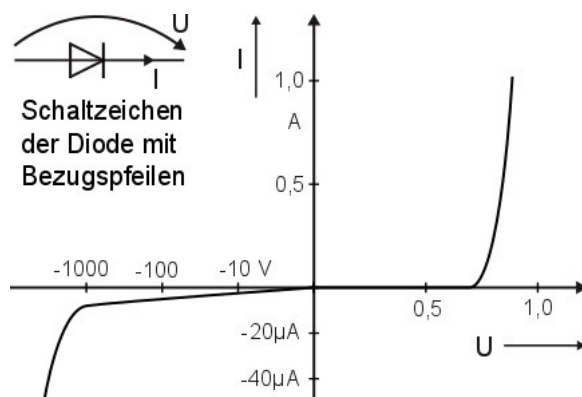


Bild 7: Strom-Spannungs-Kennlinie einer Diode (Maßstäbe unterschiedlich)

Für Spannungen, die größer sind als die Diffusionsspannung, steigt der Strom sehr stark (im Idealfall exponentiell) an.

### B.3 Transistor

Der Transistor ist ein Dreischicht-Element mit der Schichtenfolge npn oder pnp. Sein prinzipieller Aufbau, die schematische Aufeinanderfolge der Schichten, sowie die Schaltzeichen sind in Bild 8 dargestellt. Man kann diese Anordnung als Zusammenschaltung von zwei pn-Dioden betrachten, die eine gemeinsame Schicht haben. Sie wird Basis (B) genannt und ist stets extrem dünn (Größenordnung Mikrometer). Die beiden gleichartig dotierten Schichten heißen Emitter (E) und Kollektor (C).

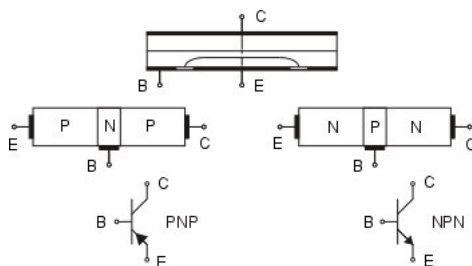


Bild 8: Prinzipieller Aufbau eines Flächentransistors

### B.3.1 Betrieb mit leerlaufender Basis

Im Folgenden soll der npn-Transistor betrachtet werden. Die Verhältnisse am pnp-Transistor sind die gleichen, wenn man den Richtungssinn sämtlicher Spannungen und Ströme umkehrt. Zwischen Kollektor (C) und Emmitter (E) wird eine ideale Spannungsquelle  $U$  so angeschlossen, dass der Pluspol mit dem Kollektor verbunden ist (Bild 9). Der Basisanschluss bleibt zunächst offen, sodass der Transistor hinsichtlich dieser Klemme leerläuft. Durch die Polarität der äußeren Spannungsquelle ist der rechte pn-Übergang (B-C) im Sperrzustand, der linke (B-E) im Durchlasszustand. Dabei bildet sich eine breite Raumladungszone zwischen Kollektor und Basis mit einer hohen Potentialdifferenz aus, die ungefähr der äußeren Spannung entspricht. (über dem anderen, in Durchlassrichtung gepolten Übergang kann ja nach Bild 5 nur ein geringer Teil der äußeren Spannung abfallen.) Die einzelnen Schichten im Transistor werden so dotiert, dass diese Raumladungszone stark unsymmetrisch ist. Soll sie sich z.B. hauptsächlich in die Basiszone und nur unwesentlich in die Kollektorzone ausdehnen, dann muss man die Basis schwach im Vergleich zum Kollektor dotieren. Da nahezu die gesamte Quellspannung  $U$  an der hochohmigen C-B-Grenzschicht abfällt, reicht die Spannung an der B-E-Diode nicht aus, um die Diffusionsspannung aufzuheben und die schmale, ebenfalls unsymmetrische Grenzschicht B-E abzubauen. Im äußeren Stromkreis fließt daher nur der sehr kleine Sperrstrom  $I_{CE0}$ , der Transistor sperrt.

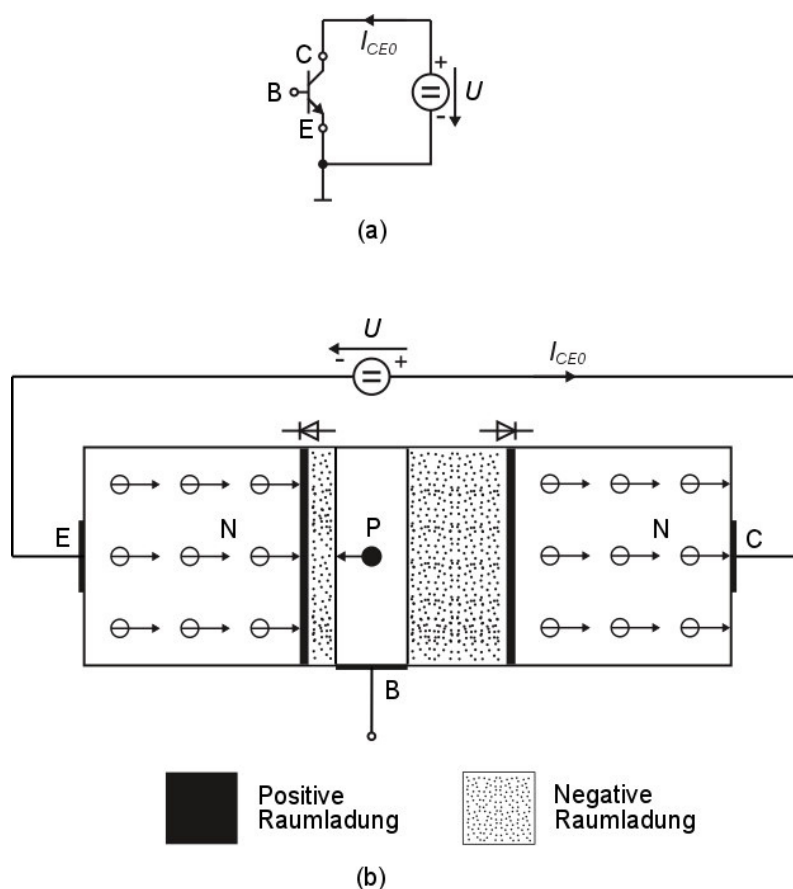


Bild 9: Transistorbetrieb mit leerlaufender Basis.

a) Beschaltung des Transistors. b) Anschauliche Modelldarstellung

### B.3.2 Betrieb des Transistors mit Basisstrom

Wie Bild 10 zeigt, wird nun eine zusätzliche Spannungsquelle  $U_B$  angeschlossen, deren Minuspol am Emittor liegt. In der sogenannten *Emitter-Schaltung* erhält der Emittor (durch eine Erdung) das Bezugspotential 0 V. Durch diese Spannungsquelle wird die Raumladung in der Basis-Emittor-Grenzschicht abgebaut, sodass die dort liegende Potentialdifferenz geringer wird. Hierdurch können vermehrt Elektronen aus dem n-dotierten Emittorgebiet in das Basisgebiet eindringen. Da die Basis verhältnismäßig schwach dotiert ist, rekombinieren dort nur sehr wenige dieser Elektronen.

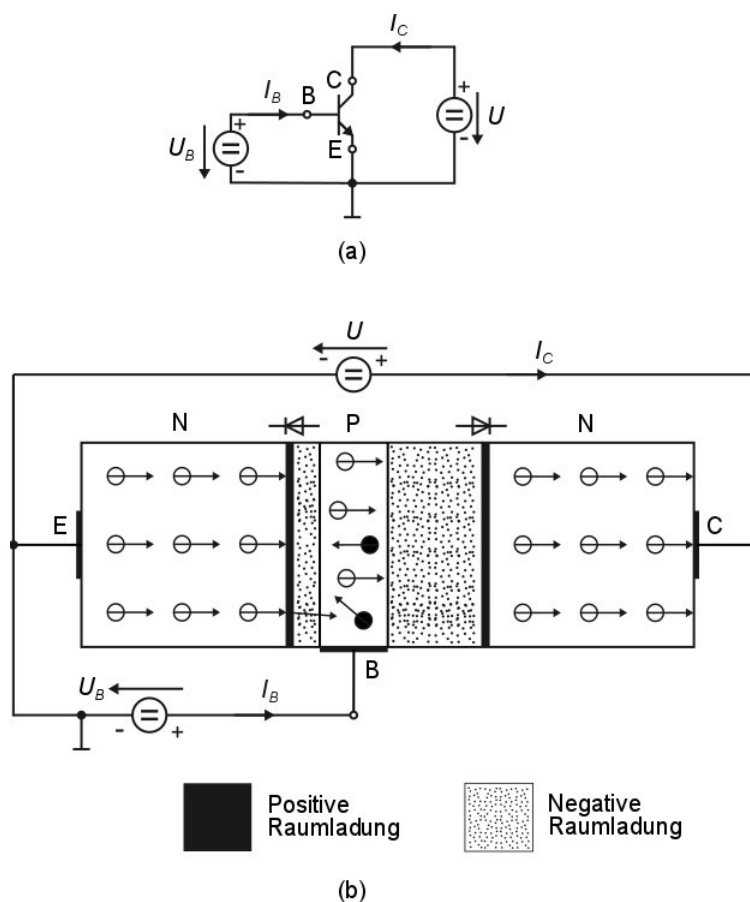


Bild 10: Transistorbetrieb mit Basisstrom.

a) Beschaltung des Transistors. b) Anschauliche Modellldarstellung.

Stattdessen durchlaufen sie die dünne Basisschicht und geraten in das elektrische Feld der Raumladung C-B. Durch dieses Feld werden sie vom Kollektor abgesaugt, „gesammelt“, und fließen als Kollektorstrom  $I_C$  ab. Von der Quelle  $U_B$  müssen dabei nur die durch Rekombination in der Basisschicht verschwindenden Löcher ersetzt werden. Dadurch fließt ein sehr kleiner Basisstrom  $I_B \ll I_C$ , der dem Strom von den Elektronen, die aus dem Emittor in die Basis fließen und dann in der Basis rekombinieren, proportional ist. Damit ist er auch  $I_C$  nahezu proportional, es tritt also eine Stromverstärkung auf. Diesen Vorgang, bei dem ein kleiner Basisstrom steuernd auf den großen Kollektorstrom einwirkt, nennt man *Transistoreffekt*.

### B.3.3 Transistorkennlinie und Arbeitspunkt

Genauso wie die Diodenkennlinie kann man auch den Zusammenhang zwischen Strömen und Spannungen am Transistor berechnen. Dabei gibt es nun aber vier Variablen,  $I_C$ ,  $U_{CE}$ ,  $I_B$  und  $U_{BE}$ . Deren Abhängigkeiten voneinander lassen sich in einem sogenannten Kennlinienfeld darstellen (Bild 11), das für jeden Transistortyp bekannt ist.

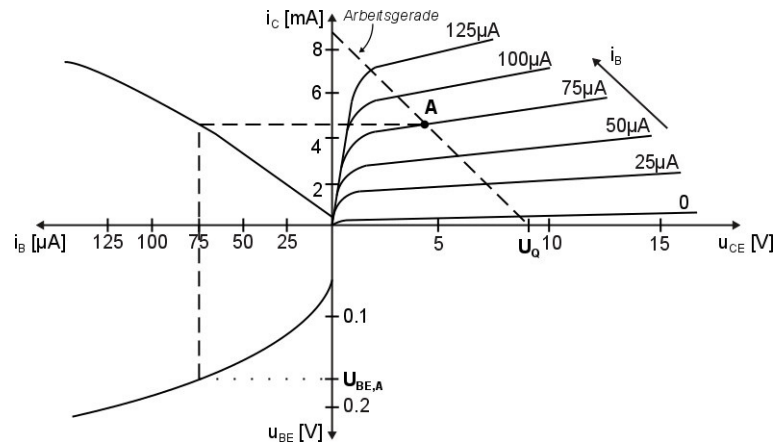


Bild 11: Typisches Kennlinienfeld eines Transistors

Im Eingangskennlinienfeld ist der Basisstrom  $I_B$  als Funktion von  $U_{BE}$  aufgetragen (3. Quadrant). Die Abhängigkeit von der Kollektor-Emitter-Spannung ist so gering, dass sie an dieser Stelle vernachlässigt wird. Der Zusammenhang zwischen Kollektor- und Basisstrom  $I_C = f(I_B)$  (Stromverstärkung  $B = \frac{I_C}{I_B}$ ) ist im 2. Quadranten des Kennlinienfeldes dargestellt. Der Kollektorstrom  $I_C$  ist im Ausgangskennlinienfeld (1. Quadrant) als Funktion der Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  mit  $i_B$  als Parameter aufgetragen.

Ein Anwendungsgebiet des Bipolartransistors ist die lineare Verstärkung von Wechselsignalen im Kleinsignalbetrieb. Eine solche Verstärkerschaltung zeigt Bild 12. Der Basis-Emitter-Kreis ist der Eingang des Verstärkers. Der Spannungsteiler bestehend aus  $R_{B1}$  und  $R_{B2}$  bestimmt über die Versorgungsspannung  $U_Q$  die Basisgleichspannung  $U_{BE}$ .

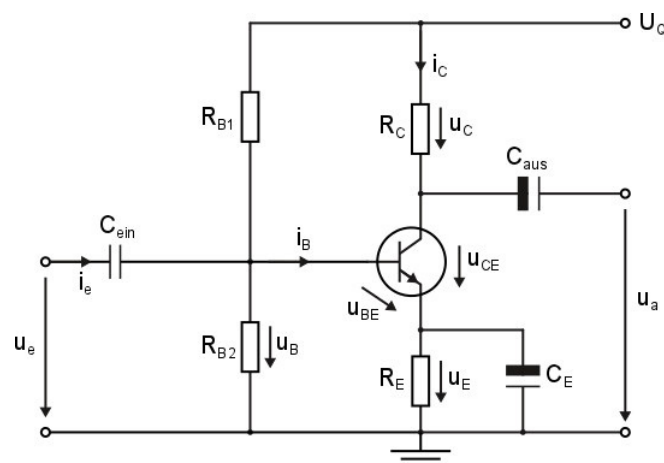


Bild 12: Typische Verstärkerschaltung mit Hilfe eines Transistors

Durch die Beschaltung von Emitter und Kollektor des Transistors mit  $R_E$  bzw.  $R_C$  ist dann mit Hilfe des Kennlinienfeldes in Bild 11 die Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$  in dieser Schaltung aus  $I_C = \frac{U_Q - U_{CE}}{R_C + R_E}$  bestimmbar. Der Zusammenhang zwischen  $I_C$  und  $U_{CE}$  wird im Ausgangskennlinienfeld durch die sogenannte Arbeitsgerade (siehe Bild 11) dargestellt.

Der Gleichspannungsarbeitspunkt A des Transistors wird durch die äußere Beschaltung so gewählt, dass kleine Wechselsignale um diesen Arbeitspunkt den Transistor möglichst nur über lineare Bereiche des Kennlinienfeldes aussteuern (Bild 13). Das verstärkte Ausgangssignal  $u_a$  steht am Kollektor zur Verfügung.

Abschließend soll noch erwähnt werden, dass man anstelle des Emitters auch die Basis oder den Kollektor auf Bezugspotential legen kann. Man erhält dann die sogenannte Basisschaltung oder Kollektorschaltung. Beide unterscheiden sich in ihren Eigenschaften deutlich von der bisher besprochenen Emitterschaltung. Auf diese Weise hat man eine hohe Flexibilität, um mit Transistoren vorgegebene Schaltungsfunktionen realisieren zu können.

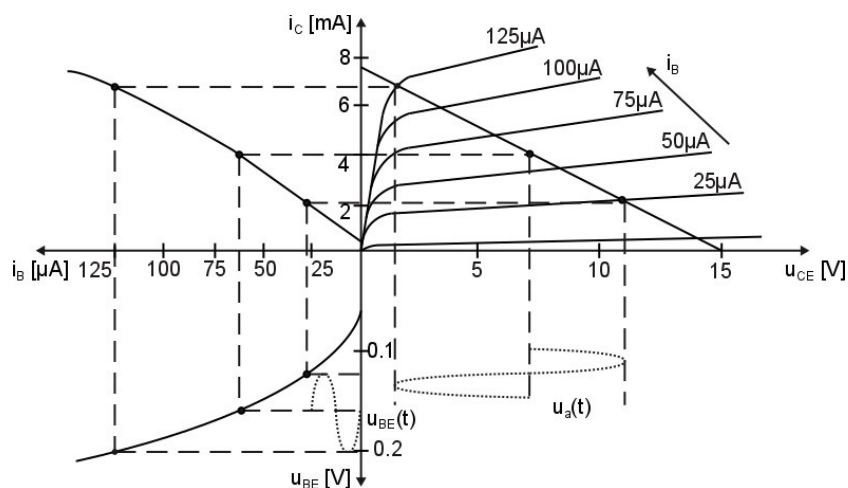


Bild 13: Kennlinienfeld eines Kleinsignaltransistors im Wechselspannungsbetrieb

## B.4 Feldeffekttransistor

Wie der Bipolartransistor, besitzt auch ein Feldeffekttransistor (FET) drei Anschlüsse, Drain D, Source S und Gate G. Je nach Aufbau unterscheidet man verschiedene FET-Typen [1], [2], [3], [4], von denen nachfolgend der MOS-FET (**M**etall-**O**xid-**S**emiconductor-FET) bzw. IGFET (**I**nsulated-**G**ate-FET) näher behandelt werden soll.

Prinzipiell ist ein n- oder p-leitender Halbleiter mit zwei sperrschichtfreien Anschlüssen versehen (Drain und Source), zwischen denen ein Strom fließen kann. Die Stromdichte in diesem Kanal wird durch ein elektrisches Feld, senkrecht zur Stromdichte, das den Querschnitt des Kanals verändert, gesteuert. Die wesentlichen Unterschiede zwischen den einzelnen FET-Typen liegen in der Dotierung der einzelnen Elektroden und deren Isolierung gegenüber dem verwendeten Substratmaterial. Da in einem FET der Stromfluss im Halbleitermaterial nur von einem Typ Ladungsträger getragen wird, also ohne Überschreitung von pn-Übergängen ist er mit dem Stromfluss in einem ohmschen Widerstand vergleichbar. Im Gegensatz zum Stromfluss in der Diode oder im Bipolartransistor wird er im FET ausschließlich von Majoritätsladungsträgern getragen, also nur einer Ladungsträgerart. Der Name Unipolar-Transistor ist daher für den FET auch gebräuchlich.

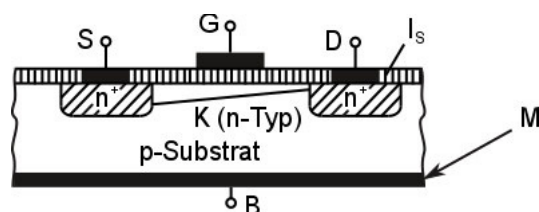


Bild 14: MOS-FET mit n-leitendem Kanal K (ohne äußere Spannung),  $I_s$ =Isolierschicht (i. Allg.  $\text{SiO}_2$ ), M = aufgedampftes Metall

Bild 14 zeigt den Querschnitt durch einen MOS-FET mit einem n-leitenden Kanal. In das p-dotierte Substrat sind zwei stark dotierte n-leitende Zonen, die Source- und die Drain-Zone eindiffundiert. Über sperrschichtfreie Metallkontakte werden diese Zonen mit den jeweiligen Anschlüssen S bzw. D verbunden. Der Gate-Anschluss G ist durch eine Oxid-Schicht  $\text{SiO}_2$  vom Substratmaterial isoliert. Die Unterseite des Substrats ist über einen sperrschichtfreien Kontakt mit dem so genannten Bulkanschluss B versehen. Dieser ist in den meisten Fällen mit S verbunden. Je nach Beschaffenheit der Grenzfläche zwischen Isolierschicht ( $\text{SiO}_2$ ) und p-Substrat kann es feste, positive Oberflächenladungen geben, die bewegliche Elektronen anziehen. Dadurch bildet sich unmittelbar unterhalb der Grenzschicht ein dünner n-leitender Kanal, der auch Inversionsschicht genannt wird. Nach Anlegen einer Spannung  $U_{DS}$  zwischen Drain und Source, kann über diesen n-leitenden Kanal ein Strom fließen. Man spricht auch von einem selbstleitenden MOS-FET.

Beim selbstsperrenden MOS-FET gibt es keinen leitenden n-Kanal unterhalb der Grenzschicht. Erst durch Anlegen einer gewissen positiven Spannung  $U_{GS} = U_{th} > 0$  zwischen Gate und Source werden unterhalb der Grenzschicht Elektronen influenziert, so dass bei Anlegen von  $U_{DS} > 0$  ein Strom fließen kann.

Wird der MOS-FET nun so wie in Bild 15 mit den Spannungen  $U_{DS}$  und  $U_{GS}$  beschaltet, fließt beim selbstsperrenden MOS-FET für  $U_{GS}=0$  noch kein Drainstrom  $I_D$ . Erst für

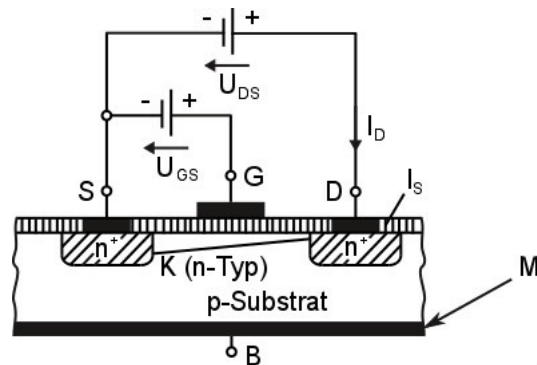


Bild 15: MOS-FET mit n-leitendem Kanal K (mit äußerer Spannung),  $I_S$ =Isolierschicht (i. Allg.  $\text{SiO}_2$ ), M = aufgedampftes Metall

$U_{GS} = U_{th} > 0$  gibt es unter der Sperrschicht einen leitenden Kanal K und der Drainstrom  $I_D$  steigt mit steigendem  $U_{GS}$  weiter an (Bild 16). Die Stromsteuerung erfolgt beim MOS-FET über eine Oxidschicht und geschieht daher nahezu leistungslos, da der Widerstand zwischen Gate und Source sehr groß ( $10^{14}\Omega$ ) ist.

Das Verhalten eines MOS-FET lässt sich, ähnlich wie beim Bipolar-Transistor, anhand der Kennlinien aufzeigen. Sie zeigen den Zusammenhang zwischen Strömen und Spannungen am Bauelement für den Fall, dass sie sich sehr langsam (statisch) ändern.

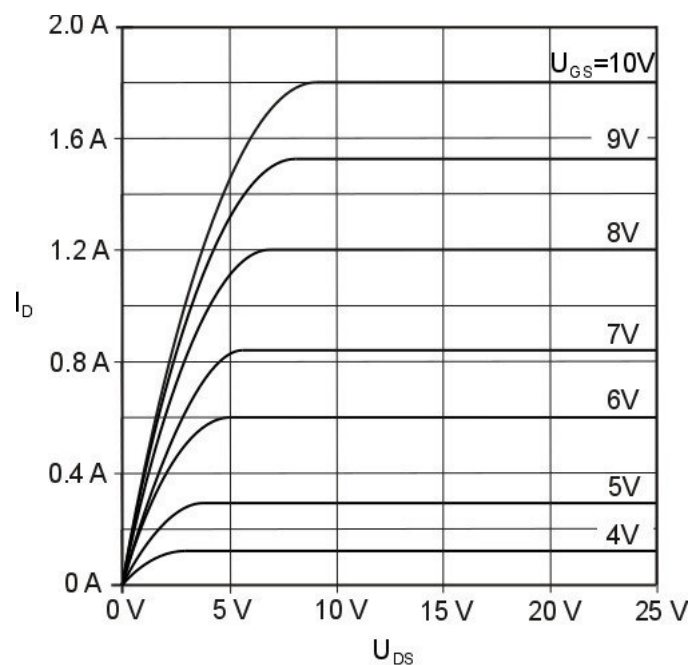


Bild 16: Typisches Ausgangskennlinienfeld eines selbstsperrenden MOS-FET mit  $U_{GS}$  als Parameter

## C Durchführung

### Versuch 1: Einweggleichrichter

#### Versuchsaufbau

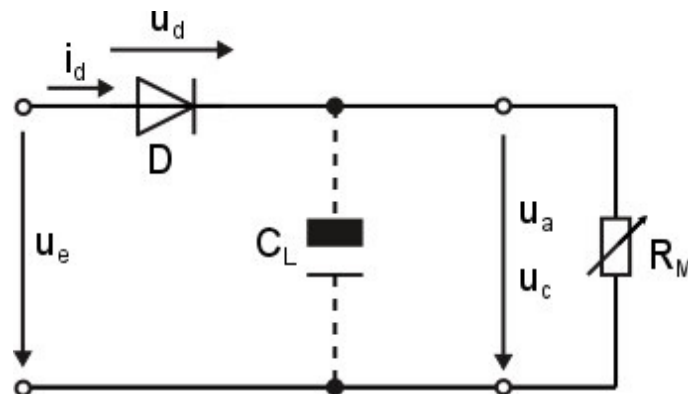


Bild 17: Einweggleichrichter

Bild 17 zeigt die Schaltung für diesen Versuchsteil. Benutzt man zur Erläuterung dieses Versuchs die idealisierte Diodenkennlinie aus Bild 18, lässt sich der Stromfluss durch die Diode  $D$  wie in Bild 19 gezeigt herleiten.

Während des größten Teils der positiven Halbwelle von  $u_e$  ist die Diode in Durchlassrichtung geschaltet (siehe auch Bild 7).

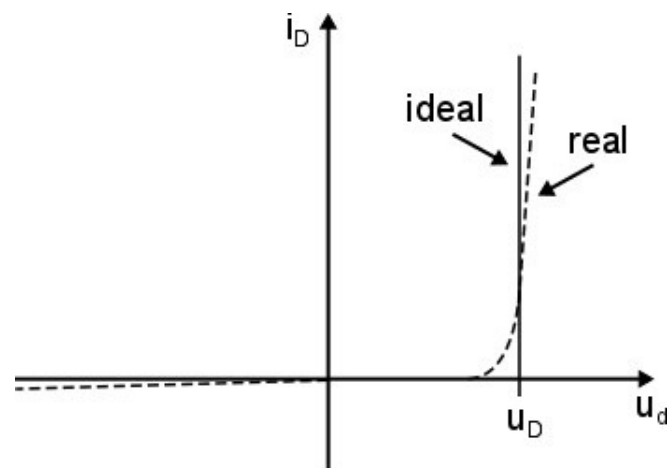


Bild 18: Kennlinie einer Diode (real und idealisiert)



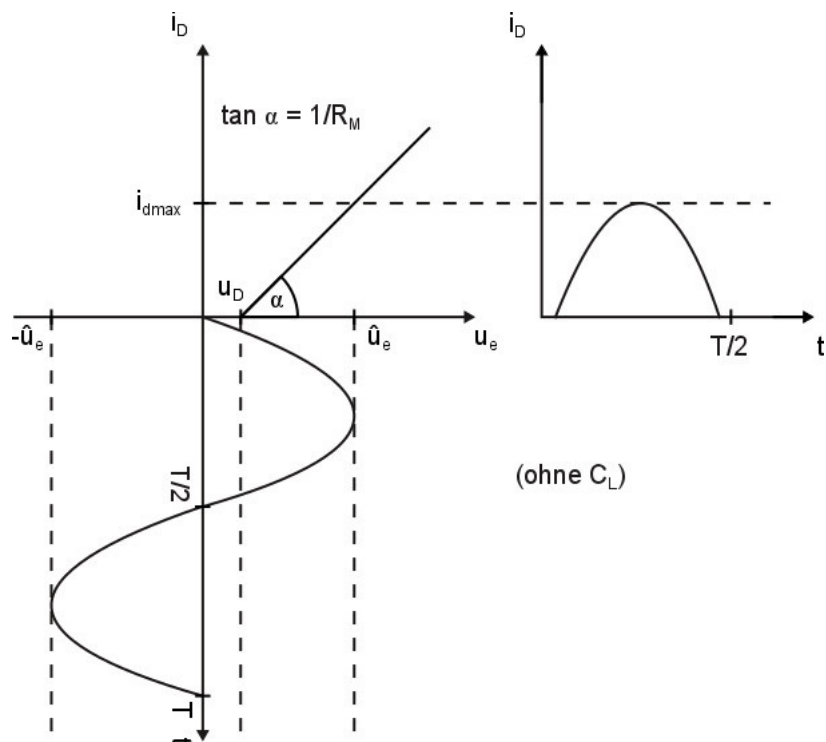


Bild 19: Abhängigkeit des Diodenstroms  $i_D$  von der Eingangsspannung  $u_e$  beim Einweggleichrichter

Der maximale Diodenstrom ergibt sich zu  $i_{d \max} = (\hat{u}_e - U_D)/R_M$ .  $U_D$  ist die Diffusionsspannung. Die negative Halbwellen von  $u_e$  sperrt die Diode. In Sperrrichtung (ohne  $C_L$ ) hat der maximale Spannungsabfall an der Diode den Betrag  $\hat{u}_e$ , in Durchlassrichtung nur den Betrag von  $U_D$ .

Die Kennlinie der Diode kann auf dem Oszilloskop abgebildet werden, wenn  $u_d$  zur X-Ablenkung und  $u_a (u_a = R_M \cdot i_d)$  zur Y-Ablenkung des Elektronenstrahls benutzt wird. Der Elektrolyt-Kondensator  $C_L$  (siehe Bild 17) bleibt hierbei unbenutzt.

Durch die Parallelschaltung des Kondensators  $C_L$  zum Lastwiderstand  $R_M$  entsteht aus der bisher benutzten Schaltung ein Einweggleichrichter. Er hat die Aufgabe, eine Wechselspannung in eine nahezu konstante Gleichspannung (Bild 20) umzuwandeln [3]. Der Kondensator dient zur Glättung der Ausgangsspannung. Die Welligkeit von  $u_a$  wird Brummspannung genannt (Bild 20).

Die Brummspannung  $u_{BR}$  ist von der Kapazität  $C_L$  des Ladekondensators, vom Wert des Widerstandes  $R_M$  und von der Frequenz der Wechselspannung  $u_e(t)$  (hier: 50 Hz) abhängig. Die Abhängigkeit von  $R_M$  ist deshalb besonders wichtig, weil dieser Widerstand als Ersatzwiderstand für eine dem Einweggleichrichter folgende Schaltung gelten kann. Die Brummspannung ist also lastabhängig.

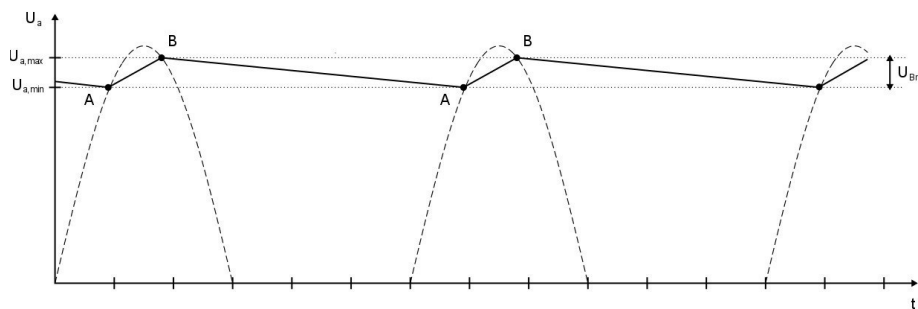


Bild 20: Typischer Verlauf der Brummspannung

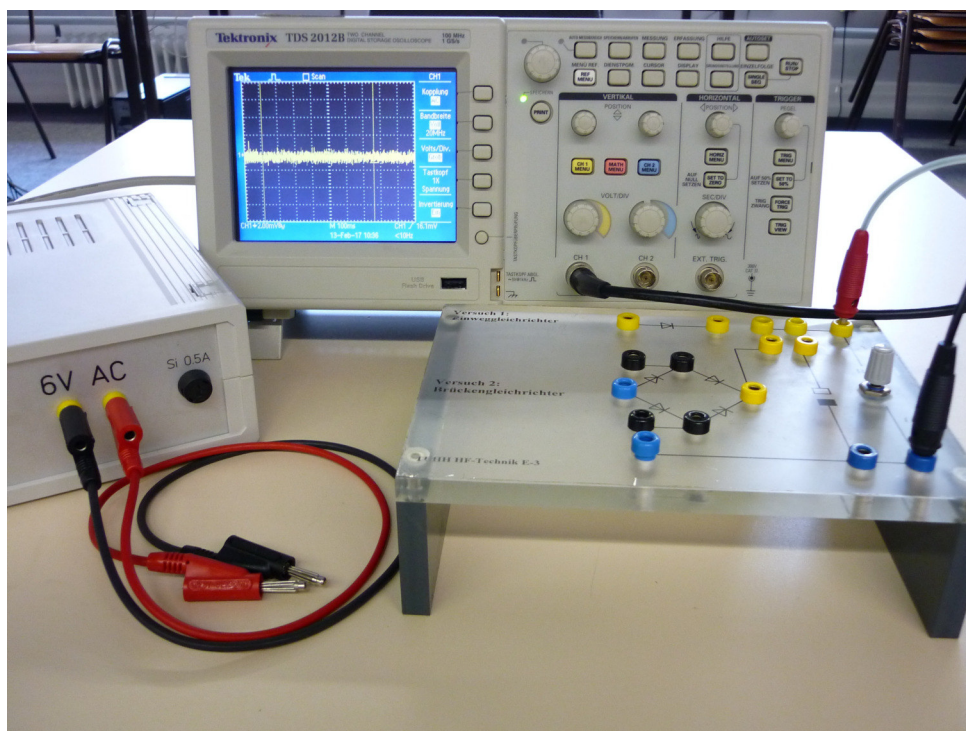


Bild 21: Versuchsaufbau für Versuch 1 und 2

### Messaufgaben

1.  $R_M$  ist auf  $1\text{ k}\Omega$  abzugleichen. In der Schaltung des Einweggleichrichters sind die Spannungsverläufe  $u_e(t)$ ,  $u_d(t)$  und  $u_a(t)$  zu oszillographieren und phasenrichtig untereinander zu skizzieren.  $C_L$  soll dabei zunächst nicht angeschlossen sein (Diagramm 1).
2. Oszillographieren und skizzieren Sie  $u_a(t)$  und  $u_d(t)$  mit angeschlossenem  $C_L$  (Diagramm 2).
3. Die Spannungsverläufe aus 2. und 3. sind zu interpretieren.
4. Verändern Sie  $R_M$  und erläutern Sie den Einfluss auf die Brummspannung  $U_{Br}$ .
5.  $R_M$  ist wieder auf  $1\text{ k}\Omega$  abzugleichen. Die Kennlinie der Diode für den Einweggleichrichter ist zu oszillographieren und zu skizzieren (Diagramm 3).

## Messprotokoll zu Versuch 1

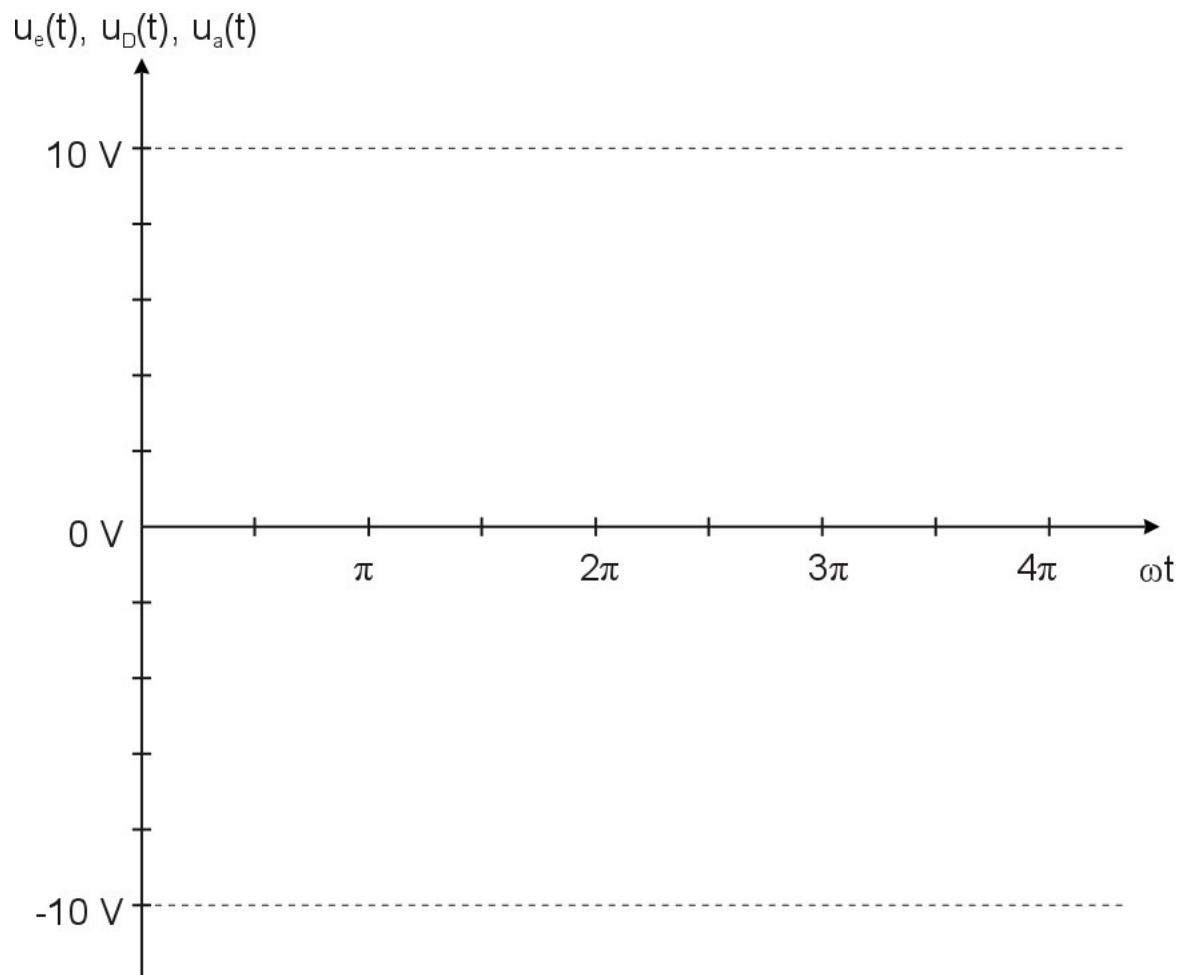
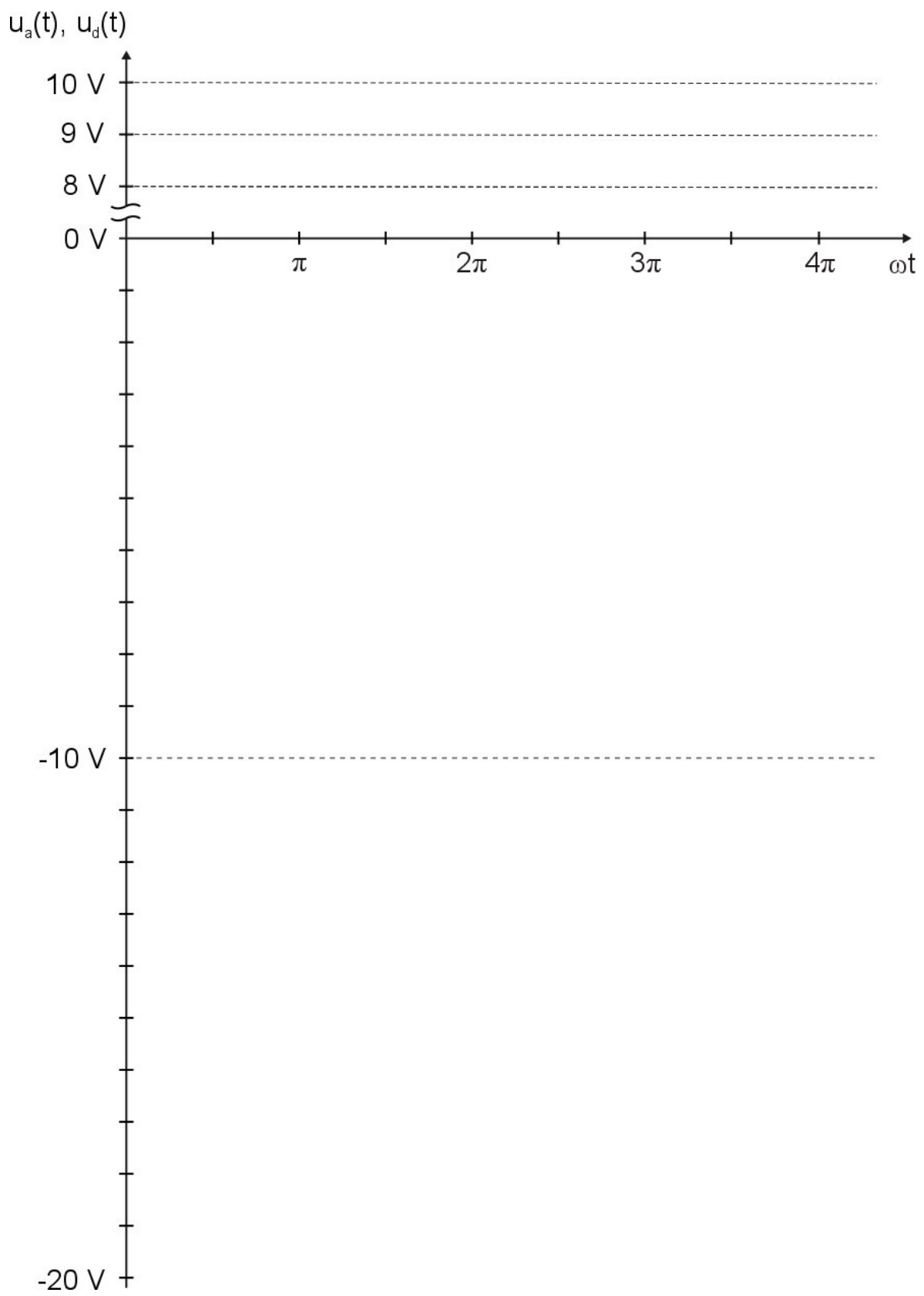


Diagramm 1: Spannungsverläufe zu Messaufgabe 1

Diagramm 2: Spannungen  $u_a(t)$  und  $u_d(t)$  aus Messaufgabe 2

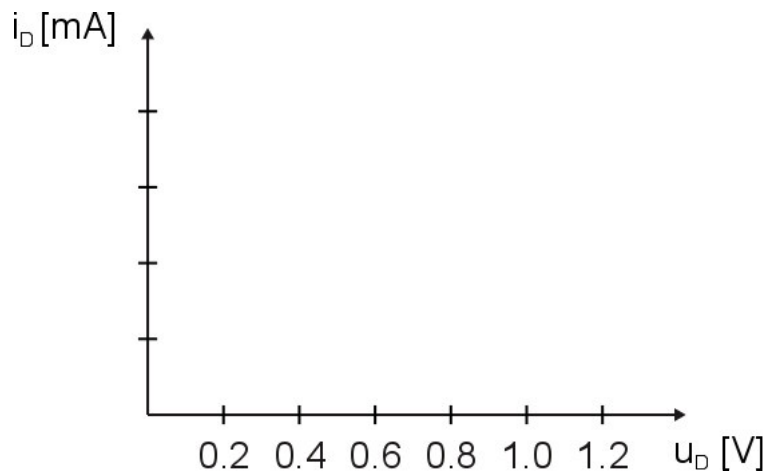


Diagramm 3: Diodenkennlinie

## Versuch 2: Brückengleichrichter

### Versuchsaufbau

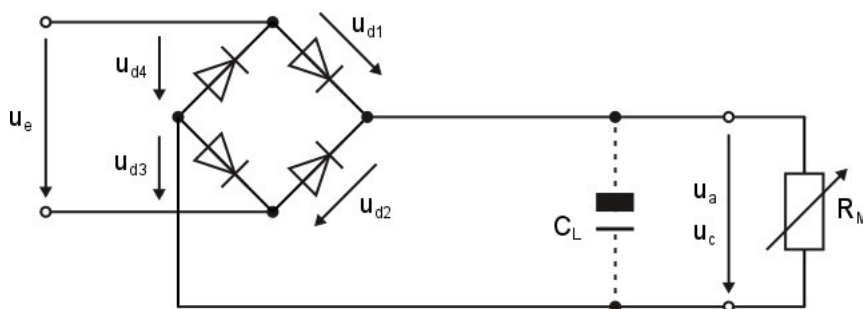


Bild 22: Schaltbild des Brückengleichrichters

Der Brückengleichrichter (Bild 22) nutzt im Gegensatz zum Einweggleichrichter jede Halbwelle von  $u_e$  zum Nachladen des Ladekondensators  $C_L$ . Während des größten Teils der positiven Halbwelle von  $u_e$  sind die Dioden D1 und D3 leitend, während des größten Teils der negativen Halbwelle die Dioden D2 und D4. Bei leerlaufendem Ausgang ist die maximale Ausgangsspannung

$$u_{a \max}(R_M \rightarrow \infty) = u_{c \max}(R_M \rightarrow \infty) = \hat{u}_e - 2U_D. \quad (2)$$

Bei Belastung des Ausgangs liefert eine Näherungsrechnung [3]:

$$u_{a \max}(R_i/R_M) = u_{c \max}(R_i/R_M) = u_{a \max}(C_L \rightarrow \infty) \left(1 - \sqrt{\frac{R_i}{2 \cdot R_M}}\right). \quad (3)$$

Darin ist  $R_i$  der Innenwiderstand des Transformators oder des Netzteils von dem die Eingangsspannung  $u_e$  erzeugt wird. Die maximale Sperrspannung ist für jede Diode mit

$$u_{s \max}(C_L \rightarrow \infty) = \hat{u}_e - U_D \quad (4)$$

nur etwa halb so groß wie beim Einweggleichrichter. Für die Brummspannung gilt näherungsweise [3]

$$u_{BR} = \frac{I_a}{2C_L f_N}, \quad (5)$$

mit  $f_N$  der Netzfrequenz.

### Messaufgaben

1.  $R_M$  ist wieder auf  $1 \text{ k}\Omega$  abzugleichen. Oszillographieren Sie die Spannungsverläufe  $u_e(t)$  und  $u_{d1}(t)$  und  $u_{d2}(t)$  ohne angeschlossenem  $C_L$  und skizzieren Sie diese phasenrichtig untereinander (Diagramm 1).
2. Oszillographieren und skizzieren Sie  $u_a(t)$  ohne angeschlossenem  $C_L$  und mit angeschlossenem  $C_L$  (Diagramm 2).
3. Erklären Sie die Wirkungsweise des Brückengleichrichters anhand der Diagramme aus Messaufgabe 1 und 2.

### Messprotokoll zu Versuch 2

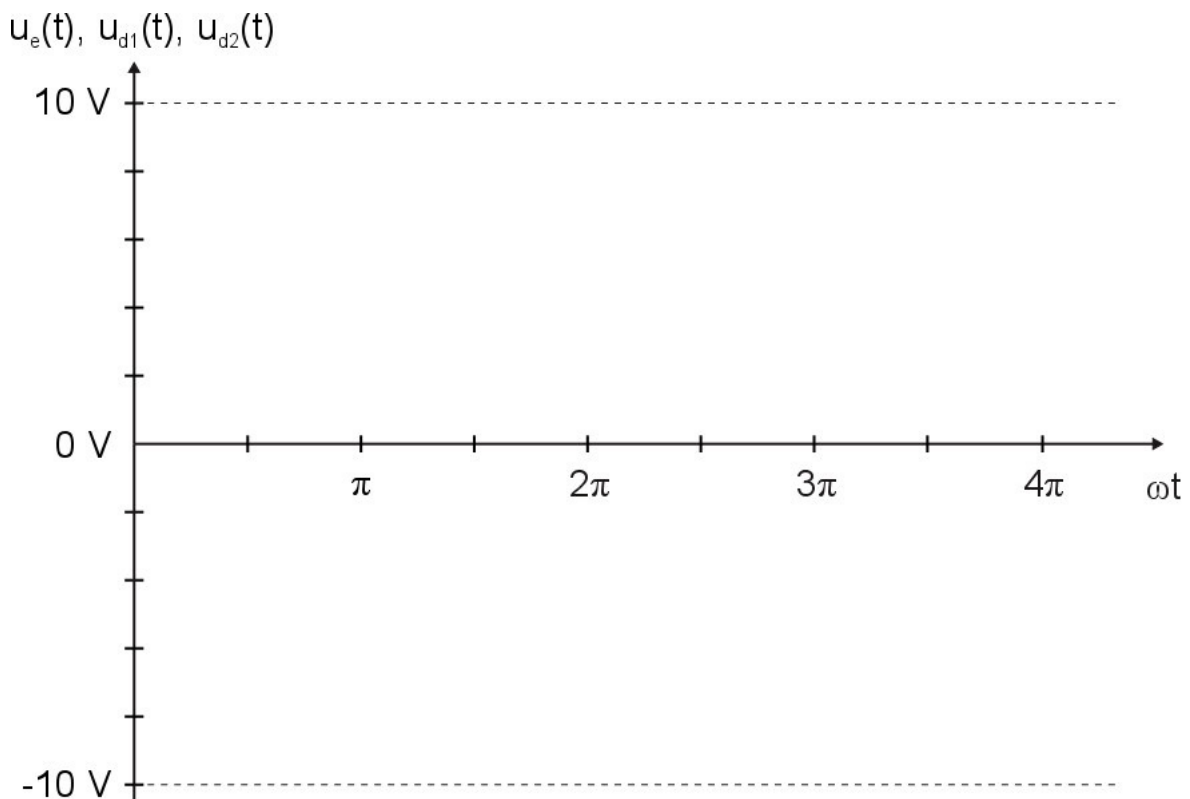


Diagramm 1: Spannungsverläufe zu Messaufgabe 1

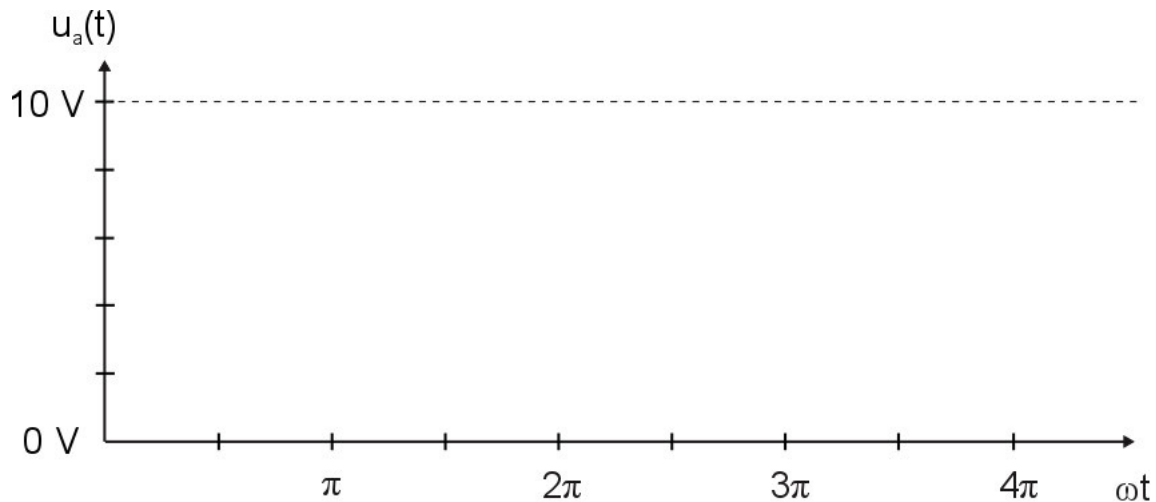


Diagramm 2: Spannungsverläufe zu Messaufgabe 2

### Versuch 3: Transistor-Verstärker

#### Versuchsaufbau

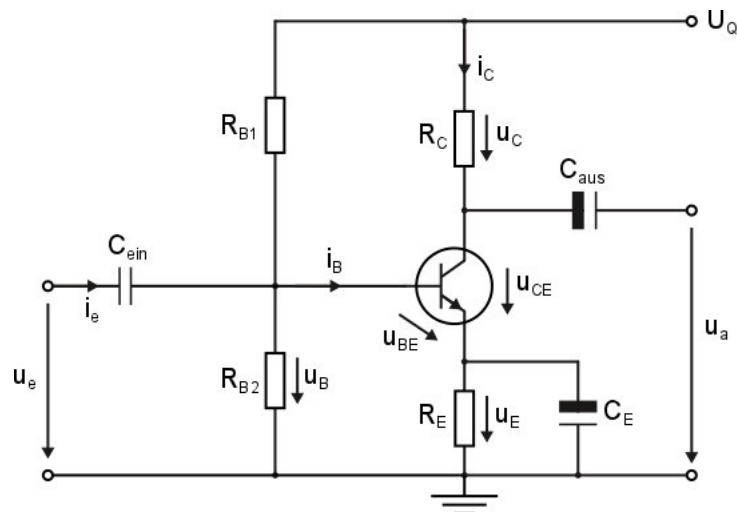


Bild 23: Transistorverstärker für den Kleinsignalbetrieb:

$$R_{B1} = 100 \text{ k}\Omega; R_{B2} = 27 \text{ k}\Omega; R_C = 3,9 \text{ k}\Omega; R_E = 1 \text{ k}\Omega; C_E = 33 \text{ }\mu\text{F}; \\ C_{aus} = 33 \text{ }\mu\text{F}; C_{ein} = 100 \text{ nF}; U_Q = 15 \text{ V}.$$

Das Hauptanwendungsgebiet des Transistors ist die Kleinsignalverstärkung in der Nachrichtentechnik. Unter „kleinen“ Signalen versteht man Signale, die den Transistor nur in näherungsweise linearen Bereichen seines Kennlinienfeldes aussteuern. Eine solche Verstärkerstufe zeigt Bild 23. Wenn die Emitter-Basis-Diode des Transistors mit einem kräftigeren Signal  $u_{BE}(t)$  über einen nichtlinearen Bereich angesteuert wird, ist das Ausgangssignal  $u_{CE}(t)$  verzerrt (Bild 24). Eine spektrale Zerlegung des Ausgangssignals würde zeigen, dass es aus Schwingungen mit verschiedenen Frequenzen zusammengesetzt ist. Der störende Anteil an Schwingungen jenseits der Frequenz des Eingangssignals wird i.A. durch die Angabe des „Klirrfaktors“ gekennzeichnet.

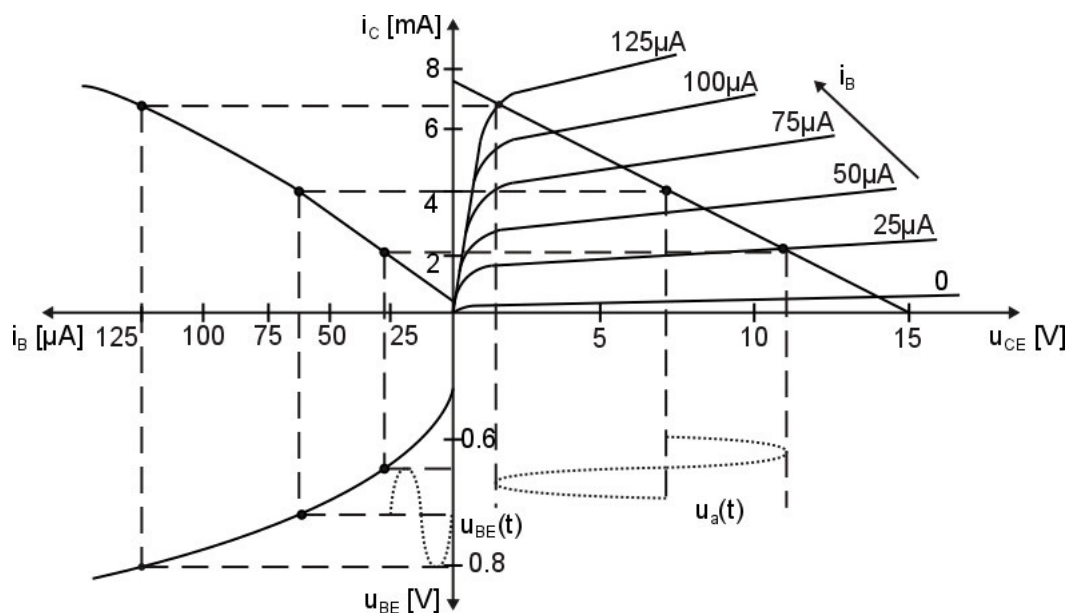


Bild 24: Kennlinienfeld eines Kleinsignaltransistors

Bild 23 zeigt einen Transistor in Emitterschaltung als Kleinsignal-Verstärker. Der Spannungsteiler aus den Widerständen  $R_{B1}$  und  $R_{B2}$  dient zur Einstellung der Basisspannung im Arbeitspunkt. Durch den Widerstand  $R_E$  wird der gewählte Arbeitspunkt gegen Temperaturänderungen stabilisiert. Für den Emitterstrom durch die Emitter-Basis-Diode gilt in Durchlassrichtung gemäß Gleichung (1)

$$i_E \sim \exp \left[ \frac{u_{BE}}{U_T} \right]. \quad (6)$$

Damit ist  $i_E$  wegen  $U_T \sim T$  temperaturabhängig. Weil  $i_B$  und  $i_C$  mit  $i_E$  verknüpft sind, hat eine Temperaturänderung auch Einfluss auf den Kollektorstrom  $i_C$ . Der Arbeitspunkt der Schaltung würde sich deshalb ohne Gegenmaßnahmen bei einer Temperaturänderung verschieben. Durch den Widerstand  $R_E$  wird nun erreicht, dass der Emitterstrom wegen

$$i_E = \frac{u_E}{R_E} = \frac{u_B - u_{BE}}{R_E} \approx \frac{u_B}{R_E} \quad (\text{mit } u_B \gg u_{BE}) \quad (7)$$

praktisch durch  $R_E$  bestimmt wird und nicht mehr durch  $u_{BE}$ . Für die Wechsignale wird  $R_E$  durch den Kondensator  $C_E$  überbrückt.

Die Kondensatoren  $C_{ein}$  und  $C_{aus}$  verhindern, dass sich die Gleichspannungen in dieser Transistorstufe auf die vorangehende oder nachfolgende Schaltung auswirken.

Das Bild 24 zeigt das vollständige Kennlinienfeld des in diesem Versuch benutzten Transistors. Die Aussteuerung des Transistors durch die Basis-Emitter-Spannung  $u_{BE}$  bzw. durch den Basisstrom  $i_B$  ist eingezeichnet.



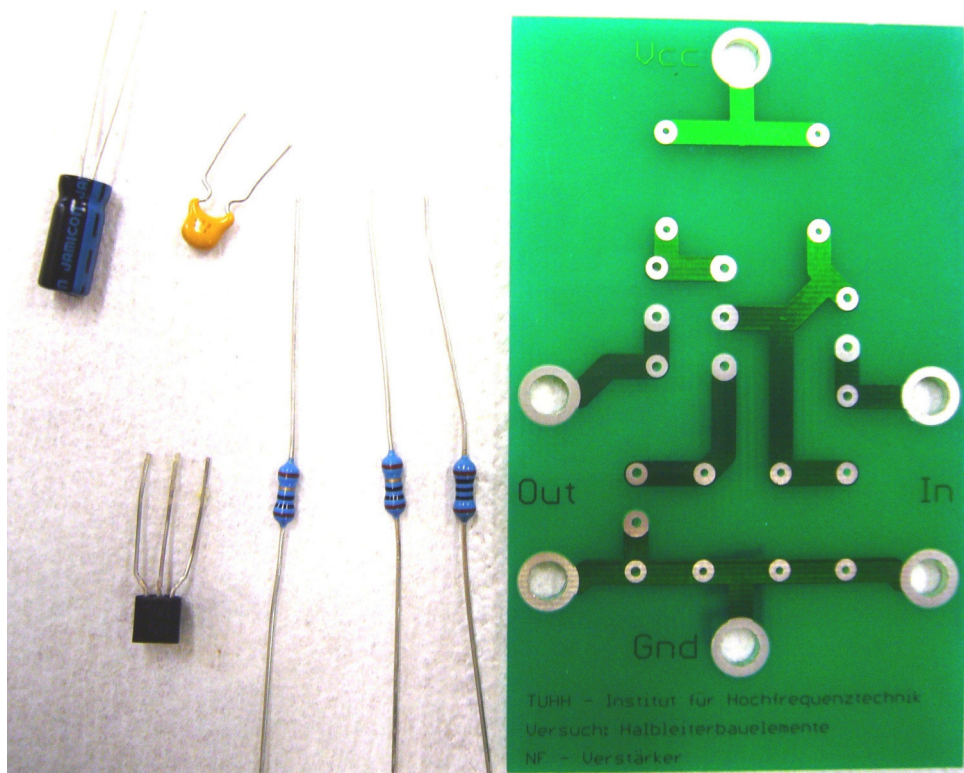


Bild 25: Bausatz für Verstärkerschaltung

### Aufgaben

1. Stellen Sie aus der vorgefertigten Platine und den entsprechenden Bauteilen (Bild 25) die in Bild 23 dargestellte Verstärkerstufe mit den angegebenen Bauteilen her. Legen Sie die Versorgungsspannung  $U_Q = 15V$  an, und schalten Sie aus dem Funktionsgenerator ein Eingangssignal  $u_e(t) = \hat{u}_e \sin(2\pi ft)$  mit  $\hat{u}_e = 10 \text{ mV}$  und  $f = 10 \text{ kHz}$  an den Eingang der Verstärkerstufe. Oszillographieren Sie  $u_e(t)$  und  $u_a(t)$  und bestimmen Sie die Spannungsverstärkung

$$V_u = \frac{\hat{u}_a}{\hat{u}_e} = \quad . \quad (8)$$

2. Vergrößern Sie  $\hat{u}_e$ . Erläutern Sie mit Hilfe von Bild 24 die Veränderung der Kurvenform von  $u_a(t)$ .

## Versuch 4: MOS-FET als Schalter

### Versuchsaufbau

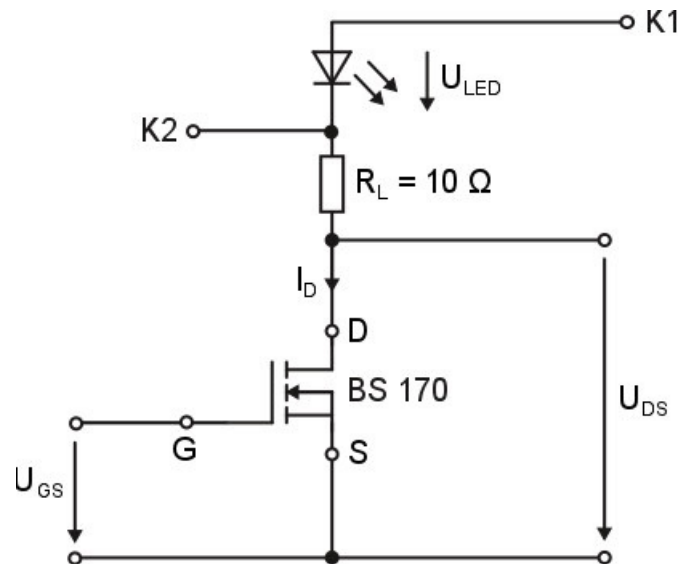


Bild 26: MOS-FET als Schalter

Bild 26 zeigt eine Schaltung in der ein MOS-FET zum Ein- und Ausschalten einer LED genutzt werden kann.

### Aufgaben

1. Geben Sie die Versorgungsspannung  $U_0 = 5\text{ V}$  an den Anschluss K1 der Schaltung. Schalten Sie dann ein Rechtecksignal  $U_{GS} = 3\text{ V}$  und  $f = 5\text{ Hz}$  vom Funktionsgenerator an die gegebene Schaltung. Oszillographieren und skizzieren Sie  $u_{GS}(t)$  und  $u_{DS}(t)$  (Diagramm 1).
2. Es soll das Ausgangskennlinienfeld des MOS-FET in Bild 26 vermessen werden. Dafür ist eine Versorgungsspannung  $U_0$  an den Anschluss K2 der Schaltung zu legen. Skizzieren Sie die Ausgangskennlinie  $I_D = f(U_{DS})$  für  $U_{GS} = 4\text{ V}$  (Tabelle 1 und Diagramm 2). Um den MOS-FET thermisch nicht zu überlasten, müssen die Messungen im Pulsbetrieb durchgeführt werden. Dazu wird an das Gate des FET ein positives Rechtecksignal  $u_{GS}(t)$  ( $f = 5\text{ Hz}$ ; Symmetrie = 10 %) aus dem Funktionsgenerator geschaltet und mit dem Oszilloskop  $u_{DS}(t)$  für den entsprechenden Wert von  $U_{GS}$  aufgenommen.
3. Wiederholen Sie die Messung für  $U_{GS} = 5\text{ V}$

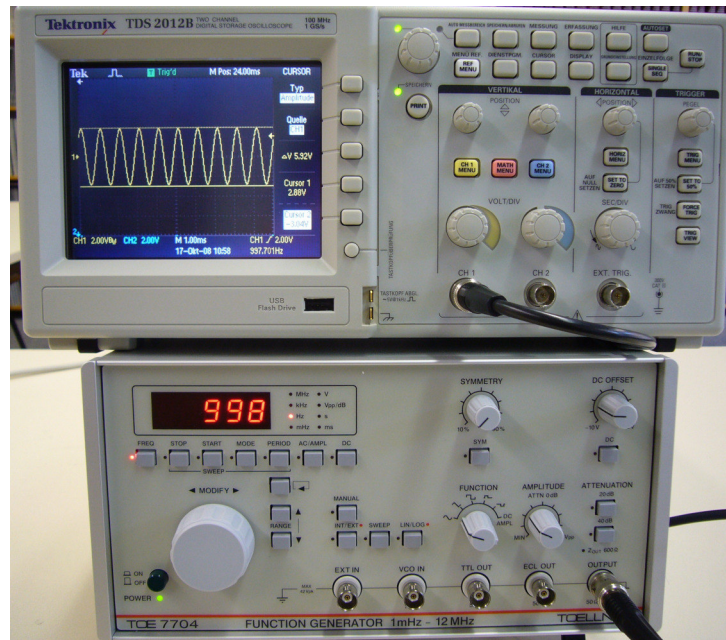


Bild 27: Oszilloskop und Funktionsgenerator für Versuch 4

## Messprotokoll zu Versuch 4

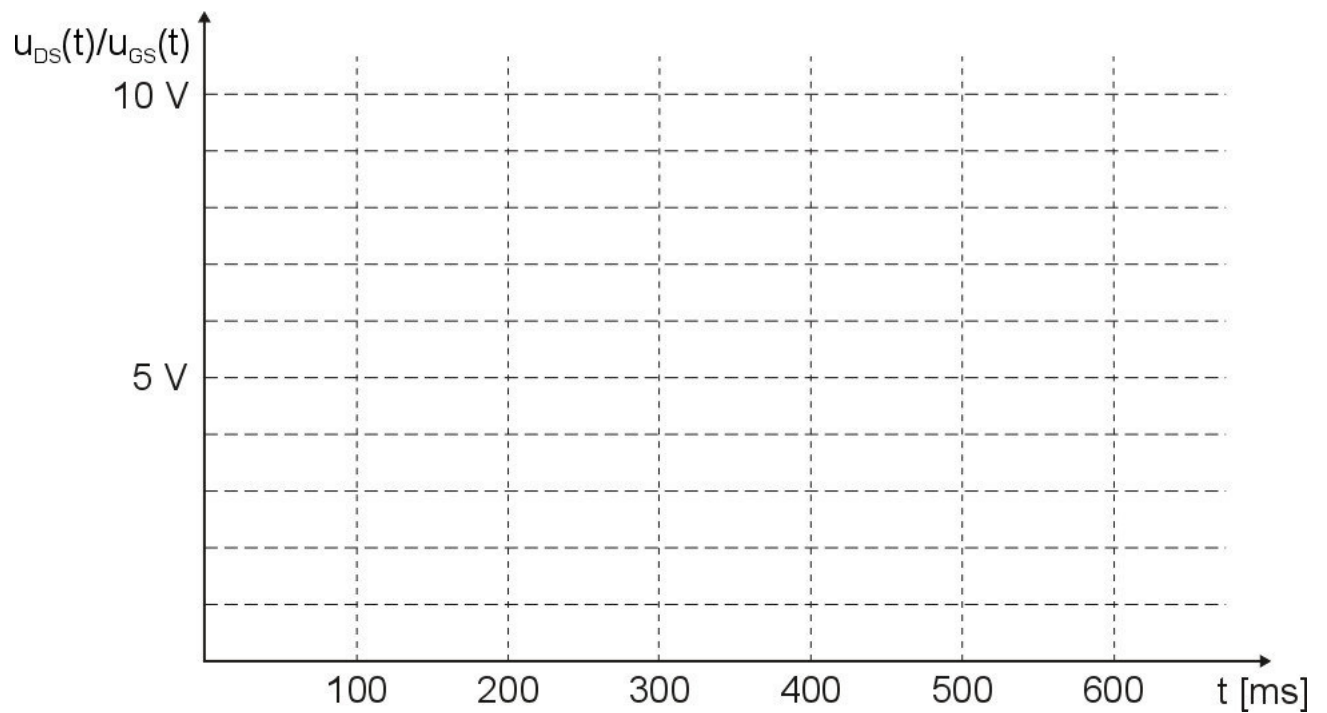


Diagramm 1: Spannungsverläufe zu Messaufgabe 1

$U_{DS}$ [V]	0.25	0.50	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0
$U_{GS} = 4V : I_D$ [mA]										
$U_{GS} = 5V : I_D$ [mA]										

Tabelle 1: Messergebnisse zu Aufgabe 2

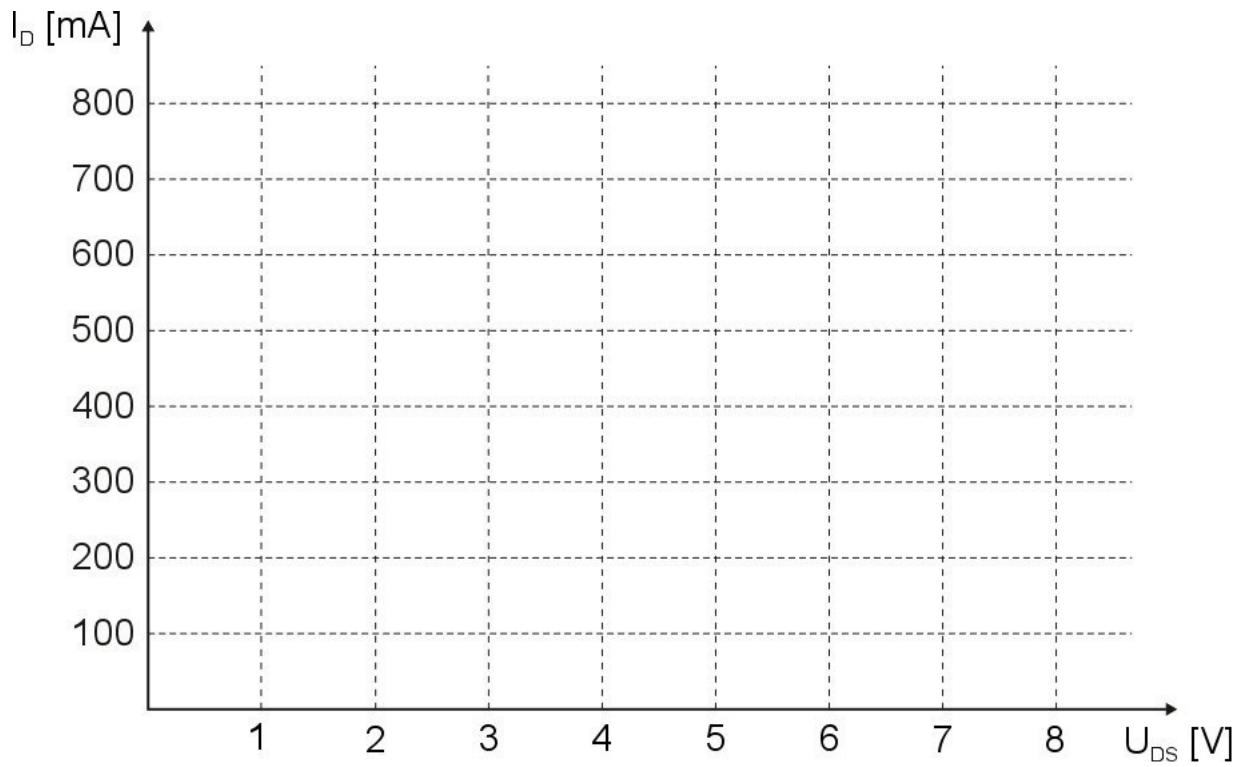


Diagramm 2: Ausgangskennlinien des untersuchten MOS-FET

## D Fragen zur Theorie und Durchführung des Versuchs

1. Warum ist  $n = p$  bei Eigenleitung? Zeigen Sie, dass bei Dotierung eines Halbleiters die Majoritätsladungsträgerdichte quadratisch gegenüber der Minoritätsladungsträgerdichte anwächst.
2. Erläutern Sie die Leitfähigkeitssteigerung von Halbleitern durch Dotierung.
3. Erläutern Sie den Gleichgewichtsprozess, der die Ausdehnung der Sperrschicht eines pn-Übergangs ohne äußere Spannung bestimmt.
4. Wie verändert sich die Grenzschicht im pn-Übergang beim Anlegen einer äußeren Spannung (sowohl in Sperr- als auch in Durchlassrichtung). Welche Bedeutung hat dabei die Diffusionsspannung  $U_D$ ?
5. Erklären Sie die stark unsymmetrischen Raumladungszonen im Transistor mit leerlaufender Basis.
6. Erläutern Sie das Kennlinienfeld eines Bipolartransistors (Bild 11)
7. Wie kann in einer Schaltung gemäß Bild 17 der Strom  $i_D(t)$  indirekt mit Hilfe einer Spannungsmessung bestimmt werden?
8. Wie kann die Kennlinie einer Diode mit einem Oszilloskop gemessen werden? Worauf ist dabei unbedingt zu achten?
9. Erläutern Sie anschaulich die Brummspannung am Ausgang eines belasteten Einweggleichrichters. Gehen Sie hierbei auf die Punkte A und B im Bild 20 ein.
10. Diskutieren Sie die Brummspannung beim Einweg- und Brückengleichrichter. Erwarteten Sie, bei gleicher Belastung der jeweiligen Schaltung, Unterschiede bei  $U_{BR}$ ? Erläutern Sie.
11. Skizzieren Sie die erwarteten Spannungsverläufe  $u_{d1}(t)$  und  $u_{d2}(t)$  ohne angeschlossenenem  $C_L$  in Bezug auf  $u_e(t)$ .
12. Erläutern Sie die Bedeutung des Arbeitspunktes A im Kennlinienfeld eines Transistors (Bild 24). Wodurch wird seine Lage im Kennlinienfeld bestimmt?
13. Erläutern Sie, wodurch die Arbeitsgerade im Ausgangskennlinienfeld eines Transistors bestimmt ist. Bestimmen Sie in allgemeiner Form die Schnittpunkte mit den Achsen.
14. Wie kann in der Schaltung in Bild 26 bei bekanntem  $U_{GS}$  die Spannung  $U_{DS}$  variiert werden?
15. Erläutern Sie, wie man in Versuch 4 aus den gemessenen Verlauf von  $u_{DS}(t)$  bei bekanntem Wert von R in Bild 26 den Verlauf von  $I_D = f(U_{DS})$  bestimmen kann. Skizzieren Sie dazu einen möglichen Verlauf von  $u_{DS}(t)$  bei gegebenem  $U_0$ .

## Literatur

- [1] C. Schuster: „Elektrotechnik II“, Skript zur Vorlesung an der TU Hamburg-Harburg.
- [2] R. Pregla: „Grundlagen der Elektrotechnik“, Hüthig GmbH Heidelberg, 1988.
- [3] U. Tietze, Ch. Schenk: „Halbleiter-Schaltungstechnik“, Springer-Verlag, 1999.
- [4] Möller, Frohne, Löcherer: „Grundlagen der Elektrotechnik“, B.G. Teubner, Stuttgart, 1996.