



University of Applied Sciences

HOCHSCHULE  
EMDEN • LEER

Praktikum Hardware-Grundlagen

Transistor als Schalter

Gruppe:

Teilnehmer:

Vortestate:

Testat:

BE-Diode:

Transistorkennlinien:

Relais - ohne Schutz:

Relais mit  
Freilaufdiode:

Relais – Diode +...

Benutzte Geräte:

# Transistoren als Schalter

## 1. Überblick

Die Halbleitertechnik bildet die Grundlage für die aus dem heutigen Leben nicht mehr wegzudenkenden diskreten Halbleiterbauelemente und integrierten Schaltungen. Wer schon mal einen PC aufgeschraubt hat, konnte dort sehen, dass das Innenleben aus vielen elektrotechnischen Bauelementen und integrierten Schaltungen (ICs) besteht. Letztlich ist dies auch die Basis von allen im alltäglichen Leben wie selbstverständlich verwendeten Geräten – wie z.B. Mobiltelefone, Kaffeemaschinen, Waschmaschinen, Chipkarten, elektronische Autoschlüssel.

In dieser Versuchsanleitung sollen folgende Themen anschaulich erklärt werden:

- Halbleitereigenschaften und Halbleiterdotierung
- Halbleiterdioden (PN-Übergänge)
- Bipolartransistoren (NPN- und PNP-Transistoren)
- Spulen (Relais) und Kondensatoren
- MetalOxidSemiconductor-Transistoren (die Funktion von MOS-Transistoren wird hier nur ganz kurz angerissen)

## 2. Halbleitereigenschaften und Halbleiterdotierung

Gegenüber Leitern (z.B. Kupfer) haben Halbleiter in der reinen kristallinen Form zunächst einmal die Eigenschaft, dass Sie eine sehr geringe Leitfähigkeit<sup>1</sup> aufweisen. Die Leitfähigkeit eines Halbleiters ist wesentlich geringer als die Leitfähigkeit von Leitern und wesentlich besser als die Leitfähigkeit von Nichtleitern – sie liegen eben genau dazwischen. Das gebräuchlichste Halbleitermaterial ist Silizium. Ein weiteres – aber nicht so verbreitetes – Halbleitermaterial ist Germanium.

In der Festkörperphysik werden die Unterschiede zwischen Leitern, Halbleitern und Nichtleitern durch das sogenannte Bändermodell erklärt. Eine genaue Betrachtung würde hier zu weit gehen. In Leitern stehen ausreichend freie Ladungsträger zur Verfügung, damit beim Anlegen einer Spannung ein Strom fließen kann – unabhängig von der Temperatur. In Halbleitern stehen diese freien Ladungsträger nur zur Verfügung wenn durch Wärme oder Licht Ladungsträger aus der Kristallstruktur gelöst werden. Dadurch bedingt sind reine Halbleiter bei Temperaturen in der Nähe des physikalischen Nullpunkts (0 Kelvin) nicht leitfähig. Hierdurch ergibt sich auch, dass die elektrischen Eigenschaften von Halbleitern stark temperaturabhängig sind.

Das chemische Element Silizium besitzt 4 Elektronen auf der Außenschale. Wird eines dieser Elektronen – z.B. durch Wärme – aus dieser Struktur gelöst, so trägt es zu einer Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit bei. Elektronen sind negativ geladene elektrische Teilchen.

In der Praxis wird die Leitfähigkeit von reinen Halbleitern dadurch erhöht, dass Fremdatome mit 3 (z.B. Bor) oder 5 Elektronen (z.B. Phosphor) auf der Außenschale dem Silizium beigemischt werden – man spricht von Dotierung. Beim Beimengen von Atomen mit 3 Außenelektronen spricht man von einer positiven Dotierung (P-Dotierung) und beim Beimengen von Atomen mit 5 Außenelektronen spricht man von einer negativen Dotierung (N-Dotierung).

Bei der N-Dotierung in der Kristallstruktur können sich Elektronen von diesen Fremdatomen (mit 5 Elektronen auf der Außenschale) leichter lösen und damit die Leitfähigkeit erhöhen.

Bei der P-Dotierung in der Kristallstruktur fehlt prinzipiell ein Elektron in der Kristallstruktur von Fremdatomen. Elektronen von benachbarten Silizium-Atomen können sich sehr leicht in diese Fehlstellen bewegen. Damit wandert die Fehlstelle – auch als Loch bezeichnet – eines solchen Atoms durch das

---

<sup>1</sup> Die elektrische Leitfähigkeit bezeichnet den Kehrwert des elektrischen Widerstands.

Kristallgitter und trägt damit zur Erhöhung der elektrischen Leitfähigkeit bei.

In dotierten Halbleitern ergibt sich die Erhöhung der Leitfähigkeit also durch eine Erhöhung der leicht beweglichen Elektronenanzahl in N-dotierten Halbleitern bzw. der Löcheranzahl in P-dotierten Halbleitern.

Dieser Zusammenhang ist im Moodle-Kurs (EMI-Board) durch einen kleinen Film (2 Minuten) veranschaulicht.

### 3. Halbleiterdioden (PN-Übergänge)

Mit reinen P-dotierten bzw. N-dotierten Halbleitern lässt sich zwar die Leitfähigkeit erhöhen – richtig interessant wird es jedoch erst wenn man zwei unterschiedlich dotierte Gebiete (also ein N-dotiertes und ein P-dotiertes Gebiet) direkt aneinander stoßen lässt. Dadurch entsteht der sogenannte PN-Übergang – eine Diode. Das P-Gebiet wird auch Anode und das N-Gebiet auch als Kathode bezeichnet.

An der Sperrschicht zwischen N- und P-dotiertem Material bewegen sich leicht bewegliche Elektronen aus dem N-dotierten Material in die Fehlstellen des P-dotierten Materials – in der Fachsprache spricht man davon, dass Elektronen und Löcher diffundieren. Zurück bleiben im N-dotierten Material Atomrümpfe, die elektrisch positiv geladen sind und im P-dotierten Material elektrisch negativ geladene Atomrümpfe. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld. Bedingt durch dieses elektrische Feld bewegen sich die freien Ladungsträger nicht beliebig weit (siehe Abbildung 1). Das Diffusionsgebiet wird auch Raumladungszone oder Sperrschicht genannt. In dieser Raumladungszone liegen keine frei beweglichen Ladungsträger vor.

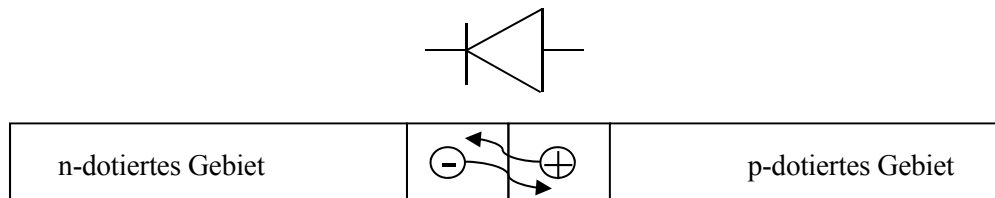


Abbildung 1: Sperrschicht einer Diode ohne externen Anschluss einer Spannungsquelle und Schaltsymbol einer Diode

Durch Anschließen einer externen Spannung an die Anode und die Kathode lässt sich die Sperrschicht vergrößern oder verkleinern:

- Durch Anschluss des Plus-Pols an die Kathode (n-dotiertes Gebiet) wird die Raumladungszone vergrößert und es fließt kein nennenswerter Strom. Die Diode sperrt (siehe 0).
- Durch Anschluss des Plus-Pols an die Anode (p-dotiertes Gebiet) wird die Raumladungszone abgebaut und Elektronen-Loch-Paare können in der Sperrschicht „rekombinieren“ – oder anders ausgedrückt die im n-dotierten Gebiet wegdiffundierten Elektronen werden ständig durch die äußere Spannungsquelle nachgeliefert. Dementsprechend fließt hier ein elektrischer Strom. Sobald die Raumladungszone komplett abgebaut ist – dies ist bei Silizium-Dioden ab einer Spannung von ca. 0,7V der Fall, fließt ein großer Strom. Die Diode leitet (siehe Abbildung 3).

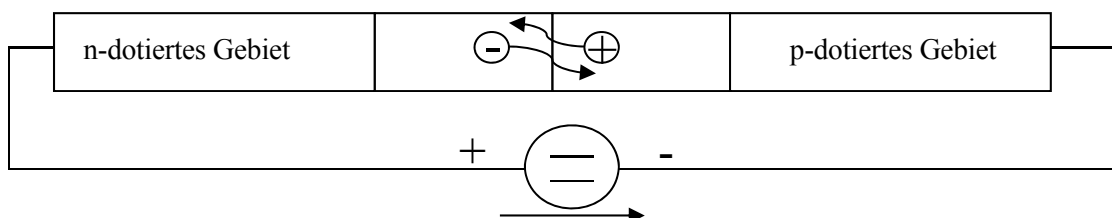


Abbildung 2: In Sperrrichtung betriebene Diode – es fließt näherungsweise kein Strom und die Raumladungszone vergrößert sich

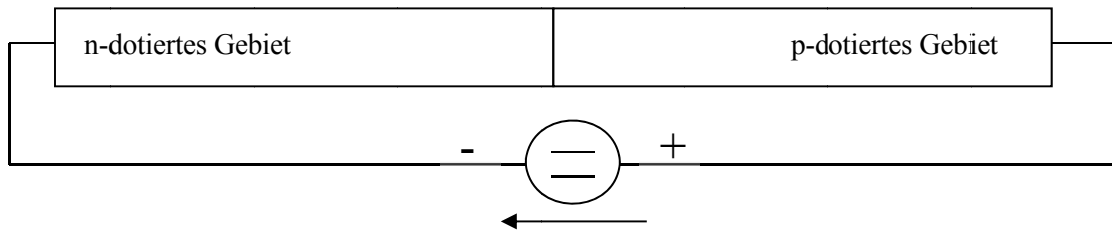


Abbildung 3: In Durchlassrichtung betriebene Diode – die Raumladungszone baut sich ab

### 3.1. Zusammenfassung elektrisches Verhalten einer Diode

Mit den hier dargestellten Zusammenhängen zwischen der Diffusion von Ladungsträgern und dem dadurch entstehenden elektrischen Feld lässt sich die Funktion einer Diode erklären. Zusammenfassend soll nun die Funktionsweise einer Silizium-Diode nochmals dargestellt werden:

- Die Diode wird in Sperrrichtung betrieben wenn der Pluspol der Spannungsquelle mit dem n-dotierten Gebiet (Kathode) verbunden wird und der Minuspol mit dem p-dotierten Gebiet (Anode).
- Die Diode wird in Durchlassrichtung betrieben wenn der Pluspol der Spannungsquelle mit dem p-dotierten Gebiet (Anode) verbunden wird und der Minuspol mit dem n-dotierten Gebiet (Kathode). Bei Silizium-Dioden fließt ein großer Strom ab einer Spannung von ca. 0,7V. Bei sehr großen Strömen kann der Spannungsabfall an der Diode auf bis zu 2V ansteigen.
- Wird eine Diode in Sperrrichtung betrieben, so kommt es oberhalb einer gewissen Spannung (im Bereich von ca. 50V bis einige Hundert Volt – je nach Bauart) zum Durchbruch. In diesem Bereich fließt ebenfalls ein großer Strom. Ein Durchbruch kann die Diode schädigen oder sogar zerstören.

Es soll im Folgenden die Serienschaltung eines Widerstands und einer in Durchlassrichtung gepolten Diode betrachtet werden (siehe linker Teil von Abbildung 4). Geht man näherungsweise von einem Spannungsabfall von  $U_F = 0,7V$  an der Diode aus, so ist  $U_{RL} = U_S - 0,7V$ . Damit kann man den Strom  $I$  näherungsweise nach dem ohmschen Gesetz berechnen:  $I = (U_S - 0,7V) / R_L$ . Sollte der Stromfluss jedoch sehr groß werden, so nimmt der Spannungsabfall über der Diode auf bis zu 2V zu. Die korrekte Berechnung des Arbeitspunktes ist im rechten Teil der Abbildung 4 dargestellt (exponentieller Verlauf entspricht der Diodenkennlinie; Gerade entspricht dem Verlauf der Widerstandskennlinie –  $I$  in Abhängigkeit von  $U_F = U_S - U_{RL}$ ).

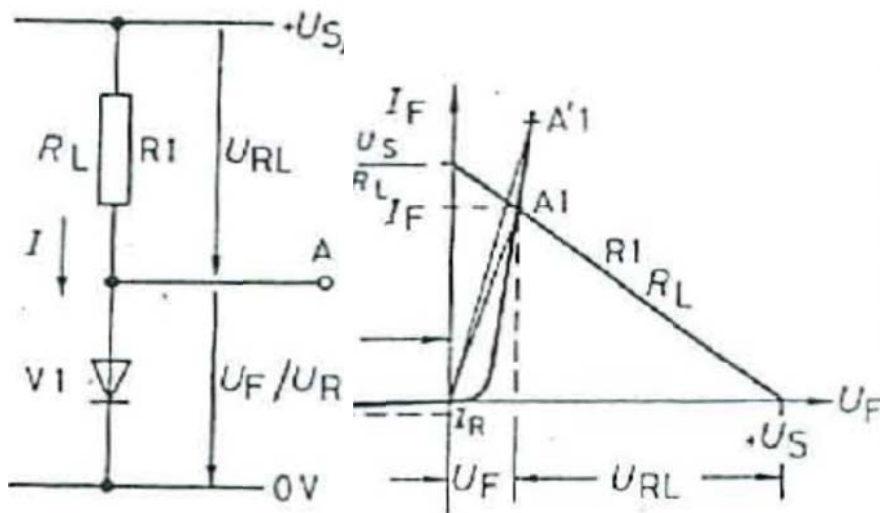


Abbildung 4: Serienschaltung einer Diode und eines Widerstands

## 4. Der Bipolartransistor

Bei der Diode wurde ein PN-Übergang betrachtet. Beim Bipolar-Transistor werden nun 2 entgegengerichtete Dioden verschaltet:

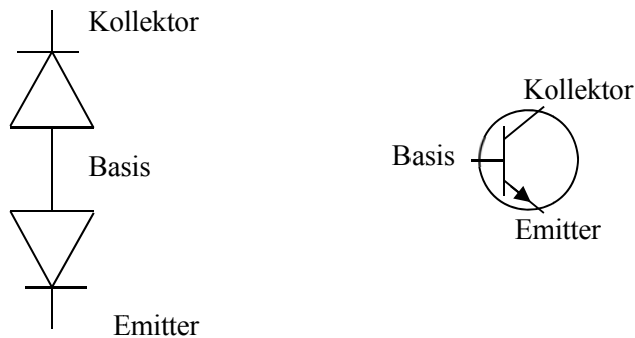


Abbildung 5: NPN-Transistor (links: prinzipielle Verschaltung von 2 Dioden; rechts: Schaltsymbol)

Ein Bipolar-Transistor hat somit 3 Anschlüsse: Emitter, Basis und Kollektor.

Wird die Basis-Emitter-Diode in Durchlassrichtung betrieben, so wird die Basis derartig mit Löchern überschwemmt, dass damit ein leitfähiger Pfad vom Kollektor zum Emitter entsteht. Durch den Basis-Emitter-Strom wird in der Praxis ein wesentlich höherer Kollektorstrom geschaltet. Das Kennlinienfeld eines solchen NPN-Transistors ist in Abbildung 6 dargestellt. Für unterschiedliche Basis-Ströme ist dort jeweils eine Kennlinie angegeben. Jede dieser Kennlinien stellt eine Beziehung zwischen dem Kollektor-Strom und der Kollektor-Emitter-Spannung dar. Diese Kenngrößen können erst richtig durch die Verschaltung des Transistors mit einem Basis-Widerstand und einem Kollektorwiderstand verstanden werden (Abbildung 7).

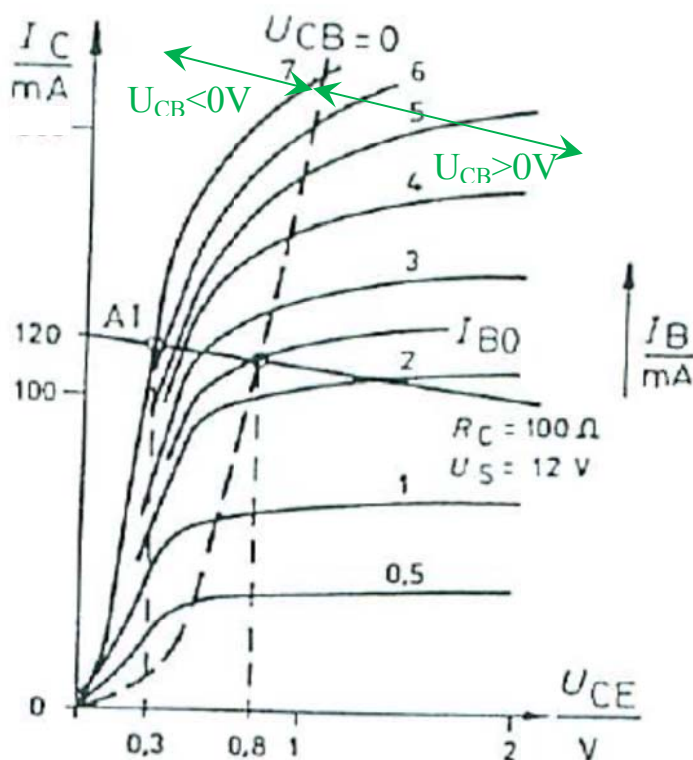


Abbildung 6: Kennlinienfeld eines NPN-Transistors

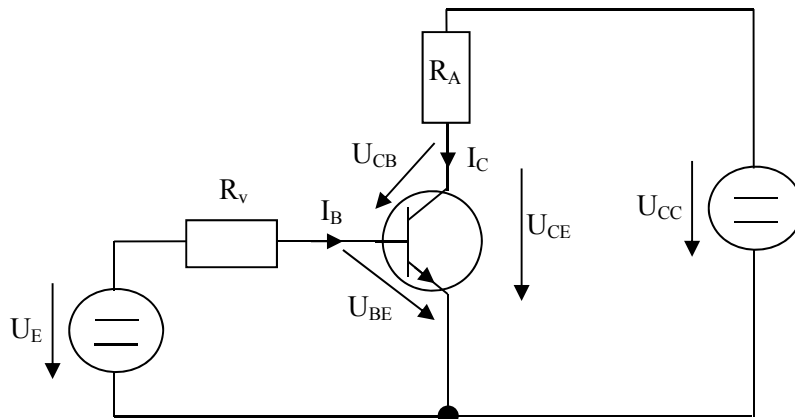


Abbildung 7: Verschaltung eines NPN-Transistors

Im Folgenden soll nun der Arbeitspunkt des Transistors für eine bestimmte Schaltungskonstellation ermittelt werden. Folgende Einflussgrößen sind hierbei zu berücksichtigen:

- Eingangsspannung  $U_E$ ,
- Vorwiderstand  $R_v$ ,
- Betriebsspannung  $U_{CC}$ ,
- Widerstand am Kollektor ( $R_A$ ),
- Transistorkennlinien (Arbeitspunkte).

Um den Arbeitspunkt des Transistors zu bestimmen sollte man zunächst den Basisstrom ermitteln und dann den Arbeitspunkt des Transistors ( $U_{CE}$  und  $I_C$ ).

Aus der Eingangsspannung  $U_E$  und dem Widerstandswert  $R_v$  lässt sich beim durchgeschalteten Transistor ( $U_{BE} \approx 0,7V$ ) der Basisstrom  $I_B$  berechnen (Ohmsches Gesetz...). Damit ist die zu verwendende Kennlinie (Abbildung 6) bekannt. Im nächsten Schritt kann nun den Strom  $I_C$  durch den Widerstand  $R_A$  in Abhängigkeit von  $U_{CE}$  in der Abbildung mit dem Kennlinienfeld einzeichnen. Im Schnittpunkt der Transistor- und der Widerstandskennlinie liegt der Arbeitspunkt des Transistors. Dieses Vorgehen wird in den Versuchsvorbereitungsaufgaben noch genauer betrachtet.

In diesem Abschnitt wurde das Verhalten eines NPN-Transistors diskutiert. Als zweiten bipolaren Transistortyp gibt es noch den sogenannten PNP-Transistor. Beim PNP-Transistor sind der Kollektor und Emitter durch p-dotierte Gebiete realisiert und die Basis durch ein n-dotiertes Gebiet. Um diesen PNP-Transistor durchzuschalten (also eine leitfähige Verbindung zwischen dem Kollektor und dem Emitter zu schaffen), muss die Basis mit Elektronen überschwemmt werden. Dies geschieht durch einen Stromfluss aus der Basis heraus (entgegen gesetzte Richtung wie in Abbildung 7). Außerdem liegt der Emitter auf einem höheren Potential als der Kollektor (also  $U_{CE} < 0V$ ). Der prinzipielle Aufbau und das Schaltsymbol eines PNP-Transistors ist in Abbildung 8 dargestellt.

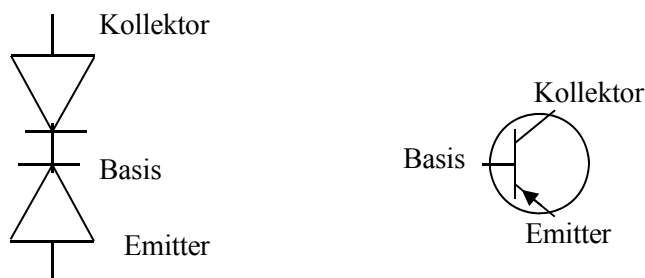


Abbildung 8: PNP-Transistor (links: prinzipielle Verschaltung von 2 Dioden; rechts: Schaltsymbol)

## 5. Spulen (Relais) und Kondensatoren

Neben Widerständen, Dioden und Transistoren sollen hier weitere Bauelemente behandelt werden:

- Kondensatoren
- Spulen (Relais)

In beiden Bauelementen lässt sich elektrische Energie speichern. Diese Bauelemente werden hier nur sehr vereinfacht und kompakt erklärt. Die eigentliche Erklärung ist Bestandteil der Vorlesung.

### 5.1. Der Kondensator

Ein Kondensator besteht prinzipiell aus typischerweise 2 elektrischen Leitern (z.B. Platten), zwischen denen sich eine Isolationsschicht befindet (im einfachsten Fall sogar Luft – aber auch andere isolierende Dielektrika sind hier möglich). Werden beide Leiter/Platten nun mit unterschiedlicher Ladung aufgeladen, so entsteht ein elektrisches Feld zwischen den Leitern. Da keine leitfähige Verbindung zwischen den beiden Leitern/Platten besteht, bleibt der Ladungsunterschied erhalten. Durch die Ladungstrennung ist im Kondensator eine Energie gespeichert worden.

Werden die beiden Leiter/Platten nun über einen Widerstand miteinander verbunden, so kann sich über den Widerstand der Ladungsunterschied ausgleichen. Es fließt ein elektrischer Strom. Die im Kondensator gespeicherte elektrische Energie wird im Widerstand in Wärme umgewandelt – also in thermische Energie. Der Spannungsverlauf für diesen Entladevorgang ist eine Exponentialfunktion:

$$U_C(t) = U_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Bezeichner:

- $U_0$ : Spannungsdifferenz zwischen den beiden Leitern/Platten vor Anschluss des Widerstandes
- $e$ : Eulersche Zahl ( $e \approx 2,718$ )
- $t$ : Zeit
- $R$ : Widerstand, über den die beiden Platten verbunden wurden
- $C$ : Kapazität des Kondensators (siehe Vorlesung)

In Abbildung 9 ist eine schaltungstechnische Realisierung des o.a. Sachverhalts dargestellt. Bis zum Zeitpunkt  $t=0$  ist der Kondensator (rechts mit  $C$  gekennzeichnet) mit der Spannungsquelle (links) verbunden. Zum Zeitpunkt  $t=0$  wird die Verbindung zwischen der Spannungsquelle und dem Kondensator durch den linken Schalter getrennt und gleichzeitig eine Verbindung über den Widerstand  $R$  zugeschaltet (der linke Schalter wird geöffnet und der rechte Schalter geschlossen).

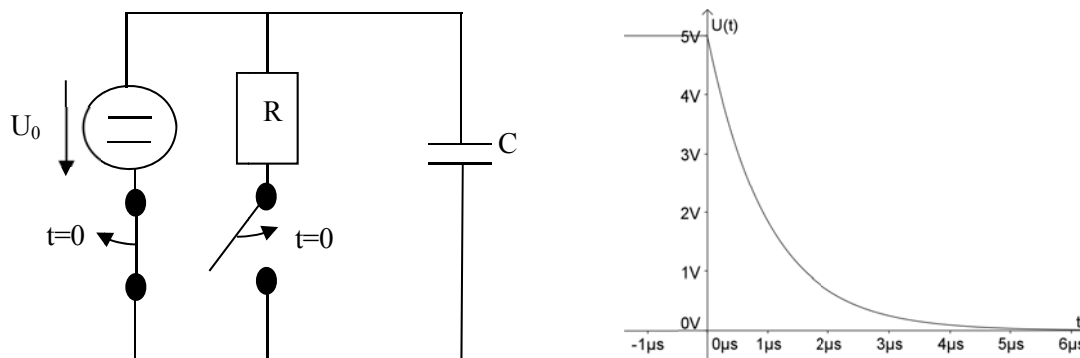


Abbildung 9: Entladen einer Kapazität über einen Widerstand

**Wichtig ist die Beobachtung, dass sich die Spannung nicht sprunghaft ändert.**

Die Aufladung einer Kapazität über einen Widerstand erfolgt ebenfalls nach einer Exponentialfunktion:

$$U_C(t) = U_0 \left( 1 - e^{-\frac{t}{RC}} \right)$$

## 5.2. Die Spule

In einer stromdurchflossenen Spule wird ein magnetisches Feld erzeugt. D.h., dass Energie in diesem magnetischen Feld gespeichert ist.

Im Abschnitt 5.1 ist darauf hingewiesen worden, dass sich die Spannung über einem Kondensator nicht sprunghaft ändert. **Bei einer Spule ändert sich der Stromfluss nicht sprunghaft.** Ein sich ändernder Stromfluss führt dazu, dass sich die magnetische Feldstärke ändert. Diese Änderung der magnetischen Feldstärke führt wiederum zu einer induzierten Spannung über der Spule. Je größer die Stromänderung ist, desto größer ist die Änderung des magnetischen Feldes und desto größer ist die induzierte Spannung.

Wird der elektrische Stromfluss durch eine Spule durch Umlegen eines Schalters nicht mehr mit einem Gleichstrom durchflossen sondern es erfolgt ein Stromfluss über einen Widerstand, so ändert sich der Stromfluss nur allmählich. Der Stromfluss lässt sich durch folgende Exponentialfunktion beschreiben:

$$I_L(t) = I_0 e^{-\frac{t \cdot R}{L}}$$

Bezeichner:

- $I_0$ : Stromfluss durch die Spule vor dem Umschalten auf den Widerstand
- $e$ : Eulersche Zahl  $\approx 2,718$
- $t$ : Zeit
- $R$ : Widerstand, über den der Stromfluss nach dem Umschalten erfolgt
- $L$ : Induktivität der Spule (siehe Vorlesung)

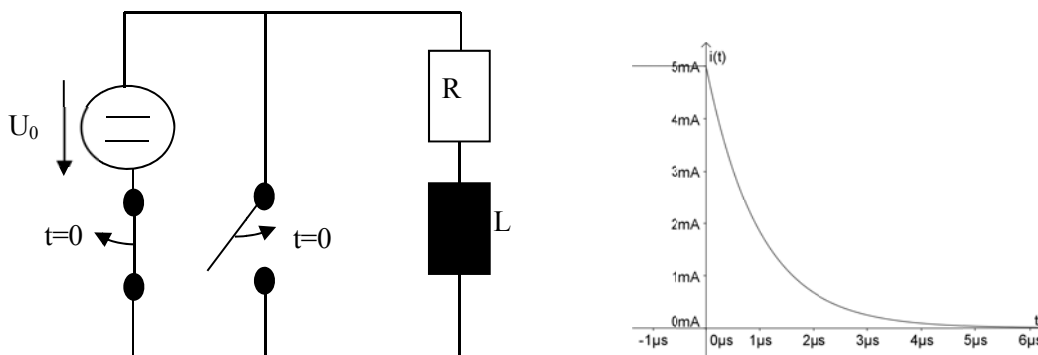


Abbildung 10: Stromfluss durch eine Induktivität

## 5.3. Das Relais

Das Relais stellt einen elektrotechnischen Schalter dar. Über eine Spule wird ein Magnetfeld erzeugt, das mechanisch einen Kontakt schließen kann. Über diesen Kontakt können große elektrische Lasten geschaltet werden (siehe Abbildung 11). In der Abbildung ist links der Steuerkreis zu erkennen. Wird der Schalter geschlossen, so fließt ein Strom durch die Spule. Durch das Magnetfeld wird der Anker angezogen und



schließt mechanisch den Arbeitskontakt. Dadurch kann im Laststromkreis ein großer Strom fließen – typischerweise ein Strom in einer Größenordnung, der im Steuerkreis nicht möglich gewesen wäre. In dem Beispiel ist die Spannung zusätzlich noch entsprechend hoch (230V Wechselspannung).

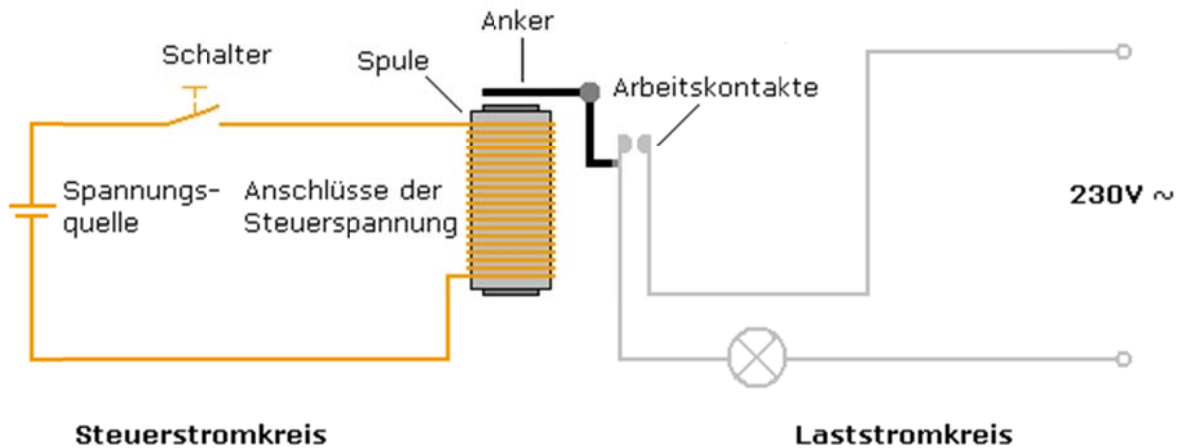


Abbildung 11: Schalten eines Laststromkreises durch ein Relais<sup>2</sup>

Bei dem Schalten von großen elektrischen Strömen über die Kontakte ist es von Bedeutung, dass sich die Kontakte beim Abschalten möglichst schnell voneinander trennen. Ein langsames Trennen der Kontakte führt dazu, dass zwischen den Kontakten ein Funken/Lichtbogen entstehen kann, der zur Beschädigung der Kontakte führen kann.

Es soll nun ein Aufbau betrachtet werden, in dem die Spule des Relais über einen Transistor geschaltet wird. Die Beschaltung ist nahezu identisch mit dem von Abbildung 7 (vergleiche auch Abbildung 12). Der Widerstand  $R_A$  wird durch eine Spule ersetzt. Durch das sehr schnelle Abschalten des Transistors ändert sich der Stromfluss durch die Spule sehr schnell. Wie oben erwähnt wird durch eine schnelle Änderung des Stromflusses eine hohe Spannung über der Spule induziert – im Bereich von mehreren hundert Volt. Dieser Effekt lässt sich anschaulich auch so erklären, dass die Spule bestrebt ist, den Stromfluss aufrecht zu erhalten – auch wenn der Transistor abschaltet. Bedingt durch das Abschalten des Transistors existiert jedoch kein Pfad mehr über den der Strom fließen kann – dies führt zu einer Ansammlung einer hohen Anzahl an Löchern am Kollektoreingang des Transistors bzw. einer hohen Kollektor-Emitter-Spannung  $U_{CE}$ . Erst wenn diese Spannung so hoch ist, dass es zu einem Durchbruch im Transistor kommt, können die Ladungsträger abfließen. Durch diese hohe Spannung kann der Transistor beschädigt bzw. sogar zerstört werden.

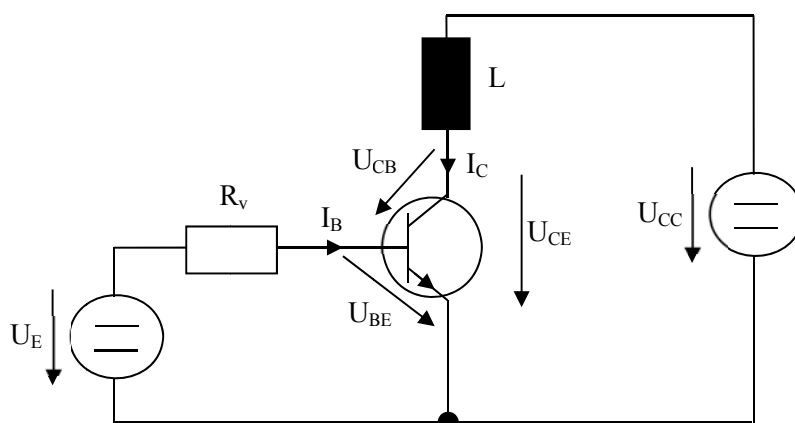


Abbildung 12: Schalten einer Spule über einen NPN-Transistor

<sup>2</sup> Quelle: <http://de.m.wikipedia.org/wiki/Relais> (dort wird die Funktion sogar animiert)

Als Abhilfemaßnahme kann man eine Diode parallel zur Spule schalten, die im Normalbetrieb in Sperrrichtung gepolt ist – man spricht in dieser Anordnung von einer Freilaufdiode (siehe Abbildung 13).

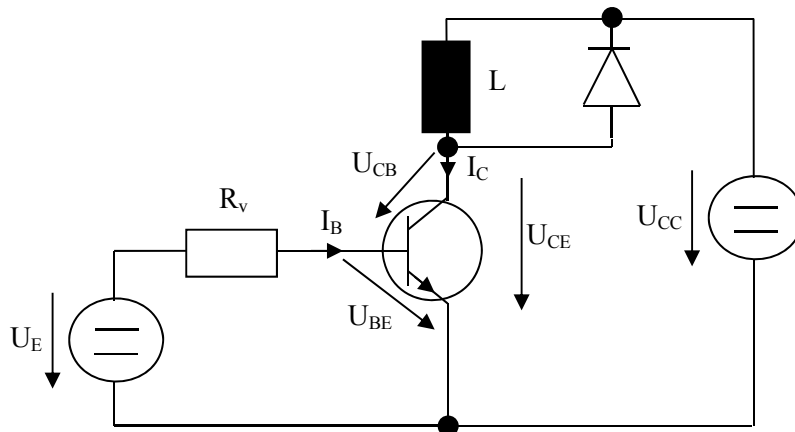


Abbildung 13: Verwendung einer Freilaufdiode zur Vermeidung von Spannungsspitzen

Diese Schaltung weist jedoch ebenfalls ein Problem auf – insbesondere für den Fall, dass die Spule ein Relais darstellt. Alles weitere sollen Sie sich in der Versuchsvorbereitung durch die Beantwortung der dortigen Fragen selbst erarbeiten.

## 6. MOS-Transistoren

In diesem Versuch wurde bisher der Bipolartransistor als Halbleiterschaltenelement verwendet. Für die Realisierung von (hoch) integrierten Schaltungen mit oft vielen Millionen Transistoren pro Chip und selbst für Leistungsbaulemente werden primär Metal-Oxid-Semiconductor-Transistoren (kurz MOS-Transistoren) eingesetzt. Diese Transistoren werden in diesem Versuch nicht praktisch vertieft. Unter Moodle finden Sie einen Kurzfilm, in dem die Funktion eines MOS-Transistors erklärt ist.

## 7. Darstellung von zeitlichen Spannungsverläufen mit Oszilloskopen

Zeitlich veränderliche Spannungsverläufe werden mit Hilfe von Oszilloskopen gemessen. Hierbei sind die zeitliche Auflösung und die Spannungsauflösung (pro Kästchen) an das zu analysierende Signal anzupassen. Um das zu analysierende Signal möglichst wenig zu belasten werden sogenannte Tastköpfe verwendet, die das Signal typischerweise sogar im Verhältnis 10:1 abschwächen. Diese Tastköpfe verfügen über eine Erdungsklemme und eine Klemme, die mit dem zu analysierenden Signal zu verbinden ist.

In Abbildung 14 ist beispielhaft ein mit einem Oszilloskop aufgezeichneter Spannungsverlauf dargestellt.

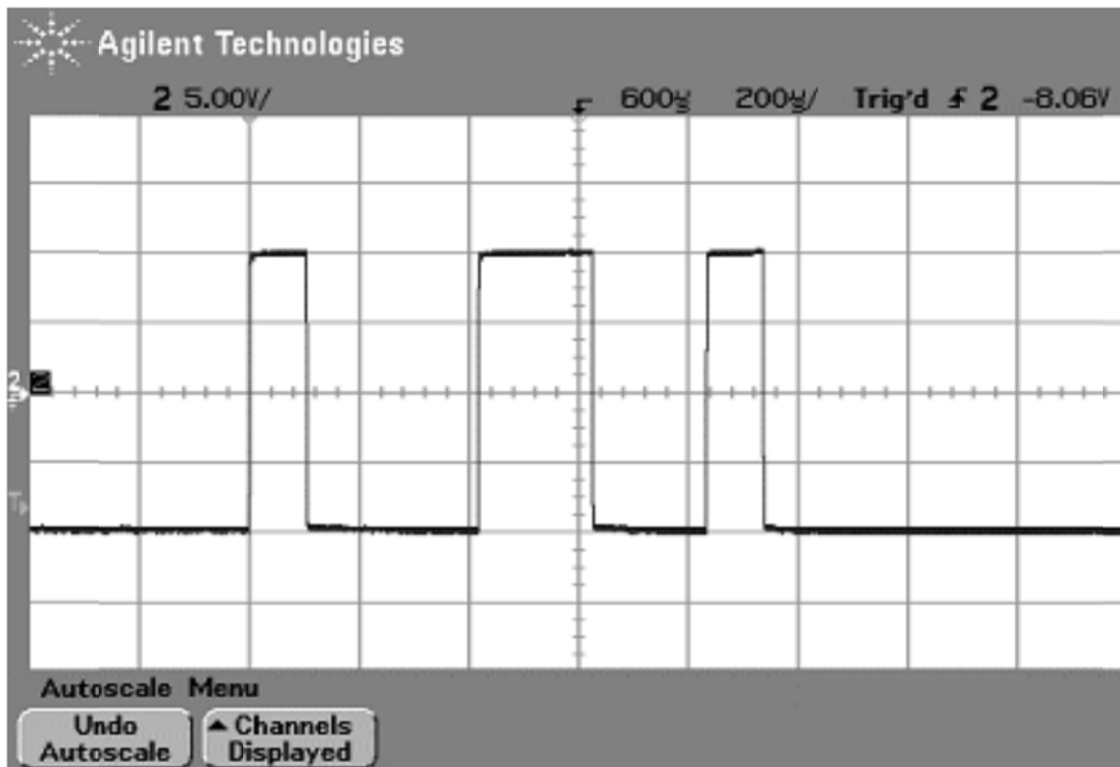


Abbildung 14 : zeitliche Darstellung eines mit einem Oszilloskop aufgenommenen Spannungsverlaufs

Das im Praktikum verwendete Oszilloskop verfügt über zwei unabhängige Kanäle, mit denen Spannungsverläufe aufgezeichnet werden können. Im Gegensatz zu einem Voltmeter kann man mit einem Oszilloskop den zeitlichen Verlauf der Spannung darstellen. Bereits an dieser Stelle sollen Sie die Darstellung des Oszilloskop interpretieren lernen. Das Oszilloskop wurde so eingestellt, dass der Kanal 2 des Oszilloskops für die Spannungsaufzeichnung mit einer Auflösung von 5V pro Kästchen in y-Richtung verwendet wurde (siehe Angabe oben links in Abbildung 14). Hierbei wurde das Tastkopfverhältnis von 1:10 bereits automatisch mit eingerechnet (dies funktioniert nicht bei allen Tastköpfen automatisch!). Auf der linken Seite ist der 0V-Spannungsspiegel durch den Pfeil mit dem Erdungssymbol unterhalb der Ziffer 2 angegeben. Der Spannungsverlauf wird vom Digital-Oszilloskop relativ zu einem „Trigger“-Ereignis angezeigt. Dieses „Trigger“-Ereignis wurde für den in Abbildung 14 dargestellten Spannungsverlauf wie folgt definiert:

- Durchschreiten des Spannungspegels von ca. -8V (siehe Pfeil mit dem Zeichen „T“ auf der linken Seite)
- mit einer steigenden Flanke (also von einer Spannung unterhalb von -8V zu einer größeren Spannung - siehe Flankensymbol zwischen „Trig’d“ und „2“ - die Ziffer „2“ gibt an, dass auf den Kanal 2 getriggert wird).

Der Triggerzeitpunkt wird durch den Pfeil an der oberen linken Bildkante visualisiert.

Die zeitliche Darstellung erfolgt mit  $200\mu\text{s}$  pro Kästchen (siehe entsprechende Info oberhalb des Diagramms in Abbildung 14). Die Zeit ist damit in der Waagerechten abgebildet („x-Achsen-Richtung“). Der Triggerzeitpunkt ist um  $600\mu\text{s}$  gegenüber dem Mittelpunkt des Diagramms verschoben (siehe entsprechende Angabe in Abbildung 14; der Triggerzeitpunkt ist entsprechend um 3 Kästchen ( $3 \cdot 200\mu\text{s} = 600\mu\text{s}$ ) links von der Diagrammmitte verschoben).

Die exakte Einstellung des Oszilloskops (Skalierung der Spannungs- und Zeitachse, Triggerung) ist Bestandteil des Praktikums und dies werden Sie auch dort detailliert erklärt bekommen.

## 8. Versuchsvorbereitung

Es soll der Arbeitspunkt der in Abbildung 15 dargestellten Versuchsanordnung für  $U_E=7,3\text{V}$  und  $U_{CC}=12\text{V}$  bestimmt werden. Sie werden schrittweise an die Lösung herangeführt.

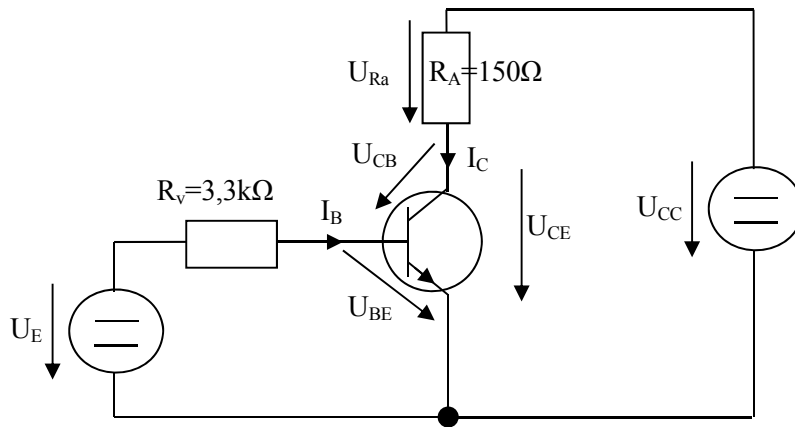


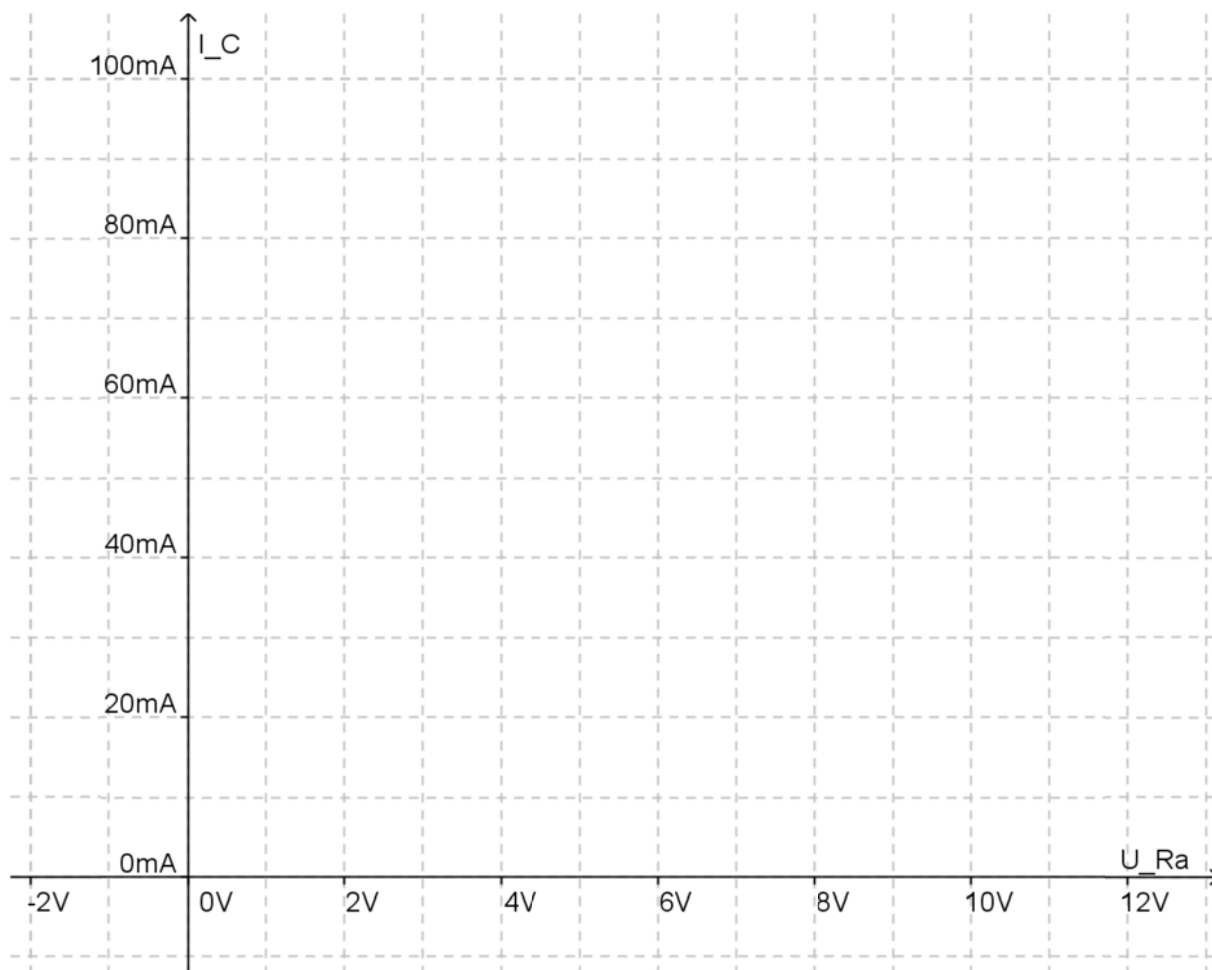
Abbildung 15: Versuchsaufbau

### Aufgabe 1:

Im ersten Schritt sollen Sie den Basisstrom berechnen. Berücksichtigen Sie hierbei die Tatsache, dass der Spannungsabfall über der Basis-Emitter-Diode im durchgeschalteten Zustand näherungsweise  $0,7\text{V}$  sein wird. (Tipp: der Basisstrom ist mit Hilfe des ohmschen Gesetzes berechenbar)

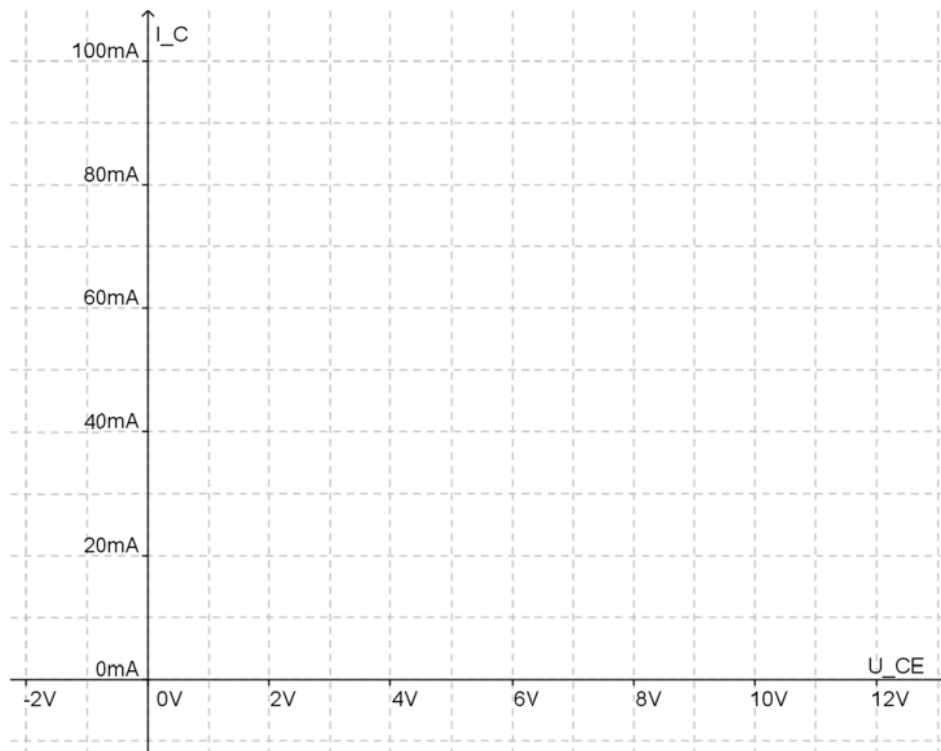
**Aufgabe 2:**

Im zweiten Schritt sollen Sie den Strom durch den Widerstand  $R_A$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U_{Ra}$  in folgendem Diagramm skizzieren. Hierbei hilft Ihnen das ohmsche Gesetz weiter.

**Aufgabe 3:**

Über welche mathematische Beziehung können Sie aus den Spannungen  $U_{Ra}$  und  $U_{CC}$  die Spannung  $U_{CE}$  berechnen?

Mit dieser Erkenntnis können Sie in folgendem Diagramm den Strom  $I_C$  in Abhängigkeit von  $U_{CE}$  skizzieren.



Übertragen Sie diese Kennlinie in die Kennliniendarstellung des Transistors in Abbildung 16. Der Schnittpunkt dieser Kennlinie mit der für diesen Fall relevanten Transistorkennlinie (Tipp: den Basisstrom haben Sie bereits berechnet) beschreibt den Arbeitspunkt, der sich hier einstellt.

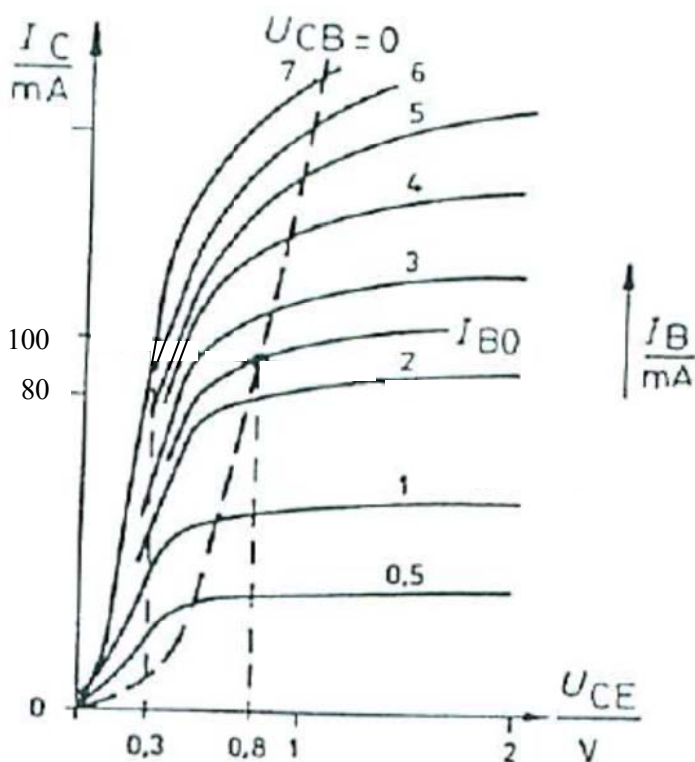


Abbildung 16: Kennlinienfeld des zu betrachtenden NPN-Transistors

**Aufgabe 4:**

Wie groß wird für die oben diskutierte Schaltungsanordnung die Spannung  $U_{CE}$  sein, wenn die Eingangsspannung  $U_E=0V$  beträgt (Begründung!)?

**Aufgabe 5:**

Interpretieren Sie eine hohe Spannung an  $U_E$  bzw.  $U_{CE}$  als digitalen High- bzw. 1-Pegel und  $0V$  als Low- bzw. 0-Pegel. Welche digitale Funktion haben Sie mit dieser Schaltungsanordnung realisiert?

**Aufgabe 6:**

Bei der Schaltungsanordnung nach Abbildung 12 ergibt sich beim Abschalten des Transistors eine hohe Spannung  $U_{CE}$  von mehreren hundert Volt. Erklären Sie wie die eingefügte Freilaufdiode in Abbildung 13 wirkt.

In Abschnitt 5.2 wurde folgende Funktion für den abklingenden Strom durch die Spule angegeben:

$$I_L(t) = I_0 e^{-\frac{t \cdot R}{L}}$$

Wie sieht der zeitliche Verlauf des Stromflusses aus, wenn der Widerstand  $0\Omega$  beträgt? Was bedeutet dies für das Magnetfeld der Spule bzw. des Relais?

In der realen hier diskutierten Schaltung (Abbildung 13) ist der Widerstand des Strompfades über die Freilaufdiode zwar nicht  $0\Omega$ , aber dennoch sehr klein. Wie verändert sich der zeitliche Stromverlauf in diesem Fall?

Die Spule soll in unserem Fall ein Relais darstellen. Wo liegt das Problem wenn über die Kontakte des Relais ein großer Strom geschaltet wird?

## 9. Versuchsanleitung

Es wird die in Abbildung 15 dargestellte Versuchsanordnung verwendet.

### Aufgabe 1:

Im ersten Versuchsteil wird nur die Basis-Emitter-Diode analysiert. Damit vereinfacht sich der Versuchsaufbau wie in Abbildung 17 dargestellt.

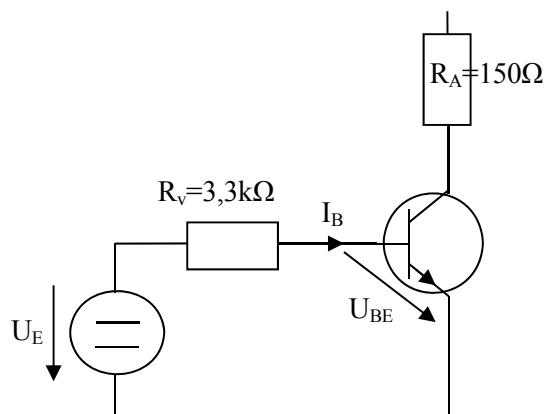


Abbildung 17: Versuchsaufbau zur Aufnahme der Kennlinie der Basis-Emitter-Diode

Durch Veränderung der Eingangsspannung  $U_E$  kann nun der Basisstrom  $I_B$  geändert werden. Es sollen zwei Kennlinien aufgenommen werden:

- Kennlinie 1:  $I_B$  in Abhängigkeit von  $U_E$
- Kennlinie 2:  $I_B$  in Abhängigkeit von  $U_{BE}$

Bei der Aufzeichnung der Werte sollten Sie eine geeignete Anzahl von Messwerten aufnehmen und die Messwerte graphisch darstellen (z.B. mit EXCEL). Die Messwerte können Sie hierfür an den Arbeitsplatzrechnern bereits in eine EXCEL-Tabelle eintragen und die Werte graphisch darstellen. Verwenden Sie hierfür die Darstellung *Punkt XY → Punkte mit interpolierten Linien und Datenpunkten*.

Achten Sie auch darauf, dass die Achsen korrekt mit den physikalischen Größen und Einheiten beschriftet sind.

Für die Kennlinie 1 haben Sie in der Versuchsvorbereitung einen vereinfachten Ansatz gemacht. Sie haben den Basisstrom  $I_B$  für den Fall berechnet, dass im leitenden Zustand der Diode der Spannungsabfall über der Diode 0,7V ist. Ergänzen Sie die sich daraus ergebene Kennlinie in obiger Abbildung und beurteilen Sie die Güte des vereinfachten Ansatzes.



**Aufgabe 2:**

Vervollständigen Sie nun den Versuchsaufbau (siehe Abbildung 18).

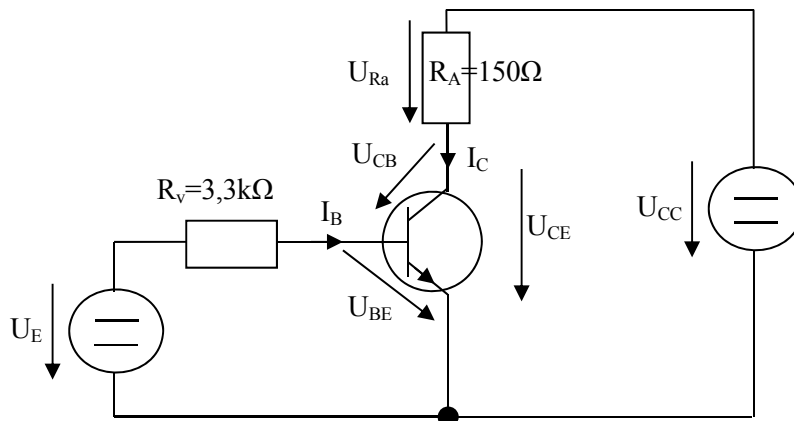


Abbildung 18: Versuchsaufbau für die Messung von Transistorkennlinien

Bestimmen Sie für 2 unterschiedliche Basisströme (z.B.  $I_B = 100 \mu A$  und  $I_B = 200 \mu A$ ) die Transistorkennlinien entsprechend Abbildung 16 und stellen Sie diese dar. Die Spannung  $U_{CE}$  können Sie über die Spannung  $U_{CC}$  variieren.

Auch hier empfehle ich Ihnen die Kurven auf dem Arbeitsplatzrechner in EXCEL darzustellen.

**Aufgabe 3:**

Es soll nun ein Relais nach Abbildung 19 angesteuert werden. Als Eingangsspannung  $U_E$  soll ein rechteckförmiger Spannungsverlauf zwischen 0 und 6V mit einer geeigneten Frequenz gewählt werden (im Herz-Bereich, damit man das Schalten des Relais hört). Die Spannung  $U_{CE}$  ist mit einem Oszilloskop aufzuzeichnen. Wie hoch ist die Spannung im Ausschaltmoment?

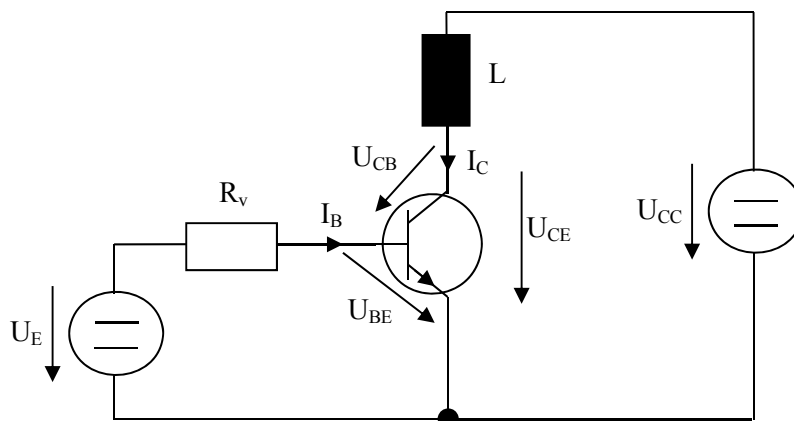


Abbildung 19: Schalten einer Spule über einen NPN-Transistor

Ergänzen Sie im nächsten Schritt die Freilaufdiode (siehe Abbildung 20) und protokollieren Sie auch hier den Spannungsverlauf auf dem Oszilloskop für 2 Fälle:

1. das Relais schaltet ungehindert
2. halten Sie den Kontakt des Relais fest (wodurch ergibt sich hier eine Änderung des Spannungsverlaufs?)

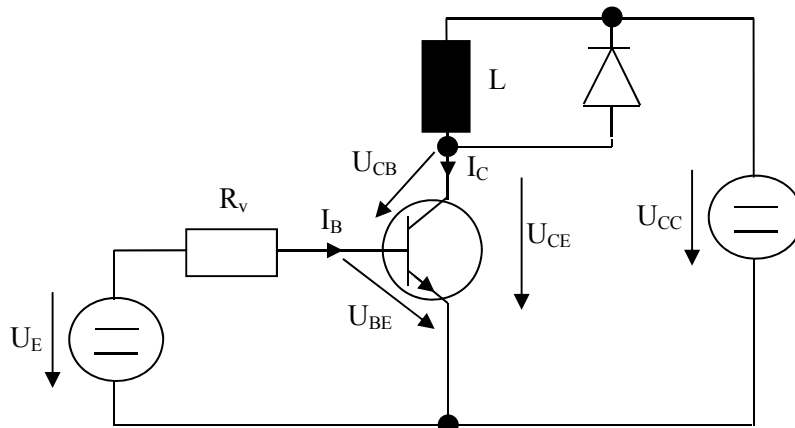


Abbildung 20: Verwendung einer Freilaufdiode zur Vermeidung von Spannungsspitzen

Ergänzen Sie ein weiteres Bauelement, um das Kleben der Kontakte zu vermeiden (Bild des Oszilloskops und Schaltungsanordnung protokollieren).

### 9.1. Hinweise zum Protokoll und allgemeine Hinweise zu den Messungen

Bei der graphischen Darstellung von Versuchsergebnissen ist folgendes zu beachten:

- Pro dargestellte Kurve ist eindeutig anzugeben was dargestellt ist.
- Die Achsen-Skalierung muss inklusive der verwendeten Einheiten klar definiert sein.

Außerdem ist folgendes zu beachten:

- Die Ergebnisse sind zu interpretieren.
- Die verwendeten Messgeräte sind zu protokollieren (inklusive Hersteller und genaue Bezeichnung).
- Bei Messungen ist zu beachten, dass die Messpunkte so gewählt werden, dass der Graph in jedem Bereich mit der ausreichenden Genauigkeit gezeichnet werden kann (z.B. in linearen Bereichen werden weniger Messwerte benötigt als in nicht linearen Bereichen).