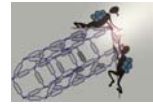


Einheit_2: Kondensator- und Transistorschaltungen

Inhaltsverzeichnis

Ziel der Einheit_2.....	2
1. Knotensatz.....	3
1.1 Einleitung	3
1.2 Stromverteilung in kombinierten LED-/Widerstandsschaltungen	4
1.3 Stromverteilung in Reihen-/Parallelschaltungen von LED.....	6
2 Halbleitertechnik – elektrischer Schalter.....	7
2.1 Diode.....	7
2.2 Bipolartransistor	10
3 Kondensator	13
3.1 Aufbau und Zusammenhang zwischen Strom und Spannung	13
3.2 Ladekurve	16
3.3 Nutzung der Kondensator-Ladekurve	18
4 Kippstufen.....	19
4.1 Einleitung	19
4.2 bistabile Kippstufe	20
4.3 monostabile Kippstufe.....	22
4.4 astabile Kippstufe.....	24
5 Zusatzaufgaben.....	25



Ziel der Einheit_2

In Einheit_2 lernen Sie die weitere Bauteile für das „Einführungsprojekt Elektrotechnik 2009“ kennen: Wieder nutzen Sie das Steckbrett, auf dem Sie alle Versuche aufbauen werden, die Batterie zur Spannungsversorgung und das Multimeter zur Messung Ihrer Ergebnisse. Speziell in Einheit_2 werden Sie den Kondensator, die Diode und den Transistor kennen lernen und in Schaltungsaufbauten nutzen. Damit können Sie zum Beispiel Kippstufen aufbauen und durch das Variieren der Bauteilgrößen, deren Verhalten experimentell verändern. Auf dieser Basis können Sie Blinklichter ansteuern – das kennen Sie ja schon aus dem Begrüßungs-Set.

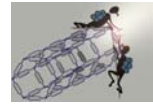
Als Hilfestellung finden Sie im vorderen Teil des Ordners das „kleine Nachschlagewerk“, nach jeder Einheit gibt es zudem einen Anhang, in dem die Lösungen zu den Zusatzaufgaben (+X) und weitere Kommentare sowie Datenblätter aufgeführt sind. In all diesen Unterlagen finden Sie weitere Verweise, um eigenständig noch mehr Faszinierendes entdecken können.

// So sind besondere Hinweise und Erläuterungen gekennzeichnet. //

Scheuen Sie sich nicht die Möglichkeiten der Kleingruppe zu nutzen:
Sprechen Sie mit Ihren Kommilitonen und Betreuern:
Tauschen Sie sich aus, diskutieren Sie, hinterfragen Sie!

Wir Betreuer stehen Ihnen jederzeit freiwillig und gerne zur Seite.

Diese Unterlagen stellen keinen Lehrbrief da. Sie sind von Studenten für Studenten speziell für das Einführungsprojekt Elektrotechnik verfasst worden.



1. Knotensatz

1.1 Einleitung

Die Kirchhoffschen Sätze beschreiben grundlegende Beziehungen zwischen Spannungen und Strömen in elektrischen Netzwerken mit konzentrierten Bauelementen. Netzwerke bestehen dabei aus Zweigen, die an Knoten zusammenstoßen. Die Zweige enthalten wiederum Zweipole die passiv (ohne Spannungs- bzw. Stromquellen) oder aktiv (mit Spannungs- bzw. Stromquellen) sein können.

Der 1. Kirchhoffsche Satz beschreibt das Verhalten der einem elektrischen Netzwerkknoten zufließenden und von ihm weg fließenden Ströme und besagt, dass die Summe der einem Knoten zufließenden Ströme gleich der Summe der vom Knoten weg fließenden Ströme sein muss:

$$\sum \underset{\downarrow}{I_\nu} = \sum \underset{\uparrow}{I_\mu}$$

I_ν ... vom Knoten weg fließende Ströme, I_μ ... dem Knoten zufließende Ströme.

und wird auch als „Knotensatz“ bezeichnet. Da der elektrische Strom als transportierte Ladungsmenge pro Zeit definiert ist, bringt der Knotensatz die Ladungskontinuität an einem Knoten zum Ausdruck: An einem Knoten können keine Ladungen „verlorengehen“ oder „hinzukommen“ (Ladungserhaltung).

Unter „Knoten“ versteht man in einer Schaltung praktisch sowohl leitende Verbindungen von stromdurchflossenen Leitungen als auch „Schnittmengen“, d. h. Schaltungsteile, um die eine gedachte „Hülle“ gelegt wird und in die Ströme über Leitungen hinein und heraus fließen. Ein Beispiel ist in Abb. 1.1 dargestellt.

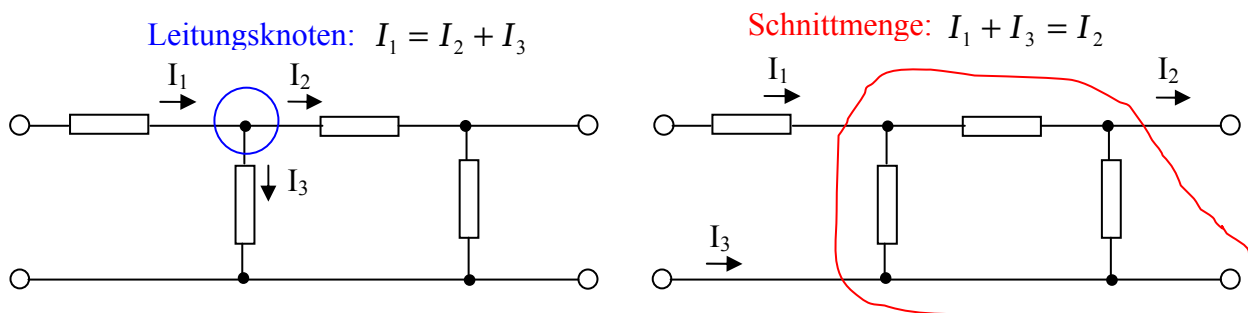
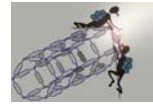


Abb. 1.1: Stromverteilung an einem Leitungsknoten (links) und einer Schnittmenge (rechts)



1.2 Stromverteilung in kombinierten LED-/Widerstandsschaltungen

In der Einheit 1 haben Sie sich mit Grundsaltungen von LED beschäftigt. Für einen sicheren Betrieb einer LED ist ein Vorwiderstand entsprechender Größe erforderlich. Diese einfache Reihenschaltung LED/Widerstand soll durch Zuschaltung weiterer Widerstände erweitert werden.

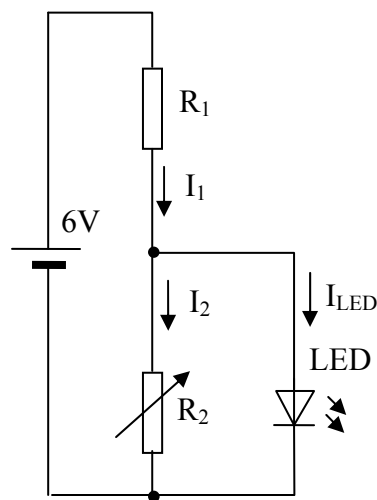
Aufgabe 1.2a

Berechnen Sie in untenstehender Schaltung den Widerstand R_1 ($R_2 \rightarrow \infty$), wenn durch die LED ein Strom von 20 mA fließen soll (Spannung über der LED ca. 2 V)!

// Der Widerstand ergibt sich aus dem Quotienten von $6\text{ V} - 2\text{ V} = 4\text{ V}$ und 20 mA: $\rightarrow 200\text{ OHM}$ //

// Verweis auf „übliche“ Werte: E-Reihen, hier 220 OHM //

Bauen Sie die Schaltung 1.2a auf dem Steckbrett auf!
Verwenden Sie für R_2 ein Potentiometer und stellen Sie es auf den maximalen Wert ein!

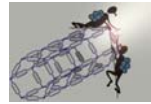


Schaltung 1.2a

Verringern Sie den Widerstandswert des Potentiometers und messen Sie für einige Widerstandswerte des Potentiometers die Ströme I_1 , I_2 und I_{LED} und stellen Sie diese in einer Tabelle zusammen!

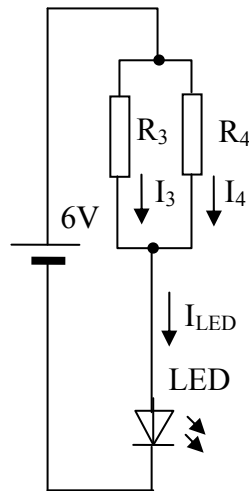
Vergleichen Sie jeweils für einen Datensatz die Summe von I_2 und I_{LED} mit dem zugehörigen Wert von I_1 und erklären Sie dabei das Leuchtverhalten der LED!

// Die Summe aus I_2 und I_{LED} muss nach dem Knotensatz jeweils gleich I_1 sein! Wenn der Widerstand R_2 zu klein wird, wird die Spannung über der LED kleiner als die Flussspannung von ca. 2 V, sie verlischt. //



Aufgabe 1.2b

Entfernen Sie das Potentiometer und ersetzen Sie R_1 durch die Parallelschaltung der Widerstände $R_3=R_4=2R_1$!



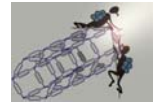
Schaltung 1.2b

Messen Sie die Ströme I_3 , I_4 und vergleichen Sie deren Summe mit dem vorgegebenen $I_{LED} = 20 \text{ mA}$ aus Aufgabe 1.2a/1. Teilaufgabe!

Vergrößern Sie den Widerstandswert von R_3 , messen und vergleichen Sie I_3 , I_4 und I_{LED} in der aktuellen Schaltung! Wie kann sich eine Verringerung des Widerstandswertes von R_3 auf die LED auswirken?

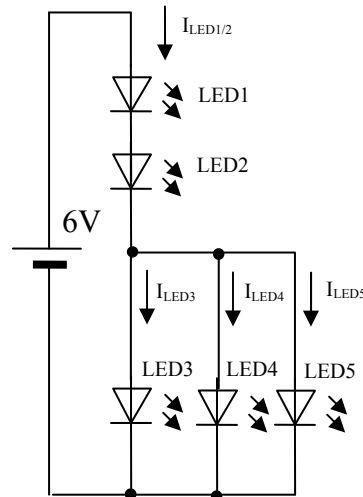
// Da die Parallelschaltung den gleichen Widerstandswert wie R_1 aus Aufgabe a) aufweist, ist die Summe der Ströme ebenfalls 20 mA. Die Summe der Teilströme I_3 und I_4 muss allgemein nach dem Knotensatz gleich I_{LED} sein. Durch Verringerung von R_3 verringert sich der Widerstand der Parallelschaltung von R_3 und R_4 was einen höheren LED-Strom zur Folge hat. Wenn der zulässige Grenzwert überschritten wird, wird die LED zerstört! //

// Auf VERGRÖßERUNG von R_3 achten, sonst ggf. Zerstörung der LED! //



1.3 Stromverteilung in Reihen-/Parallelschaltungen von LED

Aufgabe 1.3a Bauen Sie die Schaltung 1.3a auf dem Steckbrett auf!

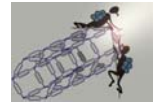


Schaltung 1.3a

Messen Sie die Ströme $I_{LED1/2}$ sowie I_{LED3} bis I_{LED5} und vergleichen Sie die Summe von I_{LED3} bis I_{LED5} mit $I_{LED1/2}$!

Wie wirken sich unterschiedliche Farben der LED auf ihr Leuchtverhalten in dieser Schaltung aus? Welche Folgen könnte ein Kurzschluss der LED1 und LED2 haben?

// Die Summe der Ströme durch die LED3 bis LED5 muss nach dem Knotensatz gleich dem Strom durch die LED1 und LED2 sein. Der Strom durch die LED1 und LED2 ist gleich (Reihenschaltung!) Da LED unterschiedlicher Farben unterschiedliche Flussspannungen haben (materialspezifisch), die Spannung über der LED-Parallelschaltung aber gleich der niedrigsten (z. B. rot, typ. 1,7 V, GaAsP) ist, leuchten andersfarbige in der Parallelschaltung ggf. nicht oder zumindest schwächer (z. B. gelb, AlInGaP, typ. 1,8 V / grün, GaP, typ. 2,2 V / blau, GaInN, 3,5 V). Durch Kurzschluss von LED1 und LED2 liegen 6 V über den LED der Parallelschaltung, womit der zulässige Spannungsbereich der LED von ca. 2 bis 3 V überschritten ist. Das kann zur Zerstörung der LED führen! //



2 Halbleitertechnik – elektrischer Schalter

2.1 Diode

Eine Diode ist ein Zweipol (elektrisches Bauelement mit zwei Anschlußklemmen) und entsteht aus der Zusammenschaltung eines p-Halbleiters und eines n-Halbleiters.

Der *p-Halbleiter* ist dadurch gekennzeichnet, dass die darin enthaltenen *positiven*

Ladungsträger (Löcher,

Defektelektronen) beweglich sind. Die Löcher sind jedoch durch andere Kräfte an den Festkörper gebunden als die Elektronen. Wenn man sie mit einem elektrischen Feld beschleunigt, misst man eine andere träge Masse als bei Elektronen. Es handelt sich daher physikalisch nicht einfach nur um „fehlende Elektronen“, wie häufig zu hören ist.

Der *n-Halbleiter* ist dadurch gekennzeichnet, dass die darin enthaltenen *negativen* *Ladungsträger* (Elektronen) beweglich sind (Abb. 2.1.1).

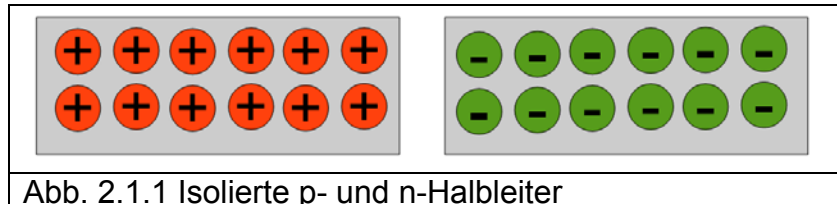


Abb. 2.1.1 Isolierte p- und n-Halbleiter

Zusammenschaltung mit $U = 0V$ und $U < 0$:

Fügt man beide Halbleiter zusammen, so diffundieren an der Kontaktstelle von beiden Seiten freie Ladungsträger in den jeweils anderen Bereich

und heben sich mit den dort vorhandenen Ladungsträgern auf. Man sagt, dass Elektronen und Löcher *rekombinieren*. Es entsteht an der Kontaktstelle Bereich ohne Ladungsträger – die sogenannte Raumladungszone (Abkürzung: _____). Sie enthält nur ortsfeste Ladungsträger (Raumladungen), aber keine beweglichen Ladungsträger (Abb. 2.1.2).

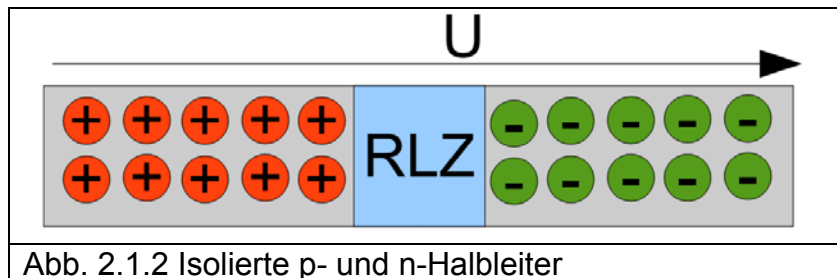


Abb. 2.1.2 Isolierte p- und n-Halbleiter

Da keine _____ Ladungsträger in der Raumladungszone vorhanden sind, ist der pn-Übergang für Spannungen nahe Null

☐ sehr gut leitfähig

☐ nicht leitfähig

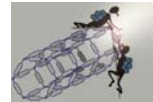
Auch für Spannungen kleiner Null ist die Diode nicht leitfähig.

Zusammenschaltung mit $U > 0V$

Für $U > 0$ wird die Raumladungszone aufgrund der elektrischen Feldkräfte, die auf die Ladungen einwirken

☐ zunehmend kleiner

☐ zunehmend größer



Der Halbleiter wird dadurch zunehmend

_____ leitfähiger/weniger leitfähig, und der Strom steigt näherungsweise exponentiell mit der Spannung an.

Ab einer Spannung von typischerweise $U_F = 0,7V$ für Siliziumdioden bzw. $0,4V$ für Schottkydioden ist die Diode vollständig leitfähig.

Näherungsweise lässt sich eine Siliziumdiode entsprechend der nebenstehenden Kennlinie folgendermaßen beschreiben (Abb. 2.1.3):

Sperrt die Diode, so ist der Strom gleich Null. Die Spannung wird durch das umgebende Netzwerk definiert.

Leitet die Diode, so ist die Spannung näherungsweise gleich $0,7V$. Der Strom wird durch das restliche Netzwerk definiert.

Eine Siliziumdiode ist demzufolge eine Art **Ventil für elektrische Ströme** (Abb. 2.1.4 und 2.1.5), das eine Vorspannung von $0,7V$ benötigt.

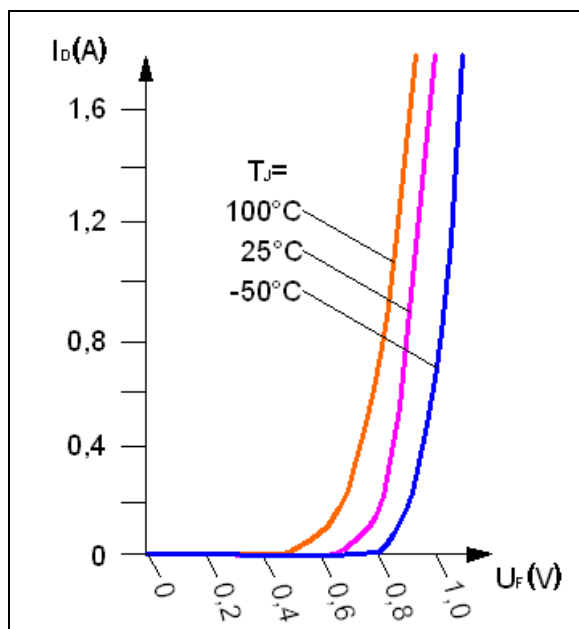


Abb. 2.1.3 Typische Kennlinie einer Siliziumdiode. Die Diode leitet ab einer Spannung von ungefähr $0,7V$ den Strom nahezu komplett.

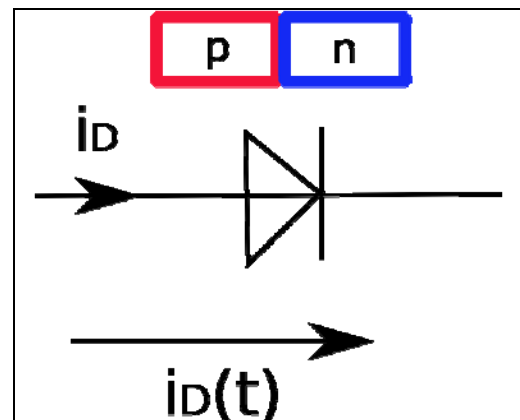


Abb. 2.1.4 Bezugspfeilrichtung und Dotierungsprofil bei einer Halbleiterdiode.

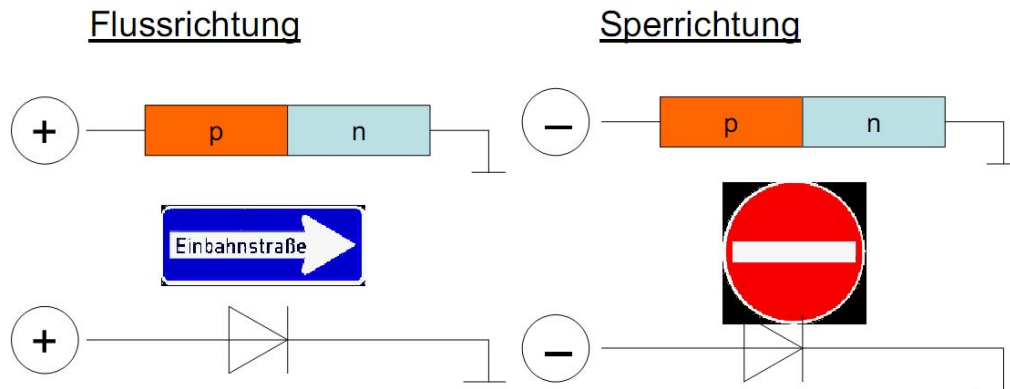
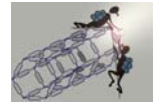
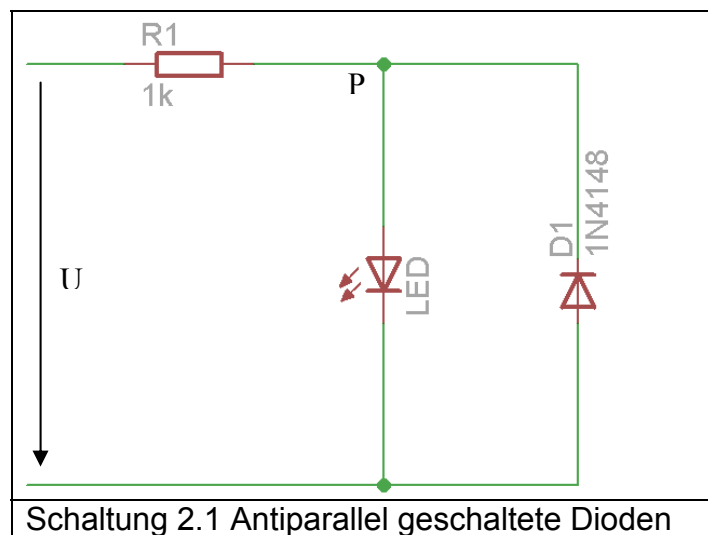


Abb. 2.1.5 Diode als Ventil für elektrische Ströme

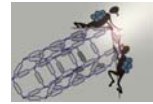
Aufgabe 2.1a

Bauen Sie folgende Schaltung mit einer Siliziumdiode D1 auf dem Steckbrett auf!



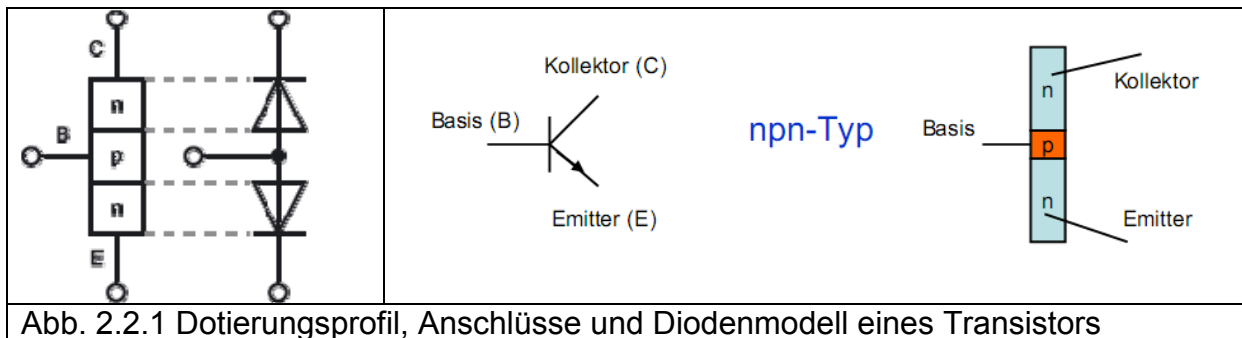
Welche Spannung messen Sie am Knotenpunkt P für $U=6V$?
Durch welche Diode fließt der Strom?
Welche Spannung messen Sie am Knotenpunkt P für $U= - 6V$?
Durch welche Diode fließt der Strom nun?
Weshalb unterscheiden sich beide Spannungen?
Überlegen Sie, welche Funktion die Diode D1 hat! (Eine derartige antiparallele Diode befindet sich in jedem Optokoppler!)

// - Die Spannung beträgt ungefähr 1,8V...2,2V (Flußspannung einer LED). Der Strom fließt ausschließlich durch die LED.
- Die Spannung beträgt ungefähr -0,7V (Flußspannung 0,7V einer Siliziumdiode). Der Strom fließt ausschließlich durch die Siliziumdiode.
- Die Spannungen unterscheiden sich, weil die Spannungsquelle herumgedreht wurde und die Flußspannungen beider Dioden unterschiedlich groß sind.
- Die Schaltung dient als Verpolungsschutz für die LED. LED vertragen im Vergleich zu Standarddioden nur sehr geringe Sperrspannungen. Die Siliziumdiode verhindert, dass die Sperrspannung der LED auf Werte von mehr als 0,7V steigt. //



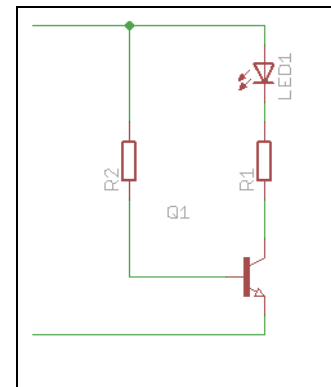
2.2 Bipolartransistor

Bipolartransistoren weisen ein Dotierungsprofil auf, das dem zweier antiparallel in Serie geschalteter Dioden gleicht (Abb. 2.2.1).



Aufgabe 2.2a

Legen Sie zwischen Kollektor und Emitter eines Transistors eine Spannung von +6V und -6V an und vergewissern Sie sich, dass kein Strom fließt. Wie können Sie sich das mit dem Diodenmodell erklären? Weisen Sie durch geeignete Untersuchungen die Dioden-Eigenschaften der Basis-Emitter und Basis-Kollektor-Diode nach. Können Sie die Diodeneigenschaft auch mit einem Multimeter nachweisen?



Schaltung 2.2a

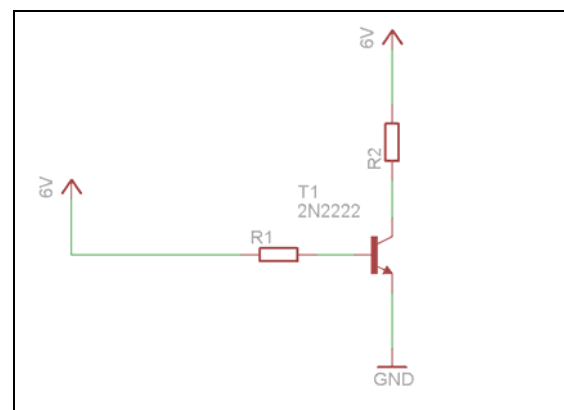
Wählen Sie mit der nebenstehenden Schaltung $R1=R2=1k\Omega$. Schließen Sie $R2$ zuletzt an? Was passiert beim Anschließen?

- //- Die Erklärung im Diodenmodell lautet, dass jeweils eine der beiden Dioden sperrt.
- Legen Sie über einen Vorwiderstand von ungefähr $1k\Omega$ eine Spannung an die zu untersuchende im Transistor enthaltene Diode. Sie erhalten je nach Polarität eine Spannung von 0,7V oder 6V.
- Das Multimeter verwendet zur Widerstandsmessung eine Stromquelle von größenordnungsmäßig 1mA. Es zeigt bei der Messung einer Diodenkennlinie in Flussrichtung die zugehörige Flußspannung (evtl. skaliert) an. In Durchlassrichtung zeigt es den Widerstand unendlich an.
- Die LED leuchtet nach dem Anschließen von $R2$!//

Verwendung als Schalter (Schaltung 2.2b)

Zur Verwendung als Schalter legen Sie an den **Kollektor 6V** und an den **Emitter 0V**. Das ermöglicht prinzipiell einen Stromfluß vom Kollektor zum Emitter, der von der Spannungsquelle am Kollektor gespeist wird.

Über den Basisstrom (R_1 als Potentiometer oder mit Schalter) können Sie anschließend den Kollektorstrom steuern. Die Zusammenhänge verhalten sich dabei qualitativ so wie in dem Wasserschachtmodell gezeigt (Abb. 2.2.2).



Schaltung 2.2b

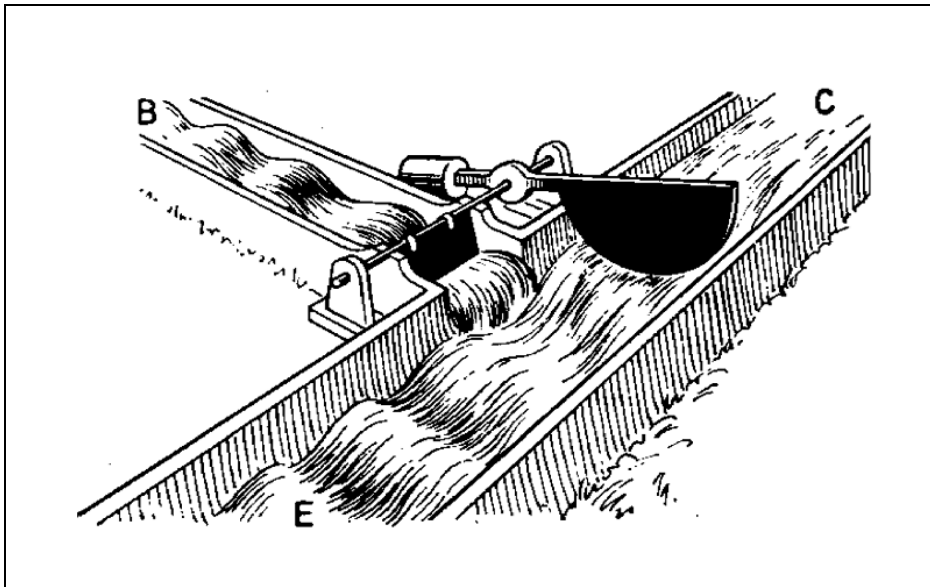
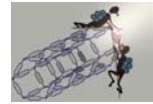


Abb. 2.2.2 Wasserschachtmodell

Solange der Kollektorstrom noch nicht gesättigt ist, d. h. die 6V Quelle noch dazu in der Lage ist, den Kollektorstrom zu vergrößern, beträgt der Kollektorstrom stets ein Vielfaches des Basisstroms, und für den Stromverstärkungsfaktor gilt

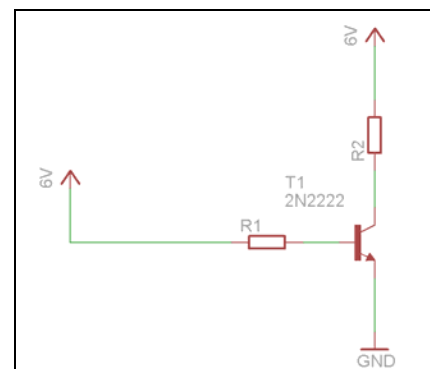
$$B = \frac{I_C}{I_B} \approx 30 \dots 300$$

Sie erreichen es über das dargestellte Prinzip, dass Sie mithilfe des typischerweise sehr kleinen Basisstroms einen großen Kollektorstrom steuern können.

Der Übergang von der Basis zum Emitter verhält sich bei einem Transistor wie eine normale Silizium-Diode, d. h. bei Stromfluss beträgt die Basis-Emitter-Spannung ungefähr 0,7V.

Aufgabe 2.2b

Ermitteln Sie mit der Schaltung 2.2c den Stromverstärkungsfaktor des von Ihnen verwendeten Transistors. Wählen Sie $R_1 = 300\text{k}\Omega$ und wählen Sie zunächst $R_2 = 0$ (Drahtbrücke). Berechnen Sie den Basisstrom, und messen Sie den Kollektorstrom.



Schaltung 2.2c

Wiederholen Sie den Versuch mit $R_2 = 330\text{ }\Omega$ und $R_2 = 10\text{ k}\Omega$ und erklären Sie, was sich dabei ändert. Verwenden Sie $R_1 = 1\text{ k}\Omega$, $R_2 = 330\text{ }\Omega$ und messen Sie die minimale Kollektor-Emitter-Spannung. Welches Bauelement wird heiß?

//- Sie begrenzen den Basisstrom über den bekannten Vorwiderstand R_1 und bestimmen seinen Wert über U_{R1}/R_1 . Den Kollektorstrom können Sie mit dem Multimeter messen (Strommessung).

- Es sollte sich ein minimaler Wert der Kollektor-Emitter-Spannung von ungefähr 0,2V ergeben, evtl. auch etwas weniger. Das ist die sogenannte Kollektor-Emitter-Sättigungsspannung. //

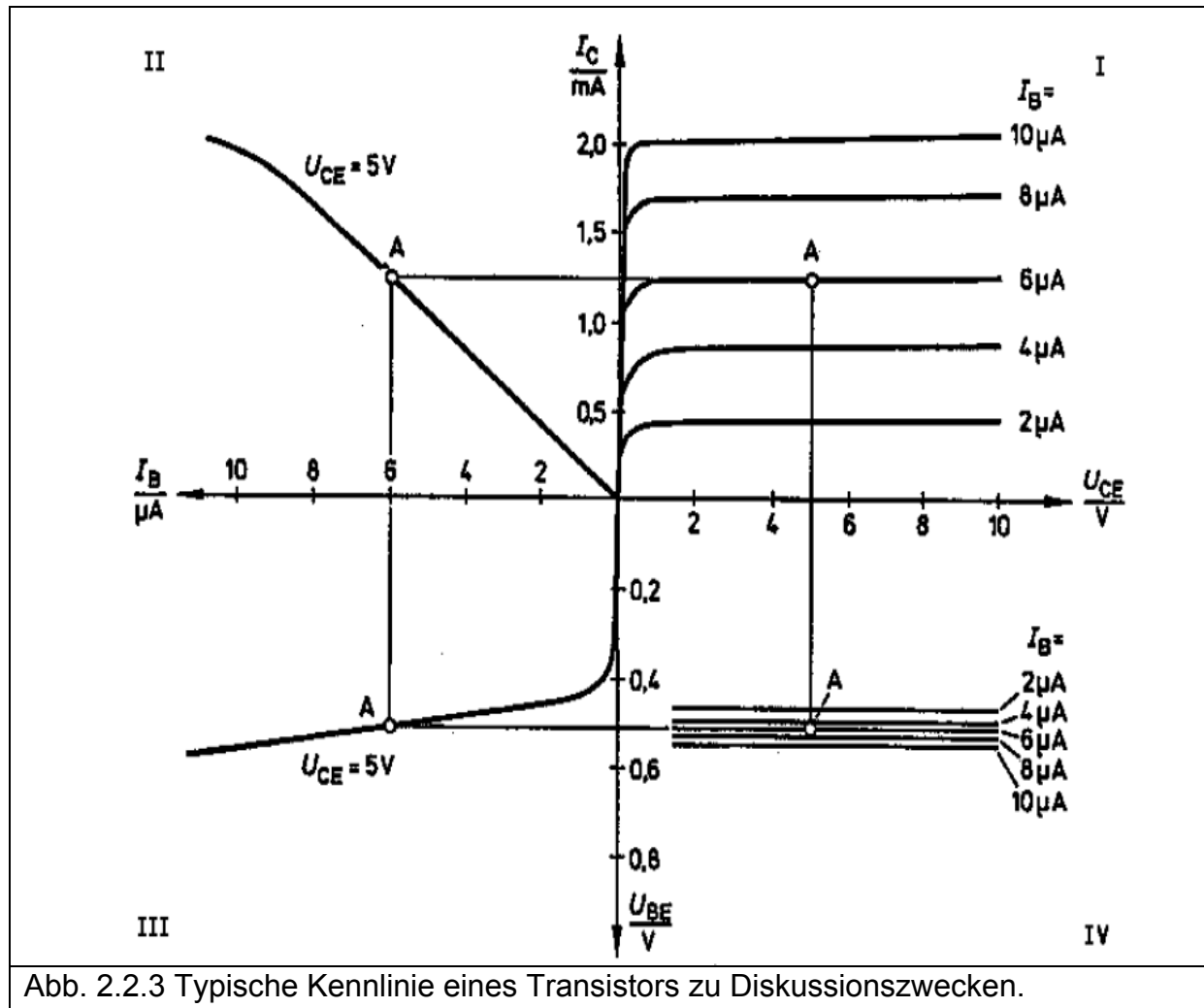
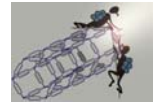
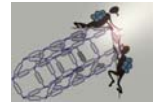


Abb. 2.2.3 Typische Kennlinie eines Transistors zu Diskussionszwecken.



3 Kondensator

Anders als Widerstände, Transistoren oder Dioden, die die aufgenommene elektrische Energie sofort umsetzen, zeichnen sich Kondensatoren und Spulen dadurch aus, daß sie Energie in Form eines elektrischen bzw. magnetischen Feldes zwischenspeichern können.

Wir möchten in diesem Kapitel die energiespeichernde Wirkung der Kondensatoren dazu nutzen, um elektrische Verzögerungsglieder zu bauen. Der Grundgedanke bei den Verzögerungsgliedern besteht in der Überlegung, dass makroskopische physikalische Prozesse, die mit einem Energietransport verbunden sind, erfahrungsgemäß nur mit endlicher Geschwindigkeit ablaufen. Dementsprechend gibt ein Kondensator beim Entladevorgang eine nur endliche Leistung ab und benötigt eine gewisse Zeit, bis er in einer Schaltung geladen oder entladen ist. Die Spannung am Kondensator ist ein direktes Maß für die im Kondensator gespeicherte Energie und kann bei einem Ladevorgang als Maß für die verstrichene Zeit aufgefasst werden.

3.1 Aufbau und Zusammenhang zwischen Strom und Spannung

Im Wesentlichen ist ein Kondensator dadurch gekennzeichnet, dass sich zwei leitfähige Flächen mit einem dazwischenliegenden Material (dem sogenannten Dielektrikum, beispielsweise Kunststoffolie) gegenüberstehen (Abb. 3.1.1). In der Schule haben Sie als Demonstrationsobjekt den sogenannten Plattenkondensator kennengelernt, der in der folgenden Abbildung idealisiert dargestellt wird.

Kapazität

Die kennzeichnende Größe eines Kondensators ist die sogenannte Kapazität C . Die Kapazität sagt aus, wieviel Ladung Q ein Kondensator bei einer gegebenen Spannung U speichert.

$$C = \frac{Q}{U} \quad (\text{Kapazität})$$

In der Form $Q = CU$ lässt sich diese Gleichung mit einer Eselsbrücke (Kuh=Kuh) leicht merken.

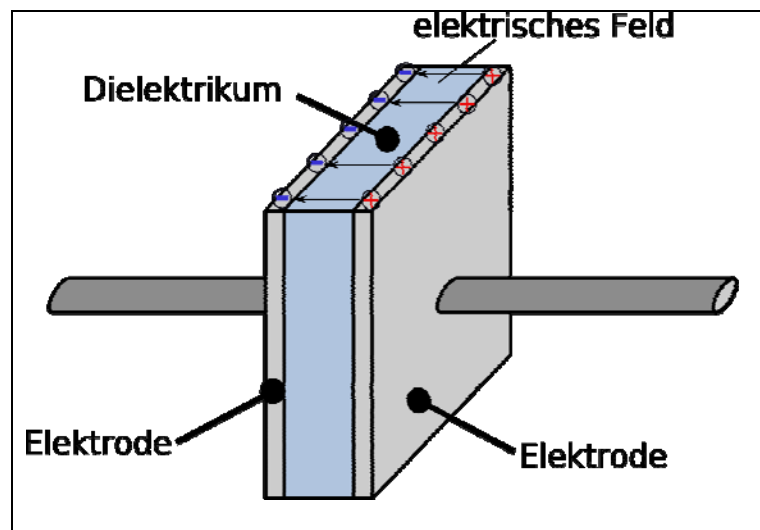
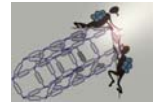


Abb. 3.1.1 Prototyp eines Kondensators: Zwei Flächen mit einem dazwischenliegenden Dielektrikum stehen einander gegenüber – Bild entnommen aus der Wikipedia.

An den Kondensatorplatten stehen einander Ladungsträger mit positiver bzw. negativer Ladung jeweils vom Betrag $|Q|$ gegenüber. Die Ladungen rufen das Feld der elektrischen Verschiebungsdichte (D-Feld) hervor, das in homogenen Materialien



über die Beziehung $D = \epsilon_0 \epsilon_r E$ mit der elektrischen Feldstärke E (E-Feld) in Zusammenhang steht.

Die Kapazität eines Kondensators können Sie in der Regel dem zugehörigen Datenblatt bzw. der Aufschrift entnehmen. Entsprechend der Gleichung $C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d}$

_____ (steigt/fällt) sie mit wachsender Fläche A

_____ (steigt/fällt) sie mit wachsendem Plattenabstand d

_____ (steigt/fällt) sie mit steigender Dielektrizitätskonstante ϵ_r

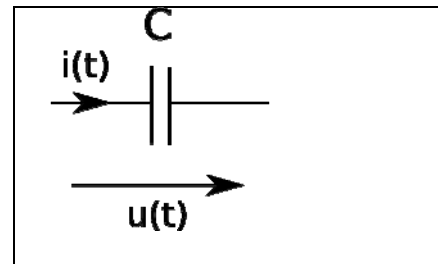


Abb. 3.1.2 Bezugssystem für die verwendeten Kondensatorgleichungen

Strom-Spannungs-Relation

Entscheidend für die Strom-Spannungs-Relation des Kondensators ist die Tatsache, dass die Kapazität C des Kondensators hauptsächlich von dessen Geometrie und nicht von der Menge der auf dem Kondensator gespeicherten Ladung abhängt. Vergrößern Sie die Ladung des Kondensators um eine kleine Menge dQ , so vergrößert sich dadurch ebenfalls die Spannung zwischen den Kondensatorplatten um einen kleinen Betrag dU , und es gilt:

$$dQ = C \cdot dU$$

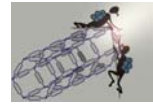
Teilt man diese Gleichung durch die beim Ladungsvorgang verstrichene Zeit dt , so ergibt sich die Differentialgleichung des Kondensators:

$$\frac{dQ}{dt} = C \cdot \frac{dU}{dt}$$

Der erste Term kennzeichnet, wie Sie in der Vorlesung bereits gelernt haben, den elektrischen Strom $i(t)$. Demzufolge ist der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung am Kondensator durch die folgende Gleichung gegeben:

$$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt} \quad (\text{Strom-Spannungs-Relation am Kondensator})$$

Der Strom-Spannungs-Relation liegt ein Bezugspfeilsystem zugrunde, bei der die Spannung über dem Bauelement und der Strom im Bauelement in die gleiche Richtung zeigen (Verbraucherzählpfeilsystem, vgl. Abb. 3.1.2).



Feldenergie

Im „Normalzustand“ ist ein Kondensator ungeladen. Die Ladungen müssen unter Krafteinwirkung voneinander getrennt werden. Dazu verwendet man in der Regel eine Stromquelle bzw. eine Gleichspannungsquelle/Batterie und einen in Serie geschalteten Widerstand. Der Widerstand dient der Strombegrenzung und verhindert, dass im Einschaltmoment eine (theoretisch) unendlich hohe Leistung von der Spannungsquelle zum Kondensator fließt.

Die bei der Ladungstrennung beispielsweise von einer Batterie aufgebrauchte Energie wird in zwei gleiche Teile aufgeteilt. Die Hälfte der Energie wird in Form von Feldenergie im Dielektrikum zwischen beiden Kondensatorplatten gespeichert. Die andere Hälfte wird während des Ladevorgangs im zugehörigen Widerstand in Wärme umgesetzt und steht anschließend im Stromkreis nicht mehr zur Verfügung.

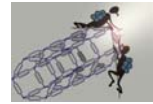
Die Feldenergie im Dielektrikum des Kondensators hängt entsprechend der Gleichung

$$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 \quad (\text{Feldenergie des Kondensators})$$

quadratisch mit der am Kondensator anliegenden Spannung zusammen. Die Bewegungsenergie der Ladungsträger sowie die magnetische Energie, die durch den Stromfluss zustande kommt, werden bei idealtypischer Betrachtung im Allgemeinen vernachlässigt.

Wichtige Eigenschaften von Kondensator und Spule

	Spule	Kondensator
Kennzeichnende elektrische Größe	Induktivität L	Kapazität C
hängt ab von ...	Geometrie und Material des Kerns, Größe, Wicklungszahl	Geometrie und Material des Dielektrikums, Flächeninhalt der sich gegenüberstehenden Flächen, Plattenabstand
Ort der Energie	magnetisches Feld im Spulenkern und in der Luft	elektrisches Feld zwischen den Kondensatorplatten (d. h. im Dielektrikum)
Energie kennzeichnende Größe	Strom I	Spannung U
Energieinhalt des Bauelements	$W = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2$	$W = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2$
Bauelementgleichung	$u(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt}$	$i(t) = C \cdot \frac{du(t)}{dt}$



// Fragen zur Selbstkontrolle: Kreuzen Sie die korrekten Aussagen an!

Eine hohe Spannung am Kondensator verursacht:

- ☐ ein starkes elektrisches Feld
- ☐ eine große gespeicherte Energie

Wenn man in einem Kondensator das Dielektrikum austauscht (Geometrie und Ladung bleiben gleich):

- ☐ so ändert sich das D-Feld
- ☐ so ändert sich das E-Feld

Der Lade- bzw. Entladevorgang an einem Kondensator:

- ☐ verläuft umso schneller, je größer der Ladestrom ist
- ☐ verläuft umso langsamer, je größer der Ladestrom ist

Die Energie im Kondensator hängt ab:

- ☐ von dem Momentanwert des Ladestromes (Bewegungsenergie der Ladungsträger)
- ☐ vom Momentanwert der Spannung am Kondensator (potentielle Energie der Ladungen im elektrischen Feld)

Wenn Sie einen Kondensator bei konstanter Ladung betreiben (Klemmen offen) und die Platten einander annähern, so

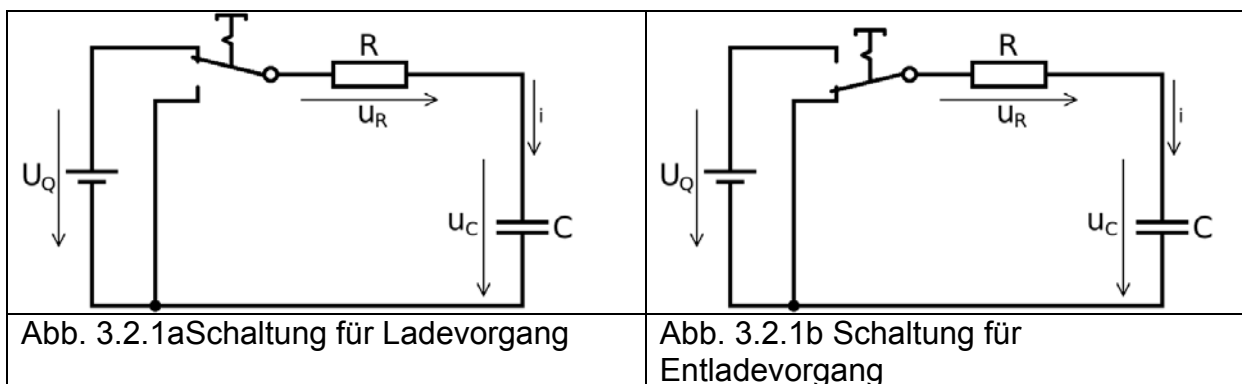
- ☐ vergrößert sich die Kapazität
- ☐ verkleinert sich die Spannung

Bei der Verdopplung der elektrischen Spannung am Kondensator

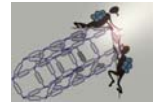
- ☐ verdoppelt sich die elektrische Feldenergie
- ☐ vervierfacht sich die elektrische Feldenergie
- ☐ die elektrische Feldenergie bleibt konstant, da Energie vom D-Feld ins E-Feld übergeht //

3.2 Ladekurve

Bei den Versuchen nutzen Sie im Wesentlichen die Ladekurve eines RC-Gliedes. Beim Einschalten (Abb. 3.1.2a) stellt sich die Spannung $U_C = U_Q = 6V$ am Kondensator erst nach einer gewissen Zeitverzögerung – theoretisch erst nach unendlicher Zeit – ein, da die Ladungen erst auf den Kondensator gelangen müssen.



Entsprechend entlädt sich der Kondensator nach dem Ausschalten (Abb. 3.2.1b) auch erst zeitverzögert, nachdem man die Eingangsspannung auf $U_Q = 0V$ reduziert.



Die wesentliche Größe, die die erforderliche Lade- bzw. Entladezeit des Kondensators beschreibt, ist das Produkt aus Widerstand R und Kapazität C , die sogenannte Zeitkonstante:

$$\tau = RC$$

Der Kondensator lädt und entlädt sich nach einer Exponentialfunktion, wobei der Ladevorgang jeweils nach einer Zeit von $t = 5 \cdot \tau$ zu mehr als 99% abgeschlossen ist (Abb. 3.2.2).

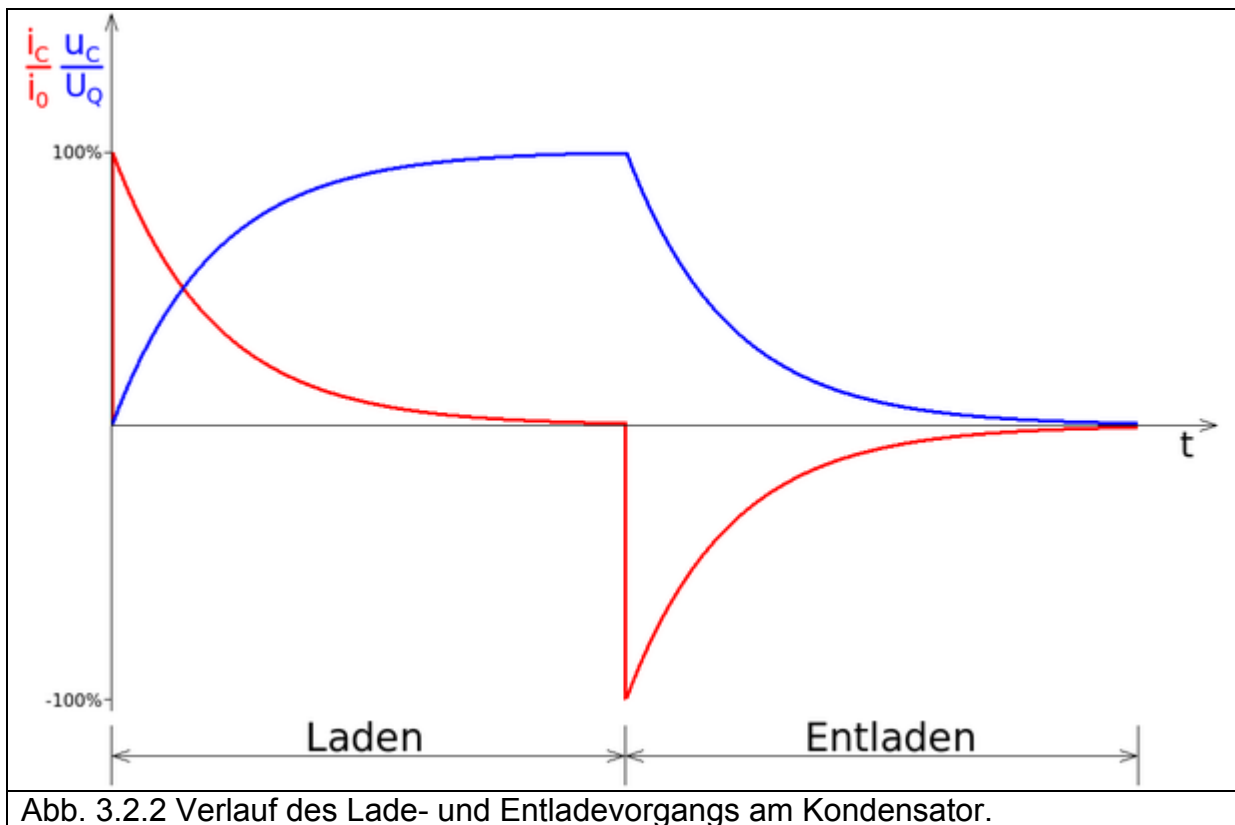
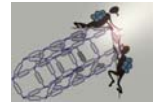


Abb. 3.2.2 Verlauf des Lade- und Entladevorgangs am Kondensator.

Zur Erhöhung der Zeitkonstante (d. h. zur Verlangsamung des Lade- bzw. Entladevorgangs) können Sie entweder die Kapazität oder den Widerstand vergrößern. Wenn Sie Kapazitäten vergrößern wollen, können Sie mehrere Kondensatoren parallel schalten (Abb. 3.2.3).



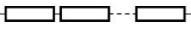
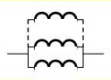
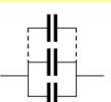
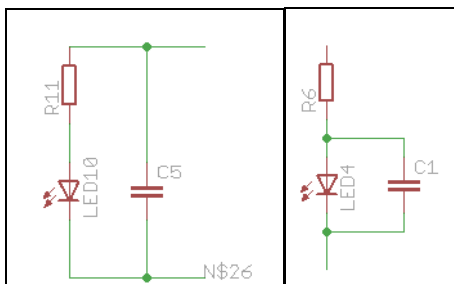
	Reihenschaltung	Parallelschaltung
Ohmscher Widerstand	 $R = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	 $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$
Induktivität	 $L = L_1 + L_2 + \dots + L_n$	 $\frac{1}{L} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \dots + \frac{1}{L_n}$
Kapazität	 $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	 $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$

Abb. 3.2.2 Reihen- und Parallelschaltungen im Vergleich

3.3 Nutzung der Kondensator-Ladekurve

Eine Ladekurve können Sie beispielsweise für die Ein- und Ausschaltverzögerung bei einem Treppenlicht verwenden. In Kapitel 4 verwenden Sie sie zur Realisierung einer Blinkschaltung.

Aufgabe 3.3a Vergleichen Sie die nachfolgenden Schaltungen (3.3.1 und 3.3.2). An die obere und untere Klemme schalten Sie jeweils die Batterie mit 6V. Welche Unterschiede ergeben sich beim Ein- bzw. Ausschalten?
Messen Sie die jeweilige Zeitverzögerung mit einer Stoppuhr. Vergrößern Sie anschließend die Kapazität, indem Sie einen zweiten gleichartigen Kondensator parallel schalten. Wie verändert sich die Zeitverzögerung?



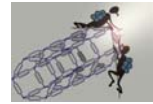
Schaltung 3.3.1

Schaltung 3.3.2

//Mögliche Werte: $C5 = 100 \dots 1000 \mu F$, $R11 = 1 \dots 10 k$; $R6 = 10 k \dots 100 k$; $C1 = 100 \mu F \dots 1000 \mu F$

Aufgabe 3.3b Entwickeln Sie eine Schaltung mit Einschaltverzögerung, die einen Transistor verwendet!

// Statt der LED verwenden Sie hier die Basis-Emitter-Diode des Transistors! //



4 Kippstufen

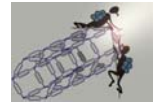
4.1 Einleitung

Kippstufen oder Multivibratoren werden durch Zusammenschaltung von zwei Transistorschaltstufen über unterschiedliche Koppellemente realisiert. Dabei wirkt der Ausgang des der einen Schaltstufe auf den Eingang der jeweils anderen. Man unterscheidet bistabile, monostabile und astabile Kippstufen.

Bistabile Kippstufen besitzen zwei stabile Zustände (eine Schaltstufe im EIN-Zustand, die jeweils andere im AUS-Zustand). Als Koppellemente werden Ohmsche Widerstände eingesetzt. Durch Schaltsignale an den Eingängen der beiden Schaltstufen kann der Schaltzustand gewechselt werden. Bistabile Kippstufen werden u. a. zur Entprellung von mechanischen Schaltern bzw. Tastern (Vermeidung von Mehrfachschaltvorgängen durch federnde Schaltkontakte bei einfacher Betätigung) sowie als Frequenzteiler 2:1 bei geeigneter Eingangsbeschaltung verwendet.

Monostabile Kippstufen wechseln den EIN-AUS-Zustand durch ein entsprechendes Schaltsignal am Eingang einer Schaltstufe. Nach einer bestimmten Zeit fällt die monostabile Kippstufe aber selbstständig in den Ausgangszustand zurück. Sie erzeugt damit einen Schaltimpuls definierter Länge. Die Koppellemente bestehen bei der einen Schaltstufe aus einem Ohmschen Widerstand, bei der anderen aus einem Kondensator und einem Ohmschen Widerstand. Monostabile Kippstufen werden als Einzelimpulsgenerator, zur Ein- und Ausschaltverzögerung (Zeitschalter) usw. eingesetzt.

Wenn als Koppellemente jeweils ein Kondensator und ein Ohmscher Widerstand verwendet werden, zeigt die Kippstufe astabiles Verhalten (*astabile Kippstufe*). Durch andauernde Umladung der Koppelkondensatoren erfolgt ein ständiger Wechsel zwischen den EIN-AUS-Schaltzuständen der Schaltstufen, so dass am Ausgang eine fortlaufende Folge von Impulsen entsteht. Durch entsprechende Dimensionierung können Impulsfolgen unterschiedlicher Wiederholraten und EIN-AUS-Dauern (Tastverhältnis) generiert werden. Der astabile Multivibrator kommt als Impuls- bzw. Taktgenerator, als optischer Blinkgeber und akustischer Signalgenerator zum Einsatz.



4.2 bistabile Kippstufe

Als bistabile Kippstufe wird die Zusammenschaltung von zwei Transistorschaltstufen (vgl. 3.) bezeichnet. Dabei wird über einen Ohmschen Widerstand der Ausgang einer Schaltstufe jeweils mit dem Eingang der anderen verbunden. Das Ausgangssignal wird am Kollektor des Transistors der Schaltstufe abgenommen, der Eingang an der Basis. Die beiden Ausgangssignale an den Schaltstufen weisen entgegengesetzte Schaltzustände auf.

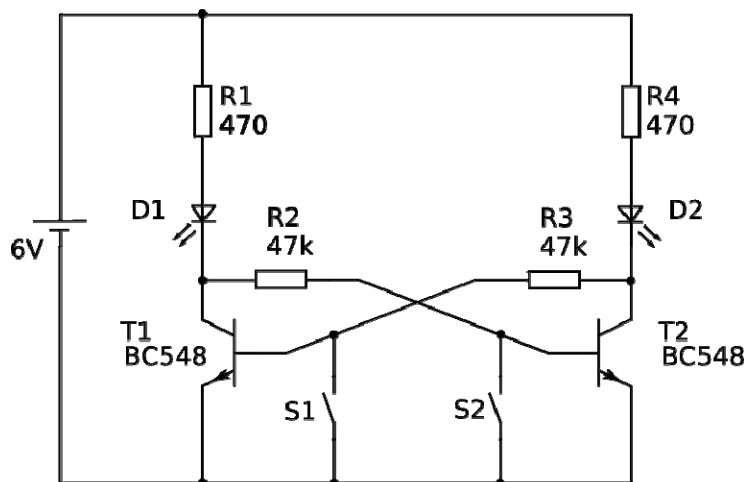
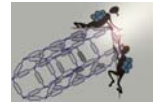


Abb. 4.2 Bistabile Kippstufe

Schaltbild einer bistabilen Kippstufe mit zwei LED mit Vorwiderstand als geschaltete Verbraucher. Wechsel des Schaltzustands durch Betätigung von S1 bzw. S2

In Abb. 4.2 ist das Schaltbild einer bistabilen Kippstufe mit einer geeigneten Dimensionierung der Bauelemente angegeben. Als Bezugspotential wird Minus der Spannungsquelle angenommen.

Nach Anlegen der Betriebsspannung ist ein Transistor durchgeschaltet, der andere sperrt (welcher durchgesteuert ist bzw. sperrt, ist von Bauelementetoleranzen abhängig). Unter der Annahme, dass T2 durchgesteuert ist (LED D2 leuchtet), liegt der Ausgang dieser Schaltstufe auf niedrigem Potential (Minuspole der Spannungsquelle, abgesehen von einer geringen Restspannung). Dieses wird über R3 an den Eingang der anderen Schaltstufe gelegt (Basis T1), was zum Sperren dieses Transistors führt (LED D1 leuchtet nicht). Durch Drücken des Tasters S2 wird die Basis von T2 auf niedriges Potential (Minuspole der Spannungsquelle) gezogen, was zum Sperren des Transistors T2 führt, das Potential des Kollektors steigt (LED D2 verlischt). Über R3 steigt auch das Potential an der Basis von T1, während das Kollektorpotential sinkt (LED D1 leuchtet). Das niedrige Kollektorpotential wird über R2 zur Basis des ohnehin gesperrten Transistors T2 zurückgeführt. Der Umschaltvorgang geht dabei sehr schnell vor sich. Ein erneutes Umschalten ist nun durch Betätigung des Schalters S1 möglich, der beschriebene Umschaltvorgang geht dann von T1 aus. Eine mehrfache Betätigung eines Schalters führt zu keinem Wechsel des Schaltzustands (Entprellfunktion, siehe Einleitung). R1 und R4 bilden einerseits die Vorwiderstände für D1 und D2 und mit diesen zusammen die



geschalteten Verbraucher. Praktisch können hier auch andere Verbraucher angeschaltet werden, z. B. Elektromotore, Relais, Schaltmagnete o. ä. Bei induktiven Verbrauchern sind dann noch geeignete schaltungstechnische Maßnahmen zur Unterdrückung hoher Induktionsspannungen, die durch den Schaltvorgang entstehen können, nötig (ggf. Zerstörung der Transistoren).

Aufgabe 4.2.1a Bauen Sie die Schaltung auf dem Steckbrett auf!
Messen Sie mit dem Voltmeter die Spannungen an den Basis- und Kollektoranschlüssen! Vergleichen Sie die Werte!

// Die Kollektorspannung eines durchgesteuerten Transistors liegt nahe beim Bezugs-potential. Es ist nur die Kollektorrestspannung messbar, ca. 0,2 V. Die entsprechende Basisspannung beträgt dann ca. 0,8 V. Beim gesperrten Transistor liegt die Basis auf Bezugspotential, während am Kollektor etwa die Betriebsspannung anliegt (etwas geringer durch Spannungsabfall an Last durch Restströme des gesperrten Transistors). Unterschiede zwischen beiden Schaltstufen durch Bauelementetoleranzen bzw. schwankende Betriebsbedingungen. //

Aufgabe 4.2.1b Berechnen Sie den Strom, der durch die leuchtende LED fließt!
Messen Sie den Strom und vergleichen Sie den berechneten mit dem gemessenen Wert. Wie lassen sich evtl. Abweichungen erklären?

// Betriebsspannung minus gemessener Kollektor- (rest-) Spannung, geteilt durch LED-Vorwiderstand.
Abweichungen z. B. durch Toleranz des Widerstands. //

Aufgabe 4.2.2 Betätigen Sie den Taster an der Basis des Transistors, an dessen Kollektor die leuchtende LED angeschlossen ist, beobachten Sie dabei das Verhalten der LED!

// LED verlöscht, andere LED leuchtet //

Messen Sie mit dem Voltmeter die Spannungen an den Basis- und Kollektoranschlüssen erneut! Vergleichen Sie die Werte mit dem Ausgangsschaltzustand!

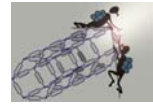
// Umgekehrte Verhältnisse, da Schaltzustand der Transistoren gewechselt. //

Betätigen Sie denselben Taster mehrfach hintereinander und überlegen Sie, warum sich der Schaltzustand nicht ändert!

// Kein Umschalten, da durch Taster Transistor sperren soll, der bereits sperrt. //
// Verweis auf Tastenentprellung. //

Aufgabe 4.2.3 Betätigen Sie die Taster abwechselnd, messen Sie jeweils die Spannungen an den Kollektoren der Transistoren und zeichnen Sie ein Diagramm des zeitlichen Verlaufs der Kollektorspannungen über den Tastzeitpunkten auf. Vergleichen Sie die zeitlichen Verhältnisse!

// Gleiches Potential der Kollektorspannung bei jedem zweiten Tastendruck (über beide Taster gesehen). → „Frequenzteiler“ //
// Erläuterung der Verwendung als Speicherelement bzw. Zähler in der Digitaltechnik. → (R/S-) Flip-Flop //



4.3 monostabile Kippstufe

Im Gegensatz zur bistabilen Kippstufe bestehen die Koppelglieder der beiden Schaltstufen der monostabilen Kippstufe aus einem Ohmschen Widerstand (R14) sowie einem Ohmschen Widerstand (R12) und einem Kondensator (C5). Das entsprechende Schaltbild zeigt das untenstehende Bild. Als Bezugspotential wird wiederum der Minuspol der Betriebsspannungsquelle angenommen.

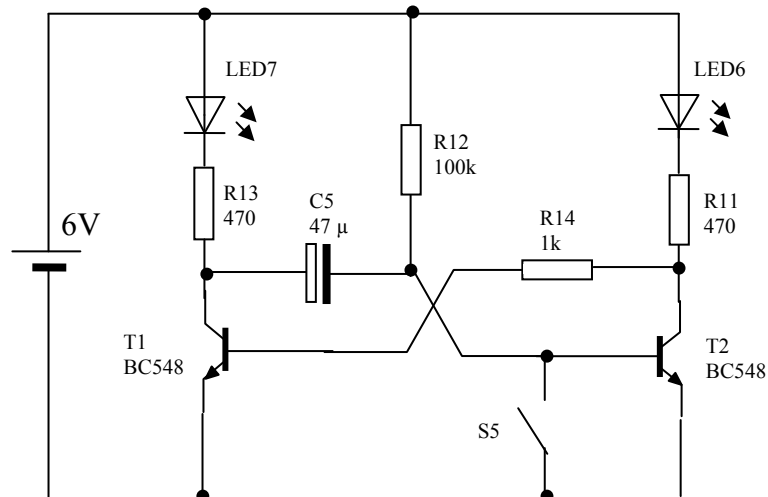
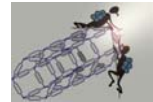


Abb. 4.3 Schaltbild einer monostabilen Kippstufe mit zwei LED mit Vorwiderstand als geschaltete Verbraucher. Auslösen eines Schaltvorgangs durch Betätigung von S5

Nach Anlegen der Betriebsspannung ist T2 durchgesteuert (LED LED6 leuchtet). Über R14 wird das niedrige Potential an die Basis von T1 geführt, der dadurch sperrt (der Kollektor von T1 liegt auf hohem Potential). Über R13 und die in Durchlassrichtung befindliche Basis-Emitter-Strecke von T2 wird C5 aufgeladen. Bei Betätigung von S5 nimmt die Basis von T2 niedriges Potential an, T2 sperrt, der Kollektor von T2 erhält positives Potential. Dieses gelangt über R14 an die Basis von T1, der dadurch durchgesteuert wird. Über R12 erfolgt nun eine Umladung von C5, das Potential an der Basis von T2 steigt, bis T2 wieder durchsteuert, der Kollektor wieder zu niedrigem Potential zurückkehrt und damit über R14 T1 wieder sperrt. Die Dauer des Umladevorgangs und damit die Umschaltdauer hängen von C5 und R12 ab. Ein weiterer Schaltzyklus kann durch erneute Betätigung von S5 ausgelöst werden.

Die Ausgangssignale an den Kollektoren sind in der Polarität entgegengesetzt.



Aufgabe 4.3.1 Bauen Sie die Schaltung auf dem Steckbrett auf!
(siehe Abb. 4.3.1)

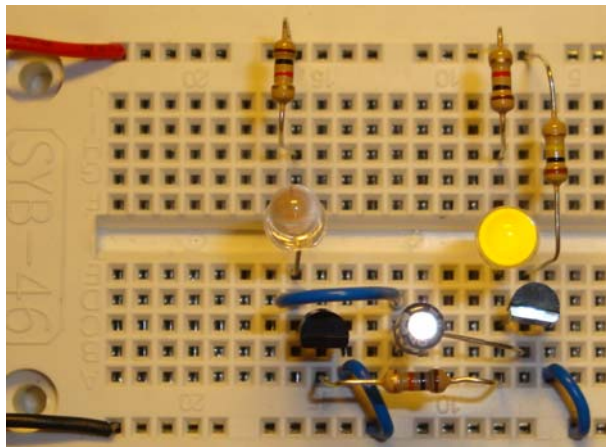


Abb. 4.3.1 Aufbau der monostabilen Kippstufe auf dem Steckbrett

Messen Sie mit dem Voltmeter die Spannungen an den Basis- und Kollektoranschlüssen! Vergleichen Sie die Werte!

// Siehe bistabile Kippschaltung. //

Aufgabe 4.3.2 Betätigen Sie (kurz) den Taster an der Basis des Transistors, an dessen Kollektor die leuchtende LED angeschlossen ist, beobachten Sie dabei das Verhalten der LEDs und messen Sie mit dem Voltmeter die Spannungen an den Basis- und Kollektoranschlüssen!

// Die Zustände kippen nach Wechsel durch Tastendruck (leuchtende LED wechselt) nach gewisser Zeit in den Ausgangszustand zurück. //

Halten Sie den Taster gedrückt! Wie ist das Verhalten der LEDs zu erklären!

// Die Kippschaltung kehrt nicht in den Ausgangszustand zurück, da durch die gedrückte Taste der Umladevorgang verhindert wird. //

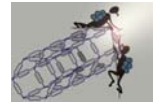
Aufgabe 4.2.3 Verändern Sie den Widerstand R12 bzw. den Kondensator C5 und lösen Sie durch kurze Tasterbetätigung einen Umschaltvorgang aus! Wie hat sich das Leuchtverhalten der LEDs verändert?

// Bei Vergrößerung der resultierenden Zeitkonstante $\tau = R12 \cdot C5$ hält der Zustandswechsel nach Tastenbetätigung länger an, bei Verkleinerung verkürzt sich der Zustandswechsel. //

// R12 darf nicht so groß werden, dass T2 nicht mehr durchgesteuert wird. //

Messen Sie für verschiedene Werte von R bzw. C die Leuchtdauer der nach Tastenbetätigung leuchtenden LED! Ermitteln Sie den Zusammenhang zwischen der Zeitkonstante $\tau = R12 \cdot C5$ und der LED-Leuchtdauer!

// $t_{\text{Leucht}} \approx 0,7 \cdot R12 \cdot C5$ //



4.4 astabile Kippstufe

Bei der in Abb. 4.4 dargestellten astabilen Kippstufe sind wiederum zwei Transistorschaltstufen über Koppellemente zusammengeschaltet, wobei beide Koppellemente aus je einem Ohmschen Widerstand und einem Kondensator (R2, C1 bzw. R3, C2) bestehen. Als Bezugspotential wird wie bei der bistabilen und monostabilen Kippstufe der Minuspol der Betriebsspannungsquelle angenommen. In Abhängigkeit von Bauelementetoleranzen ist beim Zuschalten der Betriebsspannung zunächst der Transistor einer Schaltstufe durchgesteuert. In der Schaltung soll das T2 sein. Der Kollektor von T2 liegt auf niedrigem Potential, das über C2 der Basis von T1 zugeführt wird und zum Sperren von T1 führt. C2 wird nun über R3 und die durchgeschaltete Kollektor-Emitterstrecke von T2 umgeladen, womit die Basis von T1 positiver wird und zum Durchschalten von T1 führt.

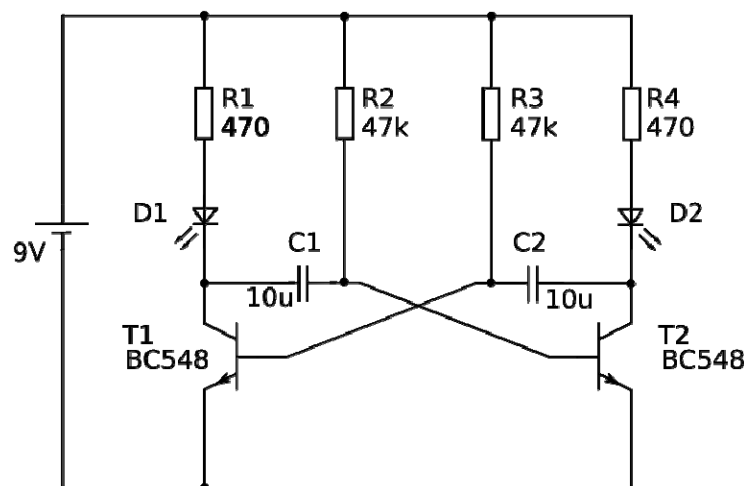


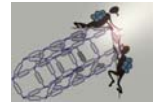
Abb. 4.4 Schaltbild einer astabilen Kippstufe mit zwei LED mit Vorwiderstand zur Anzeige der Schaltzustände

Das damit niedrige Kollektorpotential von T1 führt über C1 zum Sperren von T2. Der bisher über R1 und die leitende Basis-Emitter-Strecke von T2 aufgeladene Kondensator C1 wird nun über R2 umgeladen was zum erneuten Durchsteuern von T2 und Sperren von T1 über C2 führt, womit der beschriebene Zyklus erneut abläuft. In Abhängigkeit von den Werten der Koppelglieder können unterschiedliche Einschaltzeiten von T1 und T2 (auch unterschiedliche) realisiert werden. Die Ausgangssignale an den Kollektoren sind in der Polarität entgegengesetzt. Die Signalform ist annähernd rechteckförmig, d. h. der Umschaltvorgang selbst läuft sehr schnell ab. Voraussetzung sind wesentlich kürzere Aufladezeitkonstanten $\tau_1 = R1 \cdot C1$ bzw. $\tau_2 = R4 \cdot C2$ als Umladezeitkonstanten $\tau_3 = R2 \cdot C1$ bzw. $\tau_4 = R3 \cdot C2$.

Aufgabe 4.1

Bauen Sie die Schaltung auf dem Steckbrett auf!
Messen Sie mit dem Voltmeter die Spannungen an den Basis- und Kollektoranschlüssen! Vergleichen Sie die Werte!

// Ständiger Wechsel der Zustände nach gewisser Zeit. //



Aufgabe 4.2

Probieren Sie verschiedene und auch unterschiedliche Werte für C_1 und C_2 bzw. R_2 und R_3 . Messen Sie die Leuchtdauern bzw. schätzen Sie die Veränderung der Leuchtdauern der LED in Abhängigkeit von den veränderten Bauelementen.

// Bei gleicher Veränderung der Umladezeitkonstanten (gleichmäßige) Veränderung der Umschaltzeit (größere Zeitkonstanten $\rightarrow$ längere Umschaltzeiten), bei verschiedenen Umladezeitkonstanten entsprechend unsymmetrische Umschaltzeiten. //

// Zeitkonstanten so wählen, dass Funktion als Blinkschaltung und als Impulsgenerator im hörbaren Bereich erkennbar ist. Verweis auf Impulsgeber für Pulsbreitensteuerung. //

5 Zusatzaufgaben

zu 4.:

// Veränderung der Verbraucher (LED) an den Kippstufen: z. B. über Leistungsschaltstufe Lautsprecher am astabilen Multivibrator (Impulsrate im hörbaren Bereich wählen! //

// Taster bzw. Schalter durch Fotowiderstand o. a. lichtempfindliches Element ersetzen //

// Verwendung als Ansteuerung für Pulsbreitensteuerung (1 Umladezeitkonstante über Potentiometer), nachfolgende Schaltstufe. //

// Arbeit mit dem Oszillographen (z. B. für Einfluss Lade- und Umladezeitkonstanten beim astabilen Multivibrator auf die Signalform) //