PHYSIKALISCHES SCHULVERSUCHSPRAKTIKUM WS 2002/03

Schülerversuche Elektronik (7. Klasse AHS)

Versuche am: 17. Oktober 2002
24. Oktober 2002

Lindenbauer Edith 0055478

Ennsdorf am 29. Oktober 2002
korrigiert am: 15. November 2002

Inhaltsverzeichnis

1) Aufgabenstellung *3*

2) Physikalisches Grundwissen *3*

3) Theoretischer Hintergrund / Erklärung *4*

4) Versuche *13*

a) Versuchsanordnung
b) Versuchsdurchführung
c) Zeit
d) Theoretischer Hintergrund
e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung
f) Anmerkungen

5) Arbeitsblätter *25*

6) Medien *38*

7) Folien *38*

8) Mitschrift der Schüler *44*

9) Anmerkungen *51*

10) Literaturverzeichnis *51*

11) Foto-Anhang *52*

1) *Aufgabenstellung*

Ich möchte den Schülern anhand der Schülerversuche Elektronik folgendes Wissen vermitteln bzw. folgende Fragen behandeln: (dabei habe ich mich an folgendem Schulbuch orientiert: [1])

- Halbleiter: Was sind Halbleiter?, Wo werden Halbleiter eingesetzt?,
- Eigenschaften von Halbleiterbausteinen (Heißleiter, Fotowiderstände (LDR), Halbleiterdiode)
- Reine Halbleiter
- Dotierte Halbleiter (n-Leiter, p-Leiter, Dotierung)
- pn-Übergang: Diode und Transistor (Funktionsweise von Diode und Transistor, Einsatzmöglichkeiten dieser Halbleiterbausteine
- Optoelektronische Bauelemente (Photoleiter, Photodiode, Solarzelle)

Die Schüler sollen nach Abschluss dieses Kapitels die Funktionsweise der einzelnen Halbleiterbauelemente und die Funktionsweise der Schaltungen in den Schülerversuch verstanden haben. Weiters sollten sie auch die Funktion von nicht behandelten Schaltungen mit Halbleiterbauelementen erklären können.

2) *Physikalisches Grundwissen*

Die Schüler haben die Grundlagen zu den Themen Elektrizität und Elektrotechnik bereits in der Unterstufe behandelt. Dabei haben sie sich mit folgenden Themen beschäftigt:

<u>In der 3. Klasse AHS [2]</u>

- Elektrische Stromstärke, Einheit der Stromstärke, Messung der Stromstärke, Unterschied Gleich- und Wechselstrom
- Elektrische Spannung, Einheit der Spannung, Messung der Spannung
- Elektrische Messgeräte und deren Verwendung
- Elektrischer Widerstand, Einheit des Widerstandes
- Das Ohm'sche Gesetz

<u>In der 4. Klasse AHS [3]</u>

- Was sind Halbleiter?
- Dioden und deren Funktionsweise (Gleichrichterfunktion)
- Transistoren: Aufbau, Bezeichnung der drei Halbleiterschichten, Funktionsweise als elektronischer Schalter (Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom), Transistor als Verstärker

Die oben angeführten Themengebiete sollten in der Unterstufe bereits behandelt worden sein. Eine eigene Wiederholung dieses Stoffes ist meines Erachtens grundsätzlich nicht notwendig, da diese Themengebiete bei der Behandlung des Oberstufenstoffes nochmals (nur in viel ausführlicherer Form) vorkommen.

Folgende Themen sollten im Laufe der 7. Klasse AHS bereits behandelt worden sein:

---

[1] Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3 AHS (2. Auflage (1992))
Verlag Hölder-Pichler-Tempsky, S. 91 - 101

[2] Gollenz, Breyer, Eder, Tentschert: Lehrbuch der Physik, 3. Klasse
Verlag öbv & hpt, Wien, S. 57 - 64

[3] Fürnstahl, Wolfbauer, Becker, Obendrauf: Physik heute 4,(3. Auflage (1994))
Salzburger Jugend-Verlag, S. 41 - 47

- Elektrische Ladung
- Gleichstromkreise (Spannung, Stromstärke)
- Generator, Motor, Wechselstrom, Transformator

Experimente mit Widerständen, Experimente mit Dioden
Unterlagen zu Experimenten mit Widerständen sowie einfachen Experimenten mit Dioden sind im Protokoll: *Schülerversuche Elektronik – Unterstufe* zu finden.

3) *Theoretischer Hintergrund / Stoff*

(Informationen entnommen aus: [4])

Halbleiter

Geschichtlicher Überblick

Der Masseneinsatz miniaturisierter elektronischer Bauelemente hat die Welt drastisch verändert. Besonders deutlich ist dies im Bereich der Nachrichtenübermittlung (z. B. Autotelefon). Diese Neuerungen sind so bedeutsam, dass bereits von einer weiteren „industriellen Revolution“, vom Übergang vom industriellen Zeitalter ins Informationszeitalter gesprochen wird.

Am Beginn dieser Entwicklung stand eine wissenschaftliche Entdeckung, die lange ignoriert wurde: In einem Vortrag im Jahr 1876 führte der Physiklehrer Ferdinand Braun Experimente zur Stromleitung in Kristallen vor. Er presste eine Metallspitze auf einen Schwefelkieskristall und fand: in einer Richtung leitet der Kristall gut und zwar umso besser, je größer der Strom ist, in der anderen Richtung fließt nur wenig Strom. Dieser *Gleichrichtereffekt* widersprach allen damals bekannten Eigenschaften der Materie und es dauerte bis 1939, bis eine Erklärung dieser Eigenschaften gefunden werden konnte.

Den entscheidenden Impuls erhielt die Nachrichtentechnik zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die Entwicklung der Elektronenröhre, die bis 1955 die Nachrichtentechnik prägte. Sie diente zur Gleichrichtung von Wechselströmen und zur Verstärkung elektrischer Signale, doch ihre Nachteile ließen sich nicht leugnen: sie war gegen Stöße empfindlich, die Glühkathoden hatten kurze Lebensdauern, zum Betrieb waren beträchtliche Heizleistungen erforderlich und je mehr Elektronenröhren die elektronischen Geräte enthielten, desto unzuverlässiger wurden sie.

Man suchte daher (insbesondere in den Forschungslabors der Industrie) nach einem kompakten Bauteil, der ohne die Nachteile einer Elektronenröhre als Steuerungs- und Verstärkungselement dienen konnte. So begann die systematische Untersuchung der Eigenschaften sogenannter Halbleiter, Stoffen, die eine Zwischenstellung zwischen Metallen und Isolatoren einnehmen (dazu gehören unter anderem: Silizium, Germanium, Selen).

Nach der Erfindung des Transistors 1947 war die Entwicklung der integrierten Schaltkreise ab 1965 eine weitere entscheidende technische Errungenschaft. Sie ermöglichen die moderne Rechen- und Steuerungstechnik vom Taschenrechner bis zum Industrieroboter.

[4] Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3 AHS, ebda. S 91 – 101

Eigenschaften von Halbleitern

Im folgenden wollen wir einige Eigenschaften von Halbleiterbauelementen kennenlernen.

Heißleiter sind spezielle Halbleiter. Wenn man einen Heißleiter erhitzt, sinkt sein Widerstand stark – im Gegensatz zu dem von Metallen. Man nennt diesen Heißleiter auch NTC-Widerstand (NTC steht für „negative temperature coefficient“).

Ähnlich verhält sich ein sogenannter **Fotowiderstand** oder LDR (LDR steht für „light dependent resistor“) wenn Licht auf ihn einfällt. Der Widerstand dieses Halbleiterbauteils sinkt beim Belichten.

Die **Halbleiterdiode** (müsste bereits aus der Unterstufe bekannt sein) leitet je nach Polung der Stromversorgung den elektrischen Strom oder nicht.

Hier kann nun folgender Schülerversuch durchgeführt werden: „Kennlinien von Halbleiterdioden“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche), Kapitel 6 (Arbeitsblatt 1)). Anschließend werden die Ergebnisse in der Klasse diskutiert.

Erkenntnis: In Durchlassrichtung beginnt erst ab einem Schwellenwert der angelegten Spannung ein nennenswerter Strom zu fließen, der bei erhöhter Spannung rasch anwächst. Die Strom-Spannungs-Kurve zeigt den Unterschied zu einem metallischen Leiter (Ohmscher Widerstand) deutlich: Metallische Leiter zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung, die Strom-Spannungs-Kurve ist bei Halbleitern nichtlinear.

Somit erkennen wir:

Die elektrischen Eigenschaften eines Halbleiters unterscheiden sich wesentlich von den Eigenschaften eines metallischen Leiters.

Nun besprechen wir den Aufbau und Leitungsmechanismus in Halbleitern.

Der reine Halbleiter

Unter einem Halbleiter verstehen wir einen Festkörper, der Strom besser als ein Isolator (z. B. Hartgummi) aber schlechter als ein metallischer Leiter (z. B. Kupfer) leitet. Der Ladungstransport erfolgt durch Elektronen.

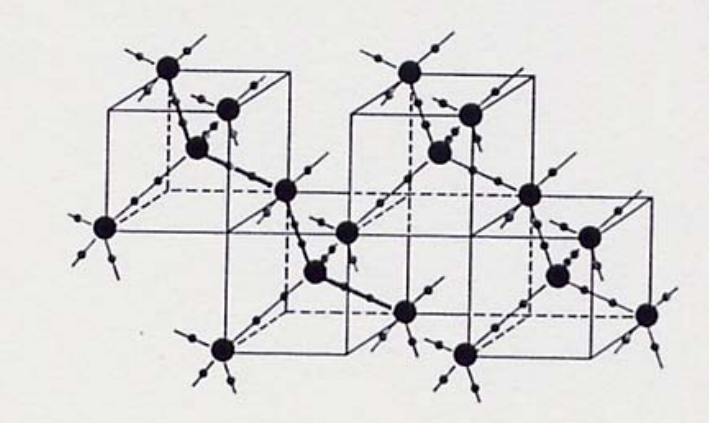
Spezifischer Widerstand einiger wichtiger Materialien:

Material		spezifischer Widerstand (Ωm)
Isolatoren	Hartgummi	10^{16}
	Glimmer	10^{14}
	Elfenbein	10^{7}
Halbleiter	Reines Silizium	10^{2}
	Reines Germanium	1
	dotiertes Silizium	10^{-1} ... 10^{-3}
Leiter	Kupfer, Silber	10^{-8}

Die wichtigsten Halbleiter sind Silizium und Germanium. Sie stehen im Periodensystem in der 4. Hauptgruppe zwischen Kohlenstoff (der als Diamantkristall ein Isolator ist) und dem metallischen Zinn.

Wodurch kommen die unterschiedlichen Eigenschaften der im Festkörper gebundenen Atome von Kohlenstoff, Silizium, Germanium und Zinn zustande? Betrachten wir zunächst einmal Zinn und Diamant:

Zinn: Zinn ist ein Metall. Bei der Bildung des Metallgitters verliert jedes Zinnatom ein Elektron aus seiner Elektronenhülle, das als Leitungselektron sich nahezu frei zwischen den ortsfesten, positiven Metallionen bewegen kann.
Diamant: Im Diamantkristall ist jedes Atom von vier Nachbarn umgeben, die Bindung erfolgt durch gemeinsame Elektronenpaare (kovalente Bindung). Um ein Elektron eines dieser Paare aus seiner Bindung an die Atome zu lösen, ist ein beträchtlicher Energiebetrag notwendig.



1 Kristallgitter von Halbleitern (Si und Ge)

(Abbildung entnommen aus: [5])

Silizium und Germanium haben die gleiche Kristallstruktur wie Diamant. Die Energie zur Loslösung von Elektronen ist jedoch beträchtlich geringer. Wie gelingt es dem Halbleiterkristall, Elektronen aus der Bindung freizusetzen und durch diese frei beweglichen Elektronen zum (schlechten) Leiter zu werden?

Die im Kristallgitter regelmäßig angeordneten Atome ruhen nicht an ihren Gitterplätzen, sondern schwingen um eine mittlere Position. Diese Schwingungen sind umso stärker, je höher die Temperatur ist. Wenn die Schwingungsenergie groß genug ist, kann ein Elektron aus seiner Bindung herausgeschlagen werden. Diese Elektronen stehen dann als frei bewegliche Leitungselektronen zur Verfügung, sie können einem angelegten elektrischen Feld folgen. (Bemerkung: die erforderliche Energie kann auch durch Lichteinstrahlung zugeführt werden.)

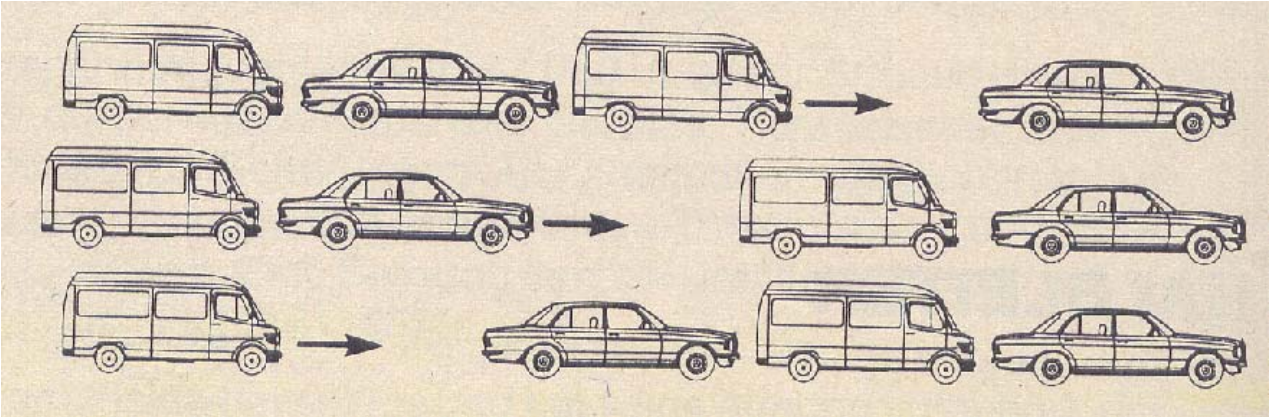
Damit lassen sich zwei Unterschiede zu den Metallen verstehen:

a) Im Metall stehen pro Atom ein Leitungselektron zur Verfügung, insgesamt etwa 10^{22} Elektronen pro cm³. In einem Kristall aus reinem Silizium kommt bei 50°C auf 10^{12} Atome ein Leitungselektron, insgesamt etwa 10^{10} Elektronen pro cm³.
⇒ Die Leitfähigkeit des reinen Halbleiters ist daher beträchtlich kleiner als die eines Metalles.

[5] Stütz, Uhlmann: Von der Physik 3, Oberstufe; ebda. S.111

b) Bei höherer Temperatur nimmt die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu, da die Gitteratome durch stärkere thermische Bewegung mehr Elektronen freisetzen. Im Metall nimmt hingegen die Leitfähigkeit mit wachsender Temperatur ab, da die Leitungselektronen immer häufiger mit den stärker schwingenden Gitterbausteinen zusammenstoßen.

Welche Rolle spielen beim Ladungstransport in Halbleitern die positiven Ionen, die nach Freisetzung eines Elektrons ortsfest an ihren Gitterplatz gebunden bleiben?
Das nunmehr freie Elektron hat eine „Lücke" hinterlassen, eine unvollständige Bindung, die als „Elektronenloch" oder „Defektelektron" bezeichnet wird. **Dieses Elektronenloch verhält sich wie ein positiver Ladungsträger**. Diese Loch kann nun leicht von einem frei werdenden Nachbarelektron aufgefüllt werden, das nun seinerseits ein Loch erzeugt. **Das Loch bewegt sich also in die entgegengesetzte Richtung der Elektronenbewegung**. Diese Löcherwanderung kann man sich durch das Aufschließen einer Lücke in einer stehenden Autokolonne vorstellen: (Abbildung entnommen aus: [6])



Während die Autos nach rechts aufschließen, bewegt sich die Lücke nach links.
Es gibt also zwei entgegengesetzte Leitungsmechanismen: Legt man an einen Halbleiter eine äußere Spannung an, wandern die Elektronen vom negativen zum positiven und die Elektronenlöcher vom positiven zum negativen Pol.

Rekombination: Was geschieht, wenn ein Leitungselektron einem Elektronenloch nahekommt? Die positive Ladung bindet das Elektron, es „fällt" in das Loch, die beiden Ladungsträger neutralisieren sich, sie rekombinieren. Dabei wird die Bindungsenergie wieder frei.

<u>Zusammenfassung:</u>

Die Leitfähigkeit eines reinen Halbleiterkristalls beruht auf der Bildung frei beweglicher Ladungsträger: Elektronen und Elektronenlöcher. Die Elektronenlöcher verhalten sich wie positive Ladungen. Die Leitfähigkeit nimmt mit wachsender Temperatur zu.

Dotierte Halbleiter

Im reinen Halbleiterkristall befinden sich immer gleichviel Leitungselektronen wie Elektronenlöcher. Die Zahl der frei beweglichen Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit

[6] Schneider, Thannhausser: Physik
Rudolf-Trauner-Verlag, Linz, S.262

eines Halbleiters kann durch die Zugabe bestimmter Fremdatome beträchtlich gesteigert werden. Man spricht dann von dotierten Halbleitern.

a) Elektronenüberschussleiter (n – Leiter)
Stellen wir uns vor, dass ein kleiner Teil der Si-Atome im Kristall durch Atome der 5. Hauptgruppe, z. B. Phosporatome, ersetzt wird (normalerweise wird eines von 10^4 bis 10^7 Siliziumatomen ersetzt). Phosphor besitzt in der äußersten Elektronenhülle fünf Elektronen, von denen nur vier an der Bindung mit den benachbarten Siliziumatomen teilnehmen können. Das fünfte Elektron ist nicht an das Gitter gebunden und lässt sich daher leicht vom Phosphoratom trennen; somit ist **ein quasi freies Elektron geschaffen**. Das zurückbleibende unbewegliche Phosphorion ist positiv geladen. Da es ein Elektron abgegeben hat, wird es Elektronenspender, **Donator**, genannt.

Die Dotierung mit fünfwertigen Atomen führt zu einer Erhöhung der Zahl von frei beweglichen Elektronen und damit zu eine erhöhten Leitfähigkeit (gegenüber reinen Halbleitern). Man spricht daher von einem Elektronenüberschussleiter oder **n-Leiter**.

b) Elektronenmangelleiter (p – Leiter)
Bauen wird jedoch dreiwertige Boratome in den Siliziumkristall ein, so fehlt den Boratomen ein Elektron, um die Bindungen zu allen vier Siliziumnachbarn durch Elektronenpaare herzustellen. Woher können die fehlenden Elektronen genommen werden? Natürlich von den umgebenden Siliziumatomen – und damit fehlen diesen wieder Elektronen:
Elektronenlöcher als **zusätzliche Ladungsträger** sind erzeugt worden.

Boratome, die ein Elektron eingefangen haben, heißen **Akzeptoren**. Sie sind negativ geladen und an ihre Gitterplätze gebunden. Die von ihnen erzeugten Elektronenlöcher stehen für den Ladungstransport zur Verfügung. Löcher verhalten sich beim Anlegen einer Spannung wie positive Ladungsträger, man spricht daher von Elektronenmangelleitern oder **p-Leitern**.

Zusammenfassung:

Die Dotierung mit Fremdatomen erhöht die Leitfähigkeit von Halbleiterkristallen. Durch Einbau von fünfwertigen Fremdatomen (Donatoren) erhält man Elektronenüberschussleiter (n-Leiter). Durch Einbau von dreiwertigen Fremdatomen (Akzeptoren) erhält man Elektronenmangelleiter (p-Leiter). Die Konzentration der Fremdatome bestimmt die Leitfähigkeit.

Der pn-Übergang: Diode und Transistor

Interessante physikalische Effekte ergeben sich, wenn eine n-leitende an eine p-leitende Kristallzone grenzt.

a) Die Halbleiterdiode

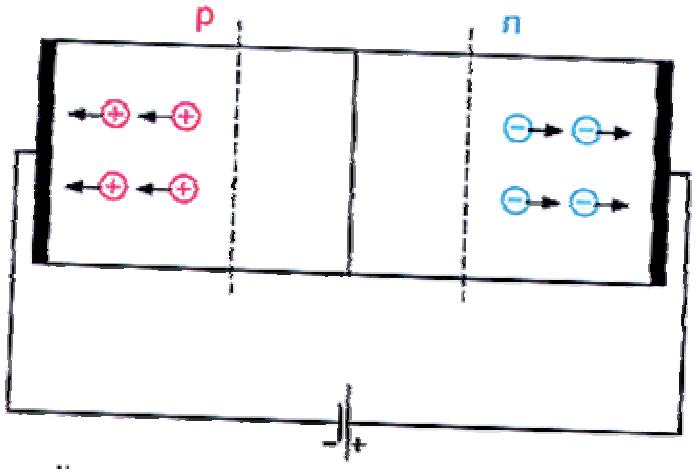
Zum Bau einer Diode nehmen wir je ein Stück n-leitendes und p-leitendes Material. Solange sich die beiden Stücke nicht berühren, sind sie elektrisch neutral: Im n-Leiter befinden sich viele frei bewegliche Elektronen (stammen großteils von den Donatoren) und wenige Elektronenlöcher. Im p-Leiter befinden sich viele frei bewegliche Elektronenlöcher und wenige frei Elektronen.

Nun bringen wir n- und p-Leiter in Kontakt. An der Kontaktfläche wandern nun infolge der Wärmebewegung Elektronen und Elektronenlöcher über die Kontaktfläche und

rekombinieren. Dadurch nehmen die frei beweglichen Ladungsträger im Bereich der Grenzschicht ab. Im n-Leiter bleiben die positiven Donatorionen unkompensiert zurück, das n-Gebiet lädt sich dadurch positiv auf. Im p-Leiter führen die unkompensierten Akzeptorionen zu einer negativen Aufladung. Das dadurch entstehende elektrische Feld verhindert die weitere Wanderung von Ladungsträgern über die Kontaktfläche. Durch die Verarmung an freien Ladungsträgern steigt der Widerstand der Grenzschicht, sie wird zur Sperrschicht.

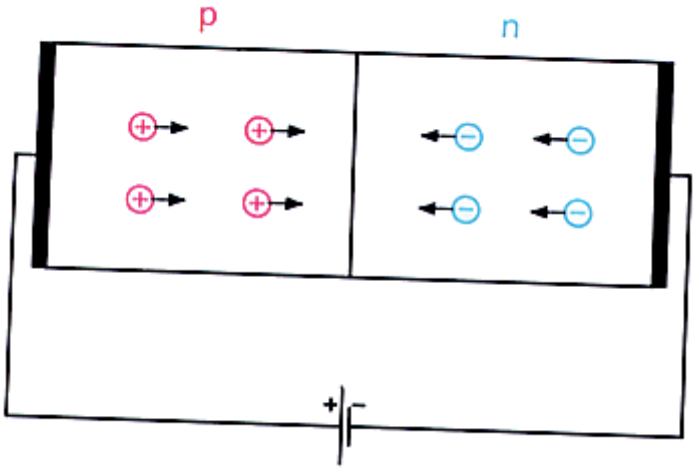
Am pn-Übergang bildet sich durch Verarmung an frei beweglichen Ladungsträgern eine hochohmige Sperrschicht.

Der pn-Übergang mit äußerer Spannung (Sperrichtung)
(Die nachstehenden beiden Abbildungen sind aus: [7])



Wir legen an den pn-Übergang eine Spannung so an, dass der Minuspol am p-Leiter und der Pluspol am n-Leiter liegt. Die freien Elektronen des n-Leiters werden zum Pluspol strömen, die Löcher des p-Leiters zum Minuspol: Die Sperrschicht verbreitert sich, es kann kein wesentlicher Ladungstransport durch den Übergang erfolgen. Die Diode sperrt.

Der pn-Übergang mit äußerer Spannung (Durchlassrichtung)



Legen wir den Minuspol einer Spannungsquelle an den n-Leiter, den Pluspol an den p-Leiter, so werden die freien Elektronen bzw. Löcher in die Sperrschicht gedrängt. Diese verkleinert sich. Überschreitet schließlich die äußere Spannung einen bestimmen Schwellenwert, kompensiert die angelegte Spannung das Feld der Ionen in der Sperrschicht, die Sperrschicht wird abgebaut und Strom kann fließen, indem an der Grenzschicht die einströmenden Elektronen und Löcher rekombinieren.

[7] Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3 AHS, ebda. S. 96

Ein pn-Übergang erlaubt den (technischen) Stromfluss vom p-Leiter zum n-Leiter.

Die Halbleiterdiode dient somit als Gleichrichterelement in der Schwachstrom- und in der Starkstromtechnik.

Hier kann nun folgender Schülerversuch durchgeführt werden: „Einweg-Gleichrichtung“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche), Kapitel 6 (Arbeitsblatt 2))

Wenn wir nur Wechselspannung zur Verfügung haben, aber Gleichstrom benötigen, können wir den gewünschten Gleichstrom mit Hilfe einer Diode gewinnen. Von den fünfzig Perioden der Wechselspannung pro Sekunde führt immer nur eine Halbperiode zum Stromfluss. Das Ergebnis sind also fünfzig Halbperioden pro Sekunde mit Strom in derselben Richtung.

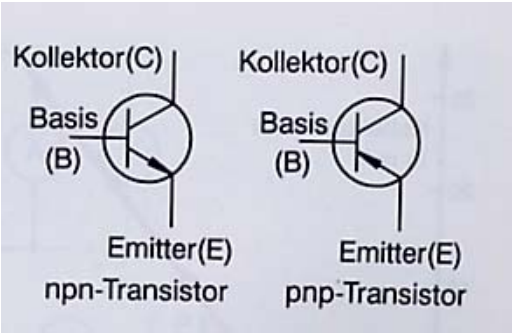
Erkenntnis: Einweg-Gleichrichtung mit einer Diode führt bei Netzwechselspannung mit 50 Hertz zu 50 Stromstößen pro Sekunde, die jeweils eine Hundertstel Sekunde dauern und durch gleich lange Pausen getrennt sind. Wir können diese Stromstöße jedoch aufgrund der Trägheit unserer Augen nicht erkennen.

b) Der Transistor

Anstelle einer theoretischen Einleitung lasse ich die Schüler den Schülerversuch „Besteht ein Transistor aus zwei Dioden“ durchführen (siehe: Kapitel 4 (Versuche) , Kapitel 6 (Arbeitsblatt 3)). Im Anschluss daran werden die Ergebnisse der Schüler in der Klasse diskutiert.

Erkenntnis: Der Transistor verhält sich so, als würde er aus zwei Dioden bestehen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Dioden so geschaltet sein müssen, wie die Zeichnung zeigt:

Der Flächentransistor besteht aus drei Zonen unterschiedlicher Dotierung. Beim npn-Transistor befindet sich zwischen zwei n-leitenden Bereichen eine sehr dünne p-Leiter-Schicht (Dicke etwa 10^{-3} mm). Die Mittelschicht wird Basis genannt, die anderen Schichten heißen Emitter und Kollektor. Jede Schicht trägt einen Kontakt. (Beim pnp-Transistor liegt eine n-leitende Schicht zwischen zwei p-leitenden.)



Schaltsymbole für Transistoren
(Technische Stromrichtung beachten!)
(Abbildung aus: [8])

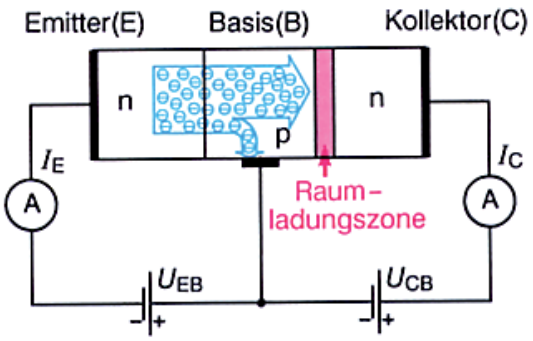
[8] Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3 AHS, ebda. S. 97

Anschließend kann folgender Versuch durchgeführt werden: „Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche) , Kapitel 6 (Arbeitsblatt 4)). Im Anschluss an die Versuchsdurchführung werden die Ergebnisse gemeinsam diskutiert.

Erkenntnis: Das Modell des Transistors als Doppeldiode ist nicht ausreichend. Ein Basisstrom ermöglicht einen Kollektorstrom.

Durch Anlegen der Basisspannung fließt im Emitter in Richtung Basis ein Strom von Elektronen, in der Basis ein Löcherstrom in Richtung Emitter, dadurch wird die Sperrschicht abgebaut. Da die Basis sehr dünn ist, diffundiert ein Großteil der Elektronen zur Sperrschicht der von der Basis und Kollektor gebildeten Diode. Sie werden in den Kollektor gesaugt und fließen zur positiven Elektrode. Der dadurch vom Emitter zum Kollektor fließende Strom von Elektronen, der Kollektorstrom, ist bis zu tausendmal größer als der Elektronenstrom vom Emitter zur Basis (Basisstrom).

(Abbildung aus:[9])



Legt man an die Basis eines npn-Transistors eine gegen den Emitter positive Spannung, so fließt ein Strom von Elektronen in die Basis. Die meisten diffundieren zum Kollektor, daher ist der Kollektorstrom wesentlich stärker als der Basisstrom.

Liegt an der Basis keine Spannung, ist die Strecke zwischen E und C gesperrt. Liegt an B eine genügend hohe Spannung, ist die E-C-Strecke leitend. Der Transistor arbeitet somit als Schalter!

Vorteile des Transistors: geringer Platzbedarf, geringe Verlustleistung, hohe Schaltgeschwindigkeit.

Anschließend kann folgender Schülerversuch durchgeführt werden: „Der Transistor als Verstärker“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche) , Kapitel 6 (Arbeitsblatt 5)). Nach Beendigung des Versuches werden die Ergebnisse noch diskutiert.

Erkenntnis: Die Kollektorstromänderung ist um ein Vielfaches höher als die Basisstromänderung.

[9] Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler: Physik 3 AHS, ebda. S. 97

Der Transistor arbeitet als Verstärker.

Zum Thema „Der Transistor als Verstärker“ kann noch folgender Schülerversuch durchgeführt werden (siehe: Kapitel 4 (Versuche), Kapitel 6 (Arbeitsblatt 6)). Die Schüler sollen dabei folgendes lernen:

Die Steuerkennlinie eines Transistors zeigt die Abhängigkeit des Kollektorstromes vom Basisstrom (ohne Arbeitswiderstand).

Erkenntnis: Der Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom ist nahezu linear. Die Steigung der Kennlinie entspricht dem Stromverstärkungsfaktor.

Optoelektronische Bauelemente

Mit diesen Halbleiterbauelementen ist eine Umwandlung von Licht in Elektrizität möglich.

a) Photoleiter
oft auch als LDR („light dependent resistor“) bezeichnet, sind homogene Halbleiter ohne pn-Übergang. Wenn Licht auf die Oberfläche eines LDR fällt, werden Elektronen von den Gitteratomen gelöst und dadurch frei bewegliche Elektronen und Löcher geschaffen. Durch Auswahl der Materialien und gezielter Dotierung lässt sich der Wellenlängenbereich wählen, in dem der LDR seine höchste Empfindlichkeit hat.

Zu diesem Thema kann man folgenden Schülerversuch durchführen: „Automatische Beleuchtung“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche), Kapitel 6 (Arbeitsblatt 7)). Der Versuch wird zuerst durchgeführt, anschließend wird die Funktionsweise der Schaltung in der Klasse besprochen (bzw. erklärt).

Zur Schaltung: Bei Dunkelheit ist der Widerstandswert des LDR groß, auf ihn entfällt der größere Teil der Spannung. Dadurch fließt Basisstrom, das Glühlämpchen leuchtet. Bei genügend Lichteinfall auf den LDR ist der Widerstandswert des LDR klein und die Teilspannung ebenfalls klein. Es fließt wenig Basisstrom und wenig Kollektorstrom – das Glühlämpchen leuchtet nicht.

Erkenntnis: Mit Hilfe des LDR erhalten wir eine Schaltung, die automatisch bei Dunkelheit die Beleuchtung einschaltet und bei Helligkeit ausschaltet.

b) Photodiode
Durch Lichteinfall werden Elektronen und Löcher gebildet. Die im p-Leiter produzierten Elektronen (und die im n-Leiter produzierten Löcher) wandern unter dem Einfluss einer in Sperrrichtung angelegten Spannung zur Sperrschicht und erhöhen den Sperrstrom.

NTC-Widerstand

Beim NTC-Widerstand wird der Widerstandswert bei Temperaturerhöhung kleiner. Dazu kann folgender Schülerversuch durchgeführt werden: „Feuermelder“ (siehe: Kapitel 4 (Versuche), Kapitel 6 (Arbeitsblatt 8)). Im Anschluss an den Versuch wird die Funktionsweise der Schaltung diskutiert (bzw. erklärt).

Zur Schaltung: Der NTC wird mit den Fingern erwärmt, der Widerstandswert des NTC wird kleiner. Dadurch fällt am Stellwiderstand eine höhere Spannung ab, der Transistor wird durchgeschaltet.

Erkenntnis: Die Widerstandsverminderung eines NTC durch Erwärmung kann für einen Feuermelder ausgenützt werden.

4) *Versuche*

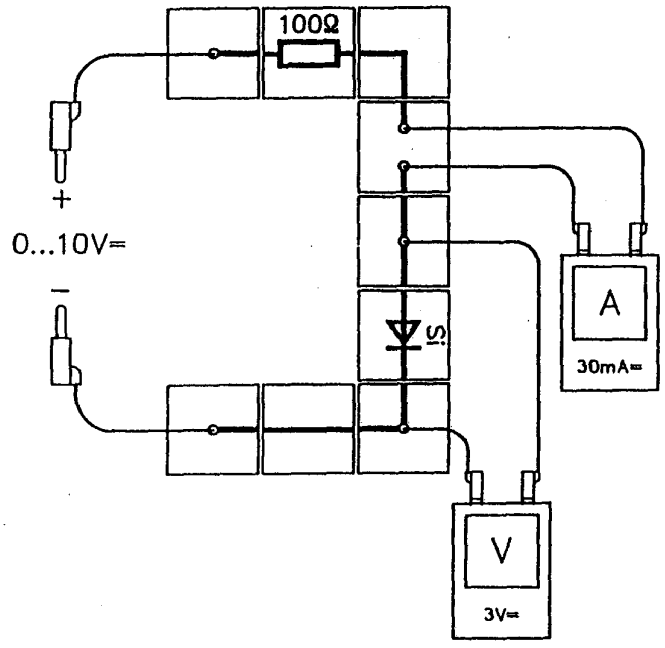
Die folgenden Versuche sind zur Durchführung für Schüler gedacht. Zu jedem Versuch gibt es ein Arbeitsblatt mit Arbeitsanweisungen. Als Lehrer muss man folgende Punkte beachten:

- Bevor man diese Versuche durchführt, muss man sich darüber informieren, wieviel Materialien für diese Versuche zur Verfügung stehen. Ausgehend von der Anzahl der Materialien und der Anzahl der Schüler müssen diese in Gruppen eingeteilt werden (oder eventuell auch nicht); jeder Versuch ist dann als Gruppenarbeit auszuführen.
- Man sollte als Lehrer die Versuche vorher immer ausprobieren und die Schaltplatten, die die Schüler benützen vorher auf deren Funktionieren überprüfen.
- Die Schaltplatten in den Schulen können durch oftmaligen Gebrauch abgenützt sein. Da die meisten Schaltpläne so gezeichnet sind, dass der Aufbau in der Mitte der Platte erfolgt, sind Beschädigungen vor allem dort zu erwarten. Daher sollte man den Schülern den Hinweis geben, sich nicht genau an den aufgezeichneten Schaltplan zu halten, sondern zu versuchen, die Schaltung eher am Rand der Schaltplatte aufzubauen.
- Weiters soll man die Schüler dazu motivieren, Leitungsbausteine einzusparen (so können Bausteine eingespart und damit mögliche Fehlerquellen vermieden werden).
- Die angeführten Zeitangaben bei den Versuchen beziehen sich darauf, wenn der Lehrer den Versuch durchführt. Da diese Versuche jedoch als Schülerversuche gedacht sind, muss man diese Zeitangaben anpassen.
- Wir haben bei allen Schülerversuchen als Stromversorgung ein Netzgerät verwendet.
- Manchmal sind nicht genau die angegebenen Bauteile verfügbar (z. B. 10 V - Glühlämpchen, bestimmte Widerstände, ...) Zum Großteil können die Versuche mit ähnlichen Bauteilen durchgeführt werden. ⇒ Man muss flexibel sein, da man auch in den Schulen damit rechnen muss, dass nicht alle gewünschten Materialien vorhanden sind.

1. Versuch: „Kennlinien von Halbleiterdioden“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [10])

Wir wollen für eine Siliziumdiode den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Stromstärke untersuchen.



a) Versuchsanordnung

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 100 Ω
1 STB Si-Diode

[10] NTL Schülerversuche: EL 2.2.1

2 Messinstrumente
6 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

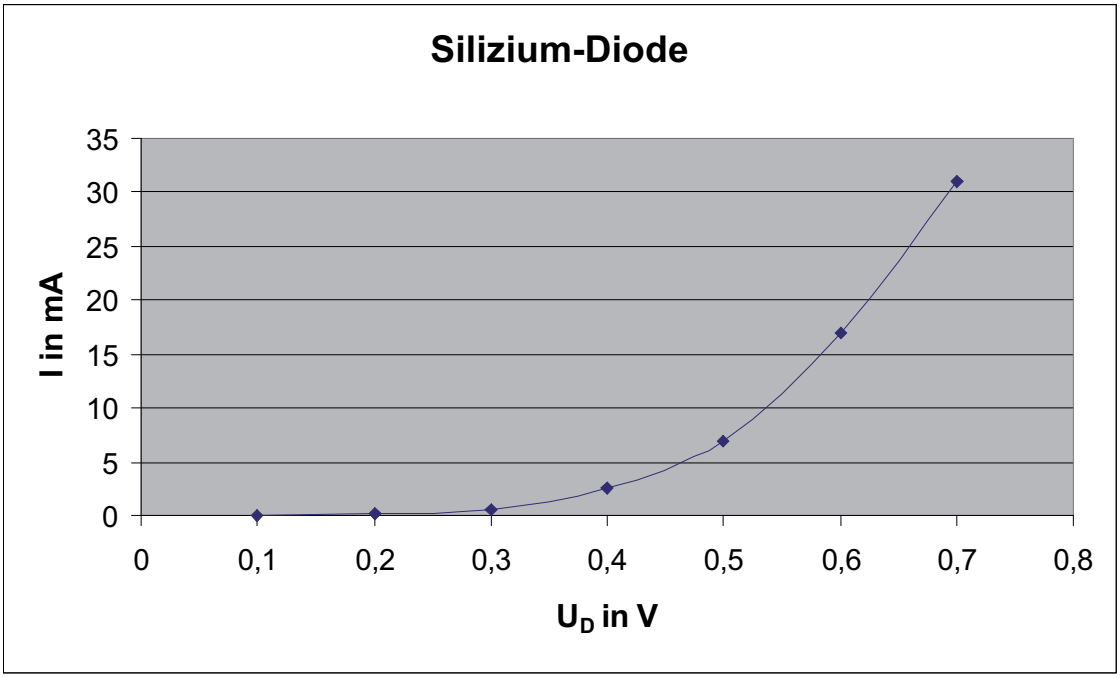
Zum Versuchsaufbau siehe auch: Kapitel 11 (Foto-Anhang), Foto 1.

b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß der Abbildung auf. Es wird das Verhalten der Siliziumdiode untersucht. Sie ist in Durchlassrichtung eingesteckt. Der Widerstand 100 Ω dient als Schutz für die Diode. Das Voltmeter mißt die an der Diode anliegende Spannung und wird mit dem Messbereich 3 V= verwendet. Das Amperemeter wird mit dem Messbereich 30 mA= verwendet.

Versuch: Wir legen Gleichspannung an und erhöhen sie langsam. Die vom Voltmeter angezeigte Spannung an der Siliziumdiode soll der Reihe nach die in der Tabelle angeführten Werte annehmen. Die jeweilige Stromstärke wird in die Tabelle eingetragen.

Spannung U_D (in V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Stromstärke I (in mA)	0	0,2	0,6	2,5	7	17	31



c) Zeit

Für diesen Versuch benötigt man zum Aufbau und Messen ca. 10 Minuten (ohne Zusammensuchen der einzelnen Materialien).

d) Theoretischer Hintergrund

Siehe Kapitel 3, Seite 5: Eigenschaften von Halbleiter – Halbleiterdiode – Schülerversuch (Erkenntnis)

Siehe Kapitel 3, Seite 9: „Der pn-Übergang mit äußerer Spannung (Durchlassrichtung)“

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Dieser Versuch ist sehr gut gelungen. Jedoch können folgende Schwierigkeiten dabei auftreten:

- Sowohl in Sperr- als auch in Durchlassrichtung wird kein Stromfluss (und kein Spannungsabfall) angezeigt.
  Mögliche Ursachen: defekte Schalterplatten, defekte Schalterbausteine (Leitungen, Widerstände, Dioden) oder mangelndes Funktionieren der Messgeräte
  Vorbeugung / Behebung:
  Bausteine am Rand der Schaltplatte aufbauen;
  Leitungsbausteine einsparen;
  Messgeräte auf Funktionsweise überprüfen;
  durch Austauschen von einzelnen Bausteinen deren Funktionsweise überprüfen;
  letzte Möglichkeit: andere Schaltplatte verwenden;

f) Anmerkungen
Dieser Versuch müsste problemlos funktionieren. Er ist gut geeignet, den Unterschied einer Diode zu einem Ohmschen Widerstand kenntlich zu machen.

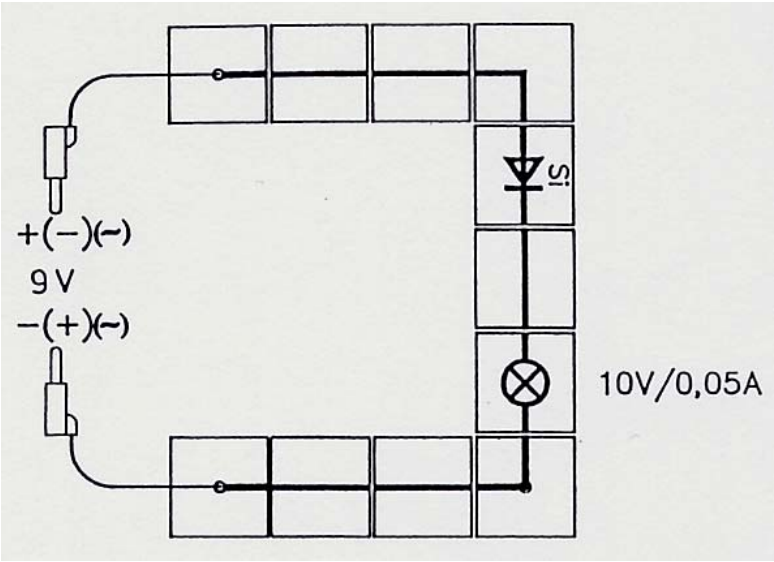
2. Versuch: „Einweg-Gleichrichtung“
(Versuch und Abbildung entnommen aus: [11])

Wenn wir nur Wechselspannung zur Verfügung haben, aber Gleichstrom benötigen, können wir den gewünschten Gleichstrom mit Hilfe einer Diode gewinnen. Von den 50 Perioden der Wechselspannung pro Sekunde führt immer nur eine Halbperiode zu einem Stromfluss. Das Ergebnis sind also 50 Halbperioden pro Sekunde mit Strom in derselben Richtung.

a) Versuchsanordnung

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Si-Diode
1 Glühlampe E10 10 V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



[11] NTL Schülerversuche: EL 4.5

b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Im ersten Versuch veranschaulichen wir das Geschehen, indem wir, statt Wechselspannung zu verwenden, die Gleichspannung umpolen.

1. Versuch: Wir polen die angelegte Spannung mehrmals um, indem wir die Anschlüsse an der Spannungsquelle vertauschen, und beobachten das Aufleuchten des Glühlämpchens immer dann, wenn die Diode in Durchlassrichtung geschaltet ist.

2. Versuch: Wir legen 9 Volt Wechselspannung an. Jetzt leuchtet das Glühlämpchen dauernd.

c) Zeit

Für diesen Versuch benötigt man zum Aufbau und Messen ca. 5 Minuten (ohne Zusammensuchen der einzelnen Materialien).

d) Theoretischer Hintergrund

Die Halbleiterdiode dient als Gleichrichterelement in der Schwachstrom- und in der Starkstromtechnik.
Siehe Kapitel 3, Seite 10: Halbleiterdiode – Schülerversuch (Erkenntnis)

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 1.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 15 oben) angeführt sind. Hinzu kommt, dass man darauf achten muss, dass man ein zur Spannung passendes Glühlämpchen verwendet und dieses auch funktioniert.

f) Anmerkungen
Dieser Versuch klappt (wenn alle Bauteile in Ordnung sind) problemlos und ist eine gute Demonstration, wie nützlich Halbleiterbauteile in der Praxis sind.

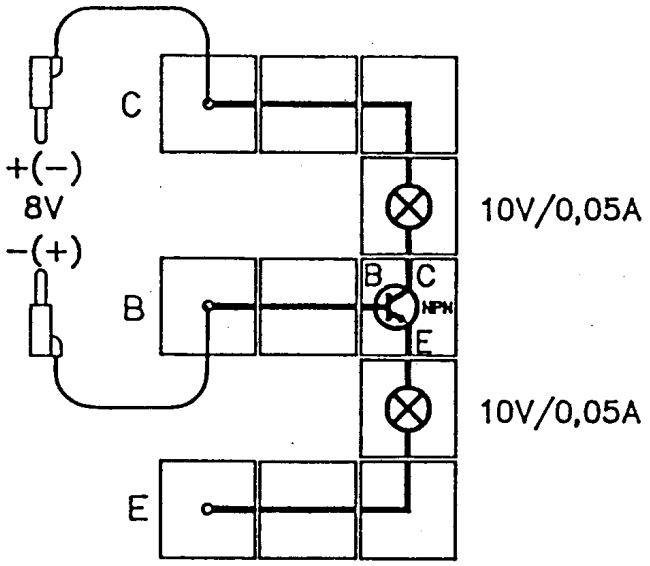
3. Versuch: „Besteht ein Transistor aus zwei Dioden“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [12])

a) Versuchsanordnung

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
2 STB Lampenfassung E10
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Glühlampen E10 10V/0,05A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



[12] NTL Schülerversuche: EL 3.1

Wir haben beim Versuch anstelle der 10 V - Glühlämpchen, 12 V - Glühlämpchen verwendet (10V-Glühlämpchen waren nicht vorhanden).

b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der Transistor und zwei Glühlämpchen sind in Reihe geschaltet. Beim 1. Versuch wird die Spannung an die Anschlüsse C und B gelegt, beim 2. Versuch an die Anschlüsse B und E.

1. Versuch: Hier wird die Spannung zunächst an die Anschlüsse B und C gelegt. Wir prüfen den Übergang Kollektor – Basis, indem wir zuerst den Pluspol an den Kollektor (C) und dann an die Basis (B) anschließen.

2. Versuch: Die Spannung wird nun an die Anschlüsse B und E gelegt. Wir prüfen den Übergang Basis – Emitter, indem wir zuerst den Pluspol an die Basis (B) und dann an den Emitter (E) anschließen.

c) Zeit

Wenn das Material bereits zur Verfügung steht, benötigt man für diesen Versuch ca. 5 min.

d) Theoretischer Hintergrund

Ein Transistor besteht aus drei Schichten. Er verhält sich so, als würde er aus zwei Dioden bestehen.
Siehe Kapitel 3, Seite 10: „Der Transistor“ (Schülerversuch (Erkenntnis) sowie nachstehende Erklärung)

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 1.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 15 oben) angeführt sind. Hinzu kommt wiederum, dass man darauf achten muss, dass man zur Spannung passende Glühlämpchen verwendet und diese auch funktionieren.

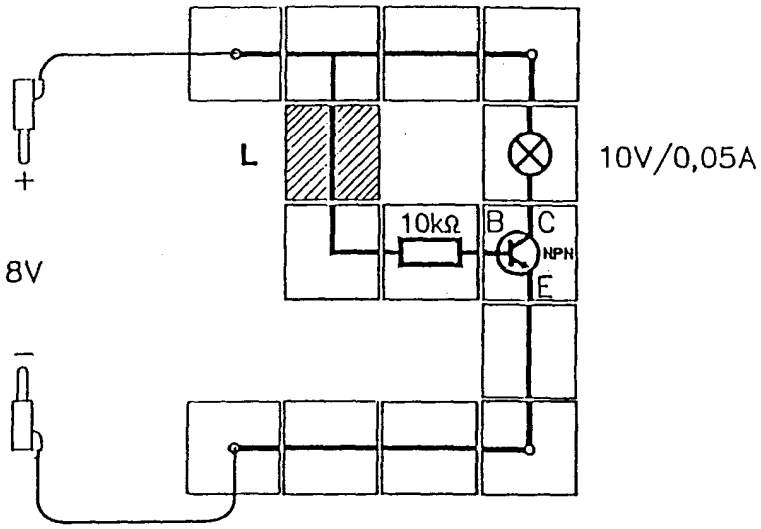
f) Anmerkungen

Bevor man diesen Versuch in der Schule durchführt (bzw. die Schüler durchführen läßt), muss das Verhalten der Halbleiterdiode behandelt worden sein. Er dient zur Verdeutlichung des Transistoraufbaues.

4. Versuch: „Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [13])

a) Versuchsanordnung



Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Transistor, NPN,
Basis links
1 Glühlampe E10 10V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

Wir haben beim Versuch anstelle des 10 V – Glühlämpchens ein 12 V - Glühlämpchen verwendet.

b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der schraffiert gezeichnete Leitungsbaustein L wird zunächst nicht eingesteckt. Ein Stromkreis führt über Glühlämpchen und Kollektor zum Emitter des Transistors.

Versuch: Ohne Basis – Emitter-Strom leuchtet das Glühlämpchen nicht. Erwartungsgemäß sperrt die Doppeldiode.
Wir stecken nun die Verbindung L ein. Dadurch legen wir den Pluspol über den 10 kΩ-Widerstand an die Basis. Das Glühlämpchen leuchtet auf. Der Basis – Emitter –Strom bewirkt also, dass der Transistor leitend wird und ein Kollektor – Emitter – Strom zustande kommt.

c) Zeit

Wenn das Material bereits zur Verfügung steht, benötigt man für diesen Versuch ca. 5 min.

d) Theoretischer Hintergrund

Nach dem Modell des Transistors als Doppeldiode dürfte ein Kollektor – Emitter – Strom nicht möglich sein, weil bei jeder der beiden Polungsmöglichkeiten an Kollektor und Emitter

[13] NTL Schülerversuche: EL 3.2

eine Diode sperrt. Das Modell des Transistors als Doppeldiode ist aber nicht ausreichend, da ein Basisstrom einen Kollektorstrom ermöglicht.
Siehe Kapitel 3, Seite 10 unten und Seite 11 oben: „Der Transistor“ (Schülerversuch (Erkenntnis) sowie nachstehende Erklärung)

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 1.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 15 oben) angeführt sind. Hinzu kommt wiederum, dass man darauf achten muss, dass man ein zur Spannung passendes Glühlämpchen verwendet und dieses auch funktioniert.
Bei der Polung der Stromversorgung ist auf die technische Stromrichtung zu achten (der Pfeil im Schaltsymbol des Transistors weist in Richtung der technischen Stromrichtung!).

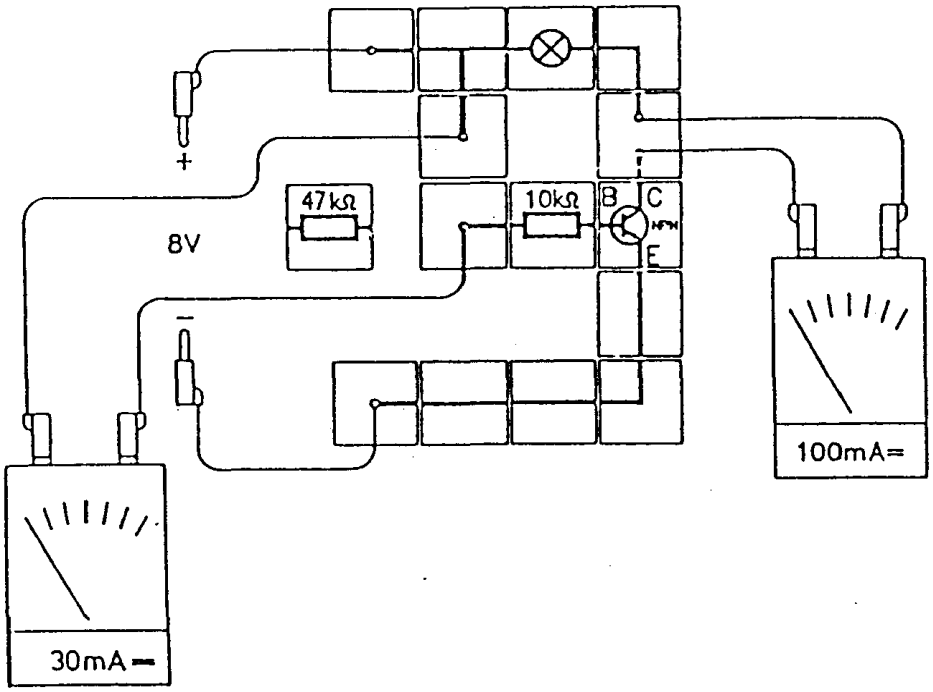
f) Anmerkungen: (keine weiteren Anmerkungen)

5. Versuch: „Der Transistor als Verstärker“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [14])

Kleine Änderungen des Basisstroms bewirken viel größere Änderungen des Kollektorstromes eines Transistors. Darauf beruht die Verstärkerwirkung eines Transistors.

a) Versuchsanordnung



[14] NTL Schülerversuche: EL 3.3

Material:

Schaltplatte	1 STB Transistor, NPN, Basis links
STB Leitungen, Satz	1 Glühlampe E 10 10V/0,05 A
1 STB Lampenfassung E10	1 Meßinstrument
1 STB Widerstand 10 kΩ	6 Verbindungsleitungen
1 STB Widerstand 47 kΩ	Stromversorgung

Wir haben anstelle des 10 V - ein 12 V – Glühlämpchen verwendet.

b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Wir messen den Basisstrom mit dem Amperemeter mit Messbereich 30 mA (Gleichstrom) und den Kollektorstrom mit dem Amperemeter mit Messbereich 100 mA (Gleichstrom).

Versuch: Wir messen den Kollektorstrom und den Basisstrom erst mit dem Basiswiderstand 10 kΩ und dann mit dem Basiswiderstand 47 kΩ. Die Messergebnisse tragen wir in eine Tabelle ein und berechnen jeweils die Stromänderung.

Kollektorstrom bei 47 kΩ: 19 mA	Basisstrom bei 47 kΩ: 0,15 mA
Kollektorstrom bei 10 kΩ: 39 mA	Basisstrom bei 10 kΩ: 0,60 mA
Kollektorstromänderung: 20 mA	Basisstromänderung: 0,45 mA

Nun berechnen wir das Verhältnis von Kollektorstromänderung zu Basisstromänderung:

$$\frac{\text{Kollektorstromänderung}}{\text{Basisstromänderung}} = \frac{20\ \text{mA}}{0{,}45\ \text{mA}} = 44{,}4$$

c) Zeit

Wenn das Material bereits zur Verfügung steht, benötigt man für diesen Versuch ca. 10 bis 15 Minuten.

d) Theoretischer Hintergrund

Kleine Änderungen des Basisstroms bewirken viel größere Änderungen des Kollektorstromes eines Transistors. Darauf beruht die Verstärkerwirkung eines Transistors.
Legt man an die Basis eines NPN-Transistors eine gegen den Emitter positive Spannung, so fließt ein Strom von Elektronen in die Basis. Da die Basis sehr dünn ist, diffundieren die meisten zum Kollektor, daher ist der Kollektorstrom wesentlich stärker als der Basisstrom. (Siehe auch: Kapitel 3, Seite 11 unten: „Der Transistor“ - Schülerversuch (Erkenntnis) sowie darüberstehende Erklärung zur Funktionsweise des Transistors.)

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 1.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 15 oben) angeführt sind. Weiters muss bei der Polung der Stromversorgung wiederum auf die technische Stromrichtung geachtet werden.

f) Anmerkungen
Dieser Versuch ist sehr anschaulich, da die Schüler den Stromverstärkungsfaktor selber ausrechnen müssen.
Für alle Versuche gilt: An Volt- und Amperemeter müssen (zum Schutz der Bauteile) vorerst immer die angegeben Messbereiche eingestellt werden. Erst wenn man während der Messung merkt, dass genügend Spielraum vorhanden ist um einen kleineren Messbereich zu verwenden, kann man ihn umstellen. Diesen Hinweis sollte man den Schülern vor den Versuchen mitteilen!!

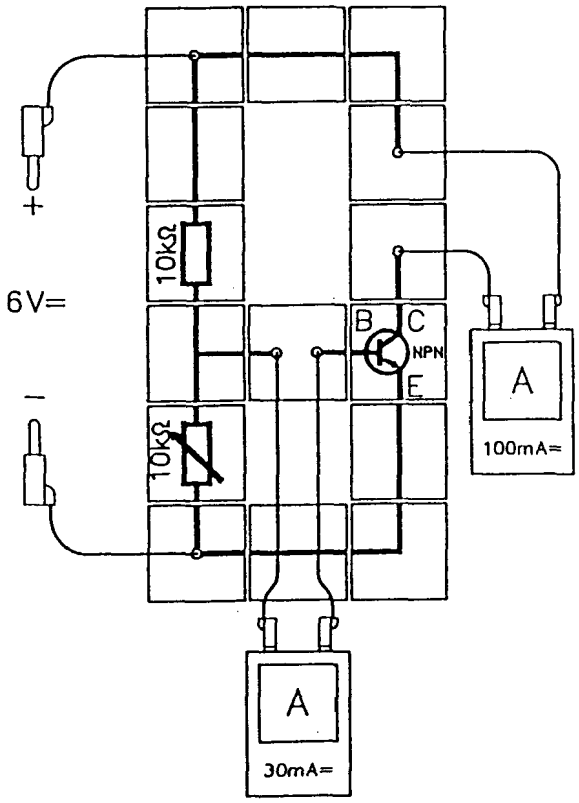
6. Versuch: „Steuerkennlinie eines NPN-Transistors“
(Versuch und Abbildung entnommen aus: [15])

Wir wollen an einem NPN-Transistor die Abhängigkeit des Kollektorstromes vom Basisstrom ohne Arbeitswiderstand messen.

a) Versuchsanordnung

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB Drehwiderstand 10 kΩ
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Messinstrumente
6 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



Zum Versuchsaufbau siehe auch:
Kapitel 11 (Foto-Anhang), Foto 2

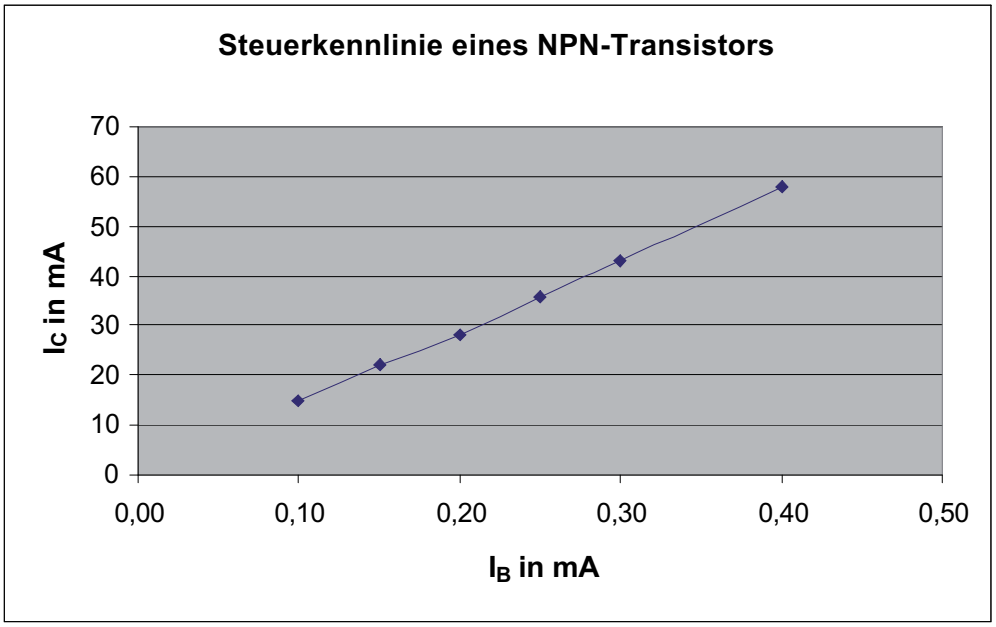
b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß der Abbildung auf. Das Amperemeter, das den Basisstrom I_B mißt, wird mit dem Messbereich 30 mA (Gleichstrom) verwendet, das Amperemeter, das den Kollektorstrom I_C mißt, wird mit dem Messbereich 100 mA (Gleichstrom) verwendet.

Versuch. Wir legen 6 V Gleichspannung an und regeln den Basisstrom mit Hilfe des Drehwiderstandes. Es werden verschiedene Werte des Basisstromes der Reihe nach eingestellt und der zugehörige Kollektorstrom gemessen.

Basisstrom I_B (in mA)	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3	0,4
Kollektorstrom I_C (in mA)	15	22	28	36	43	58

[15] NTL Schülerversuche: EL 3.3.6



c) Zeit

Wenn das Material bereits zur Verfügung steht, benötigt man für diesen Versuch ca. 15 Minuten.

d) Theoretischer Hintergrund

Der Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom ist nahezu linear.
Siehe auch: Kapitel 3, Seite 12 oben: „Der Transistor“ - Schülerversuch (Erkenntnis) sowie darüberstehende Erklärung zur Funktionsweise des Transistors

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 5.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 20 unten) angeführt sind.

f) Anmerkungen: (keine weiteren Anmerkungen)

7. Versuch: „Automatische Beleuchtung“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [16])

Der Basisstrom eines Transistors wird mit einem LDR (Light Depending Resistor = Fotowiderstand) gesteuert, wodurch der Transistor in Abhängigkeit von der Belichtung durchgeschaltet wird.

a) Versuchsanordnung

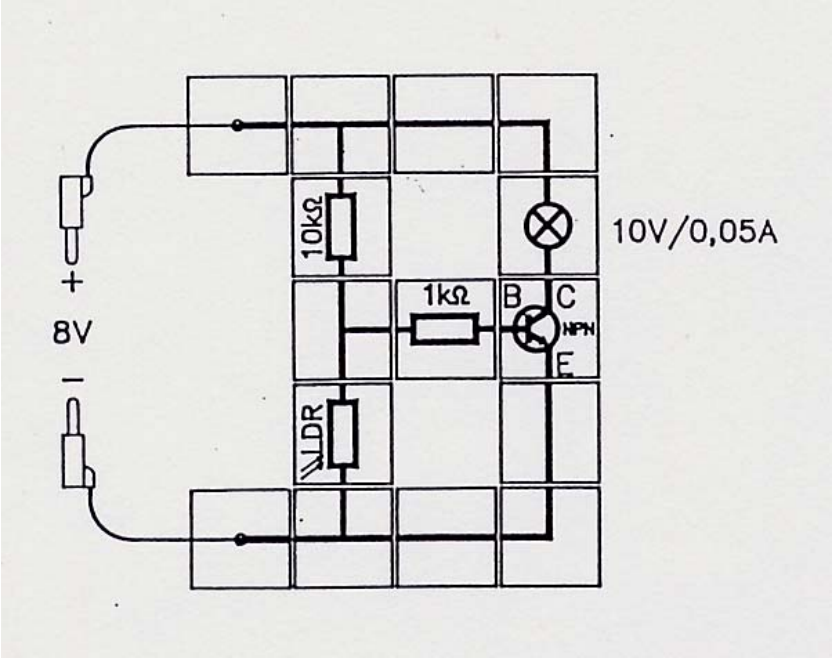
Zum Versuchsaufbau siehe auch: Kapitel 11 (Foto-Anhang):

[16] NTL Schülerversuche: EL 3.7

Foto 2: Aufbau mit Kerze ⇒ das Glühlämpchen leuchtet nicht
Foto 3: Aufbau ohne Kerze ⇒ das Glühlämpchen leuchtet

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB LDR-Widerstand
1 STB Transistor, NPN, Basis links
1 Glühlampe E10 10 V /0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung
Kerze



b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der Spannungsteiler besteht aus dem Widerstand 10 kΩ und dem LDR. Bei Dunkelheit ist der Widerstandswert des LDR groß, auf ihn entfällt der größere Teil der Spannung. Dadurch fließt Basisstrom und das Glühlämpchen leuchtet. Bei genügend Lichteinfall auf den LDR ist der Widerstandswert des LDR klein und die Teilspannung ebenfalls klein. Es fließt wenig Basisstrom und wenig Kollektorstrom; das Glühlämpchen leuchtet nicht.

Versuch: Der LDR wird abwechselnd abgedunkelt und belichtet. Bei Abdunkelung muss das Glühlämpchen leuchten, bei Lichteinfall auf den LDR muss das Glühlämpchen dunkel bleiben.

c) Zeit

Für diesen Versuch benötigt man ca. 10 Minuten.

d) Theoretischer Hintergrund

Siehe Kapitel 3, Seite 12: Optoelektronische Bauelemente – Photoleiter ;Schülerversuch (Erkenntnis) und anschließende Erklärung

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 5.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 20 unten) angeführt sind.

Bei unserem Versuch war das Licht im Raum nicht ausreichend – die Glühbirne leuchtete auch, wenn der LDR nicht „verdunkelt“ war. In diesem Fall muss man eine kleine Kerze (Teelicht) oder ein Feuerzeug nahe genug an den LDR bringen.

f) Anmerkungen
Dieser Versuch ist eine gute Demonstration, für welche Bereiche des täglichen Lebens Halbleiterbauelemente verwendet werden können.

8. Versuch: „Feuermelder“

(Versuch und Abbildung entnommen aus: [17])

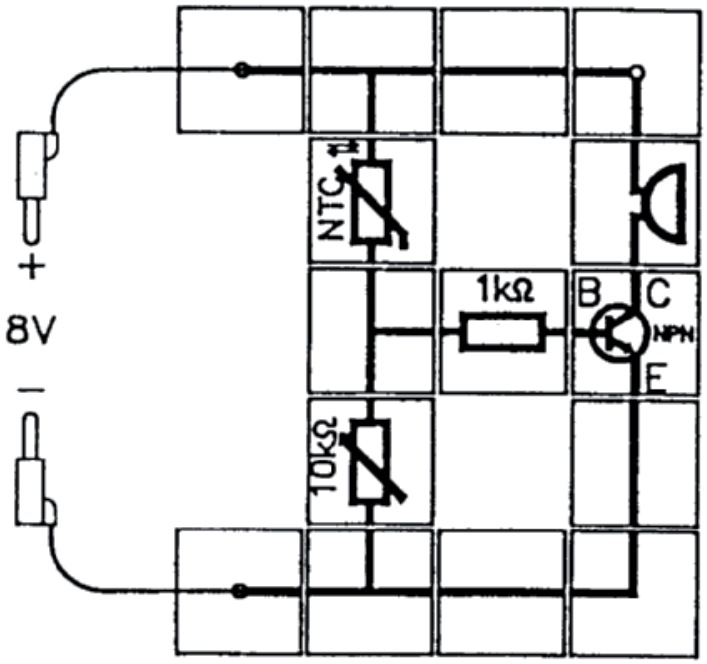
Der Basisstrom eines Transistors wird mit einem NTC-Widerstand gesteuert, wodurch der Transistor in Abhängigkeit von der Temperatur durchgeschaltet wird. (Beim NTC-Widerstand wird der Widerstandswert bei Temperaturerhöhung kleiner.)

a) Versuchsanordnung

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 1 kΩ
1 STB Drehwiderstand 10 kΩ
1 STB NTC-Widerstand
1 STB Summer
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

Zum Versuchsaufbau siehe auch:
Kapitel 11 (Foto-Anhang), Foto 5 und Foto 6



b) Versuchsdurchführung

Schaltung: Wir bauen die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der Stellwiderstand 10 kΩ wird so eingestellt, dass gerade noch nicht der Summer ertönt.

Versuch: Der NTC wird mit den Fingern erwärmt. Nach einigen Sekunden wird „Alarm“ ausgelöst. Der Widerstandswert des NTC ist kleiner geworden. Dadurch fällt am Stellwiderstand eine höhere Spannung ab, und der Transistor wird durchgeschaltet.

c) Zeit

Für diesen Versuch benötigt man ca. 10 Minuten.

[17] NTL Schülerversuche: EL 3.9

d) Theoretischer Hintergrund

Beim NTC-Widerstand wird der Widerstand bei Temperaturerhöhung kleiner. Diese Widerstandsverminderung eines NTC durch Erwärmung kann für einen Feuermelder ausgenützt werden.
Siehe auch:
Kapitel 3, S. 5: Eigenschaften von Halbleitern
Kapitel 3, S. 6: Der reine Halbleiter
Kapitel 3, S. 12 unten und S. 13 oben (Schülerversuch (Erkenntnis)

e) Experimentelle Schwierigkeiten und deren Behebung

Hier sind wiederum jene Punkte zu erwähnen, die bereits beim 5.Versuch (siehe Kapitel 4, S. 20 unten) angeführt sind.

f) Anmerkungen

Wenn man den Stellwiderstand nicht sehr nah an jenen Punkt einstellt, an dem der Summer gerade noch nicht ertönt, kann es eine Weile dauern bis der NTC-Widerstand genug erwärmt ist um den Alarm auszulösen.

5) *Arbeitsblätter*

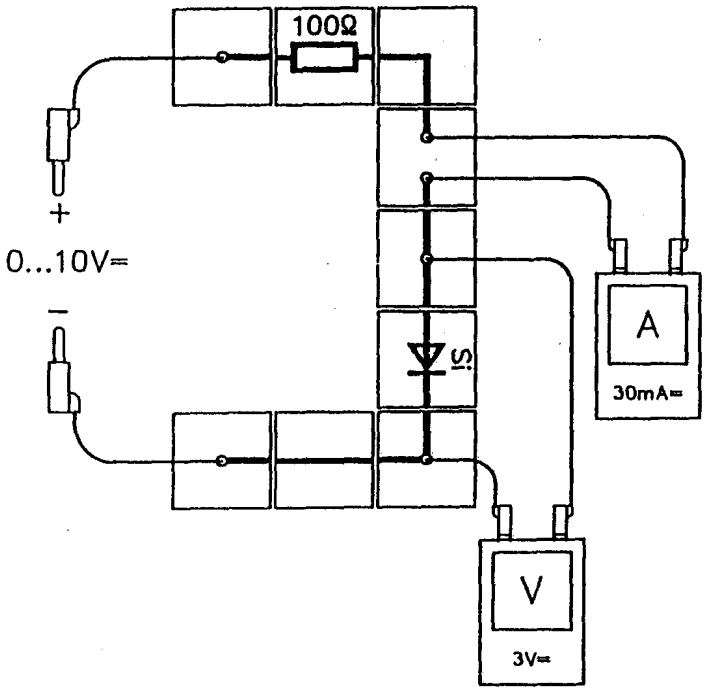
Dieser Abschnitt enthält Schülerarbeitsblätter zu den oben besprochenen Versuchen.

Arbeitsblatt 1 - Kennlinien von Halbleiterdioden

Wir wollen für eine Siliziumdiode den Zusammenhang zwischen angelegter Spannung und Stromstärke untersuchen.

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 100 Ω
1 STB Si-Diode
2 Messinstrumente
6 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

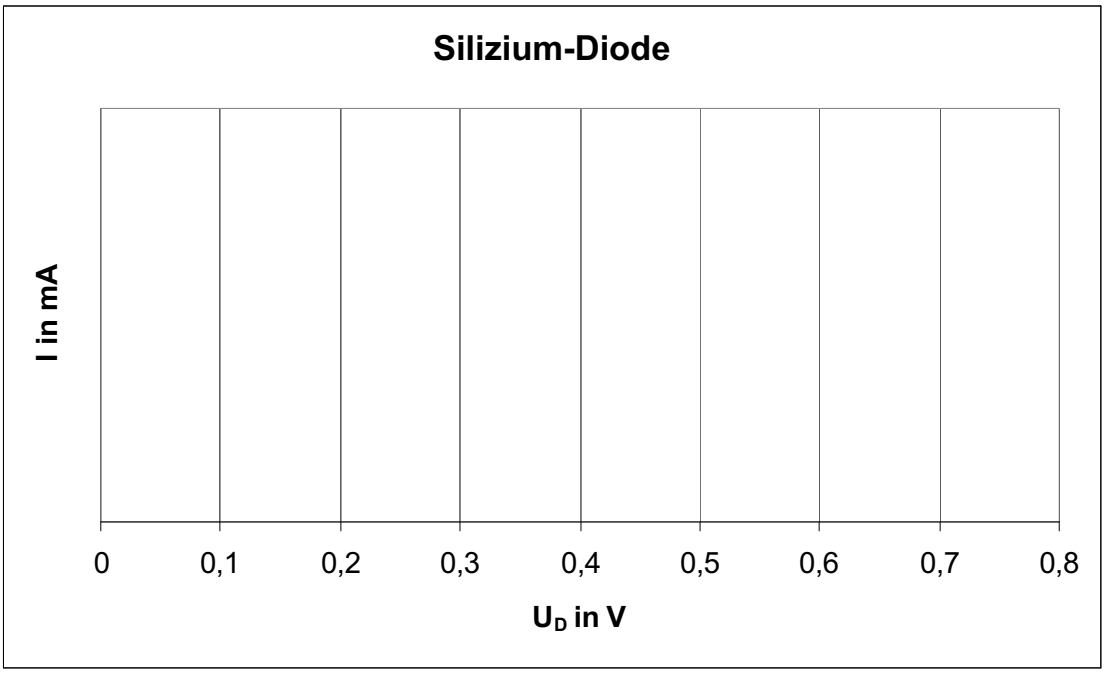


Schaltung: Baue die Schaltung gemäß der Abbildung auf. Es wird das Verhalten der Siliziumdiode untersucht. Sie ist in Durchlassrichtung eingesteckt. Der Widerstand 100 Ω dient als Schutz für die Diode. Das Voltmeter mißt die an der Diode anliegende Spannung und wird mit dem Messbereich 3 V - Gleichstrom verwendet. Das Amperemeter wird mit dem Messbereich 30 mA - Gleichstrom verwendet.

Versuch: Lege Gleichspannung an und erhöhe sie langsam. Die vom Voltmeter angezeigte Spannung an der Siliziumdiode soll der Reihe nach die in der Tabelle angeführten Werte annehmen. Die jeweilige Stromstärke wird in der Tabelle eingetragen.

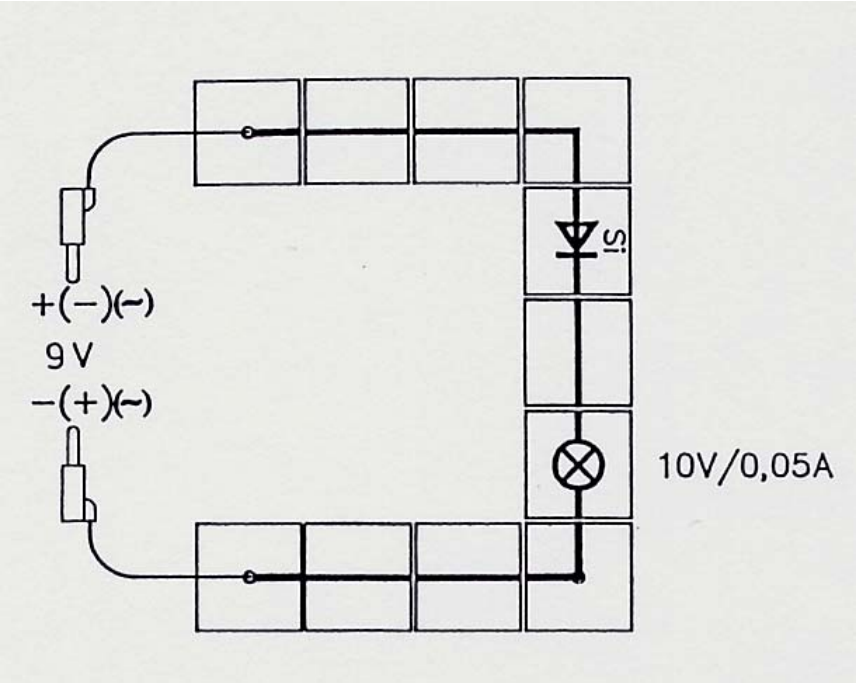
Spannung U_D (in V)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
Stromstärke I (in mA)	.....	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Trage die Messwerte in nachstehendes Diagramm ein und verbinde die Punkte.


Silizium-Diode
I in mA
0
0,1
0,2
0,3
0,4
0,5
0,6
0,7
0,8
U_D in V

Arbeitsblatt 2 - Einweg-Gleichrichtung

Wenn wir nur Wechselspannung zur Verfügung haben, aber Gleichstrom benötigen, können wir den gewünschten Gleichstrom mit Hilfe einer Diode gewinnen.



Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Si-Diode
1 Glühlampe E10 10 V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf. Veranschauliche dir im ersten Versuch das Geschehen, indem du, statt Wechselspannung zu verwenden, die Gleichspannung umpolst.

1. Versuch: Pole die angelegte Gleichspannung mehrmals um, indem du die Anschlüsse an der Spannungsquelle vertauscht. Was beobachtest du beim Glühlämpchen?

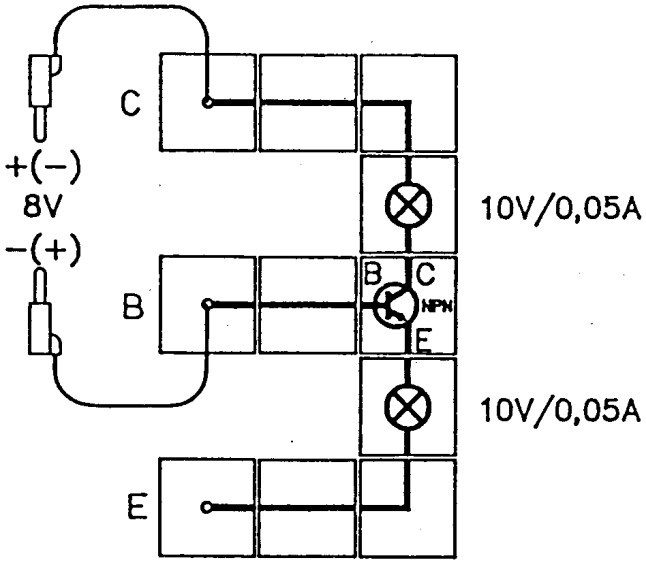
2. Versuch: Lege nun 9 Volt Wechselspannung an. Was beobachtest du nun?

Arbeitsblatt 3 - Besteht ein Transistor aus zwei Dioden?

Wir untersuchen einen Transistor. Transistoren besitzen drei Anschlüsse, die mit E (Emitter), B (Basis) und C (Kollektor) bezeichnet werden.

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
2 STB Lampenfassung E10
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Glühlampen E10 10V/0,05A
2 Verbindungsleitungen



Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der Transistor und zwei Glühlämpchen sind in Reihe geschaltet.
Beim 1. Versuch wird die Spannung an die Anschlüsse C und E gelegt,
beim 2. Versuch an die Anschlüsse C und B und
beim 3. Versuch an die Anschlüsse B und E.

1. Versuch: Prüfe den Übergang Kollektor – Emitter, indem du zuerst den Pluspol an den Kollektor (C) und dann an die Basis (B) anschließt. Bei welcher Polung fließt Strom?

Schaltung	**Strom fließt**	
Pluspol an Kollektor	☐ JA	☐ NEIN
Pluspol an Emitter	☐ JA	☐ NEIN

2. Versuch: Prüfe den Übergang Kollektor – Basis, indem du zuerst den Pluspol an den Kollektor (C) und dann an die Basis (B) anschließt. Bei welcher Polung fließt Strom?

Schaltung	**Strom fließt**	
Pluspol an Kollektor	☐ JA	☐ NEIN
Pluspol an Basis	☐ JA	☐ NEIN

3. Versuch: Prüfe den Übergang Basis – Emitter, indem du zuerst den Pluspol an die Basis (B) und dann an den Emitter (E) anschließt. Bei welcher Polung fließt Strom?

Schaltung	**Strom fließt**	
Pluspol an Basis	☐ JA	☐ NEIN
Pluspol an Emitter	☐ JA	☐ NEIN

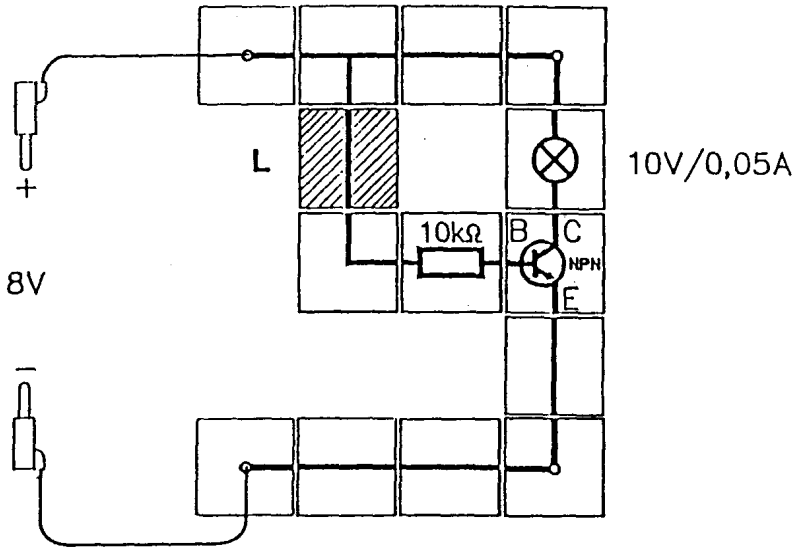
Aufgabe:
Beschreibe, wie sich ein Transistor verhält (Hinweis: Erinnere dich an das Verhalten einer Diode!)

Arbeitsblatt 4 - Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom

Nach dem Modell des Transistors als Doppeldiode dürfte ein Kollektor – Emitter – Strom nicht möglich sein, weil bei jeder der beiden Polungsmöglichkeiten an Kollektor und Emitter eine Diode sperrt.

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Transistor, NPN,
Basis links
1 Glühlampe E10 10V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf. Ein Stromkreis (Gleichspannung 8 Volt, Pluspol am Kollektor) führt über Glühlämpchen und Kollektor zum Emitter des Transistors.

1. Versuch: Der schraffiert gezeichnete Leitungsbaustein L wird zunächst nicht eingesteckt. Somit fließt kein Basis-Emitter-Strom. Was passiert mit dem Glühlämpchen?

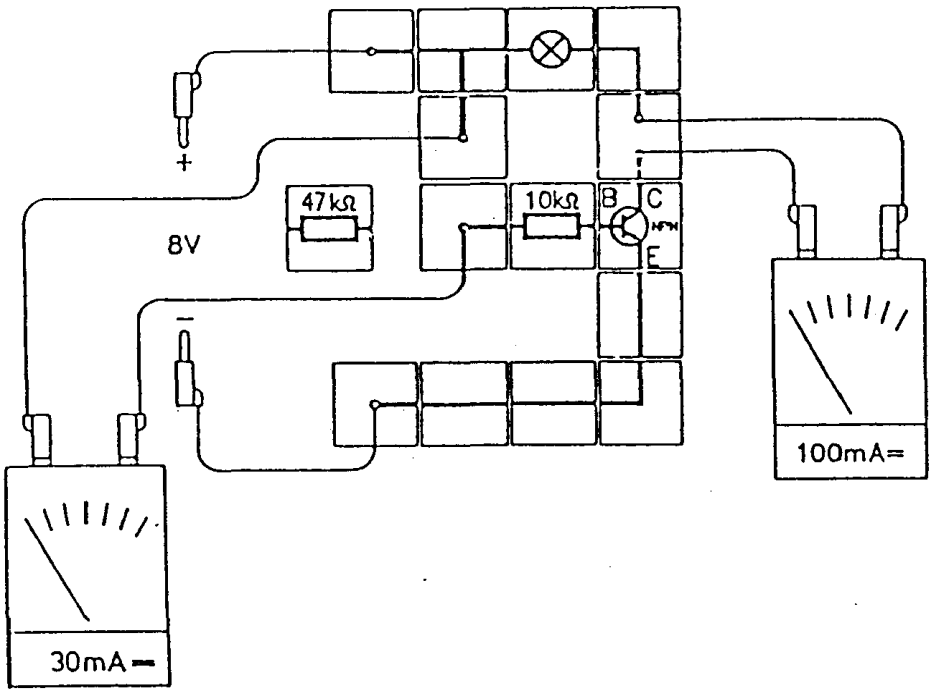
2. Versuch: Stecke nun die Verbindung L ein. Dadurch legst du den Pluspol über den 10 kΩ - Widerstand an die Basis und es fließt ein Basis-Emitter-Strom. Was passiert nun mit dem Glühlämpchen?

Arbeitsblatt 5 - Der Transistor als Verstärker

Kleine Änderungen des Basisstroms bewirken viel größere Änderungen des Kollektorstroms eines Transistors. Darauf beruht die Verstärkerwirkung eines Transistors.

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Transistor, NPN,
Basis links
1 Glühlampe E10 10V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf. Den Basisstrom mißt du mit dem Amperemeter mit Messbereich 30 mA –Gleichstrom und den Kollektorstrom mit dem Amperemeter mit Messbereich 100 mA –Gleichstrom.

Versuch: Wir messen den Kollektorstrom und den Basisstrom erst mit dem Basiswiderstand 10 kΩ und dann mit dem Basiswiderstand 47 kΩ. Die Ergebnisse tragen wir in die Tabelle ein:

Kollektorstrom bei 47 kΩ: ..... mA
Kollektorstrom bei 10 kΩ: ..... mA

Kollektorstromänderung: ..... mA

Basisstrom bei 47 kΩ: ..... mA
Basisstrom bei 10 kΩ: ..... mA

Basisstromänderung: ..... mA

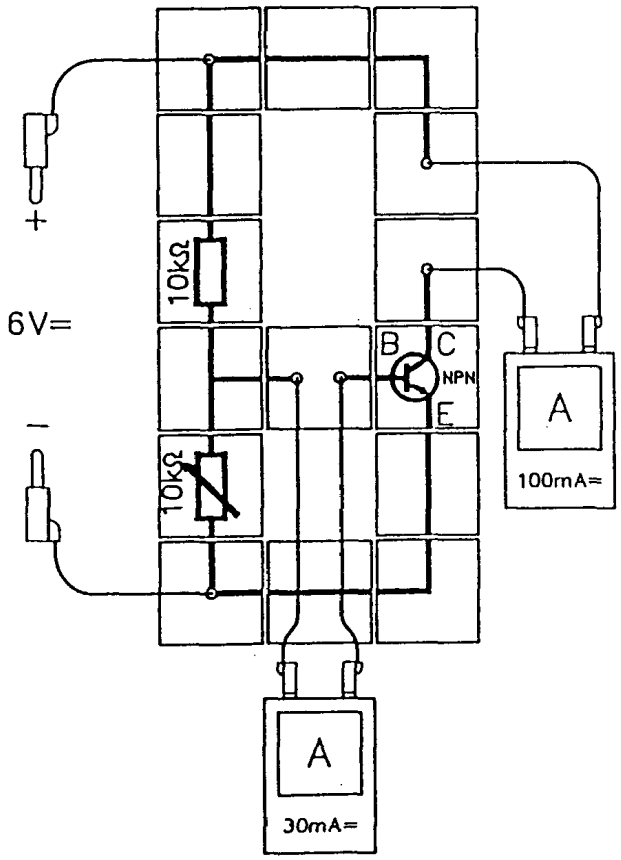
$$\text{Stromverstärkungsfaktor} = \frac{\text{Kollektorstromänderung}}{\text{Basisstromänderung}} = \frac{\text{..... mA}}{\text{..... mA}} = \underline{\qquad\qquad}$$

Arbeitsblatt 6 - Steuerkennlinie eines NPN-Transistors

Wir wollen an einem NPN-Transistor die Abhängigkeit des Kollektorstromes vom Basisstrom ohne Arbeitswiderstand messen.

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB Drehwiderstand 10 kΩ
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Messinstrumente
6 Verbindungsleitungen
Stromversorgung

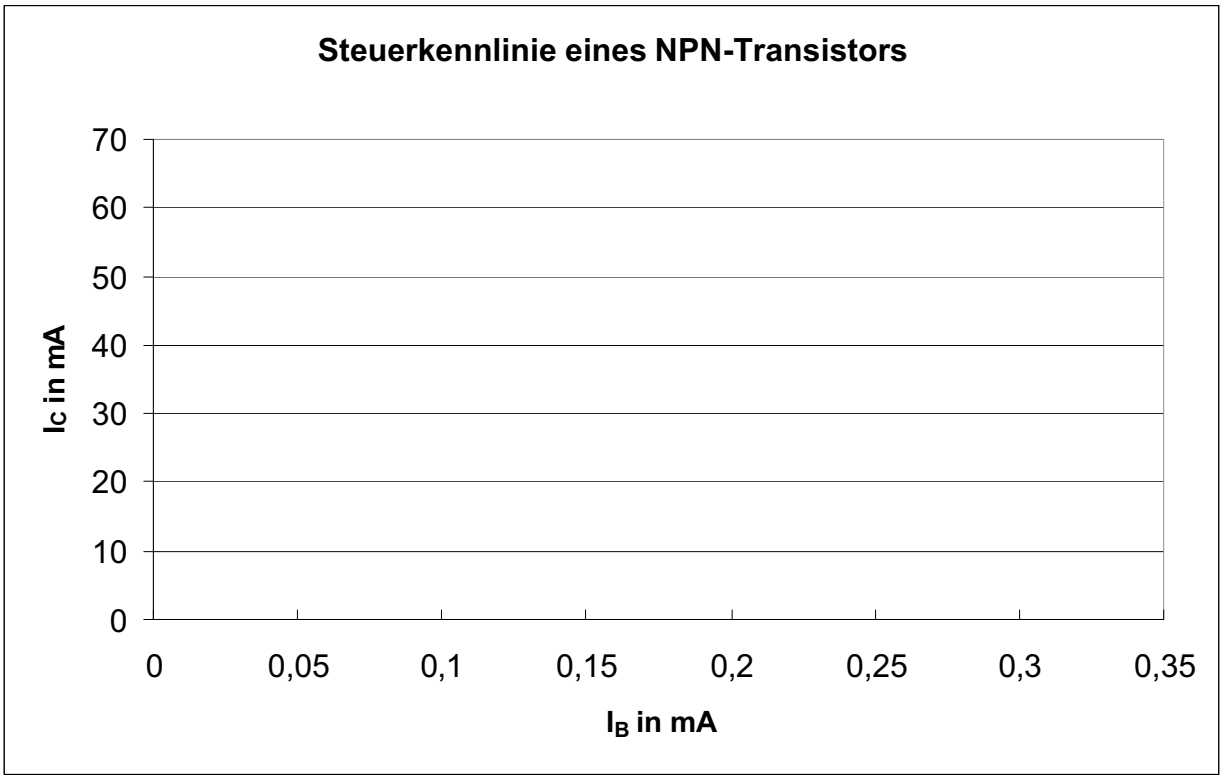


Schaltung: Baue die Schaltung gemäß der Abbildung auf. Das Amperemeter, das den Basisstrom I_B mißt, wird mit dem Messbereich 30 mA –Gleichstrom verwendet, das Amperemeter, das den Kollektorstrom I_C mißt, wird mit dem Messbereich 100 mA –Gleichstrom verwendet.

Versuch: Lege 6 V Gleichspannung an und regle den Basisstrom mit Hilfe des Drehwiderstandes. Die in der Tabelle angegebenen Werte des Basisstromes werden der Reihe nach eingestellt und der zugehörige Kollektorstrom gemessen und in die Tabelle eingetragen.

Basisstrom I_B (in mA)	0,05	0,1	0,15	0,2	0,25	0,3
Kollektorstrom I_C (in mA)	.....	.....	.....	.....	.....	.....

Stelle die Messergebnisse im I_C-I_B-Diagramm graphisch dar.



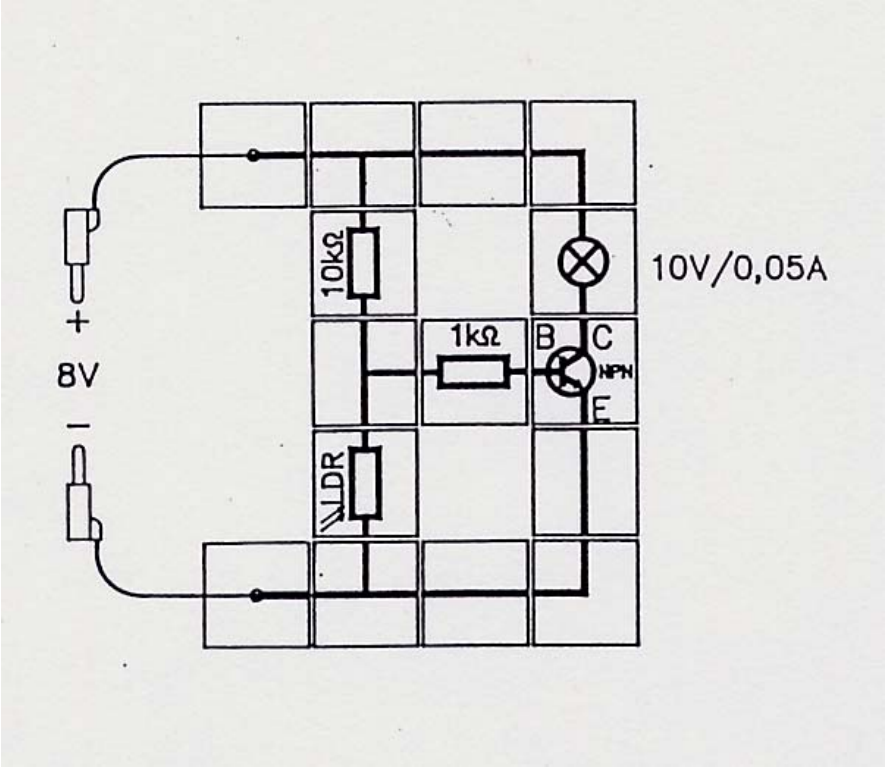
Wie ist der Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom?

Arbeitsblatt 7 - Automatische Beleuchtung

Der Basisstrom eines Transistors wird mit einem LDR gesteuert, wodurch der Transistor in Abhängigkeit von der Belichtung durchgeschaltet wird. (Der Widerstandswert des LDR ist bei Dunkelheit groß und bei genügend Lichteinfall klein.)

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Lampenfassung E10
1 STB Widerstand 10 kΩ
1 STB LDR-Widerstand
1 STB Transistor, NPN, Basis links
1 Glühlampe E10 10 V/0,05 A
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung
Kerze oder Feuerzeug



Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf.

Versuch: Der LDR wir abwechselnd abgedunkelt und belichtet. Bei Abdunkelung muss das Glühlämpchen leuchten, bei Lichteinfall auf den LDR muss das Glühlämpchen dunkel bleiben.

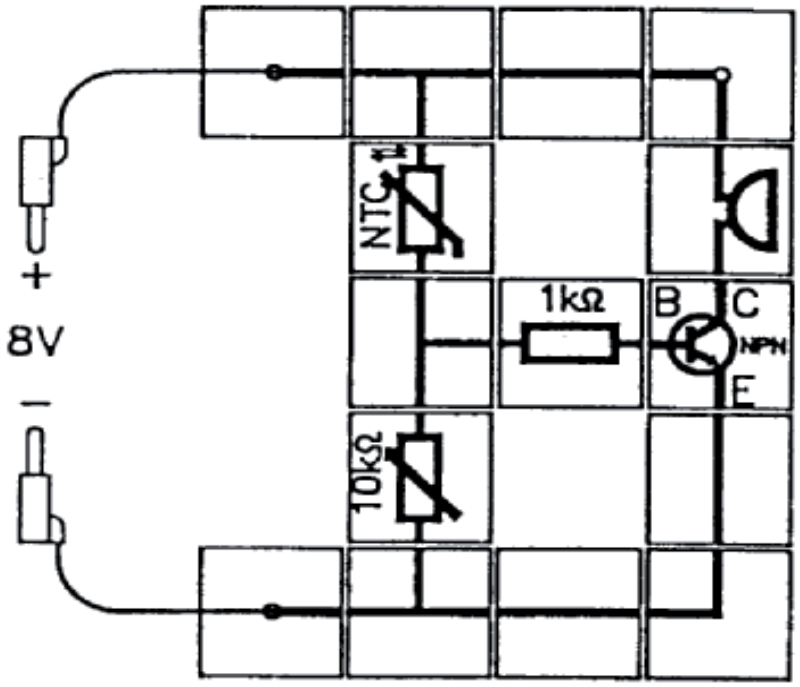
Aufgabe:
Überlege, warum das Glühlämpchen bei Abdunkelung leuchtet und bei genügend Lichteinfall nicht!

Arbeitsblatt 8 - Feuermelder

Der Basisstrom eines Transistors wird mit einem NTC-Widerstand gesteuert, wodurch der Transistor in Abhängigkeit von der Temperatur durchgeschaltet wird. (Beim NTC-Widerstand wird der Widerstandswert bei Temperaturerhöhung
kleiner.)

Material:

Schaltplatte
STB Leitungen, Satz
1 STB Widerstand 1 kΩ
1 STB Drehwiderstand 10 kΩ
1 STB NTC-Widerstand
1 STB Summer
1 STB Transistor, NPN, Basis links
2 Verbindungsleitungen
Stromversorgung



Schaltung: Baue die Schaltung gemäß Abbildung auf. Der Stellwiderstand 10 kΩ wird so eingestellt, dass der Summer gerade noch nicht ertönt.

Versuch: Der NTC wird mit den Fingern erwärmt. Nach einigen Sekunden wird „Alarm“ ausgelöst.

Aufgabe:
Überlege, warum der Alarm ausgelöst wurde!

6) *Medien*

Zur Vermittlung des Stoffes können verschiedene Medien eingesetzt werden:

1. Overheadprojektor:
   Dazu habe ich Folien gestaltet, die im nächsten Kapitel zu finden sind.

2. Anstelle Folien zu verwenden, könnten die entsprechenden Seiten auch mittels Videobeamer an die Wand projiziert werden.

3. Tafel:
   Für die Zeichnung von Abbildungen (siehe Folie 3 und Folie 4) kann auch die Tafel verwendet werden. Der Vorteil der Tafel ist, dass man problemlos Ergänzungen in der Zeichnung machen kann.

7) *Folien*

Im Anschluss nun einige Folien, die im Unterricht verwendet werden können. Zu welchem Kapitel sie jeweils gehören, wird in der Mitschrift erwähnt.

Hierzu noch einige Anmerkungen:

- Bevor man die Folien 3 und 4 verwendet, sollte man überprüfen, ob die Zeichnung auch überall in der Klasse gut sichtbar sind. Wenn nicht ist es besser, die Zeichnungen selbst an der Tafel zu erstellen.

Die Folien werden während der Erklärung durch den Lehrer gezeigt.

Folie 1: Diese Folie sollte kopiert und an die Schüler verteilt werden.

Folie 2: Diese Folie sollte von den Schüler abgeschrieben werden.

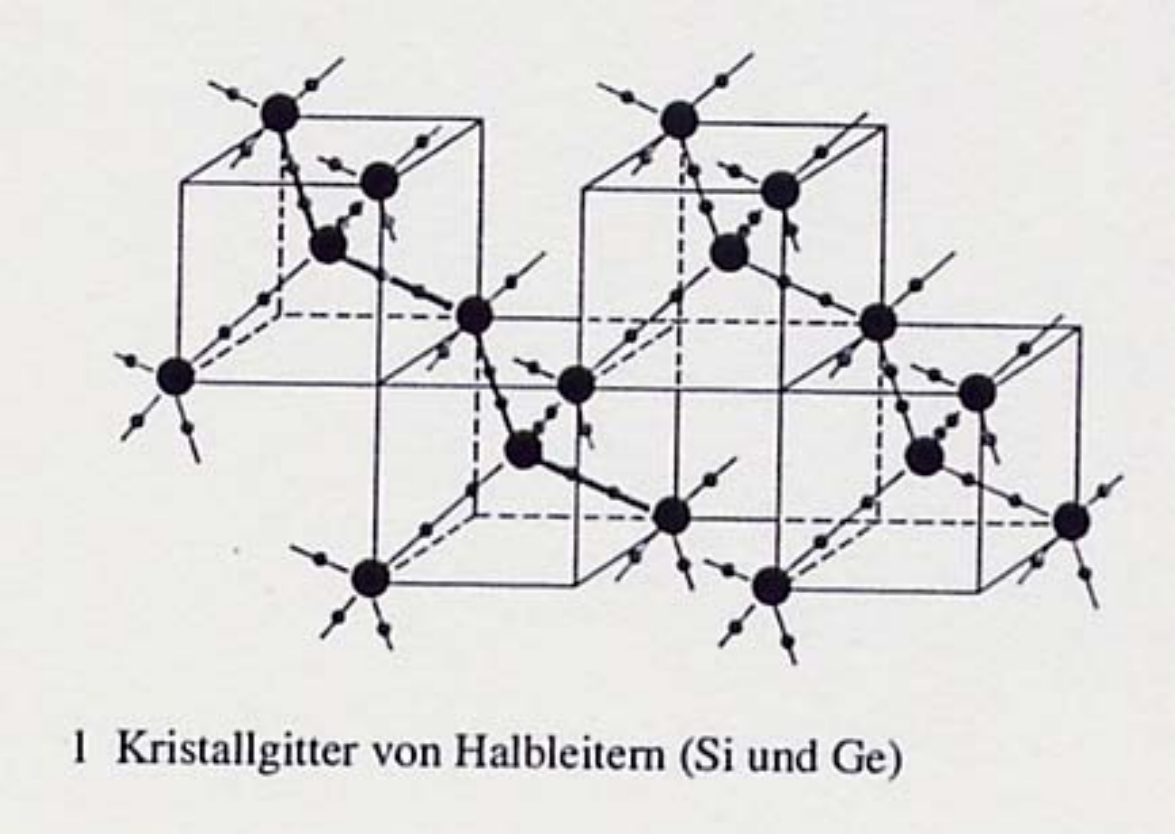
Folie 3 und **Folie 4**: Die Abbildungen sollen von den Schülern in die Mitschrift gezeichnet werden. Die Erklärungen dazu sind im nächsten Kapitel (Mitschrift) zu finden.

Folie 5: Dies Folie dient wiederum zum Abschreiben für die Schüler.

Spezifischer Widerstand einiger wichtiger Materialien:

Material		spezifischer Widerstand (Ωm)
Isolatoren	Hartgummi	10^{16}
	Glimmer	10^{14}
	Elfenbein	10^{7}
Halbleiter	Reines Silizium	10^{2}
	Reines Germanium	1
	dotiertes Silizium	10^{-1} ... 10^{-3}
Leiter	Kupfer, Silber	10^{-8}

(Tabelle 1)



(Abbildung 1: Kristallgitter von Silizium, Germanium und Diamant)

Ein freies Elektron hinterlässt eine „Lücke“.

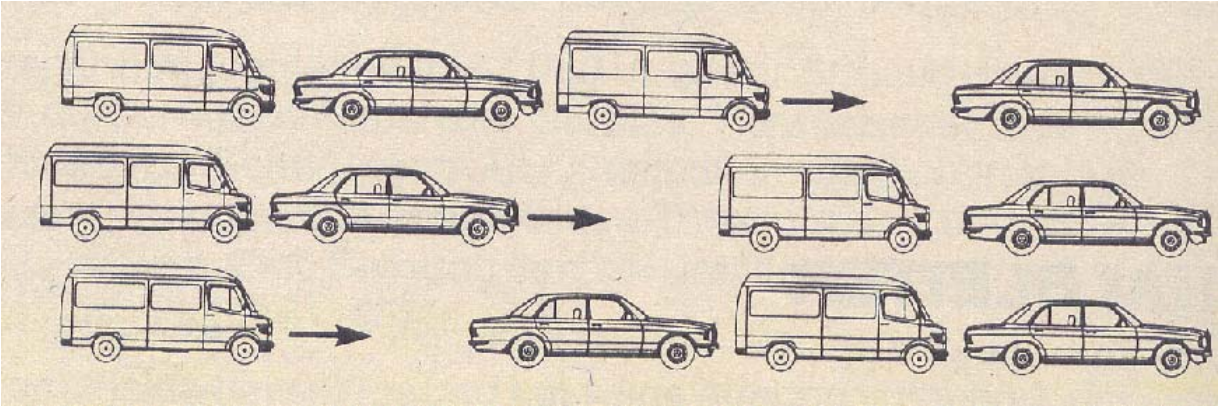
(„Lücke“ = Elektronenloch, Defektelektron)

Dieses Elektronenloch verhält sich wie ein positiver Ladungsträger.

Diese Loch kann nun leicht von einem frei werdenden Nachbarelektron aufgefüllt werden, das nun seinerseits ein Loch erzeugt.

Das Loch bewegt sich also in die entgegengesetzte Richtung der Elektronenbewegung.

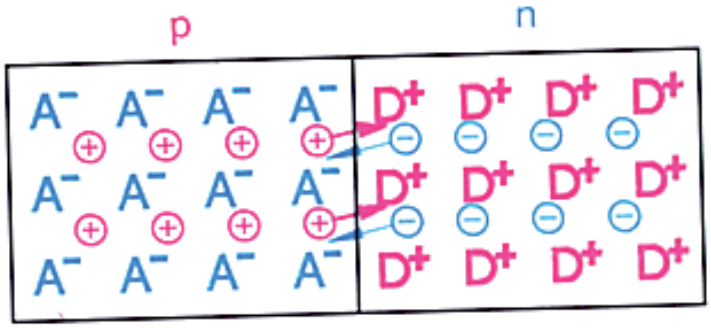
Diese Löcherwanderung kann man sich durch das Aufschließen einer Lücke in einer stehenden Autokolonne vorstellen:



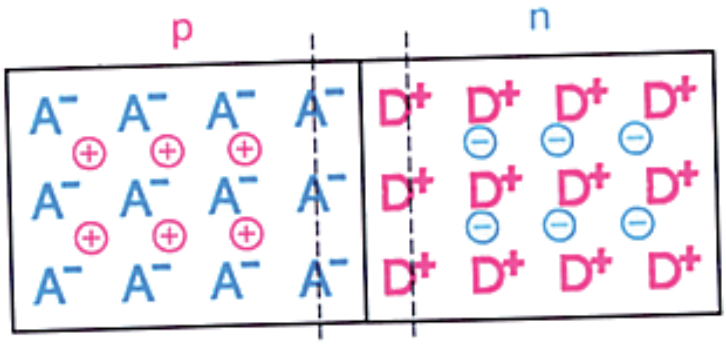
Während die Autos nach rechts aufschließen, bewegt sich die Lücke nach links.

Somit gibt es zwei entgegengesetzte Leitungsmechanismen. Bei angelegter äußerer Spannung wandern:

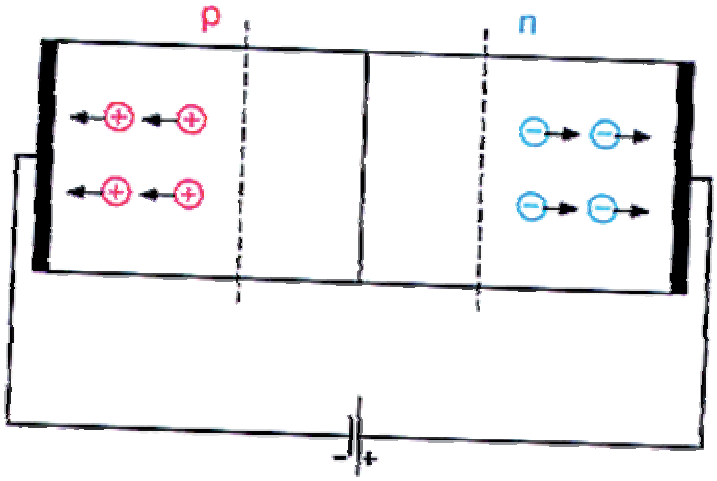
Elektronen	**vom**	**negativen**	**zum**	**positiven**
Elektronenlöcher	**vom**	**positiven**	**zum**	**negativen Pol.**



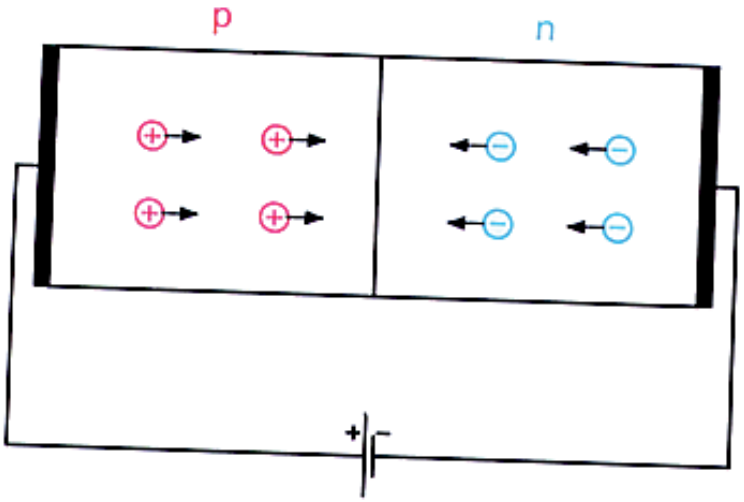
(Abbildung 1)
Diffusion von Elektronen und Löchern



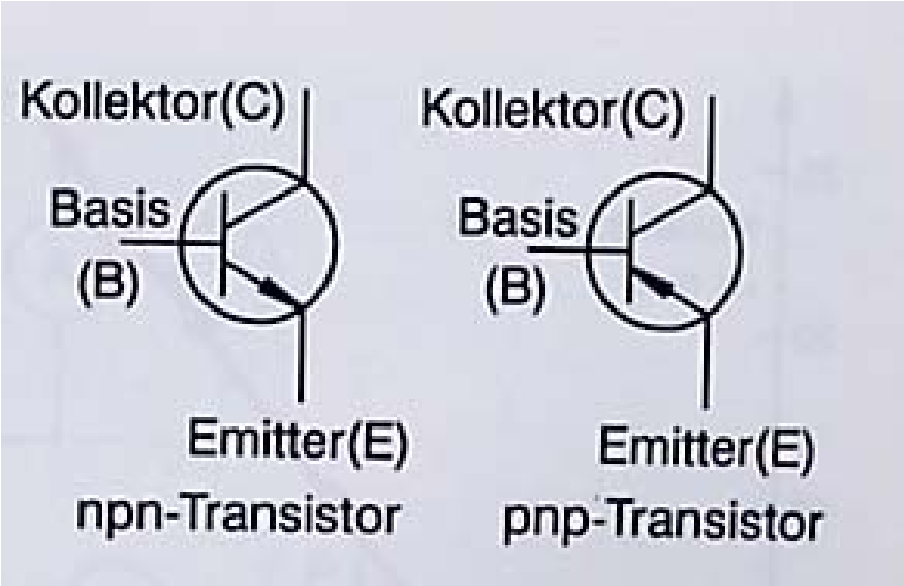
(Abbildung 2)
Die Grenzschicht verarmt an freien Ladungsträgern und wird zur hochohmigen Sperrschicht



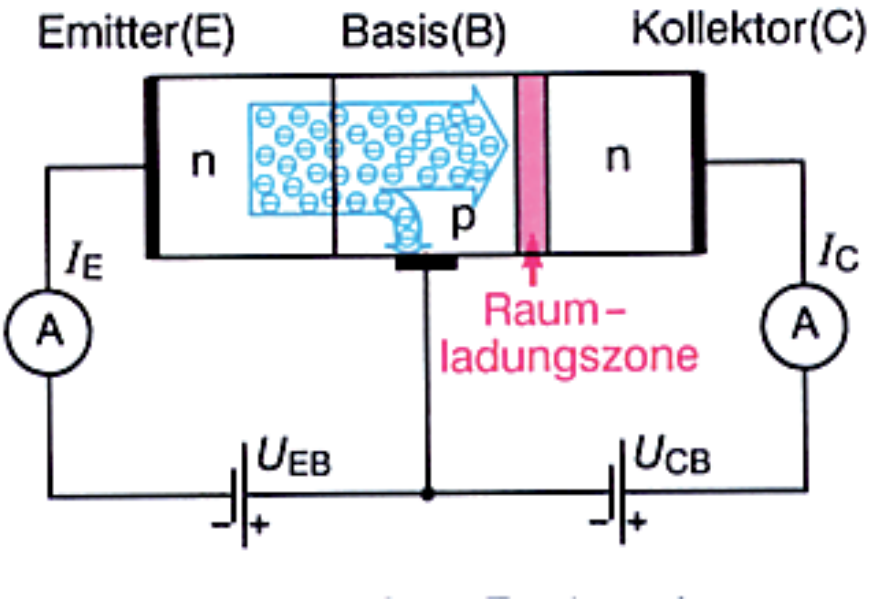
(Abbildung 3)
Spannung in Sperrichtung



(Abbildung 4)
Spannung in Durchlassrichtung



(Abbildung 1: Schaltsymbole für Transistoren)
(Technische Stromrichtung beachten!)



(Abbildung 2: Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom)

6. Optoelektronische Bauelemente

Mit diesen Halbleiterbauelementen ist eine Umwandlung von Licht in Elektrizität möglich.

a) Photoleiter

oft aus als LDR bezeichnet, sind homogene Halbleiter ohne pn-Übergang. Wenn Licht auf die Oberfläche eines LDR fällt, werden Elektronen von den Gitteratomen gelöst und dadurch frei bewegliche Elektronen und Löcher geschaffen. Durch Auswahl der Materialien und gezielter Dotierung lässt sich der Wellenlängenbereich wählen, in dem der LDR seine höchste Empfindlichkeit hat.

b) Photodiode

Durch Lichteinfall werden Elektronen und Löcher gebildet. Die im p-Leiter produzierten Elektronen (und die im n-Leiter produzierten Löcher) wandern unter dem Einfluss einer in Sperrichtung angelegten Spannung zur Sperrschicht und erhöhen den Sperrstrom.

8) *Mitschrift der Schüler*

Zu diesem Punkt gehören einerseits Textpassagen, die den Schülern angesagt werden, und andererseits auch Folien und Unterlagen, die von den Schülern abgeschrieben werden bzw. an diese verteilt werden. Inhaltlich richtet sich dieser Punkt nach Punkt 3 (Theoretischer Hintergrund / Erklärung).

Weiters ist beabsichtigt, dass die Schüler die Arbeitsblätter der Schülerversuche ebenfalls in ihre Mitschrift aufnehmen. Hier möchte ich jedoch noch anmerken, dass ich gerade in der Oberstufe versuchen möchte, die Schüler an das Lernen aus dem Schulbuch zu gewöhnen (im Hinblick darauf, dass man ihm Studium sich ebenfalls viel Wissen aus Büchern aneignen muss.) Die Mitschrift der Schüler ist demnach auch vom verwendeten Schulbuch abhängig und muss von mir jeweils an meine Anforderungen angepasst werden.

Ich beginne nun mit dem Punkt „Geschichtlicher Überblick“. Dazu möchte ich den Schülern die folgende Textseite als Kopie zur Verfügung stellen, da ich nicht zu viel Zeit mit Abschreiben von Text verschwenden möchte.

Anschließend kommt der Text, der in das Heft geschrieben wird. Hinweise von mir, die nicht zur Mitschrift gehören, sind kursiv geschrieben!!

HALBLEITER

1. Geschichtlicher Überblick

Der Masseneinsatz miniaturisierter elektronischer Bauelemente hat die Welt drastisch verändert. Besonders deutlich ist dies im Bereich der Nachrichtenübermittlung (z. B. Autotelefon). Diese Neuerungen sind so bedeutsam, dass bereits von einer weiteren „industriellen Revolution“, vom Übergang vom industriellen Zeitalter ins Informationszeitalter gesprochen wird.

Am Beginn dieser Entwicklung stand eine wissenschaftliche Entdeckung, die lange ignoriert wurde: In einem Vortrag im Jahr 1876 führte der Physiklehrer Ferdinand Braun Experimente zur Stromleitung in Kristallen vor. Er presste eine Metallspitze auf einen Schwefelkieskristall und fand: in einer Richtung leitet der Kristall gut und zwar umso besser, je größer der Strom ist, in der anderen Richtung fließt nur wenig Strom. Dieser ***Gleichrichtereffekt*** widersprach allen damals bekannten Eigenschaften der Materie und es dauerte bis 1939, bis eine Erklärung dieser Eigenschaften gefunden werden konnte.

Den entscheidenden Impuls erhielt die Nachrichtentechnik zu Beginn des 20. Jahrhunderts durch die Entwicklung der Elektronenröhre, die bis 1955 die Nachrichtentechnik prägte. Sie diente zur Gleichrichtung von Wechselströmen und zur Verstärkung elektrischer Signale, doch ihre Nachteile ließen sich nicht leugnen: sie war gegen Stöße empfindlich, die Glühkathoden hatten kurze Lebensdauern, zum Betrieb waren beträchtliche Heizleistungen erforderlich und je mehr Elektronenröhren die elektronischen Geräte enthielten, desto unzuverlässiger wurden sie.

Man suchte daher (insbesondere in den Forschungslabors der Industrie) nach einem kompakten Bauteil, der ohne die Nachteile einer Elektronenröhre als Steuerungs- und Verstärkungselement dienen konnte. So begann die systematische Untersuchung der Eigenschaften sogenannter Halbleiter, Stoffen, die eine Zwischenstellung zwischen Metallen und Isolatoren einnehmen (dazu gehören unter anderem: Silizium, Germanium, Selen).

Nach der Erfindung des Transistors 1947 war die Entwicklung der integrierten Schaltkreise ab 1965 eine weitere entscheidende technische Errungenschaft. Sie ermöglichen die moderne Rechen- und Steuerungstechnik vom Taschenrechner bis zum Industrieroboter.

(Der nachfolgende Text gehört zur Mitschrift.)

2. Eigenschaften von Halbleitern

Nachfolgend einige Eigenschaften von Halbleiterbauelementen:

Heißleiter sind spezielle Halbleiter. Wenn man einen Heißleiter erhitzt, sinkt sein Widerstand stark – im Gegensatz zu dem von Metallen. Man nennt diesen Heißleiter auch NTC-Widerstand („**n**egative **t**emperature **c**oefficient“).

Ähnlich verhält sich ein sogenannter **Fotowiderstand** oder LDR („**l**ight **d**ependent **r**esistor“) wenn Licht auf ihn einfällt. Der Widerstand dieses Halbleiterbauteils sinkt beim Belichten.

Die **Halbleiterdiode** leitet je nach Polung der Stromversorgung den elektrischen Strom oder nicht.

Schülerversuch „Kennlinien von Halbleiterdioden“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: In Durchlassrichtung beginnt erst ab einem Schwellenwert der angelegten Spannung ein nennenswerter Strom zu fließen, der bei erhöhter Spannung rasch anwächst. Die Strom-Spannungs-Kurve zeigt den Unterschied zu einem metallischen Leiter (Ohmscher Widerstand) deutlich: Metallische Leiter zeigen einen linearen Zusammenhang zwischen Strom und Spannung, die Strom-Spannungs-Kurve ist bei Halbleitern nichtlinear.

Merksatz:

Die elektrischen Eigenschaften eines Halbleiters unterscheiden sich wesentlich von den Eigenschaften eines metallischen Leiters.

3. Der reine Halbleiter

(Beilage zur Mitschrift: Kopie der Folie 1)

Unter einem Halbleiter verstehen wir einen Festkörper, der Strom besser als ein Isolator aber schlechter als ein metallischer Leiter leitet (siehe: Folie 1, Tabelle 1).

Die wichtigsten Halbleiter sind Silizium und Germanium. Sie stehen im Periodensystem in der 4. Hauptgruppe zwischen Kohlenstoff (der als Diamantkristall ein Isolator ist) und dem metallischen Zinn.

Wodurch kommen die unterschiedlichen Eigenschaften von Kohlenstoff, Silizium, Germanium und Zinn zustande?

Zinn: Zinn ist ein Metall. Bei der Bildung des Metallgitters verliert jedes Zinnatom ein Elektron aus seiner Elektronenhülle, das als Leitungselektron sich nahezu frei zwischen den ortsfesten, positiven Metallionen bewegen kann.

Diamant: Im Diamantkristall ist jedes Atom von vier Nachbarn umgeben, die Bindung erfolgt durch gemeinsame Elektronenpaare (kovalente Bindung). Um ein Elektron eines dieser Paare aus seiner Bindung an die Atome zu lösen, ist ein beträchtlicher Energiebetrag notwendig.

Silizium und Germanium haben die gleiche Kristallstruktur wie Diamant (siehe Folie 1, Abbildung 1). Die Energie zur Loslösung von Elektronen ist jedoch beträchtlich geringer.

Die im Kristallgitter regelmäßig angeordneten Atome ruhen nicht an ihren Gitterplätzen, sondern schwingen um eine mittlere Position. Diese Schwingungen sind umso stärker, je höher die Temperatur ist. Wenn die Schwingungsenergie groß genug ist, kann ein Elektron aus seiner Bindung herausgeschlagen werden. Diese Elektronen stehen dann als frei bewegliche Leitungselektronen zur Verfügung, sie können einem angelegten elektrischen Feld folgen.

Damit lassen sich zwei Unterschiede zu den Metallen verstehen:

a) Im Metall stehen pro Atom ein Leitungselektron zur Verfügung, insgesamt etwa 10^{22} Elektronen pro cm³. In einem Kristall aus reinem Silizium kommt bei 50°C auf 10^{12} Atome ein Leitungselektron, insgesamt etwa 10^{10} Elektronen pro cm³.
⇒ Die Leitfähigkeit des reinen Halbleiters ist daher beträchtlich kleiner als die eines Metalles.

b) Bei höherer Temperatur nimmt die Leitfähigkeit eines Halbleiters zu, da die Gitteratome durch stärkere thermische Bewegung mehr Elektronen freisetzen.

Anschließend an diesen Text gehört die Folie 2 in die Mitschrift (siehe: Kapitel Folien)

Rekombination: Wenn ein Leitungselektron einem Elektronenloch nahekommt, dann bindet die positive Ladung das Elektron, es „fällt“ in das Loch, die beiden Ladungsträger neutralisieren sich, sie rekombinieren. Dabei wird die Bindungsenergie wieder frei.

Zusammenfassung:

Die Leitfähigkeit eines reinen Halbleiterkristalls beruht auf der Bildung frei beweglicher Ladungsträger: Elektronen und Elektronenlöcher. Die Elektronenlöcher verhalten sich wie positive Ladungen. Die Leitfähigkeit nimmt mit wachsender Temperatur zu.

4. Dotierte Halbleiter

Die Zahl der frei beweglichen Ladungsträger und damit die Leitfähigkeit eines Halbleiters kann durch die Zugabe bestimmter Fremdatome beträchtlich gesteigert werden. Man spricht dann von dotierten Halbleitern.

a) Elektronenüberschussleiter (n – Leiter)

Es werden Fremdatome an die Plätze von Halbleiteratomen eingebaut, die 5 Valenzelektronen besitzen. Nur vier können eine kovalente Bindung eingehen. Das fünfte Elektron ist nicht an das Gitter gebunden und lässt sich daher leicht vom Stammatom trennen; somit ist **ein quasi freies Elektron geschaffen**. Das zurückbleibende unbewegliche Ion ist positiv geladen. Das es ein Elektron abgeben hat, wird es Elektronenspender, **Donator**, genannt.

Die Dotierung mit fünfwertigen Atomen führt zu einer Erhöhung der Zahl von freibeweglichen Elektronen und damit zu eine erhöhten Leitfähigkeit (gegenüber reinen Halbleitern). Man spricht daher von einem Elektronenüberschussleiter oder **n-Leiter**.

b) Elektronenmangelleiter (p – Leiter)

Hier werden Fremdatome an die Plätze von Halbleiteratomen eingebaut, die nur drei Valenzelektronen besitzen.
Bauen wird z.B. dreiwertige Boratome in den Siliziumkristall ein, so fehlt den Boratomen ein Elektron, um die Bindungen zu allen vier Siliziumnachbarn durch Elektronenpaare herzustellen. Das fehlende Elektron wir von einem umgebenden Siliziumatom genommen. **Elektronenlöcher** als **zusätzliche Ladungsträger** sind erzeugt worden.

Boratome, die ein Elektron eingefangen haben, heißen **Akzeptoren**. Sie sind negativ geladen und an ihre Gitterplätze gebunden. Die von ihnen erzeugten Elektronenlöcher stehen für den Ladungstransport zur Verfügung. Löcher verhalten sich beim Anlegen einer Spannung wie positive Ladungsträger, man spricht daher von Elektronenmangelleitern oder **p-Leitern**.

Zusammenfassung:

Die Dotierung mit Fremdatomen erhöht die Leitfähigkeit von Halbleiterkristallen. Durch Einbau von fünfwertigen Fremdatomen (Donatoren) erhält man Elektronenüberschussleiter (n-Leiter). Durch Einbau von dreiwertigen Fremdatomen (Akzeptoren) erhält man Elektronenmangelleiter (p-Leiter). Die Konzentration der Fremdatome bestimmt die Leitfähigkeit.

5. Der pn-Übergang: Diode und Transistor

a) Die Halbleiterdiode

Zum Bau einer Diode nehmen wir je ein Stück n-leitendes und p-leitendes Material. Solange sich die beiden Stücke nicht berühren, sind sie elektrisch neutral. Nun bringen wir n- und p-Leiter in Kontakt.

(Wenn ich den Schülern diesen Abschnitt erkläre, lege ich dazu Folie 3, Abb. 1 und 2 auf. Die Schüler sollen beide Abbildungen in ihre Mitschrift zeichnen.)

ad Abb. 1: An der Kontaktfläche wandern nun infolge der Wärmebewegung Elektronen und Elektronenlöcher über die Kontaktfläche und rekombinieren. Dadurch nehmen die frei beweglichen Ladungsträger im Bereich der Grenzschicht ab.

ad Abb. 2: Im n-Leiter bleiben die positiven Donatorionen unkompensiert zurück, das n-Gebiet lädt sich dadurch positiv auf. Im p-Leiter führen die unkompensierten Akzeptorionen zu einer negativen Aufladung. Das dadurch entstehende elektrische Feld verhindert die weitere Wanderung von Ladungsträgern über die Kontaktfläche.

Am pn-Übergang bildet sich durch Verarmung an frei beweglichen Ladungsträgern eine hochohmige Sperrschicht.

Der pn-Übergang mit äußerer Spannung (Sperrichtung)

(Abbildung 3 von Folie 3 gehört hier zur Mitschrift)

Wir legen an den pn-Übergang eine Spannung so an, dass der Minuspol am p-Leiter und der Pluspol am n-Leiter liegt. Die freien Elektronen des n-Leiters werden zum Pluspol strömen, die Löcher des p-Leiters zum Minuspol: Die Sperrschicht verbreitert sich, es kann kein wesentlicher Ladungstransport durch den Übergang erfolgen. Die Diode sperrt.

Der pn-Übergang mit äußerer Spannung (Durchlassrichtung)

(Abbildung 4 von Folie 3 gehört hier zur Mitschrift)

Legen wir den Minuspol einer Spannungsquelle an den n-Leiter, den Pluspol an den p-Leiter, so werden die freien Elektronen bzw. Löcher in die Sperrschicht gedrängt. Diese verkleinert sich. Überschreitet schließlich die äußere Spannung einen bestimmen Schwellenwert, kompensiert die angelegte Spannung das Feld der Ionen in der Sperrschicht, die Sperrschicht wird abgebaut und Strom kann fließen, indem an der Grenzschicht die einströmenden Elektronen und Löcher rekombinieren.

Ein pn-Übergang erlaubt den (technischen) Stromfluss vom p-Leiter zum n-Leiter.

Schülerversuch „Einweg-Gleichrichtung“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: Von den fünfzig Perioden der Wechselspannung pro Sekunde führt immer nur eine Halbperiode zum Stromfluss. Das Ergebnis sind also fünfzig Stromstöße pro Sekunde, die jeweils eine Hundertstel Sekunde dauern und durch gleich lange Pausen getrennt sind. Wir können diese Stromstöße jedoch aufgrund der Trägheit unserer Augen nicht erkennen.

b) Der Transistor

Schülerversuch „Besteht ein Transistor aus zwei Dioden“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: Der Transistor verhält sich so, als würde er aus zwei Dioden bestehen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Dioden so geschaltet sein müssen, wie die Zeichnung zeigt:

Der Flächentransistor besteht aus drei Zonen unterschiedlicher Dotierung. Beim npn-Transistor befindet sich zwischen zwei n-leitenden Bereichen eine sehr dünne p-Leiter-Schicht (Dicke etwa 10^{-3} mm) *(dazu eine einfache Tafelzeichnung der 3 Schichten mit Kontakt)* Die Mittelschicht wird Basis genannt, die anderen Schichten heißen Emitter und Kollektor. Jede Schicht trägt einen Kontakt. (Beim pnp-Transistor liegt eine n-leitende Schicht zwischen zwei p-leitenden.)

Hier lege ich Folie 4, Abbildung 1 auf – Schüler sollen sie abzeichnen.

Schülerversuch „Basisstrom ermöglicht Kollektorstrom“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: Das Modell des Transistors als Doppeldiode ist nicht ausreichend. Ein Basisstrom ermöglicht einen Kollektorstrom.

Hier lege ich Folie 4, Abbildung 2 auf – Schüler sollen sie abzeichnen.

Durch Anlegen der Basisspannung fließt im Emitter in Richtung Basis ein Strom von Elektronen, in der Basis ein Löcherstrom in Richtung Emitter, dadurch wird die Sperrschicht abgebaut. Da die Basis sehr dünn ist, diffundiert ein Großteil der Elektronen zur Sperrschicht der von der Basis und Kollektor gebildeten Diode. Sie werden in den Kollektor gesaugt und fließen zur positiven Elektrode. Der dadurch vom Emitter zum Kollektor fließende Strom von Elektronen, der Kollektorstrom, ist bis zu tausendmal größer als der Elektronenstrom vom Emitter zur Basis (Basisstrom).

Liegt an der Basis keine Spannung, ist die Strecke zwischen E und C gesperrt.
Liegt an B eine genügend hohe Spannung, ist die E-C-Strecke leitend.

Der Transistor arbeitet somit als Schalter!

Vorteile des Transistors: geringer Platzbedarf, geringe Verlustleistung, hohe Schaltgeschwindigkeit.

Schülerversuch „Der Transistor als Verstärker“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: Die Kollektorstromänderung ist um ein Vielfaches höher als die Basisstromänderung.

Der Transistor arbeitet als Verstärker.

Schülerversuch „Steuerkennlinie eines NPN-Transistors“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgende „Erkenntnis“ gehört zum Versuch)

Erkenntnis: Der Zusammenhang zwischen Basisstrom und Kollektorstrom ist nahezu linear. Die Steigung der Kennlinie entspricht dem Stromverstärkungsfaktor.

6. Optoelektronische Bauelemente

(Folie 5 wird abgeschrieben)

Schülerversuch „Automatische Beleuchtung“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgender Text gehört zum Versuch.)

Zur Schaltung: Bei Dunkelheit ist der Widerstandswert des LDR groß, auf ihn entfällt der größere Teil der Spannung. Dadurch fließt Basisstrom, das Glühlämpchen leuchtet. Bei genügend Lichteinfall auf den LDR ist der Widerstandswert des LDR klein und die Teilspannung ebenfalls klein. Es fließt wenig Basisstrom und wenig Kollektorstrom – das Glühlämpchen leuchtet nicht.

Erkenntnis: Mit Hilfe des LDR erhalten wir eine Schaltung, die automatisch bei Dunkelheit die Beleuchtung einschaltet und bei Helligkeit ausschaltet.

NTC-Widerstand

Schülerversuch „Feuermelder“
(Hier wird nun der Schülerversuch durchgeführt und das verwendete Arbeitsblatt zur Mitschrift gegeben. Folgender Text gehört zum Versuch.)

Zur Schaltung: Der NTC wird mit den Fingern erwärmt, der Widerstandswert des NTC wird kleiner. Dadurch fällt am Stellwiderstand eine höhere Spannung ab, der Transistor wird durchgeschaltet.

Erkenntnis: Die Widerstandsverminderung eines NTC durch Erwärmung kann für einen Feuermelder ausgenützt werden.

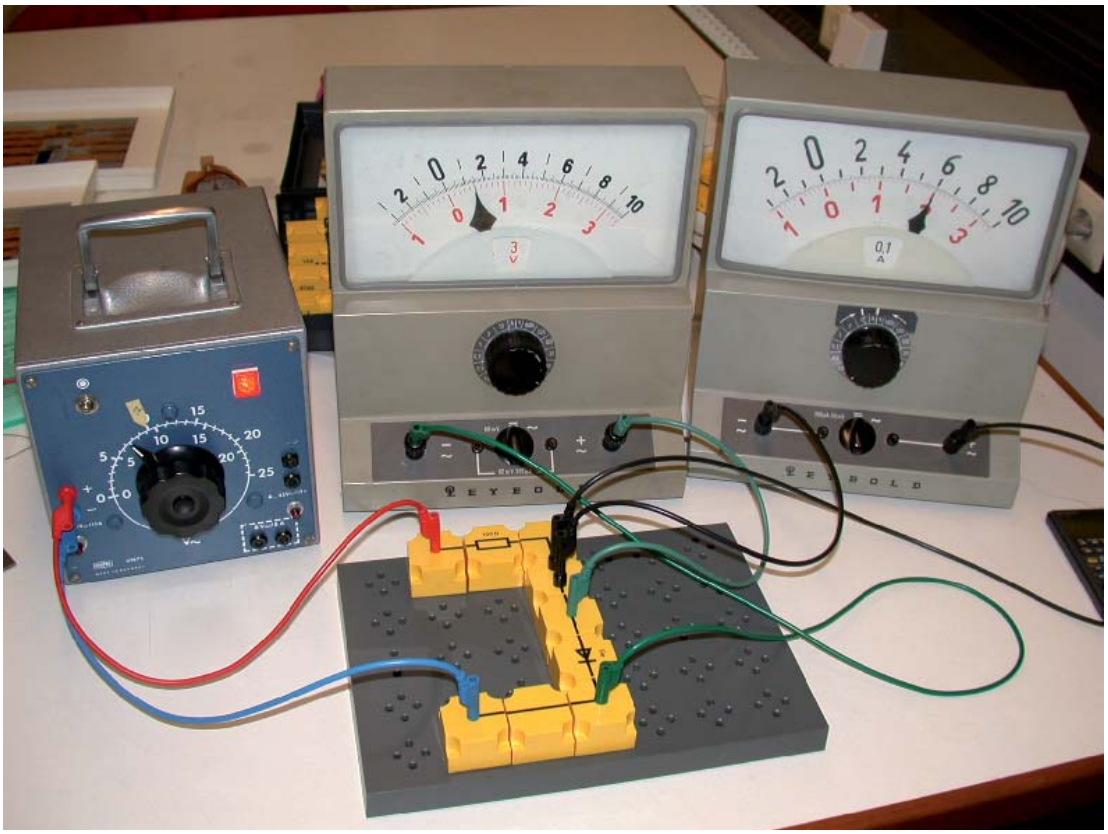
9) *Anmerkungen*

Zu diesem Protokoll gibt es keine weiteren Anmerkungen.

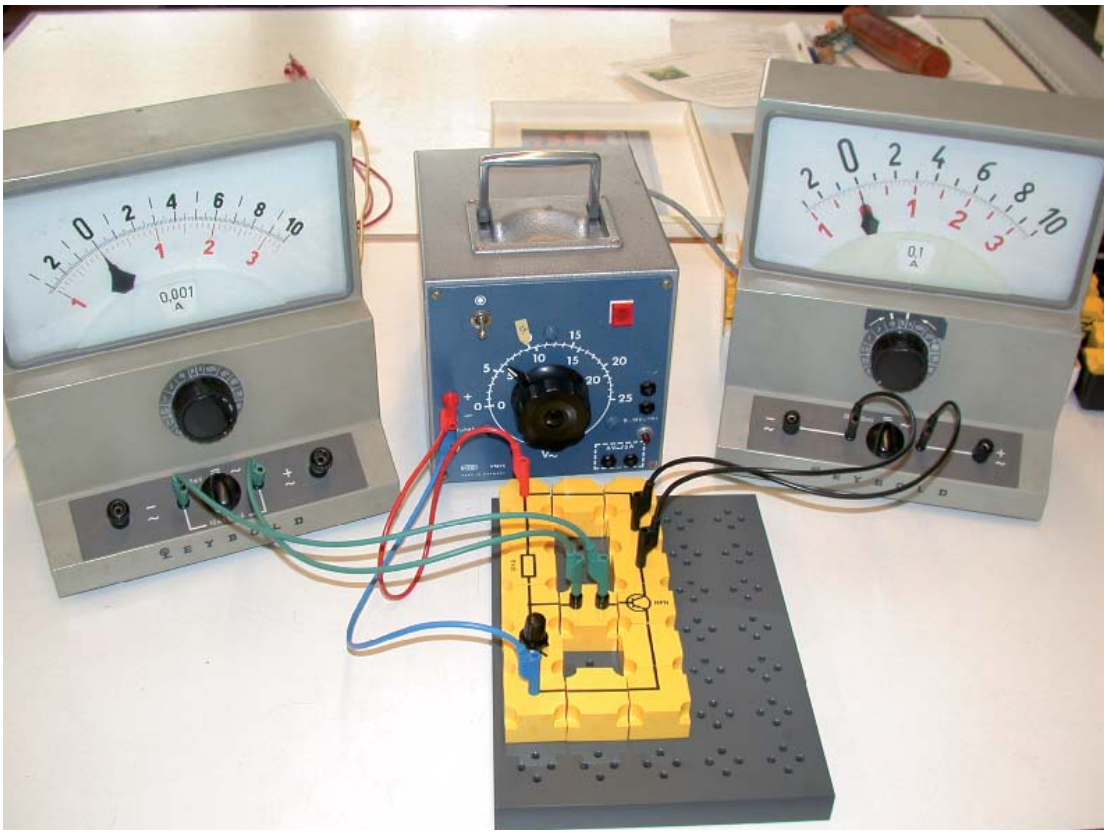
10) *Literaturverzeichnis*

Sexl, Kühnelt, Pflug, Stadler (1992). Physik 3 AHS. Wien: Verlag Hölder-Pichler-Tempsky
Schneider, Thannhausser (1986). Physik. Linz: Trauner Verlag
NTL Schülerexperimente Physik. Versuchsanleitung Elektronik
Stütz, Uhlmann (1998). Von der Physik 3, Oberstufe. Wien: Verlag E. Dorner GmbH
Gollenz, Breyer, Eder, Tentschert. Lehrbuch der Physik, 3. Klasse. Wien: Verlag öbv & hpt
Fürnstahl, Wolfbauer, Becker, Obendrauf (1994). Physik heute 4. Salzburger Jugend-Verlag

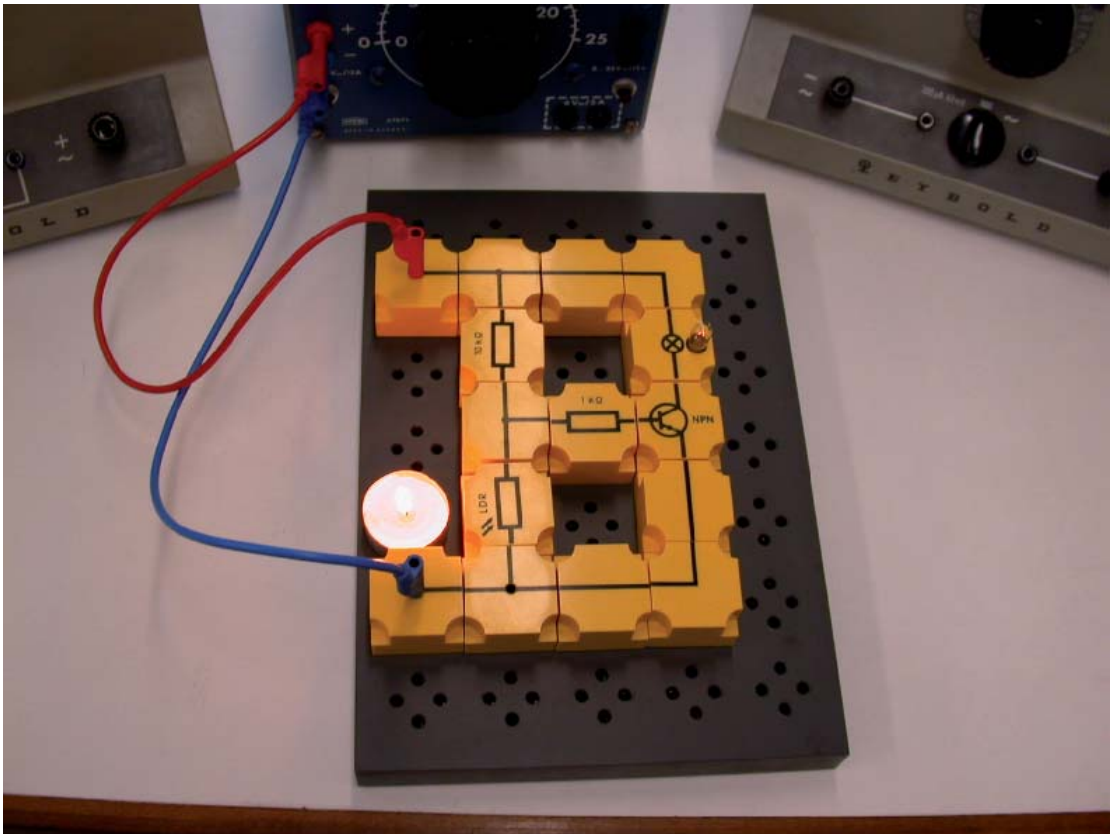
11) *Foto-Anhang*



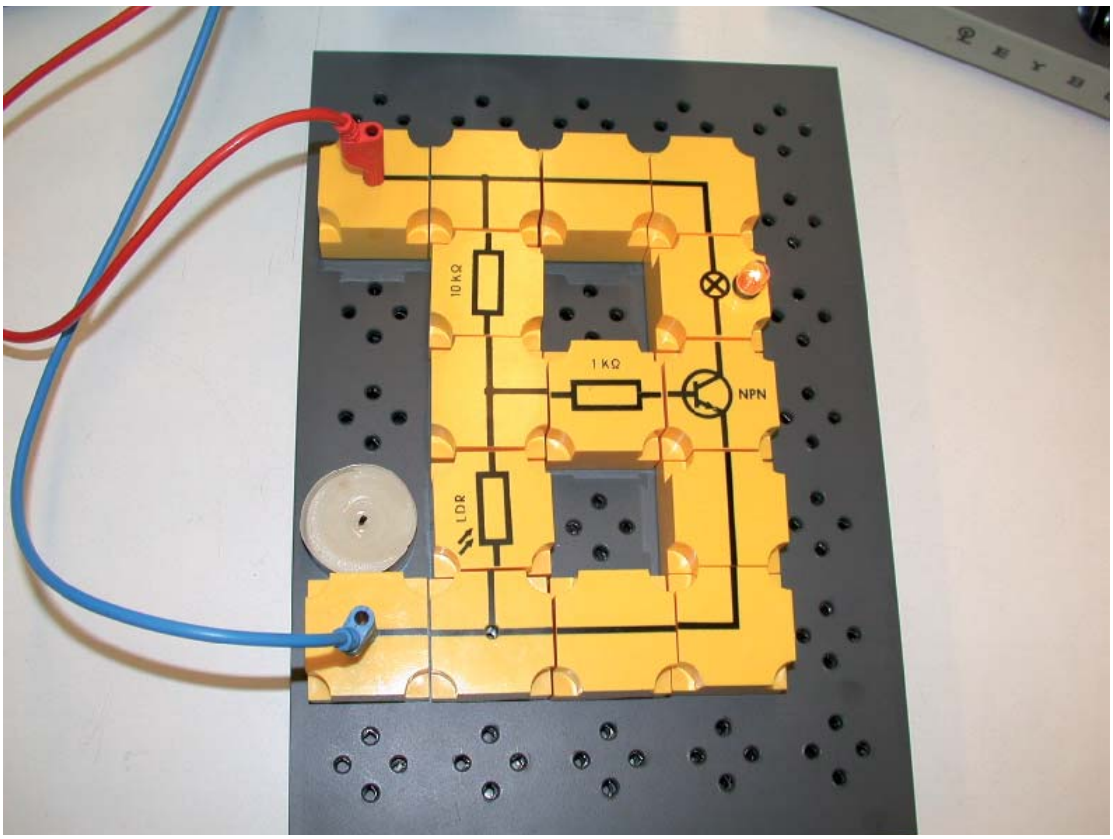
(Foto 1: Kennlinie einer Diode)



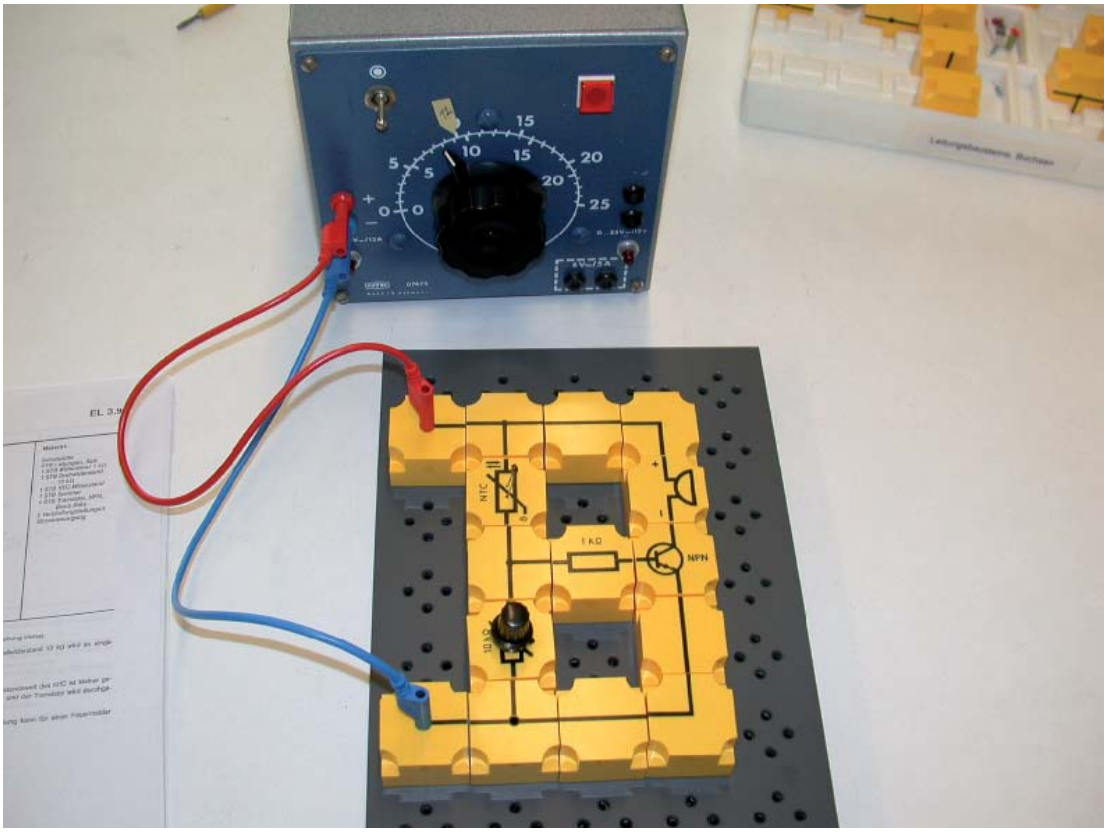
(Foto 2: Steuerkennlinie eines Transistors)



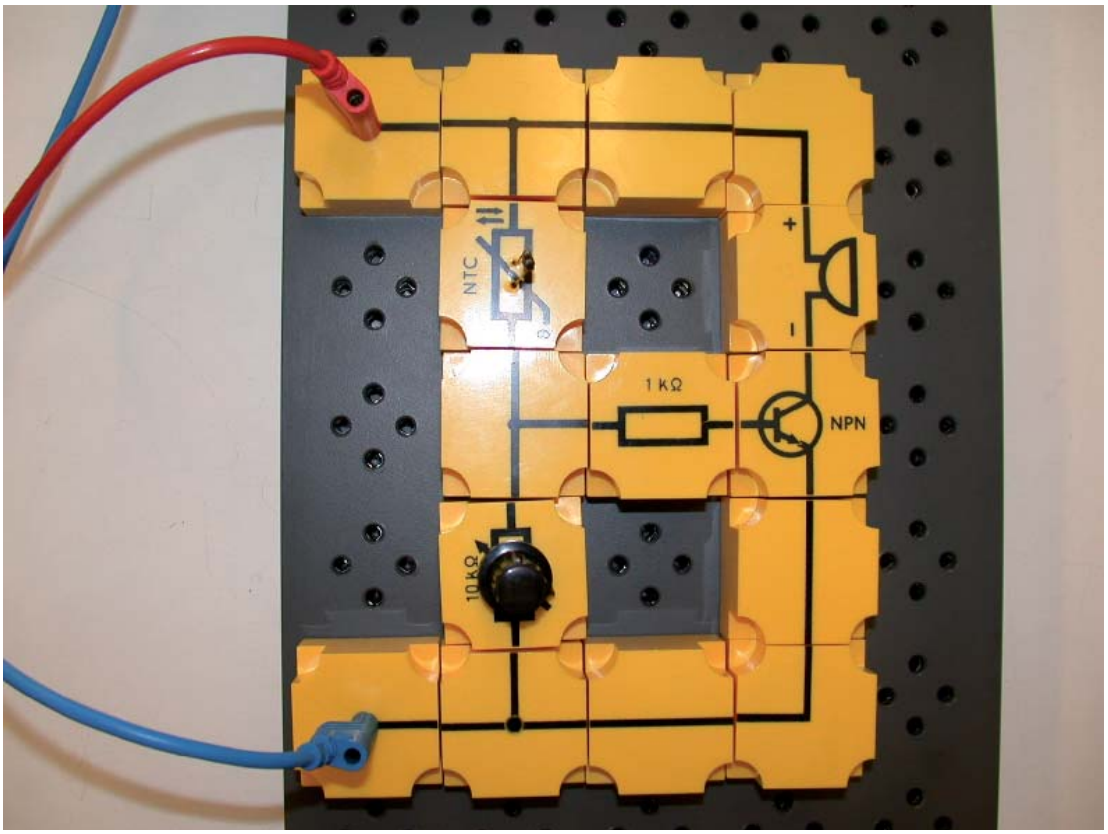
(Foto 3: Automatische Beleuchtung)
Hinweis: Die Glühbirne leuchtet nicht, da es genügend hell ist.



(Foto 4: Automatische Beleuchtung)
Hinweis: Die Glühbirne leuchtet, da es ohne Kerzenlicht zu dunkel ist.



(Foto 5: Feuermelder)



(Foto 6: Feuermelder)