

Versuch EP2 Die Diode

I. Zielsetzung des Versuches

In diesem Versuch lernen Sie die grundlegenden Eigenschaften eines pn-Halbleiterübergangs kennen.

Dazu werden im ersten Teil des Versuchs die Kennlinien (Strom-Spannungs-Charakteristiken) einer Siliziumdiode (Gleichrichterdiode) und einer Silizium-Zenerdiode ausgemessen.

Im zweiten Versuchsteil lernen Sie praktische Anwendungen kennen: Es werden mit Siliziumdioden verschiedene Schaltungen zur Gleichrichtung und Glättung einer Wechselspannung und zum Bau eines spannungsstabilisierten Netzteils realisiert. Dabei werden Filterschaltungen mit Kondensatoren aufgebaut sowie eine einfache Spannungstabilisierung mit einer ZENER-Diode¹.

II. Vorkenntnisse

Bändermodell, Fermistatistik, Elektronen- und Löcherleitung, p-n-Grenzschicht, Diode, Gleichrichtung, Glättung, RC-Glied, Spannungstabilisierung.

Literatur:

jedes Lehrbuch der Physik, Elektrizität

R.MÜLLER: Grundlagen der Halbleiter-Elektronik

R.MÜLLER: Bauelemente der Halbleiter-Elektronik

W.WALCHER: Praktikum der Physik

H.GÖBEL: Einführung in die Halbleiter-Schaltungstechnik

M.REISCH: Elektronische Bauelemente

TIETZE, SCHENK: Halbleiter-Schaltungstechnik

MALMSTADT, ENKE: Electronics for scientists

C.F.G.DELANEY: Electronics For The Physicists

SCHNELL, W.GERHARD: Elemente der Elektronik

HERING, BRESSLER, GUTEKUNST: Elektronik für Ingenieure und Naturwissenschaftler

¹ZENER, CLARENCE MELVIN, *1. Dezember 1905, Indianapolis, Indiana, USA, † 15. Juli 1993. US-amerikanischer Physiker und Elektrotechniker.

III. Theorie

1. Halbleiteraufbau der Diode

Die einfachste Halbleiterdiode besteht aus einer p-n-Grenzschicht. Hierbei handelt es sich zwei aneinander angrenzende Halbleitermaterialien der vierten Hauptgruppe (Silizium, Germanium), von denen die eine Seite mit einem fünfwertigen Element wie z.B. Phosphor verunreinigt ist (*n-dotiert*) und die andere mit einem dreiwertigen Element wie z.B. Bor (*p-dotiert*). Auf der n-dotierten Seite liegt daher im Kristallverband mit dem vierwertigen Si oder Ge bei jedem Phosphor jeweils eine zusätzliche ungesättigte Bindung mit nur einem Elektron vor.

Da die Bindungsenergie dieser Elektronen im Bereich weniger Millielektronenvolt (meV) liegt, reicht schon alleine thermische Anregung zur Ionisierung der Phosphoratome aus. Da jedes im Kristall ortsfest gebundene Phosphoratom somit ein Elektron als negativ geladenen freien Ladungsträger zur Verfügung stellt, bezeichnet man das Phosphor auch als *Donator*.

Auf der p-dotierten Seite hingegen fehlt aufgrund der Dreiwertigkeit des dotierenden Materials jeweils ein Bindungselektron und hinterlässt somit eine ungesättigte Bindung im Kristallverband selbst. Die hier fehlenden Elektronen können ebenfalls auf thermischer Anregung basierend durch benachbarte Bindungselektronen ersetzt werden, wodurch eine Art frei beweglicher *Löcher* als Ladungsträger mit positivem Vorzeichen vorliegen. Das Bor bezeichnet man daher in diesem Zusammenhang als *Akzeptor*. Die freien Ladungsträger in beiden Schichten nennt man auch *Majoritätsladungsträger*, die korrespondierenden Gitterionen werden *Minoritätsladungsträger* genannt. (Beachten Sie für die folgenden Abbildungen: Die Plus- oder Minuszeichen symbolisieren *keine* Überschussladungen! Diese gibt es nur in der Raumladungszone.)

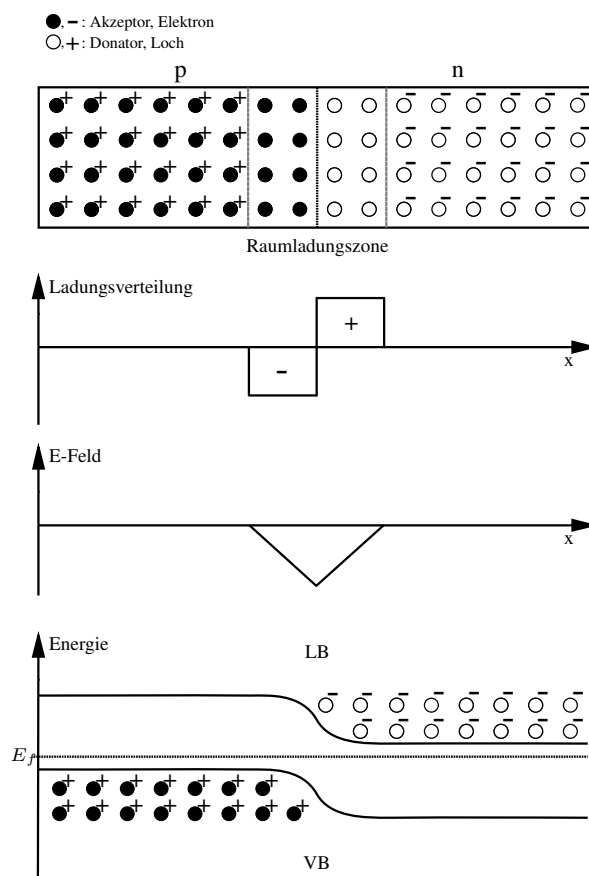


Abbildung 1: p-n-Schicht im thermodynamischen Gleichgewicht

Bringt man eine n- und eine p-dotierte Schicht zusammen, diffundieren aufgrund des Konzentrationsgradienten Elektronen aus der n- in die p-Schicht und rekombinieren mit den dortigen Löchern. Umgekehrt rekombinieren die aus der p- in die n-Schicht wandernden Löcher mit den dort vorhandenen freien Elektronen. Da bei diesem Prozess effektiv Ladungen aus den beiden anfänglich neutralen Schichten in die jeweils gegenüberliegende Schicht übertreten, entsteht hierbei ein elektrisches Feld, was der Elektronen-, bzw. Löcherdrift entgegenwirkt und mit zunehmender Anzahl an übersetzenden Ladungsträgern wächst. Dementsprechend stellt sich ein Gleichgewicht zwischen Feld- und Diffusionskraft ein und es entsteht ein schmaler geladener Bereich um die Grenzschicht zwischen n- und p-dotierter Schicht, der frei von beweglichen Ladungsträgern ist und als *Raumladungszone* bezeichnet wird.

Legt man eine Spannung in p-n-Richtung (*Durchlassrichtung/forward bias*) an die Diode an, so wirkt das entsprechende E-Feld dem durch die Rumpfionen in der Raumladungszone erzeugten E-Feld entgegen, sodass die Majoritätsladungsträger zu den Elektroden hin abgezogen werden können. Auf diese Weise fließt ein elektrischer Strom über die Diode (vgl. Abb. 2, links). Polt man die Spannung hingegen um, verstärkt man das anfängliche E-Feld und vergrößert somit die Raumladungszone um die p-n-Grenzschicht, sodass durch das Fehlen freier Ladungsträger eine nichtleitende Barriere erzeugt wird, welche einen Stromfluss unterbindet. In dieser Richtung (*Sperr-Richtung/ reverse bias*) geschaltet, fließt lediglich ein geringer Sperrstrom – die Diode ist nahezu stromundurchlässig (vgl. Abb. 2, rechts).

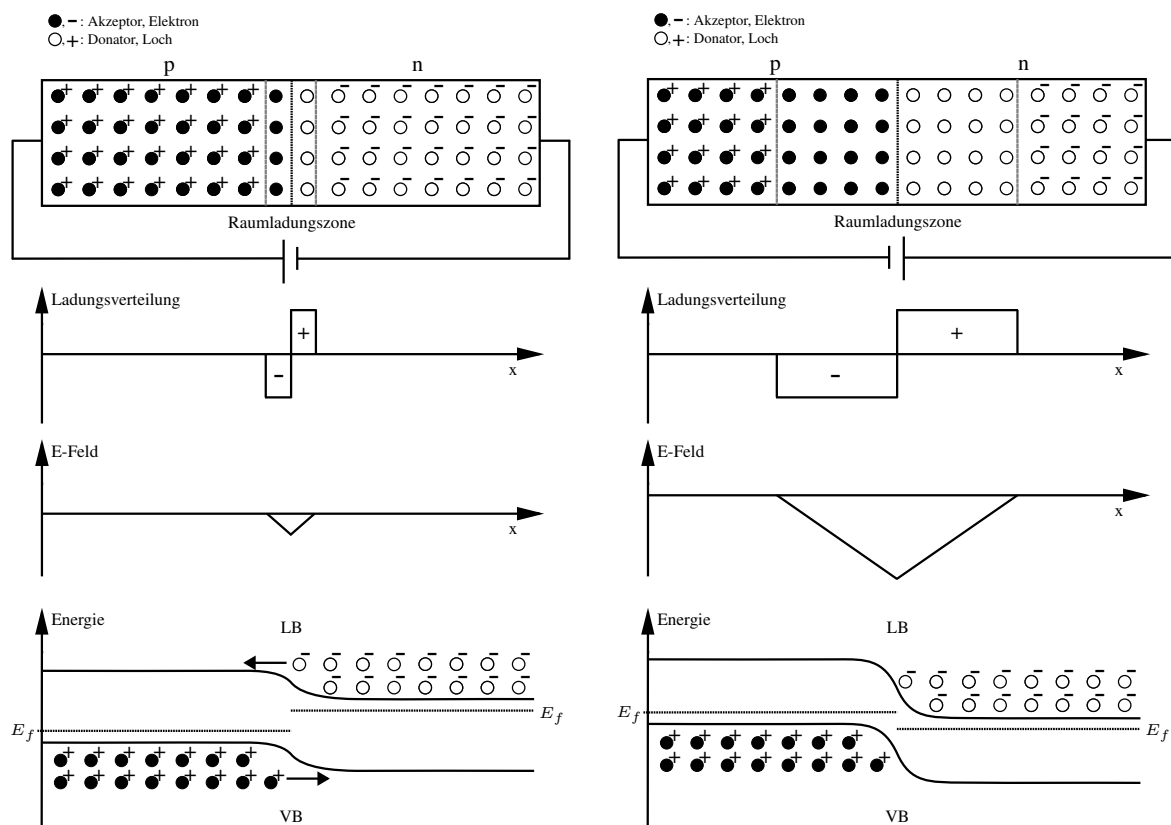


Abbildung 2: Diode in Durchlassrichtung (links) und in Sperrichtung geschaltet (rechts)

Betrachtet man die Diode im Bändermodell, so liegt im thermodynamischen Gleichgewicht der unten in Abb. 1 dargestellte Zusammenhang vor. Das FERMINIVEAU beider unterschiedlich dotierter Halbleiter liegt hierbei in einer Ebene. Durch die unterschiedlichen Energieniveaus auf beiden Seiten bilden sich daher die gezeigten Niveaustufen aus, welche die nach oben strebenden Löcher (nach unten strebenden freien Elektronen) daran hindern, nach rechts (nach links)

zu gelangen. Eine bzgl. der n-Schicht positive Spannung an der p-Schicht führt dazu, dass die Potenzialbarrieren verkleinert werden (Abb. 2, links). Eine entgegengesetzt gepolte Spannung führt zur Vergrößerung der Barrieren (Abb. 2, rechts).

2. Kennlinie

Es ist möglich, einen analytischen Ausdruck für die Strom-Spannungs-Charakteristik (Kennlinie) einer solchen Halbleiterdiode abzuleiten. Bei der Ableitung bedient man sich der Tatsache, dass eine bestimmte Potentialdifferenz über der Grenzschicht eine bestimmte Elektronenenergie zur Folge hat und dass außerdem die Zahl der Elektronen mit dieser Energie durch die MAXWELL-BOLTZMANN-Verteilung gegeben ist. So verwundert es auch nicht, dass der Faktor $\exp(eU/kT)$ in der Formel auftaucht, wobei e die Elektronenladung, U die Potentialdifferenz, k die BOLTZMANNkonstante und T die absolute Temperatur bedeutet. Das Ergebnis der Rechnung, die hier nicht abgeleitet werden soll, ist:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Hierin ist I_0 der maximale Sperrstrom für große negative Spannungen U . I_0 ist für eine feste Temperatur eine charakteristische Konstante für eine bestimmte Diode.

Wie groß ist $\exp(eU/kT)$ bei Zimmertemperatur und einer Spannung $U = 1\text{ V}$ bzw. $U = 1\text{ mV}$?

Gemäß Formel (2.1) hat die Diodenkennlinie folgendes Aussehen:

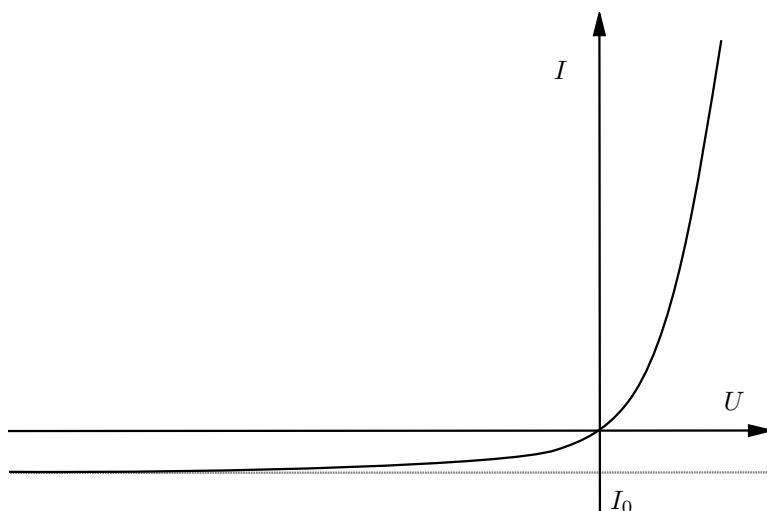


Abbildung 3: Beispiel einer Diodenkennlinie

Erhöht man die Sperrspannung über einen kritischen Wert hinaus, so kommt es zu einem schlagartigen Anstieg des Sperrstroms. Man spricht hierbei vom *Durchbruch* der Diode. In Sperrpolung werden in der Diode durch die Raumladungszone wandernde Elektron-Loch-Paare erzeugt, die durch das angelegte elektrische Feld beschleunigt werden. Bei hohen Feldstärken können durch Stöße mit Gitteratomen zusätzliche Elektron-Loch-Paare erzeugt und ihrerseits beschleunigt werden, sodass es zu einer Kettenreaktion kommt. Man spricht in diesem Zusammenhang vom *Lawinendurchbruch*.

Bei Dioden mit sehr hohen Dotierungen ist die Raumladungszone sehr klein, sodass Elektronen direkt vom Valenz- ins Leitungsband „tunneln“ können (*ZENER-Effekt*, s. Abb.4). Der *Tunneledurchbruch* tritt hier schon bei geringen Sperrspannungen auf. Dieser Effekt wird daher

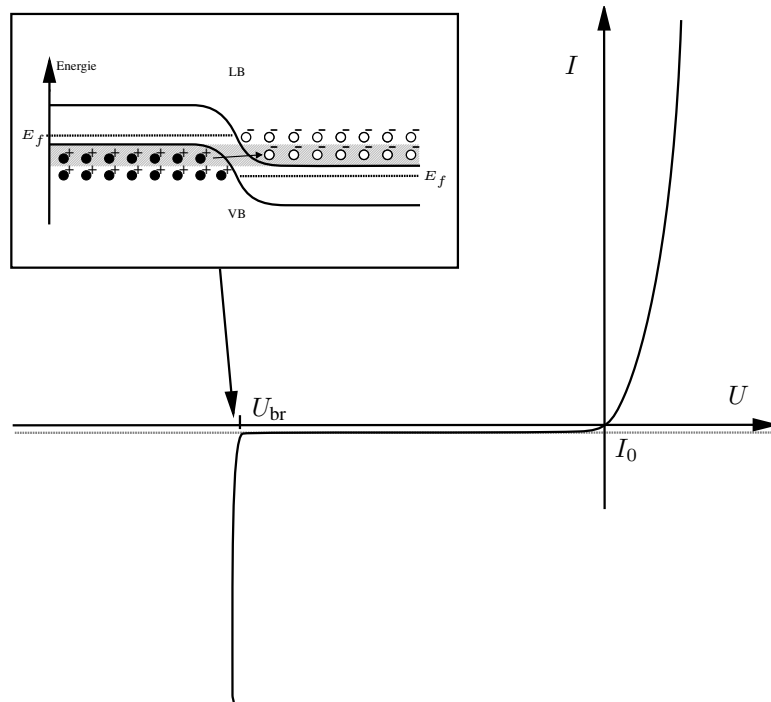


Abbildung 4: Diodenkennlinie mit Tunneldurchbruch bei einer ZENER-Diode

zur Herstellung von ZENER-Dioden mit recht exakt definierter Durchbruchspannung U_{br} verwendet, welche in Sperrichtung betrieben werden können, ohne dass es zwangsläufig zu einer Zerstörung der Dioden kommt. Dies ist erst der Fall, wenn die maximal zulässige Höchstleistung einer Diode überschritten wird. Man spricht dann vom *thermischen Durchbruch*.

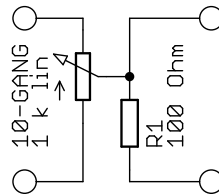
IV. Versuchsprogramm

1. Eigenschaften verschiedener Dioden

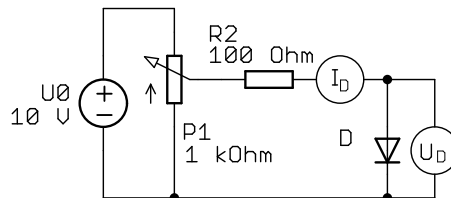
Das charakteristische Verhalten einer Diode wird durch ihre Kennlinie beschrieben, d.h. durch den Zusammenhang zwischen der Spannung an der Diode und dem Strom, der dann durch sie fließt.

Hierbei wird zwischen der Sperrichtung und der Durchlaßrichtung unterschieden. Während in Sperrichtung sich Effekte erst bei einigen Volt (u.U. auch erst einigen hundert Volt) zeigen, beginnen die meisten Dioden in Durchlaßrichtung schon bei unter einem Volt an zu leiten. Um auch diese kleinen Spannungen gut einstellen zu können, wird dem Labornetzgerät ein fein einstellbarer Spannungsteiler nachgeschaltet.

Dieser Spannungsteiler ist ein 10-Gang-Potentiometer, d.h. sein Widerstandsbereich von 0 bis $1\text{ k}\Omega$ wird mit 10 Umdrehungen durchfahren. Zur Sicherheit ist der Schleiferanschluß nicht nur direkt, sondern auch über einen eingebauten $100\text{-}\Omega$ -Widerstand (R_1) zugänglich. **Verwenden Sie immer diesen abgesicherten Anschluß, wenn es nicht anders angegeben ist!** Der Kasten mit dem 10-Gang-Potentiometer hat daher folgende Innenschaltung:



Bauen Sie die folgende Schaltung auf. P1 ist das $1\text{ k}\Omega$ -Potentiometer mit dem Skalenknopf (10-Gang). Achten Sie dabei unbedingt darauf, den Strombegrenzungswiderstand R_2 einzusetzen! Sie können als R_2 die $100\ \Omega$ nehmen, die (als R_1 , siehe oben) mit dem Potentiometer im selben Steckelement sitzen.



Als Dioden stehen Ihnen zur Verfügung:

- eine gewöhnliche Gleichrichterdiode (1N4007 oder 1N4004 oder ähnlich)
- eine Zenerdiode für $5,6\text{ V}$ (ZPY 5,6 oder ähnlich) oder $5,1\text{ V}$.

Nehmen Sie für diese beiden Dioden eine Kennlinie auf.

Was müssen Sie bei der Messung sehr kleiner Ströme beachten? Bedenken Sie: Das DVM hat einen Innenwiderstand von $10\text{ M}\Omega$. Welchen Strom zeigt das Amperemeter I_D an, wenn Voltmeter U_D parallel zur Diode geschaltet ist?

Die Sperrströme sind sehr klein und können möglicherweise auch im kleinsten Meßbereich ($20\ \mu\text{A}$ bei den DMMs der Marke ALCRON) nicht vom Amperemeter gemessen werden. **Achtung:** Wenn Sie die Sperrströme messen, können Sie nicht gleichzeitig mit dem DVM die Diodenspannung messen, weil durch die $10\text{ M}\Omega$ des DVMs ein deutlich höherer Strom fließt. Messen Sie stattdessen die Potentiometerspannung U_P , also hinter dem $100\ \Omega$ -Widerstand d.h. vor dem Amperemeter (I_D).

Falls Sie auch jetzt keinen Sperrstrom messen: Wie groß kann I_D demnach höchstens sein? (Das Datenblatt nennt bei der 1N4007 für I_D einen Maximalwert von $5\ \mu\text{A}$ bei Raumtemperatur und der maximalen Sperrspannung von 1000 V , bei 100 V sind es eher 20 nA .)

2. Gleichrichterschaltungen

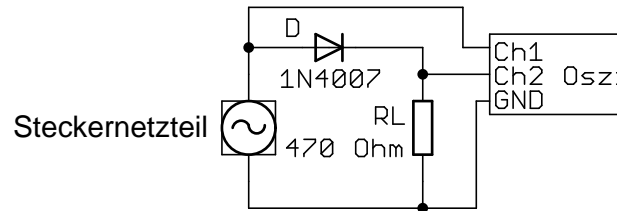
Wir wollen jetzt in verschiedenen Schritten kennenlernen, wie Wechselspannung in eine Gleichspannung umgewandelt werden kann. Diese Aufgabe ist alltäglich, sie wird in jedem Stecker-netzteile geleistet, wenn die lebensgefährlich hohe (230 V) Wechselspannung der Steckdose in eine stabile Gleichspannung von geringer (ungefährlicher) Höhe umgesetzt wird.

2.1. Einweggleichrichtung

Bauen Sie die folgende Schaltung auf. **Achtung: Spannungsquelle** (das quadratische Symbol links mit Sinuszeichen im Kreis) **in allen folgenden Schaltungen ist ein Steckernetzteil mit Wechselspannungsausgang**, bitte nicht verwechseln mit dem Funktionsgenerator!

Als Diode D nehmen Sie eine 1N4007, als Lastwiderstand R_L 470 Ω .

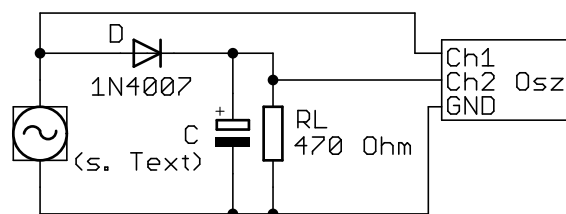
Messen Sie den Unterschied in der Amplitude von Ein- und Ausgangsspannung.



2.2. Einweggleichrichtung mit Kondensator

Bei einer Einweggleichrichtung haben Sie die halbe Zeit keine Spannung. Was bei Motoren oder Lampen noch akzeptabel wäre, führt z.B. bei Radios oder Computern zu völliger Fehlfunktion. Sie müssen also die „Spannungspausen“ durch eine andere Energiequelle überbrücken.

Bauen Sie folgende Schaltung auf. **Spannungsquelle ist auch hier das Steckernetzteil mit Wechselspannungsausgang**. R_L bleibt 470 Ω , für C sind Werte von 1 μF bis 1000 μF sinnvoll. Die Kapazitäten ab 10 μF sind Elektrolytkondensatoren. **Achtung! Elektrolytkondensatoren sind gepolt, d.h. sie dürfen niemals verkehrt herum an die Spannungsquelle angeschlossen werden, sonst werden sie beschädigt oder können platzen. Achten Sie auf das Pluszeichen!**



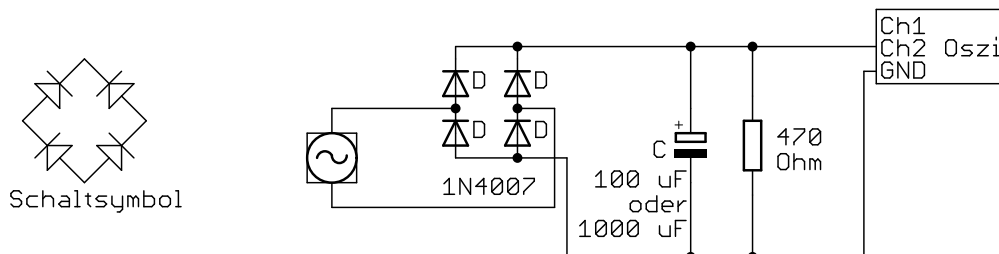
Messen Sie am Lastwiderstand R_L die mittlere Spannung $U_{\text{=}}$ und die Restwelligkeit (Brummspannung) $U_{\text{~}}$ als Funktion von C (unterschiedliche Elkos nehmen). Zur Messung der mittlere Spannung $U_{\text{=}}$ gibt es am Oszilloskop bei der Taste „measure“ die Funktion „Mittelwert“.

Zur Messung der Restwelligkeit nutzen Sie am Oszilloskop zunächst die Cursor-Funktion (horizontale Cursorlinien, Messung der Amplitude) und danach bei der Taste „measure“ die Funktion „Uss“. Der Index ss steht für Spitze-zu-Spitze, also die Differenz zwischen dem maximalen und minimalen Spannungswert.

Vergleichen Sie beide Werte mit theoretischen Berechnungen (Wie stark wird sich der Kondensator C innerhalb der Spannungspause, also in 10 Millisekunden, am Lastwiderstand entladen? Nehmen Sie für $U_C(t = 0)$ die gemessene Maximalspannung, berechnen Sie $U_C(t = 10 \text{ ms})$. Nehmen Sie den Mittelwert beider Spannungen als theoretische mittlere Spannung $U_{\text{=}}$ und die Differenz als theoretische Restwelligkeit (Brummspannung) $U_{\text{~}}$.)

2.3. Brückengleichrichter

Um beide Halbwellen der Wechselspannung zu nutzen, können Sie mit 4 Dioden in der sog. Graetzschaltung eine Doppelweggleichrichtung machen. Man spricht auch von einem Brückengleichrichter. Machen Sie sich klar, wie diese Schaltung funktioniert. Bauen Sie sie mit 4 einzelnen Dioden auf. (In der Praxis gibt es die Brücke als fertiges Bauteil aus 4 Dioden in einem Gehäuse, siehe Schaltsymbol unten links.) Verwenden Sie hier für C einen Elektrolytkondensator (Elko) mit $100\ \mu\text{F}$ oder $1000\ \mu\text{F}$. **Nochmal der Hinweis: Elektrolytkondensatoren sind gepolt, d.h. sie dürfen niemals verkehrt herum an die Spannungsquelle angeschlossen werden. Spannungsquelle ist auch hier das Steckernetzteil mit Wechselspannungsausgang.**



Vergleichen Sie die Ausgangsspannung mit den Werten, die Sie bei der vorherigen Einweggleichrichtung mit Kondensator erhalten haben.

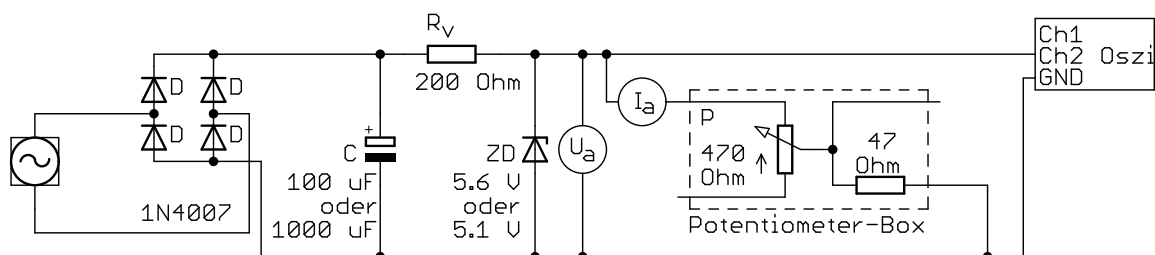
3. Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode

Sie haben gesehen, daß die Ausgangsspannung auch bei großen Kondensatoren immer noch eine geringe Restwelligkeit hat. Eine wesentlich stabilere Ausgangsspannung erreicht man durch Einbau einer Zenerdiode (ZD 5.6 oder ZD 5.1, die Zahl gibt die typische Zenerspannung in Volt an). Bauen Sie die dargestellte Schaltung auf, vergessen Sie nicht den Vorwiderstand R_v von $200\ \Omega$. **Spannungsquelle ist auch hier das Steckernetzteil mit Wechselspannungsausgang.**

Schließen Sie die Zenerdiode niemals ohne Vorwiderstand an! Ein zu hoher Strom zerstört die Diode sofort. Schon ein geladener Elektrolytkondensator kann die Zenerdiode zerstören, wenn man ihn direkt mit ihr verbindet!

Verwenden Sie auch hier für C einen Elektrolytkondensator (Elko) mit $100\ \mu\text{F}$ oder $1000\ \mu\text{F}$. **Nochmal der Hinweis: Elektrolytkondensatoren sind gepolt, d.h. sie dürfen niemals verkehrt herum an die Spannungsquelle angeschlossen werden.**

Messen Sie die Ausgangs(gleich)spannung U_a als Funktion des Ausgangsstroms I_a , d.h. für unterschiedliche Lastwiderstände R_L . Als R_L verwenden Sie jetzt das 470-Ohm-Potentiometer, dabei müssen Sie aber unbedingt den 47-Ohm-Schutzwiderstand (im Potentiometerkasten) in Serie schalten.



Wo sind die Grenzen der Schaltung, was passiert bei zu großer Last (zu hohem Ausgangsstrom)?