

E24 Halbleiterdioden	
Name:	Matrikelnummer:
Fachrichtung:	Versuchsdatum:
Mitarbeiter/in:	Gruppennummer:
Assistent/in:	Endtestat:

Dieser Fragebogen muss von jedem Teilnehmer **eigenständig** (keine Gruppenlösung!) handschriftlich beantwortet und vor Beginn des Versuchs abgegeben werden. Die Vorbereitung wird zusätzlich durch einen Test bzw. eine mündliche Prüfung über die physikalischen Grundlagen des Versuchs kontrolliert.
(Version: 18. November 2024)

Versuchsziel und Versuchsmethode:

1.) Zeichnen Sie das Bändermodell eines Metalles, Halbleiters und Isolators. Tragen Sie typische Bandabstände in eV und die Besetzung der Bänder mit Elektronen ein.

2.) Wie groß ist die mittlere thermische Energie von (freien) Elektronen bei Zimmertemperatur und die Energie von sichtbarem Licht in eV?

3.) Nennen Sie drei Möglichkeiten, die Leitfähigkeit eines reinen Halbleiters zu verbessern.

4.) Nennen Sie jeweils zwei Beispiele für eine Donator- und eine Akzeptor-Dotierung in Silizium und Germanium.

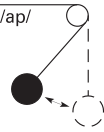
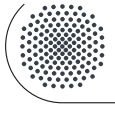
5.) Skizzieren Sie das Raumladungsgebiet in einem p-n-Übergang.

6.) Skizzieren Sie die Kennlinie einer Diode bei verschiedenen Temperaturen. Wie ändert sich der Sättigungsstrom I_S in Sperrrichtung bei steigender Temperatur?

7.) Was ist zu beachten, wenn Sie die Kennlinien in Stromfehlerschaltung messen? Was würde sich in Spannungsfehlerschaltung verändern?

8.) Machen Sie sich mit den verwendeten Anordnung für Messungen mit Gleich- und Wechselstrom vertraut. Welche Funktion haben die Widerstände in beiden Schaltungen?

9.) Erklären Sie die Funktionsweise der Wechselstromschaltung nach Abbildung E24-2, indem Sie den Stromfluss für eine positive und eine negative Halbwelle der Wechselspannung beschreiben. Warum muss am Oszilloskop invertiert werden für eine Darstellung der Kennlinie in der üblichen Form?



E Elektrizitätslehre

E24 Halbleiterdioden

Diese Anleitung kann und soll kein Lehrbuch ersetzen. Die beschriebenen Grundlagen stellen einen kurzen Überblick dar und sind daher zum Erlernen der physikalischen Grundlagen nicht ausreichend. Genauere Beschreibungen finden sich in:

- [1] *Kapitel 13* Elektronen im Festkörper. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book
- [2] *Kapitel 37* Elektrische Eigenschaften von Festkörpern. In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book
- [3] *Kapitel 14* Halbleiter. In: DEMTRÖDER, W.: *Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper*. Springer, 2016. – E-Book
- [4] *Kapitel 22* Elektrischer Strom: Gleichstromkreise. In: TIPLER, P.: *Physik für Wissenschaftler und Ingenieure*. Springer, 2015. – E-Book
- [5] *Kapitel* Widerstände, Ohm'sches Gesetz. In: EICHLER, H.-J.: *Das neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer, 2016. – E-Book
- [6] *Kapitel 21.* Messung zeitabhängiger Spannungen. In: EICHLER, H.-J.: *Das neue Physikalische Grundpraktikum*. Springer, 2016. – E-Book

Stichworte

Bändermodell [1][2], Dotierung [3], Leitfähigkeit [3][2], pn-Übergang [3], Zener-Effekt, technische Anwendungen [3][2]: Diode, Transistor, Leuchtdiode (LED); Spannungsteiler [4], Strom-/Spannungsfehlerschaltung [5], Funktion und Bedienung eines Oszilloskops [6] .

USB-Memorystick mitbringen!

Grundlagen

Dotierung

Die Leitfähigkeit eines Halbleiters lässt sich durch Fremdatome leicht beeinflussen. Man unterscheidet dabei zwischen n-Leitung und p-Leitung. Haben die eingebrachten Fremdatome eine höhere Wertigkeit als die Atome des Halbleiterkristalls (Donatoren), so werden die nur schwach gebundenen Überschusselektronen frei und tragen zur Leitfähigkeit bei (n-Leitung).

Bei geringerer Wertigkeit der Fremdatome (Akzeptoren) entstehen Elektronenfehlstellen, die durch Elektronen vom Nachbaratom her aufgefüllt werden können, wodurch neue "Löcher" (auch Defektelektronen genannt) entstehen. Auf diese Weise können Elektronen von Gitterplatz zu Gitterplatz durch den ganzen Kristall diffundieren, wobei sich die Löcher in der entgegengesetzten Richtung bewegen (Löcher- oder p-Leitung).

p-n-Kontakt

Aneinandergrenzende p- und n-Gebiete können durch Einlegieren oder Eindiffundieren von Donatoren bzw. Akzeptoren in einem Kristall erzeugt werden. Die Konzentration der in beiden Gebieten unterschiedlichen Ladungsträger sucht sich zunächst durch Diffusion über die Grenzschicht hinweg auszugleichen. Dadurch entsteht in dem vorher elektrisch neutralen Kristall auf der n-Seite des Kontakts eine positive und auf der p-Seite eine negative Raumladung. Diese erzeugt ein elektrisches Feld, das die Diffusion stoppt. Es stellt sich ein Gleichgewichtszustand ein. Wird von außen eine elektrische Spannung an den Kontakt gelegt, so kann die Diffusion von Elektronen aufrecht erhalten oder vergrößert werden, sofern der n-Leiter an den negativen und der p-Leiter an den positiven Pol angeschlossen werden (Durchlassrichtung). Dabei rekombinieren Elektronen und Löcher in der p-n-Grenzschicht unter Abgabe von Energie. Bei umgekehrter Polung wandern die Ladungsträger von der Grenzschicht weg. Dadurch entsteht eine Sperrschicht, die den Ladungsfluss unterbricht (Sperrichtung). Für den idealen p-n-Übergang von Halbleiterdioden gilt die Shockleysche Beziehung zwischen Strom I , Spannung U und der absoluten Temperatur T

$$I = I_S \left[\exp\left(\frac{eU}{kT}\right) - 1 \right] \quad (\text{E24-1})$$

e bedeutet die Elementarladung und k die Boltzmannkonstante. Im Sperrbereich ($U < 0$) bleibt immer noch ein Reststrom I_S (Sperrstrom); er wird im n-Gebiet von Löchern und im p-Gebiet von Elektronen (Minoritätsträger) getragen, die thermisch aktiviert werden. I_S hat die umgekehrte Richtung wie der Durchlassstrom. Schon bei geringer Sperrspannung ist bei konstanter Temperatur der Sperrstrom I_S konstant (Sättigungsstrom), da sich die Sperrschicht mit zunehmender Sperrspannung verbreitert. Sie ist sehr hochohmig im Vergleich zu den übrigen Gebieten, und die gesamte von außen angelegte Spannung fällt an ihr ab.

Für negative Spannungen U ist in Gl. (E24-1) der Term $\exp\left(\frac{eU}{kT}\right)$ praktisch zu vernachlässigen, da $\frac{Ue}{kT}$ betragsmäßig sehr groß und negativ ist ($\frac{kT}{e} \approx 26 \text{ mV}$ bei Zimmertemperatur), so dass $I = -I_S$. Der Sperrstrom I_S selbst hängt exponentiell von der Temperatur ab, deshalb sind alle Halbleiterbauelemente sehr wärmeempfindlich. Der Wert von I_S , beispielsweise bei Zimmertemperatur, ist materialabhängig und für Germanium größer als für Silizium.

Bei höheren Sperrspannungen steigt der Sperrstrom abweichend von der Shockleyschen Beziehung infolge Ladungsträger-Multiplikation plötzlich stark an. Bei Germaniumdioden führen diese Durchbruchströme zur thermischen Zerstörung, während Siliziumdioden im Allgemeinen in diesem Bereich noch ohne Schaden betrieben werden können.

Eine technische Anwendung findet dieser steile Stromanstieg oberhalb der Durchbruchspannung (Zenerspannung) in stark dotierten Si-Dioden (Zenerdioden).

Für diese Ladungsträger-Multiplikation im Sperrbereich von Halbleitern gibt es zwei wesentliche Ursachen:

1. bei Dioden mit niedriger Durchbruchspannung den Zenereffekt, ein Elektronen-Tunneleffekt, der sich quantenmechanisch erklären lässt;
2. den Lawinendurchbruch analog der Stoßionisation in Gasen. Bei höheren Sperrspannungen erhalten die Ladungsträger genügend Energie, um bei Stößen mit dem Gitter neue Elektronen-Löcherpaare zu erzeugen.

Für positive Spannungen, d.h. im Durchlassbetrieb, kann für $U \geq 0,1 \text{ V}$ Gl. (E24-1) vereinfacht werden (nachrechnen!) zu:

$$I = I_S \exp\left(\frac{eU}{kT}\right) \quad (\text{E24-2})$$

Bei halblogarithmischer Darstellung ergibt dies eine Gerade, aus deren Extrapolation zu $U = 0 \text{ V}$ sich der Sperrstrom I_S ermitteln lässt.

Metall-Halbleiter-Kontakte

Solche Kontakte haben nur unter gewissen Voraussetzungen Gleichrichtereigenschaften. Ist z.B. die Austrittsarbeit der Elektronen W_M aus dem Metall größer als ihre Austrittsarbeit W_M aus einem n-Halbleiter, so treten bei Kontakt Elektronen aus dem Halbleiter in das Metall über; es bilden sich positive Raumladungen in der Halbleiterrandschicht, die wie beim p-n-Übergang eine gleichrichtende Sperrschicht erzeugen. Die Voraussetzung für einen Gleichrichtereffekt des Kontaktes zwischen Metall und p-Halbleiter ist $W_M < W_p$. In allen anderen Fällen ergeben sich nur Ohmsche Kontakte ohne Sperrschichtbildung.

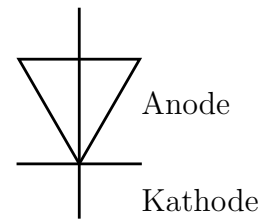
Leuchtdiode

Durch geeignete Wahl des Halbleitermaterials und der Dotierstoffe kann der Bandabstand zwischen Valenz- und Leitungsband so eingestellt werden, dass beim Rekombinationsprozess von Elektronen und Löchern Lichtquanten entstehen: man spricht dann von einer Leuchtdiode (light emitting diode, LED), die im Durchlassbetrieb Licht einer bestimmten Wellenlänge emittiert. In einer vereinfachenden Betrachtungsweise entspricht die Energie des Lichts (hf) der Energie der Ladungsträger (eU).

Hinweise

Eine Halbleiterdiode hat folgendes Schaltsymbol:
 $U_{AK} > 0$: Durchlaß-, $U_{AK} < 0$: Sperr-Richtung.

Die **K**athodenseite ist auf dem Bauelement durch einen schwarzen Balken / gelben Punkt markiert, bei LEDs durch den **k**ürzeren Anschlussdraht.



Strom - und Spannungsfehlerschaltung

Ein ideales Strommessgerät sollte den Innenwiderstand 0Ω , ein ideales Spannungsmessgerät den Innenwiderstand $\infty\Omega$ haben - reale Messgeräte weichen davon ab. So beträgt zum Beispiel der Innenwiderstand des Spannungsmessers DMM3021 „nur“ $10\text{M}\Omega$. Als Folge davon kann an einem Bauteil nie gleichzeitig Strom und Spannung fehlerfrei gemessen werden: In Abb.E24-1 fließt durch die Parallelschaltung des Spannungsmessers zum Lastwiderstand ein zusätzlicher Fehlerstrom durch das Strommessgerät. In der alternativen, gestrichelten Anordnung wird dieser Fehlerstrom zwar vermieden, dafür muss man einen Spannungsfehler in Kauf nehmen: Zusätzlich zur Spannung am Lastwiderstand fällt eine Spannung am Strommessgerät ab, deren Größe meist auch noch vom gewählten Messbereich abhängt. In der Praxis muss man sich entscheiden, in welcher der beiden Messanordnungen der kleinere Fehler entsteht und ggf. den Fehler mithilfe der Instrumentendaten herausrechnen.

Messprogramm

Auf einem Steckbrett sind fünf unterschiedliche Dioden in einer Anordnung für Messungen mit Gleichstrom (=) und Wechselstrom (\approx) aufgebaut. Durch Anlegen einer variablen Gleichspannung kann die Kennlinie $I(U)$ eines Bauteils punktweise ausgemessen werden. Durch Anlegen einer passend gewählten Wechselspannung kann die Kennlinie in jeder Periode komplett durchlaufen und auf einem Oszilloskop in xy-Betriebsweise dargestellt werden.

Hinweis: Messen Sie die Kennlinien in der Stromfehlerschaltung und korrigieren Sie ggf. alle Messdaten um den jeweiligen Fehlerstrom!

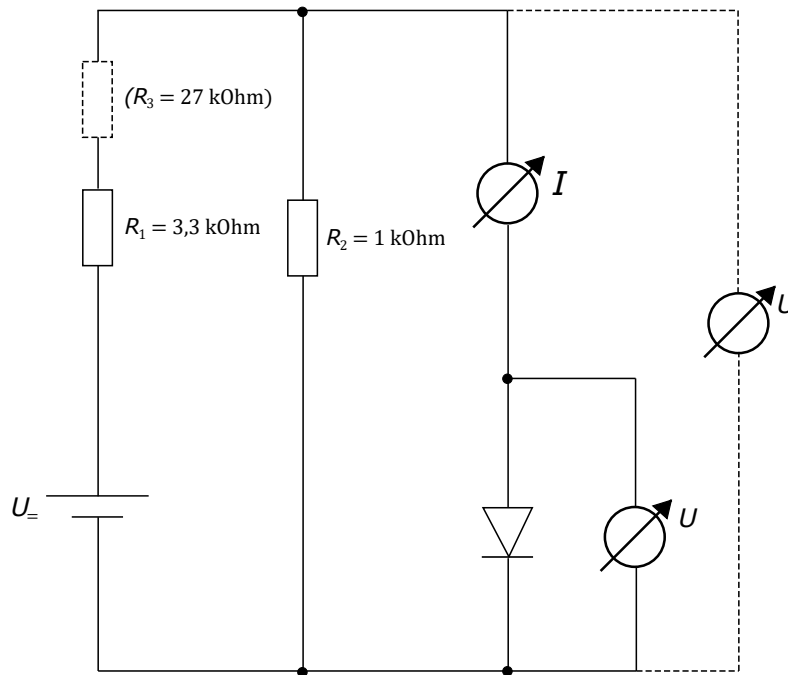


Abb. E24-1: Anordnung zur Messung der Kennlinie einer Ge- und Si-Diode in Stromfehlerschaltung (gestrichelt: Spannungsfehlerschaltung).

I. Germanium- und Silizium-Diode

- a) Messen Sie die Durchlasskennlinie der Dioden im Bereich zwischen ca. $5 \mu\text{A}$ und ca. 8 mA . Bauen Sie dazu die Schaltung nach Abbildung E24-1 auf. Achten Sie darauf, dass der gewählte Messbereich Ihre Messungen nicht verfälscht.

Auswertung: Erstellen Sie ein Diagramm I über U (y-Achse logarithmisch). Ermitteln Sie durch grafische Extrapolation zu $U = 0$ **und** durch Berechnung mithilfe der Punkt-Steigungsmethode den Sperrstrom $I = I_S$ gemäß Gl. (E24-2).

- b) Stellen Sie bei beiden Dioden (Ge, Si) einen Durchlassstrom von ca. $200 \mu\text{A}$ ein und notieren Sie jeweils Strom und Spannung **vor** und **nach** Erwärmung der Dioden mit dem Finger. Berühren Sie dazu das Diodengehäuse und **einen** Anschlussdraht (als Wärmeleiter). Berechnen Sie die prozentuale Änderung der Leitfähigkeit.
- c) Wechseln Sie die Polarität der Eingangsspannung für die Messung der Sperrrichtung und lassen Sie die Schaltung vom Assistenten prüfen (ggf. $27 \text{ k}\Omega$ -Widerstand entfernen!).
- d) Messen Sie die Sperrkennlinie der Dioden bis zur maximalen Sperrspannung von ca. -8 V . Legen Sie in Bereichen mit größerer Änderung die Messpunkte dichter. **Auswertung:** Berechnen Sie den Fehlerstrom und korrigieren Sie die Messwerte um diesen Betrag. Warum ist dieser Schritt in Versuchsteil a) vernachlässigbar? Die korrigierte Kennlinie ist in einem linearen Diagramm darzustellen. Wie groß ist jeweils der Sperrsättigungsstrom I_S ?

II. Zenerdiode

- Bauen Sie die Schaltung nach Abbildung E24-2 auf. Schalten Sie das Oszilloskop als Kennlinienschreiber für 2-Pole (Taste „Acquire“, „XY“ auf „On“ setzen) und schreiben Sie damit die Kennlinien für die Zenerdiode gemäß der üblichen Darstellung.
- Speichern Sie das Oszilloskopbild als jpeg-Datei auf einen USB-Stick (notfalls fotografieren und auf die nötige Pixelzahl reduzieren). **Physiker:** Speichern Sie den Datensatz der Kennlinie als csv-Datei auf einen USB-Stick. Stellen Sie die Kennlinie in einem (einzigem) linearen Strom-Spannungsdiagramm dar.
- Erklären Sie den Verlauf der Kennlinie.

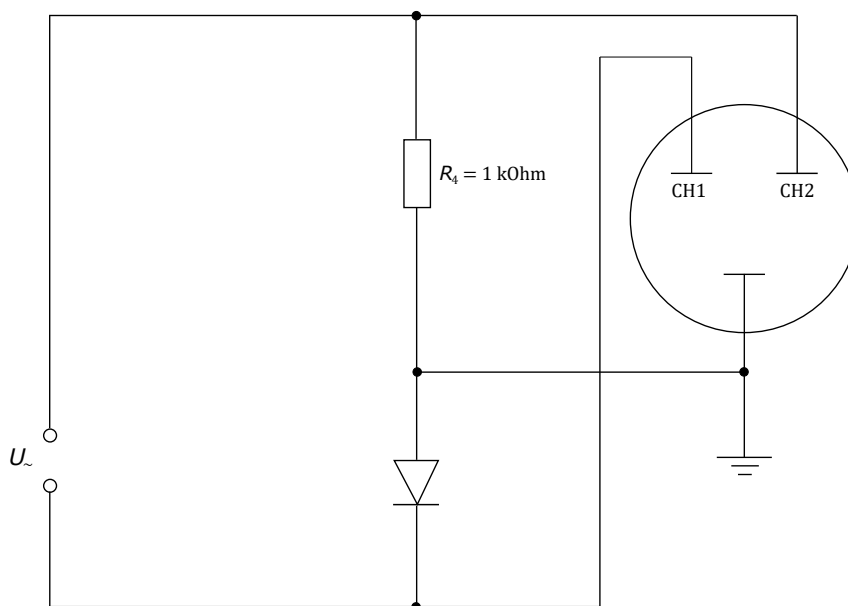


Abb. E24-2: Anordnung zur Darstellung der Kennlinien der Z-Diode und verschiedener LEDs mit dem Oszilloskop im xy-Betrieb. Wechselspannungsquelle ist ein Signalgenerator mit variabler Frequenz und variabler Amplitude.

III. LEDs

- Schreiben Sie die Kennlinien der beiden LEDs wie zuvor für die Zenerdiode.
- Speichern Sie das Oszilloskopbild ab. Wodurch unterscheiden sich die Kennlinien der beiden LEDs? **Physiker:** Speichern Sie den Datensatz als csv-Datei. Stellen Sie die Kennlinien der beiden LEDs in einem gemeinsamen Schaubild dar.
- Erniedrigen Sie nun die Spannung am Generatortausgang so weit, dass Sie erkennen können, ab welcher Spannungsschwelle die Diode gerade zu leuchten beginnt (Deckenlampen im Raum ausschalten!).

- d) Diskutieren Sie den Zusammenhang zwischen Spannungsschwelle und Wellenlänge des Lichts. Überprüfen Sie durch Rechnung, ob Ihre Messwerte zu den beobachteten Wellenlängen (schätzen!) passen.

IV. Gleichrichterschaltung (nur Physiker)

- a) Bauen Sie die Schaltung wie in Abbildung E24-3 auf. Bestimmen Sie die abgegebene Leistung des Einweggleichrichters in den Widerstand R_4 im Vergleich zur Eingangsleistung (Messung an R_2) für die Si- und die Ge-Diode und die beiden LEDs. Messen Sie dazu die Spannungen an U_1 und U_2 mit dem Oszilloskop.
- b) Speichern Sie den Datensatz ab und bestimmen Sie den mittleren Spannungswert einer Halbwelle (Eingangsspannung und abfallende Spannung) durch Integration. Tragen Sie außerdem die Eingangs- und die abfallenden Leistungen über die Halbwelle in einem Diagramm auf. Vergleichen Sie die Spannungsverluste.

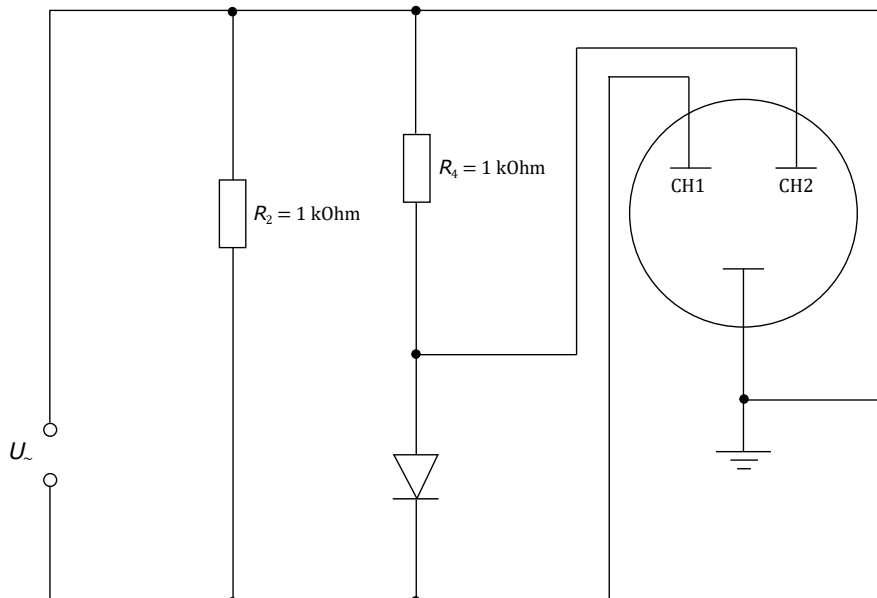


Abb. E24-3: Anordnung zur Messung der abgegebenen Leistung des Gleichrichters in den Widerstand R_4 mit dem Oszilloskop.

Hinweise

- Speicherung des Oszilloskopbildes: Taste „Save/Recall“, Auswahl „Save“, Ausgabeformat (JPEG, CSV, usw) via „Type“ einstellen und Bestätigung mittels „Press to Save“.
- Im „x-y“ ist kein csv-Export möglich, hierfür wieder in den normalen Betriebsmodus wechseln.

- Die Einstellung sehr kleiner Stromwerte bei der Messung der Durchlasskennlinien wird erleichtert, wenn man für diesen Aufgabenteil den Spannungsteiler um einen zusätzlichen Widerstand von $27\text{ k}\Omega$ vergrößert.
- Wenn ein exponentieller Zusammenhang zwischen I und U erwartet wird, ist es nicht sinnvoll, die Messpunkte äquidistant in I zu wählen, sondern diese mit einem konstanten Faktor, z. B. ca.(!) 2, anwachsen zu lassen.
- Beim Umschalten des Messbereichs ändert sich der Innenwiderstand der Messgeräte. Nehmen Sie daher Datenpunkte (mind. 2), bei denen Sie den Messbereich wechseln zweimal auf, einmal vor und einmal nach dem Umschalten.
- Bei einer Ge-Diode gilt Gl. (E24-2) nur für kleine Ströme. Die Ausgleichsgerade soll deshalb bei Ge nur an den unteren Bereich der Kennlinie angepasst werden.
- Damit Sie die übliche Kennliniendarstellung erhalten kann es notwendig sein, Kanal 2 zu invertieren (blaue Taste, im Menu CH2 „Invert On“ wählen).
- Um die Diagrammachsen richtig darzustellen, muss vor Beginn einer **Kennlinienmessung** bei Spannung 0 (im Menu CH1 und CH2 auf „Coupling Ground“ stellen) an den Eingängen des Oszilloskops mit den Drehreglern für Vertical Position der Strahl auf die Bildschirmmitte (= Koordinatenursprung) justiert werden. Beim Drehen der Knöpfe wird die Strahlposition am unteren Bildrand eingeblendet. Nach Justage nicht mehr ändern! Danach ist wieder auf DC-Einkopplung der Signale an Kanal 1 und Kanal 2 (im Menu CH1 und CH2 „Coupling DC“ wählen) zu stellen!
- Um ein stehendes Bild einer Kennlinie zu erhalten, sollte die Frequenz des Generators auf ca. 200 Hz (nicht höher!) eingestellt sein.