

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I
Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007
Halbleiterbauelemente

I Einleitung

In dieser Versuchsreihe geht es um die statischen und dynamischen Eigenschaften von Halbleiterbauelementen. Ermittelt werden unter anderem die Sperrverzögerungszeit von Leistungsdioden und das Verhalten von Gleichrichterschaltungen.

II Theoretische Grundlagen

Dioden

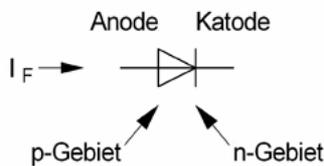


Abbildung 1: Schaltbild einer Diode (public domain)

Eine nach Abbildung 1 aufgebaute Diode lässt eine positive Spannung von Anode zu Katode durch. Daraus resultiert ein Durchlassstrom I_D . Wird hingegen eine negative Spannung an die Diode gelegt, so sperrt die Diode und es ergibt sich ein Sperrstrom I_S . Dieser ist wesentlich kleiner als der maximal zulässige Durchlassstrom.

Statisches Verhalten von Dioden

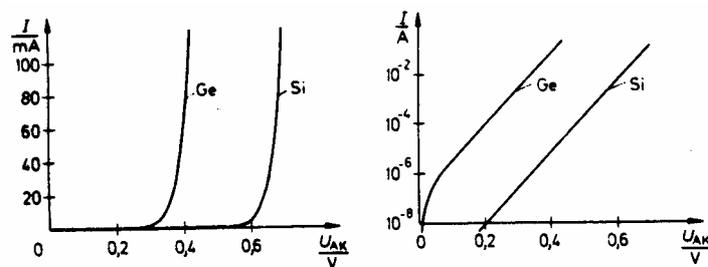


Abbildung 2: Diodenkennlinien für Germanium- und Siliziumdioden in (a) linearer Darstellung / (b) halblogarithmischer Darstellung (aus /2/ „U. Tietze, Ch. Schenk: Halbleiterschaltungstechnik“ S.24)

Anhand von Abbildung 2 (a) kann man das statische Verhalten von Dioden gut erkennen. Die für den Diodenstrom resultierende Kurve, die Diodenkennlinie, lässt sich mit der Hilfe der Shockleyschen Diodengleichung berechnen. Sie lautet für den theoretischen Sperrstrom I_S ,

die Temperaturspannung $U_T = \frac{kT}{e_0}$ (ca. 25,5mV bei 20°C) sowie eine positive

Diodenspannung U_{AK} von Anode zu Katode (siehe Abbildung 1)

$$I = I_S(T) \left(e^{\frac{U_{AK}}{mU_T}} - 1 \right).$$

Die berechnete Diodenkennlinie ist nur für die Durchlassrichtung gültig.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Der reale Sperrstrom ist in Wirklichkeit deutlich größer als der theoretische und nimmt wegen Oberflächeneffekten mit der Sperrspannung zu.

Wie in der halblogarithmischen Darstellung (Abbildung 2 (b)) zu sehen ist, hat die Diodenkennlinie keinen Knick, so wie man es in Abbildung 2 (a) hätte erwarten können.

Nach der Shockleyschen Diodengleichung, lässt sich berechnen, dass die Durchlassspannung um Werte zwischen 60 und 120mV ($mU_T \ln(10)$) zunimmt, wenn sich der Durchlassstrom verdoppelt.

Wegen der Temperaturabhängigkeit von U_T und I_S ist auch die Durchlassspannung temperaturabhängig.

Näherungsweise gilt:
$$\left. \frac{\partial U_{AK}}{\partial T} \right|_{I=const.} \approx -\frac{2mV}{K}$$

Daraus ist ersichtlich, dass für eine konstante Spannung der Strom exponentiell mit der Temperatur ansteigt.

Gleiches gilt für den Sperrstrom, der sich bei 10K Temperaturzunahme verdoppelt und bei 100K Temperaturzunahme auf den tausendfachen Wert ansteigt.

Dynamisches Verhalten

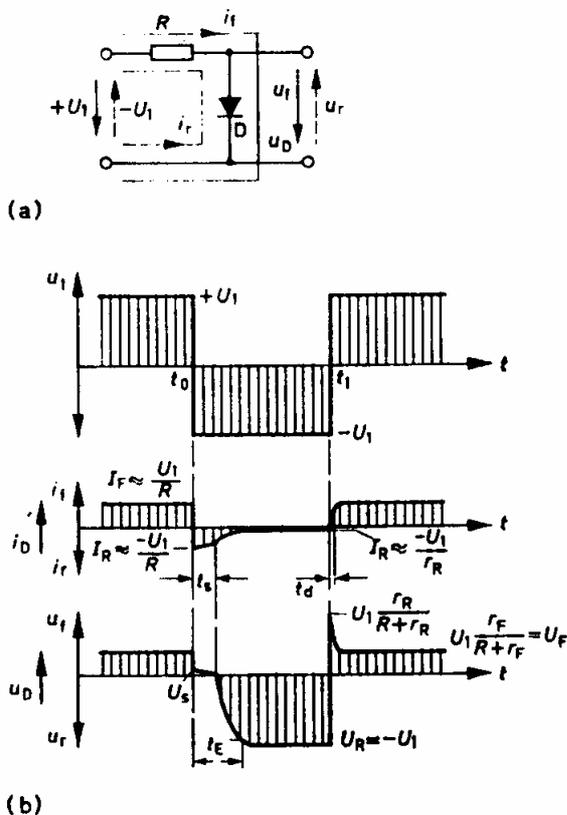


Abbildung 3: (b) Verlauf von Diodenstrom und -spannung bei angelegter Rechteckspannung an eine Diodenschaltung nach (a) (aus /4/ „H. Schröder: Elektr. Nachrichtentechnik“ S.303)

Betrachtet man das dynamische Verhalten einer Diode nach Abbildung 3 (b), also die Übergänge zwischen Durchlass- und Sperrbereich, so fällt auf, dass die Diode weder unmittelbar sperrt noch Spannungen durchlässt, sondern dafür einige Zeit benötigt. Diese Zeiten werden als Sperrerrholzeit t_e und Durchlassträgheit t_d bezeichnet.

Vor dem Zeitpunkt t_0 fließt eine konstante Durchlassspannung $+U_1$ durch die Diode, woraus ein Durchlassstrom $I_F \approx \frac{U_1}{R}$ resultiert.

An der Diode selbst liegt eine Spannung von $U_F = r_F \cdot I_F = U_1 \cdot \frac{r_F}{R+r_F}$ an, wobei r_F den Durchlasswiderstand der Diode angibt.

Zum Zeitpunkt t_0 wechselt die Eingangsspannung $+U_1$ ihre Richtung, ist also $-U_1$. Daraus ergibt sich ein Sperrstrom

$I_R \approx -\frac{U_1}{R}$ der die noch vorhandenen Ladungen zwischen der pn-Schicht der Diode

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

abbaut.

Sobald alle Ladungen abgebaut sind – der Vorgang verläuft linear -, beträgt die Spannung durch die Diode 0V. Dieser Vorgang entspricht zeitlich der Sperrverzugszeit t_s .

Es folgt nun die Aufladung der Sperrschichtkapazität C_s . Dieser Vorgang, bis die Sperrspannung $U_R = -U_1$ beträgt, benötigt $2,2C_s \cdot R = 2,2\tau$, wobei wir τ bereits in der letzten Versuchsreihe kennen gelernt haben.

Die Gesamtzeit zwischen Sperrbefehl und tatsächlicher Sperrung, also für das Ausschalten der Diode, beträgt somit $t_s + 2,2\tau = t_E$, die als Erholzeit bezeichnet wird.

Für den Einschaltvorgang der Diode ergibt sich hingegen nur eine kurze Durchlassträgheit t_d , die deutlich kürzer als die Erholzeit ist. Sie befindet sich zwischen t_1 und dem Erreichen

der angelegten Durchlassspannung $U_F = U_1 \frac{r_F}{R + r_F}$ von der Spannungsspitze ($U_1 \frac{r_R}{R + r_R}$) nach Änderung der Eingangsspannungsrichtung.

Einweg-Gleichrichter

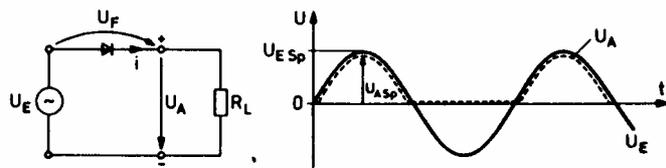


Abbildung 4: Schaltung (links) und Spannungen (rechts) eines Einweg-Gleichrichters (aus /6/ "K.H. Rohe: Elektronik für Physiker" S.89)

Für einen nach Abbildung 4 aufgebauten Einweg-Gleichrichter ergeben sich die rechts in Abbildung 4 mit gestrichelter Linie gezeigten Ausgangsspannungen bei einer sinusförmigen Eingangsspannung (Graph mit durchgezogener Linie).

Ein Einweg-Gleichrichter stellt die einfachste Form eines Gleichrichters dar. Für positive Eingangsspannungen ergibt sich die Ausgangsspannung $U_A = U_E - U_F$. Typische Werte für U_F sind bei einer Germaniumdiode 0,3V und bei einer Siliziumdiode 0,7V.

Für negative Eingangsspannungen ergibt sich eine Ausgangsspannung von $U_A = I_S R_L \approx 0V$, da die Diode in Sperrrichtung betrieben wird.

Da beim dynamischen Verhalten Nebeneffekte - wie im vorigen Teilkapitel „Dynamisches Verhalten“ angesprochen – auftreten, versucht man durch einen parallel zur Ausgangsspannung geschalteten Kondensator mit Kapazität C die Ausgangsspannung zu glätten. Dieser wird durch die positiven Halbwellen auf einen Spitzenwert von $U_{ASp} = U_{ESp} - U_F$ aufgeladen.

Bei sinusförmiger Eingangsspannung beträgt $U_{ESp} = \sqrt{2} U_{Eff}$. U_{Eff} ist der Effektivwert der Eingangsspannung. Die Ausgangsspannung beträgt somit $U_{ASp} = \sqrt{2} U_{Eff} - U_F$.

Fällt die Eingangsspannung unter den Wert U_{ASp} , sperrt die Diode. Der Kondensator gibt nun die gespeicherte Ladung an den Verbraucher R_L ab.

Bei Wahl von $R_L C > T$, so ist für $t < T$

$$u_A \approx U_{ASp} \left(1 - \frac{t}{R_L C} \right).$$

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Damit fällt die Spannung um den Betrag

$$\Delta u = U_{ASp} - U_{ASp} \left(t - \frac{t_e}{R_L C} \right) = U_{ASp} \frac{t_e}{R_L C} < U_{ASp} \frac{T}{R_L C} \quad \text{ab.}$$

Es ergibt sich folgender Spannungsverlauf (Abbildung 5, oben):

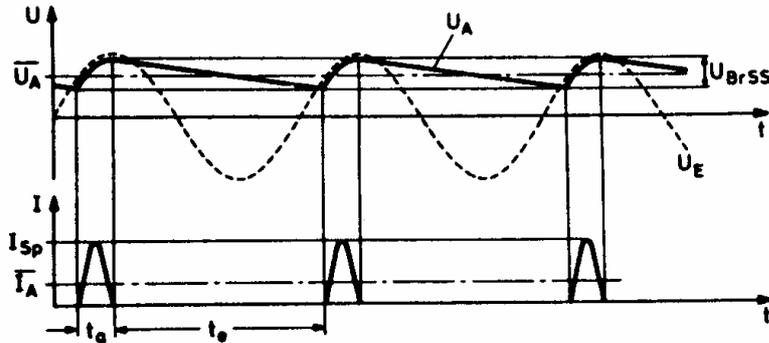


Abbildung 5: Spannungs- und Stromverlauf bei der Einweg-Gleichrichtung mit Gleichrichtungskondensator (aus /6/ "K.H. Rohe: Elektronik für Physiker" S.92)

Die Ausgangsspannung kann man ebenso in eine Gleichspannung \overline{U}_A mit Brummspannungsanteil u_{BrSS} aufteilen, wobei $u_{BrSS} = \Delta u < \frac{1}{f} \frac{\overline{I}_A}{C}$ ist.

Für die Durchbruchspannung der Diode muss wegen des Spitzenwertes der Eingangsspannung gelten: $U_R > 2 \cdot \sqrt{2} U_{Eff}$.

Der Einschaltladestrom I_E wird wesentlich durch den Innenwiderstand R_i der Spannungsquelle bestimmt. Es ist $I_E < \frac{\sqrt{2} U_{Eff}}{R_i}$.

Während des Aufladevorgangs des Kondensators tritt ein periodischer Spitzenstrom I_{Sp} auf. Dieser kann ein Vielfaches des mittleren Ausgangsstromes \overline{I}_A betragen.

$$\overline{I}_A = \frac{1}{T} \int_0^{t_a} i dt < \frac{1}{T} I_{Sp} t_a \quad , \quad \text{mit Aufladezeit } t_a \text{ und } i = C \frac{dU_A}{dt} + i_A$$

Schätzungsweise gilt: $I_{Sp} \leq \frac{U_{ESp}}{\sqrt{R_i R_L}}$.

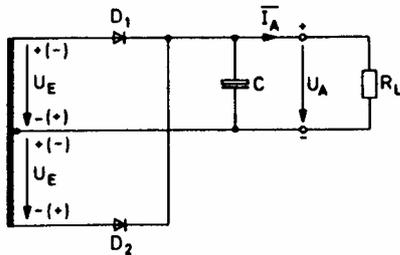
Der mittlere Diodenstrom ist $\overline{I}_D = \overline{I}_A$, da sowohl Lade- als auch Ausgangsstrom die Diode durchfließen.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Zweiweg-Gleichrichter

Zweiweg-Gleichrichter stellen eine ermöglichen größere Gleichströme und kleinere Brummspannungen. Es gibt zwei Modelle, die Mittelpunkts- und Brückenschaltung (Abbildung 6):



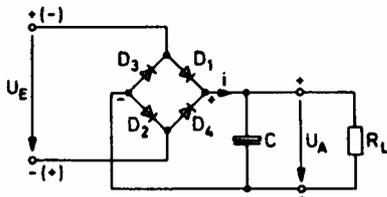
Die Mittelpunkts-Gleichrichterschaltung besteht aus zwei Einweg-Gleichrichterschaltungen die im Gegentakt arbeiten. Vorteil der Schaltung ist eine nur halb so hohe Brummspannung wie beim Einweg-Gleichrichter.

Es ist $u_{BrSS} < \frac{1}{2} \frac{\overline{I_A}}{fC}$, da der Kondensator während einer

Periode zweimal aufgeladen wird.

Außerdem ist der mittlere Diodenstrom einer Diode

$$\overline{I_D} = \frac{1}{2} \overline{I_A}, \text{ da Strom auf beide Dioden verteilt wird.}$$



Bei der Brücken-Gleichrichterschaltung liegen die Gleichrichter hingegen in Reihe, wodurch für den Spitzenwert der Ausgangsspannung folgt:

$$U_{ASp} = \sqrt{2}U_{Eff} - 2U_F$$

Abbildung 6: Mittelpunt-(oben) sowie Brückenschaltung (unten) eines Zweiweg-Gleichrichters (aus /6/ "K.H. Rohe: Elektronik für Physiker" S.95)

Für die maximale Sperrspannung gilt:

$$U_R = \sqrt{2}U_{Eff}$$

Zu beachten ist bei beiden Schaltungen, dass die Eingangs- und Ausgangsspannung kein gemeinsames konstantes Bezugspotential haben.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007****III Versuchsteil****Schaltverhalten einer Leistungsdiode****III.i.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- Leistungsdiode
- Widerstandsdekade
- Funktionsgenerator für Rechteckspannung (FG)
- Laborstecker-Verbindungskabel
- Oszilloskop Agilent 54603B
- 2 BNC-auf-Laborstecker-Kabel
- BNC-auf-BNC-Kabel
- BNC-T-Stück

Leistungsdiode und Widerstandsdekade werden in Reihe mit einem Laborstecker-Kabel geschaltet. Parallel dazu wird der FG geschaltet. „Channel 2“ des Oszilloskops wird parallel zur Diode geschaltet. Mit Hilfe des T-Stückes wird das Ausgangssignal des FG auf „Channel 1“ gelegt und über dieses Signal am externen Triggereingang des Oszilloskops getriggert. Zur Verdeutlichung des Aufbaus dient folgendes Schaltbild (Abbildung 7):

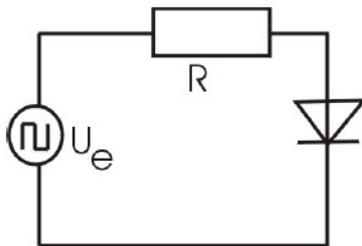


Abbildung 7: Schaltbild zum Schaltverhalten einer Leistungsdiode
(aus der Versuchsbeschreibung "Halbleiterbauelemente" der Universität Rostock)

III.i.b Versuchsdurchführung

Es wird nun mit Hilfe der Widerstandsdekade und den Reglern „Amplitude“ und „Offset“ am FG die gemessene Spannung so variiert, dass nur der Durchlass- bzw. Sperrstrom geändert wird. Für R ergibt sich ein geeigneter Wert von $10\text{k}\Omega$.

Anschließend wird für verschiedene Durchlass- und Sperrspannungen U_D und U_R die Sperrverzögerungszeit mit Hilfe der Cursor-Funktion am Oszilloskop bestimmt.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Es ergeben sich die Werte aus Tabelle 1 und 2 im Anhang und die Diagramme 1 und 2 zu den gemessenen Werten:

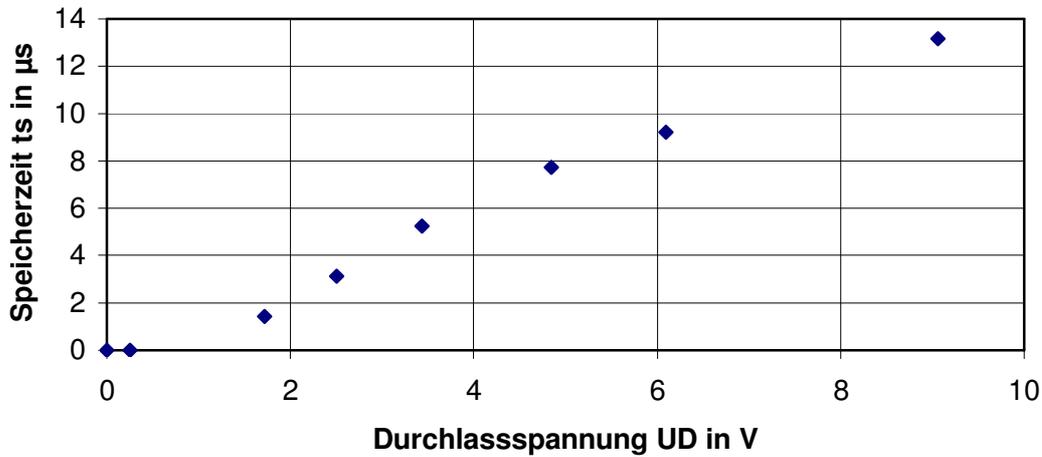


Diagramm 1: Speicherzeit in Abhängigkeit vom Durchlassstrom

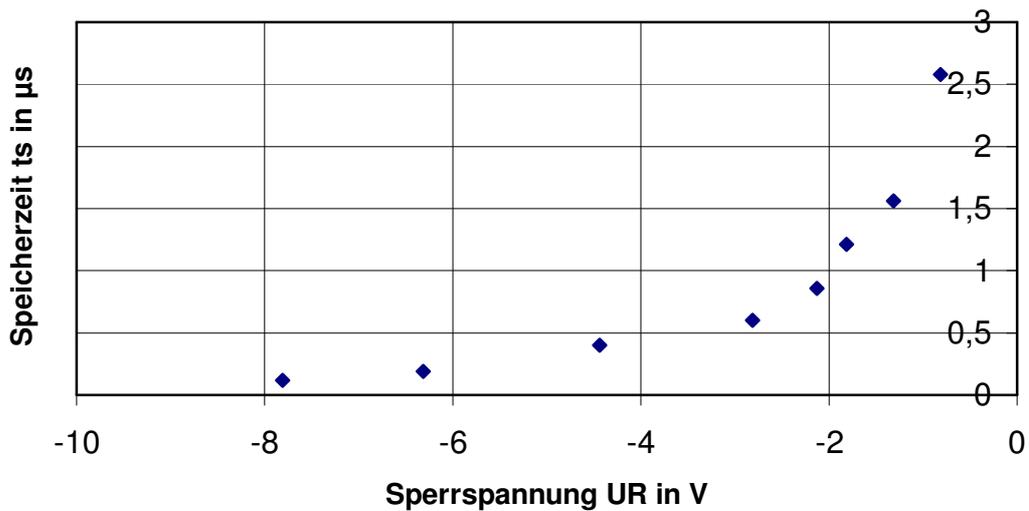


Diagramm 2: Speicherzeit in Abhängigkeit vom Sperrstrom

III.i.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Messergebnisse genügen qualitativ der Beziehung $t_s = \tau_v \ln \left(\frac{1 + \frac{I_F}{I_R}}{1 + K_0} \right)$ (aus /5/

„P.Baumann: Halbleiterpraxis – Wirkungsweise und Kenndaten von Dioden“ S.18).

Bei steigender Durchlassspannung steigt auch der Durchlassstrom, da $I_F \approx \frac{U_1}{R}$. Für größer werdendes I_F muss die Speicherzeit logarithmisch ansteigen.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

Gleiches gilt umgekehrt für die Sperrspannung. Steigt ihr Betrag, so fällt die Speicherzeit logarithmisch ab.

Gleichrichterschaltung I**III.ii.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- Gleichrichtersteckbrett nach Abbildung 8
- Widerstandsdekade
- Spannungsquelle mit $U_e = 6V / 50Hz$
- Laborstecker-Verbindungskabel
- Oszilloskop Agilent 54603B
- 2 BNC-auf-Laborstecker-Kabel

Es wird folgende Schaltung mit Hilfe eines Gleichrichtersteckbrettes realisiert (Abbildung 8):

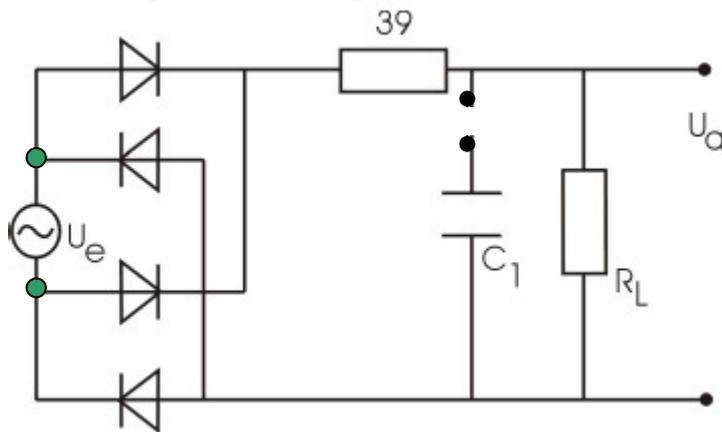


Abbildung 8: Gleichrichtersteckbrett

(aus der Versuchsbeschreibung "Halbleiterbauelemente" der Universität Rostock mit leichten Änderungen)

Parallel zu $R_L = 1k\Omega$ wird mit dem Oszilloskop an Channel 2 der Ausgangsstrom gemessen. Der Dioden- und Kondensatorstrom werden nacheinander auf Channel 1 gelegt.

Im ersten Teilversuch beträgt $C_1 = 0\mu F$, dazu wird keine Verbindung zwischen C_1 und der oberen Leiterbahn hergestellt.

Im zweiten Teilversuch beträgt $C_1 = 10\mu F$. Dazu wird einfach ein Kabel zur Verbindung von C_1 und der oberen Leiterbahn verwendet.

Um gleichzeitig den Ausgangsstrom, den Kondensatorstrom (Widerstandsdekade erforderlich, gewählt: $R_C = 300\Omega$) und den Diodenstrom auf dem Oszilloskop darzustellen, wird der Speicher des Oszilloskops verwendet.

Zum externen Triggern wird einer der in Abbildung 8 grün markierten Punkte mit dem Eingang für externe Triggersignale am Oszilloskop verbunden.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

III.ii.b Versuchsdurchführung

Es werden Diodenstrom und Ausgangsstrom auf dem Bildschirm des Oszilloskops dargestellt. Diese Bild wird gespeichert. Anschließend wird in einer zweiten Teilmessung der Kondensatorstrom gemessen, mit dem gespeicherten Bild kombiniert und ausgedruckt.

Es ergibt sich folgendes Bild (Abbildung 9) für $C_1 = 0\mu F$ (also kein Kondensatorstrom):

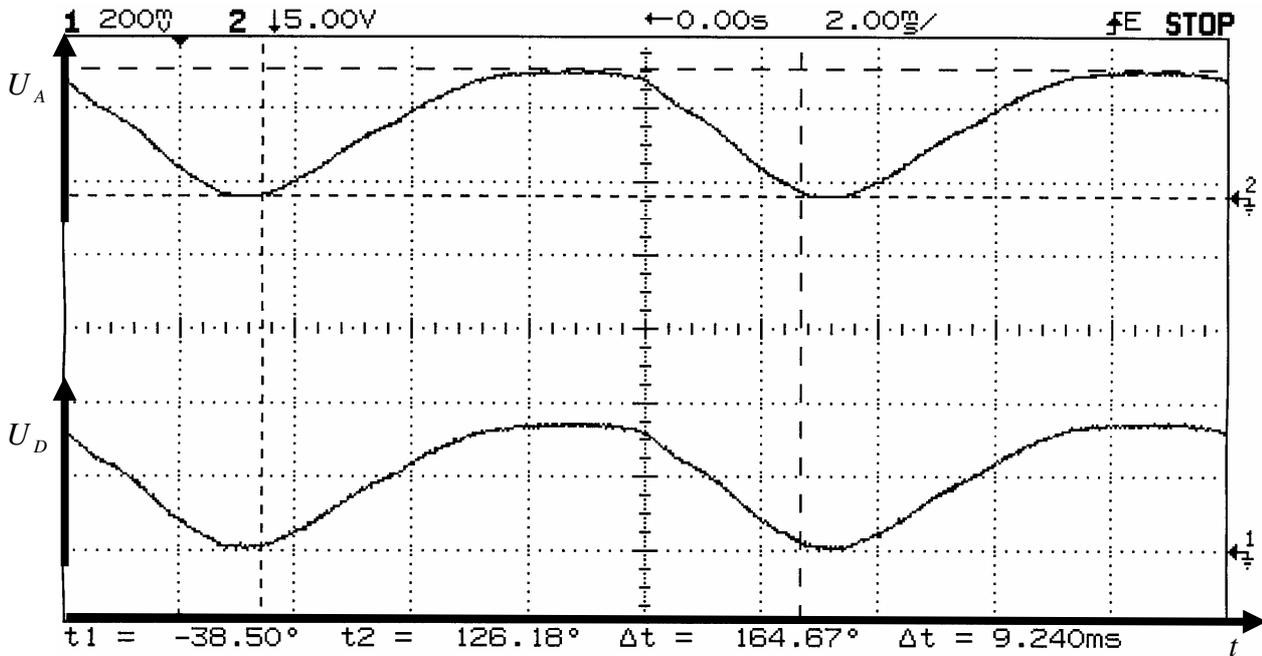


Abbildung 9: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = 0\mu F$

und folgendes Bild (Abbildung 9) für $C_1 = 10\mu F$ und $R_C = 300\Omega$:

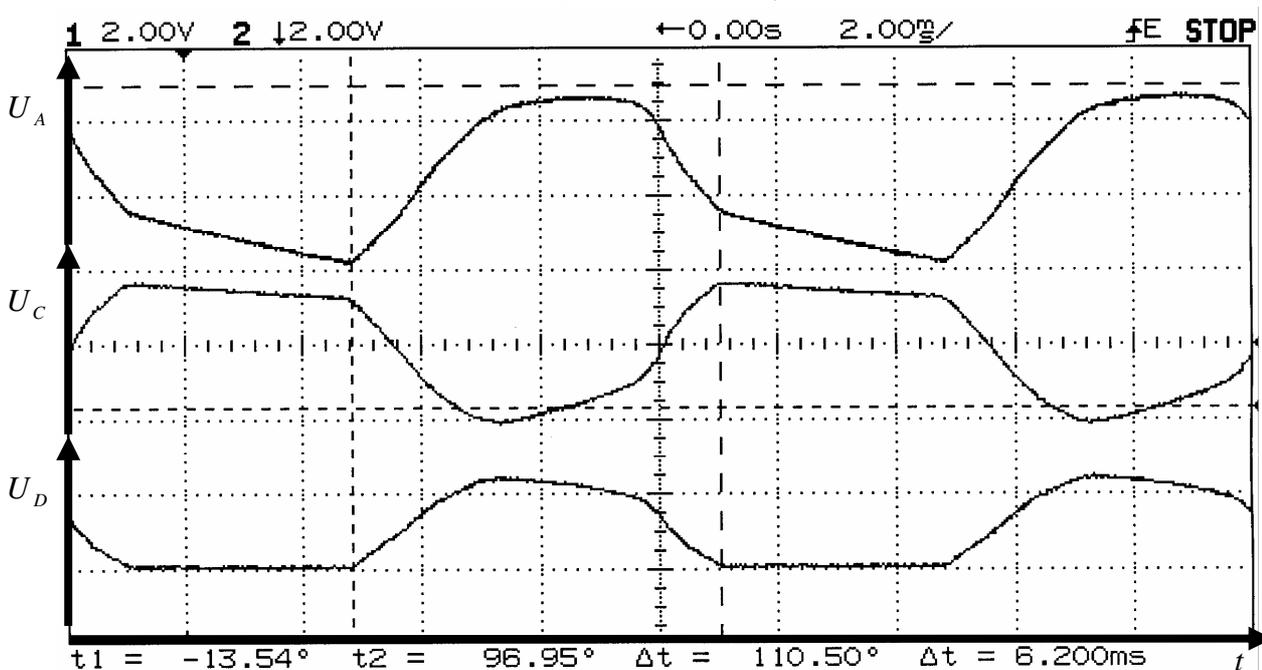


Abbildung 10: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = 10\mu F$

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007****III.ii.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen**

Wie in Abbildung 9 und 10 zu erkennen ist, sind die resultierenden Stromflusswinkel bei $C_1 = 0\mu F$ $\theta = 164,67^\circ$ und bei $C_1 = 10\mu F$ und $R_C = 300\Omega$ $\theta = 110,50^\circ$ was näherungsweise über die Beziehung $\hat{U}_e \cos \theta = \overline{U_b}$ (aus /7/ „Elektronikpraktikum“ S.113) mit den Messwerten übereinstimmt.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I**Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007****Gleichrichterschaltung II****III.iii.a Versuchsaufbau**

Die für diesen Versuch benötigten Materialien sind:

- Gleichrichtersteckbrett nach Abbildung 11
- Spannungsquelle mit $U_e = 6V / 50Hz$
- Laborstecker-Verbindungskabel
- Oszilloskop Agilent 54603B
- 2 BNC-auf-Laborstecker-Kabel

Es wird folgende Schaltung mit Hilfe eines Gleichrichtersteckbrettes realisiert (Abbildung 11):

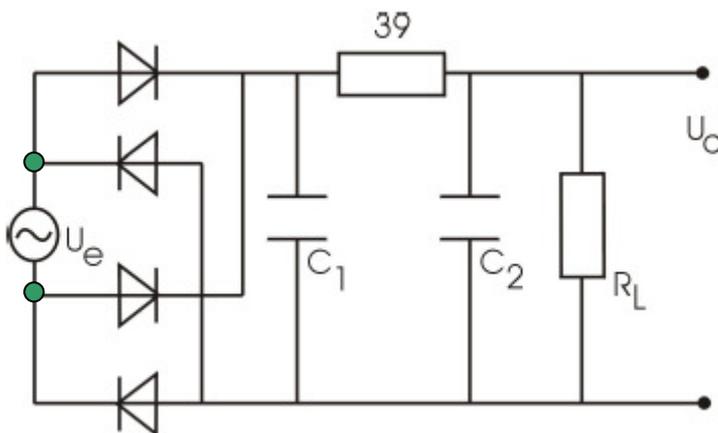


Abbildung 11: Gleichrichtersteckbrett
(aus der Versuchsbeschreibung "Halbleiterbauelemente" der Universität Rostock)

Parallel zu $R_L = 1k\Omega$ wird mit dem Oszilloskop an Channel 2 die Ausgangsspannung gemessen.

Analog zum Versuch „Gleichrichterschaltung I“ werden die wechselnden Kapazitäten über Laborstecker-Kabel mit der oberen Leiterbahn verbunden.

Getriggert wird über einen der grün in Abbildung 11 eingezeichneten Punkte am externen Triggereingang des Oszilloskops.

III.iii.b Versuchsdurchführung

Es wird nur die Ausgangsspannung auf dem Bildschirm des Oszilloskops ausgegeben. Die entsprechenden Werte (Spitze-Spitze) werden mit Hilfe der Cursor am Oszilloskop bestimmt.

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Es ergeben sich die folgenden Messbilder:

Für $C_1 = 0\mu F$ und $C_2 = 0\mu F$:

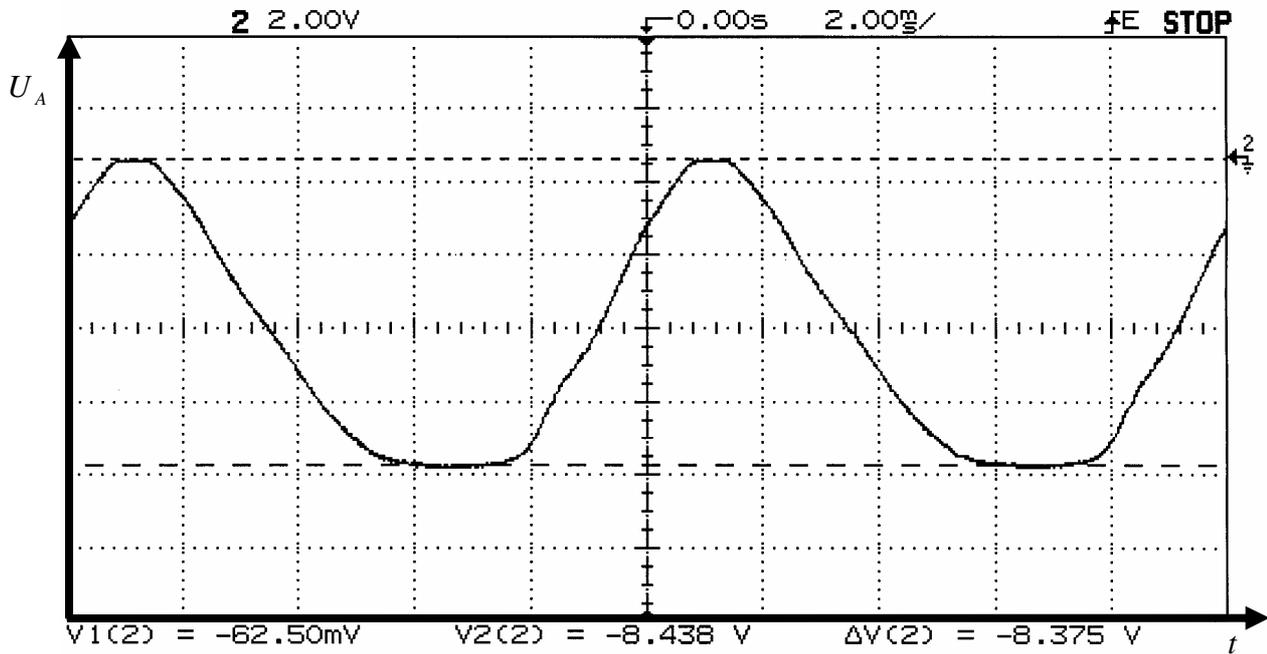


Abbildung 12: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = C_2 = 0\mu F$

Für $C_1 = 0\mu F$ und $C_2 = 10\mu F$:

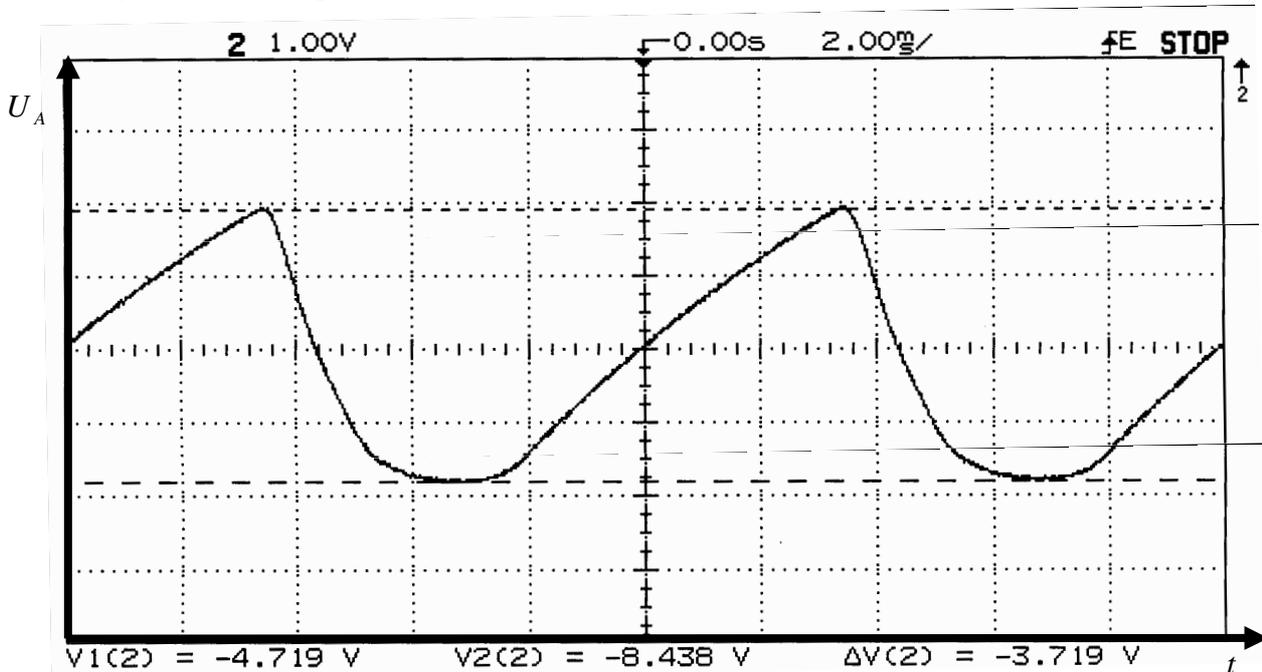


Abbildung 13: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = 0\mu F$ und $C_2 = 10\mu F$

Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I

Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007

Für $C_1 = 0\mu F$ und $C_2 = 100\mu F$:

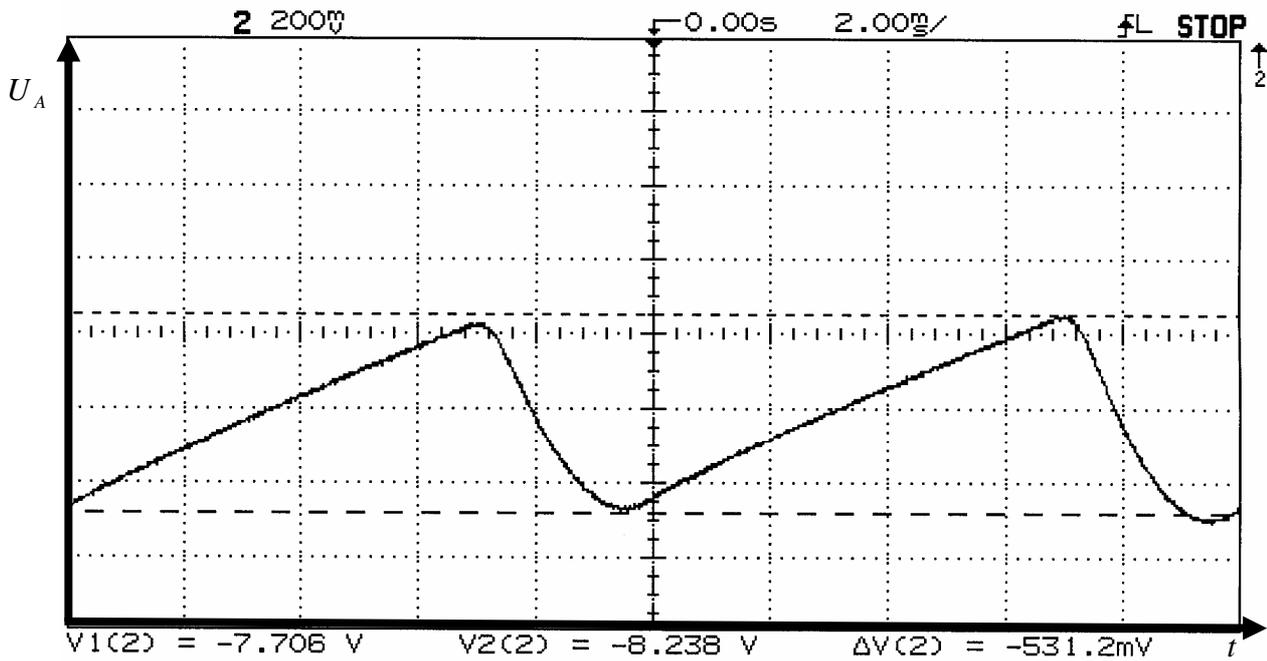


Abbildung 14: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = 0\mu F$ und $C_2 = 100\mu F$

Für $C_1 = 100\mu F$ und $C_2 = 100\mu F$:

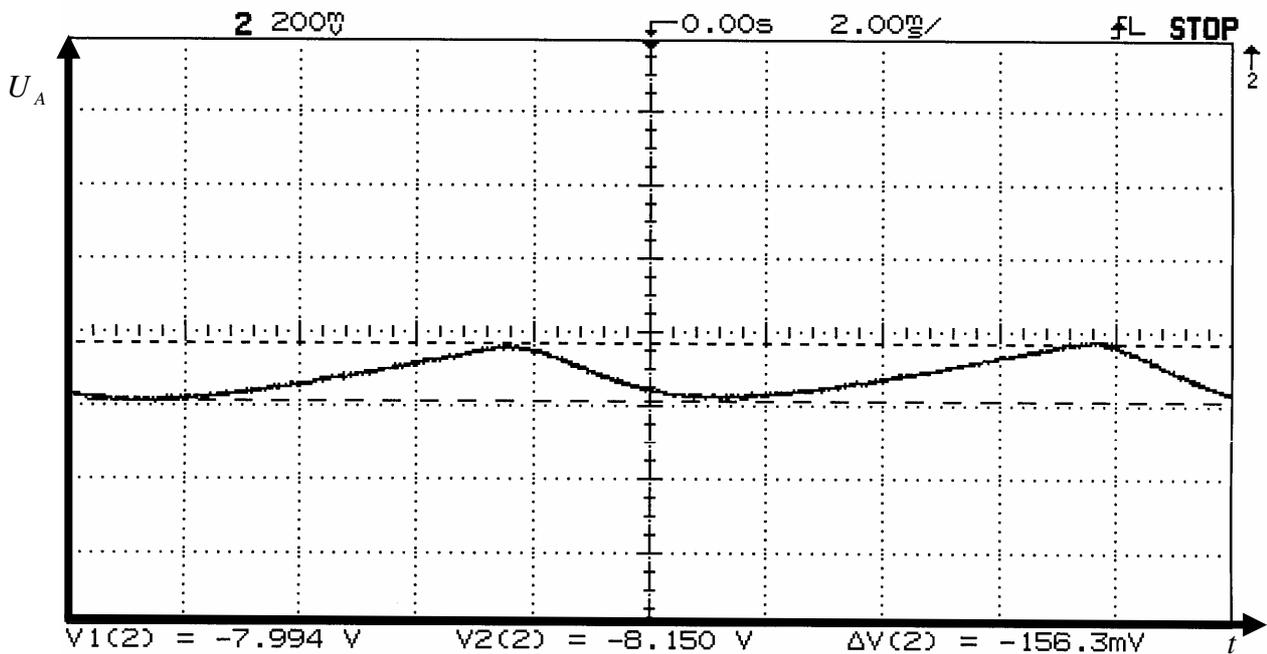


Abbildung 15: Messbild eines Gleichrichters für $C_1 = C_2 = 100\mu F$

III.iii.c Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Wie theoretisch erwartet, wird durch die Erhöhung der Kapazität die Ausgangsspannung geglättet. Eine optimale Glättung wird durch die Zuschaltung des Siebglieds $C_1 = 100\mu F$ im

**Protokoll zum Fortgeschrittenenpraktikum I
Elektronische Messtechnik im WS 2006/2007**

vierten Teilversuch erreicht. Die Ergebnisse erfüllen die Beziehungen $u_{BrSS} = \Delta u < \frac{1}{f} \frac{\overline{I_A}}{C}$ und

$$U_{ASp} = \sqrt{2}U_{Eff} - 2U_F \text{ im vollen Umfang.}$$

IV Anhang

Tabelle 1: Messwerte zum Versuch "Schaltverhalten einer Leistungsdiode" in Abhängigkeit vom Durchlassstrom

Durchlassspannung U_D in V	Sperrverzögerungszeit t_s in μs
0	0
0,250	~0
1,719	1,440
2,50	3,120
3,438	5,240
4,844	7,720
6,094	9,200
9,063	13,160

Tabelle 2: Messwerte zum Versuch "Schaltverhalten einer Leistungsdiode" in Abhängigkeit vom Sperrstrom

Durchlassspannung U_R in V	Sperrverzögerungszeit t_s in μs
-0,813	2,580
-1,312	1,560
-1,812	1,210
-2,125	0,860
-2,813	0,600
-4,437	0,400
-6,312	0,188
-7,812	0,116