

## Versuchsprotokoll

Lehrveranstaltung			
Nummer oder Bezeichnung des Versuchs			
Versuchs-	Abgabedatum		
Betreuer			
Name, Vorname des Protokollanten			
Praktikums-		Studiengruppe	
E-Mailadresse			

Ich erkläre mit meiner Unterschrift, daß das Protokoll die im Merkblatt (nächste Seite) aufgeführten Mindestanforderungen erfüllt.

Datum:

Unterschrift:

- |                                       |   |   |
|---------------------------------------|---|---|
| <input type="checkbox"/> 1. Protokoll | <input type="checkbox"/> 2. Protokoll       | <input type="checkbox"/> 3. Protokoll       |
| <input type="checkbox"/> Original     | <input type="checkbox"/> 1. Nachbearbeitung | <input type="checkbox"/> 2. Nachbearbeitung |

- ➔ Um den Bonus zur Klausur zu erhalten muß jeder Teilnehmer an allen allen Versuchen teilgenommen haben und 2 (GdE) bzw. 1 (EBau) anerkannte Protokolle vorweisen können.
- ➔ Das Protokoll muß spätestens eine Woche (GdE) bzw. zwei Wochen (EBAU) nach Versuchsdurchführung abgegeben werden. Sie können das Protokoll Ihrem Betreuer übergeben oder in den Kasten vor Raum R4.004 einwerfen.
- ➔ Es werden nur Protokolle mit vollständig ausgefülltem Deckblatt angenommen.
- ➔ Das Protokoll nur mit dem Deckblatt zusammenheften, nicht in irgendwelchen Hüllen oder Ordnern abgeben.

Testat:	<input type="checkbox"/> Anerkannt	<input type="checkbox"/> 1. Nacharbeit	<input type="checkbox"/> 2. Nacharbeit
<p><u>Wichtig:</u> Das Protokoll wurde unter Umständen nur stichprobenartig geprüft. Abschnitte, die nicht beanstandet wurden müssen daher nicht zwangsläufig richtig sein.</p>			

# Protokoll Praktikum EBau Diode

Johann BECKER

Valentin EDER

Marc OSTNER

1. Juni 2025

Date Performed:

30. Mai 2025

Instructor:

Prof. Dr. Alexandru Negut

## A Einführung

Die Vorbereitung ist im Anhang zu finden.

## B Versuchsdurchführung

### B.1 Statische Messungen

#### B.1.1 Sperrschichtkapazität

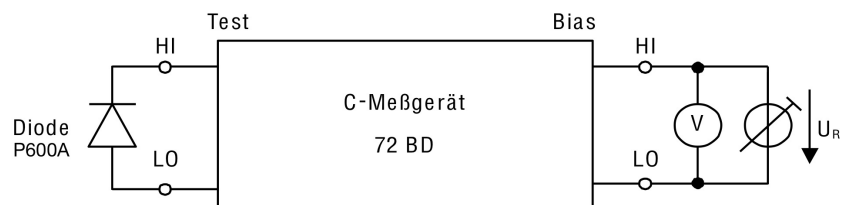


Abbildung 1: Versuchsaufbau für Messung der Sperrschichtkapazität

U/V	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1	1,5	2	3,5
C/pF	122,6	110,1	102,4	96,5	87,8	81,6	74,8	67,2	62	52,5

Tabelle 1: Sperrschichtkapazitäten zwischen 0 bis 3,5 V

U/V	5	8	10	15	20	25	30
C/pF	47	40,5	37,7	33,1	30,1	28	26,4

Tabelle 2: Sperrschichtkapazitäten zwischen 3,5 bis 30 V

B1.1 Lineare Darstellung

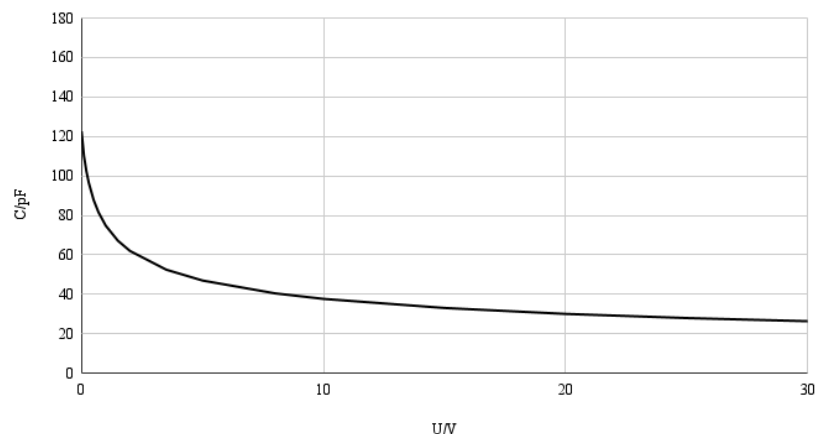


Abbildung 2: P600A Sperrschichtkapazität über Spannung.

### B.1.2 Sperrstrom

Um den Vorwiderstand zu Dimensionieren wurde eine maximale Spannung von 30 V gewählt sowie ein maximaler Strom von 10 mA.

$$U = R \cdot I \quad \Leftrightarrow \quad I = \frac{U}{R}$$

$$R_{Vor} = \frac{30 \text{ V}}{10 \text{ mA}} = 3 \text{ k}\Omega$$

Da es keinen exakten 3 kΩ Widerstand gibt wurden 5,1 kΩ gewählt.

Die Messung muss Stromrichtig erfolgen, da durch die Sperrpolung der Diode sehr kleine Ströme zu erwarten sind. Für hohe Spannungen ist es nicht essenziell die Spannung auf den Millivolt genau einzustellen. Auch bei 0,5 V ist der erwartete Strom im Verhältnis zur Spannung sehr gering. Das Picoampermeter wird am niederohmigen Knoten geschaltet, um den sehr kleinen Sperrstrom möglichst genau messen zu können. Dabei ist zu beachten, dass der Spannungsabfall über das Messgerät vernachlässigbar klein bleibt, damit die Messung nicht verfälscht wird.

U/V	0,5	5	30
I/A	1,093μ	1,256μ	1,691μ

Tabelle 3: AA136 Sperrströme bei verschiedenen Spannungen.

U/V	0,5	5	30
I/A	0,35n	0,81n	2,86n

Tabelle 4: 1N4002 Sperrströme bei verschiedenen Spannungen.

Hinweis: Der Sperrstrom bei 0,5V ist beim Messen zwischen 0,25 nA und 0,4 nA geschwankt.

### B.1.3 Vorwärtsstrom 1N4002

$U_R/V$	0	0.5	1	2	3	4	5	7.5
$I/A$	15 n	30 n	80 n	150 n	300 n	800 n	1.5 $\mu$	3 $\mu$
$U_R/V$	10	12.5	15	20	25	30	2	
$I/\mu$	8 $\mu$	15 $\mu$	30 $\mu$	80 $\mu$	150 $\mu$	300 $\mu$	800 $\mu$	

Tabelle 5: Sperrschichtstrom  $I/A$  in Abhängigkeit von der Spannung  $U_R/V$ .

#### B.1.3. Logarithmische Darstellung

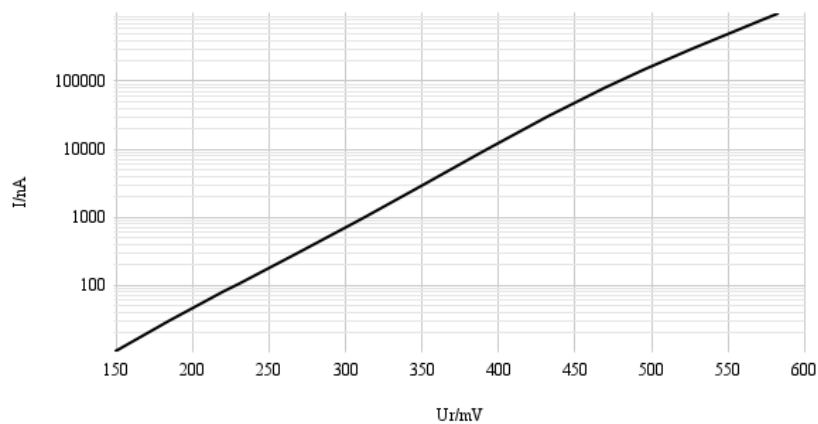


Abbildung 3: Logarithmische Darstellung des Durchlassstroms über Spannung der Diode 1N4002.

## B.2 Dynamische Aufnahme von Kennlinien

### B.2.1 Durchlaßkennlinien 1N4002 und AA136

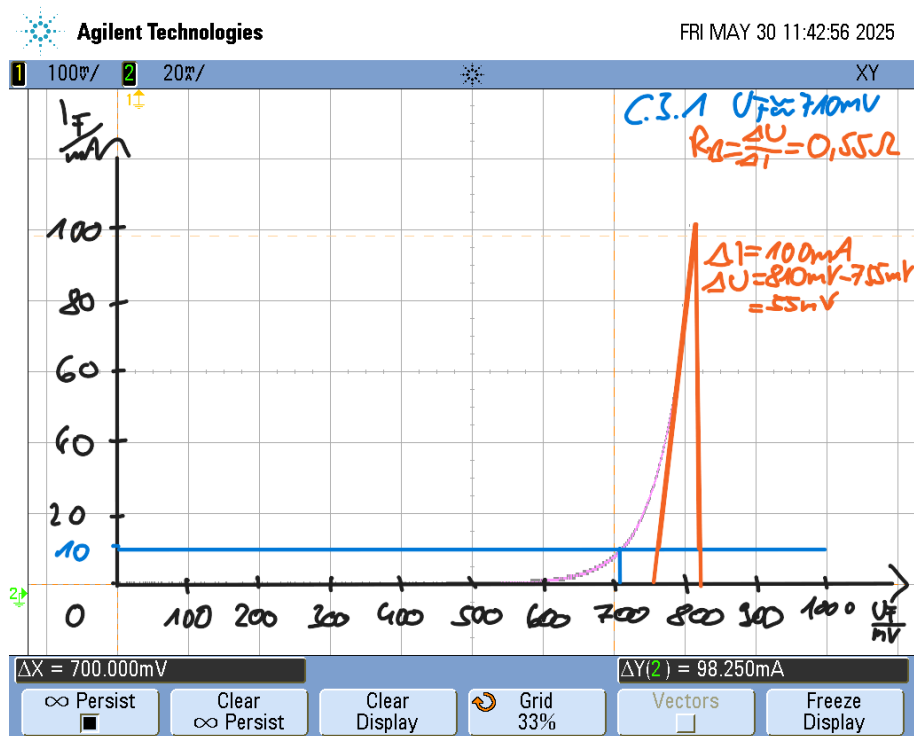


Abbildung 4: 1N4002 Durchlaßkennlinien.  $R_D \approx 0,55\Omega$

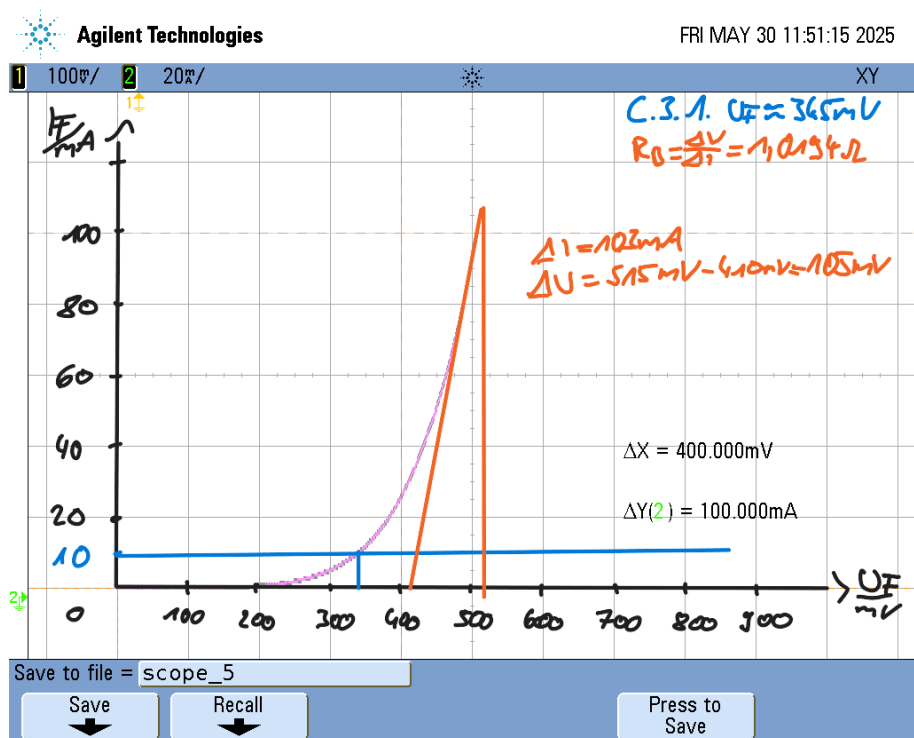


Abbildung 5: AA136 Durchlaßkennlinien

## B.2.2 Vergleich der Kennlinien

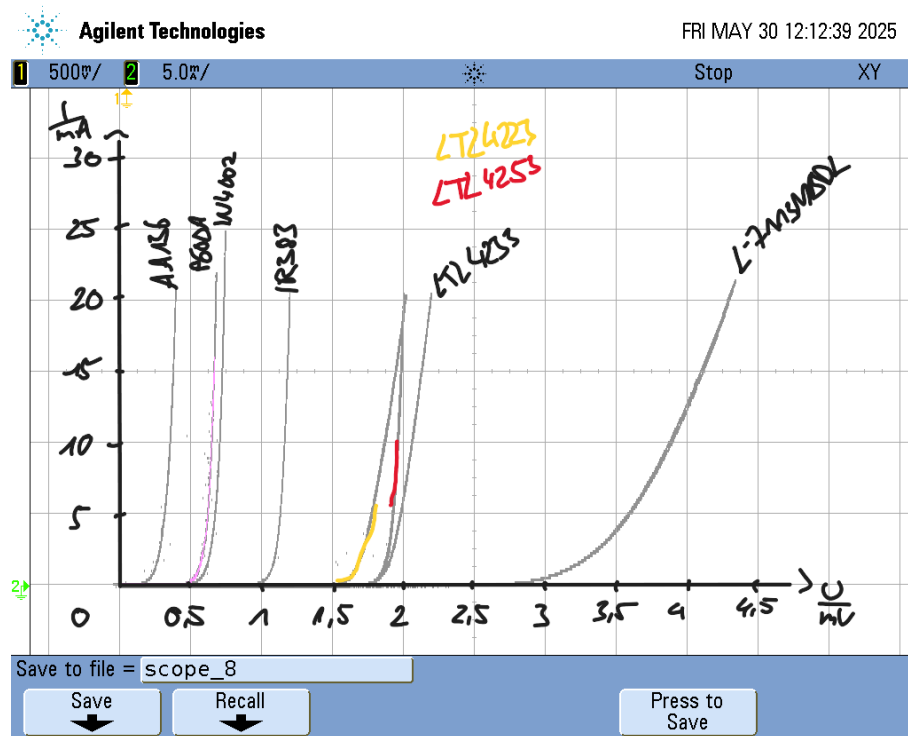


Abbildung 6: Verschiedene Diodenkennlinien.

## B.2.3 Z-Dioden

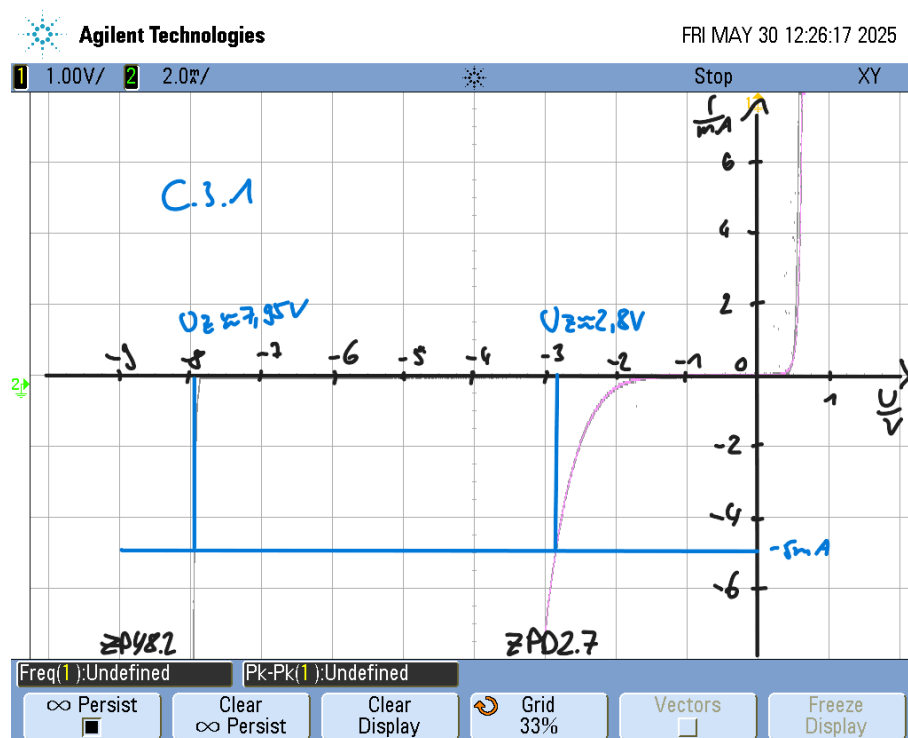


Abbildung 7: Gesamtkennlinie der Zener Dioden ZPD8.2 und ZPD2.7.

## B.3 Dynamisches Verhalten der Siliziumdiode (1N4002)

### B.3.1 Bestimmung von Speicher- und Abfallzeit

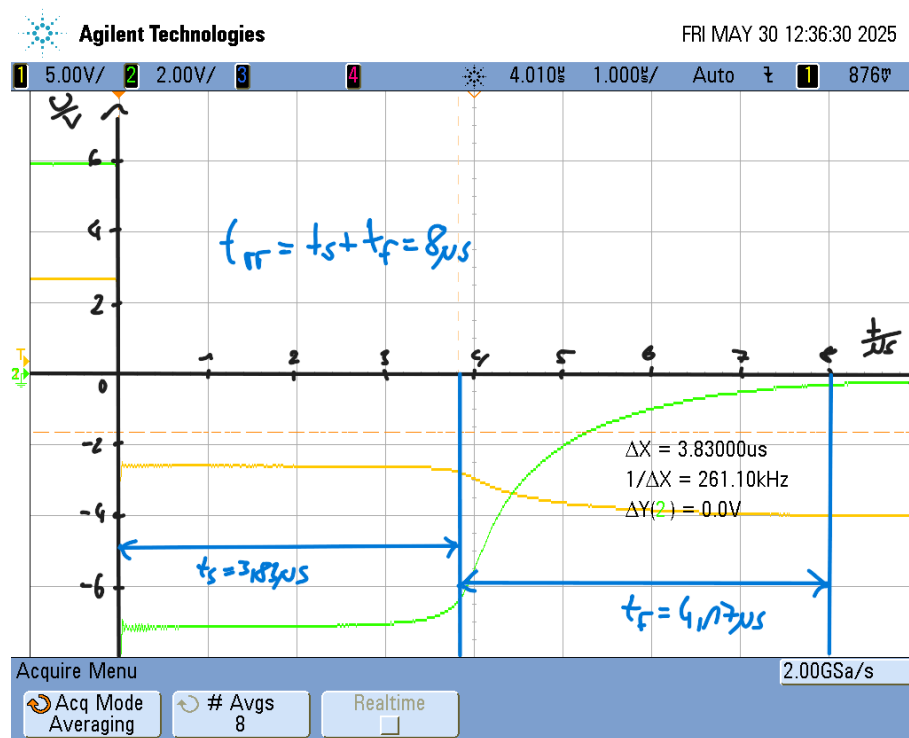


Abbildung 8: Grafische bestimmung von  $t_s$ ,  $t_f$  und  $t_{rr}$ .

### B.3.2 Bestimmung der Einschaltzeiten

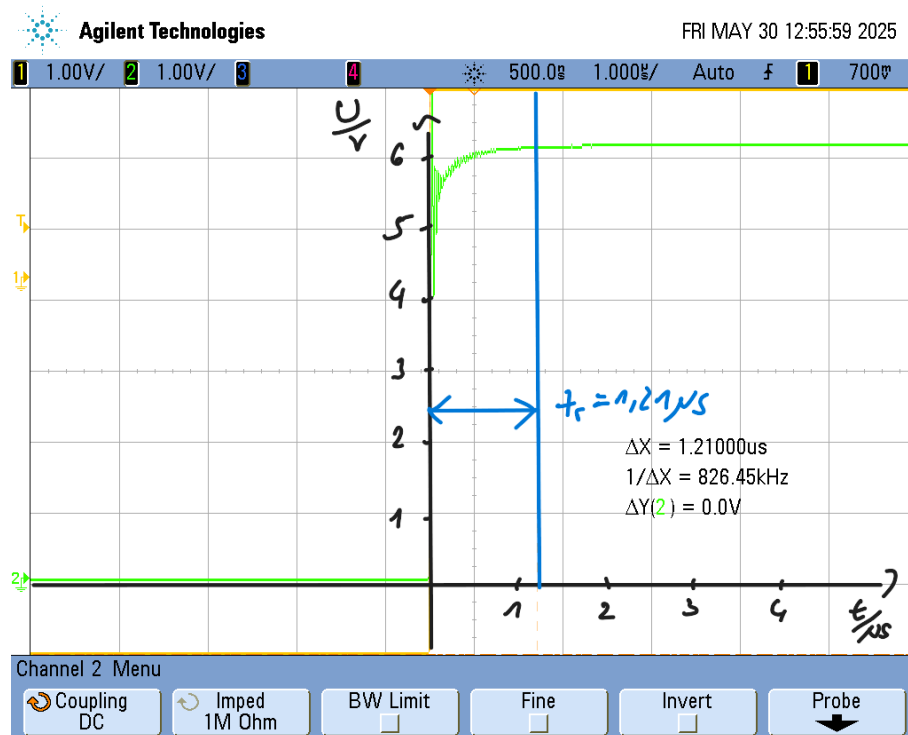


Abbildung 9: Grafische bestimmung von  $t_r$ .

Nun soll die gesuchte Injektionszeit  $t_i$  bestimmt werden. Erhöhen der Frequenz und beobachten der Speicherzeit ergab folgenden Wert für  $f_{\text{best}}$ :

$$f_{\text{best}} = 14,3 \text{ kHz}$$

$$t_r = 1,21 \mu s$$

$$\Rightarrow t_i = \left( \frac{1}{2f_{\text{best}}} \right) - t_r$$

$$t_i = 33,755 \mu s$$



### B.3.3 Einfluß der Schaltzeiten auf die maximale Betriebsfrequenz

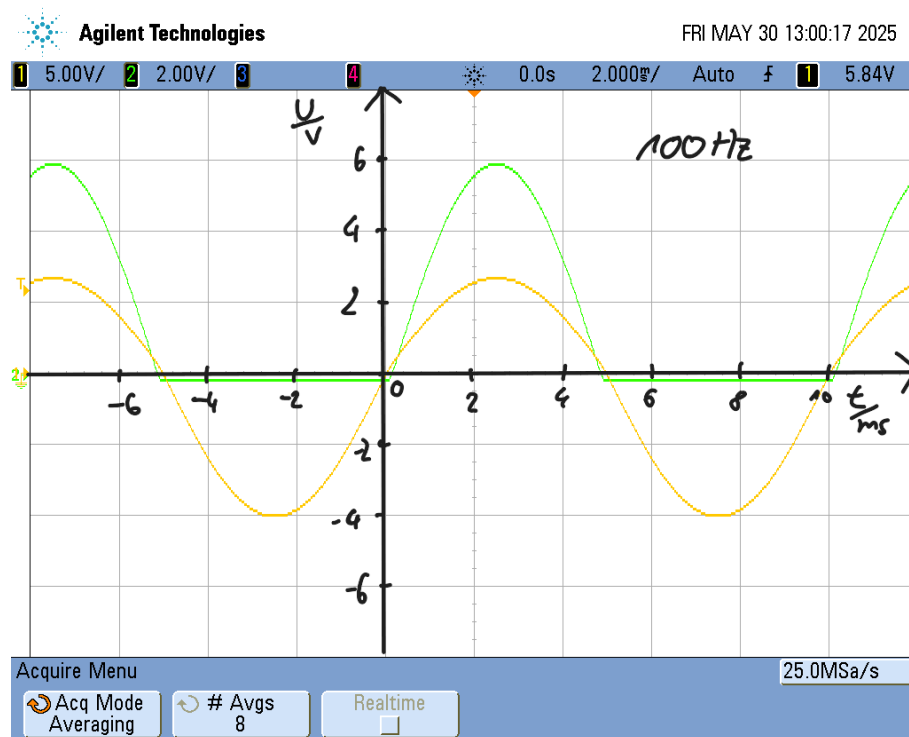


Abbildung 10: Gleichrichtverhalten bei 100 Hz.

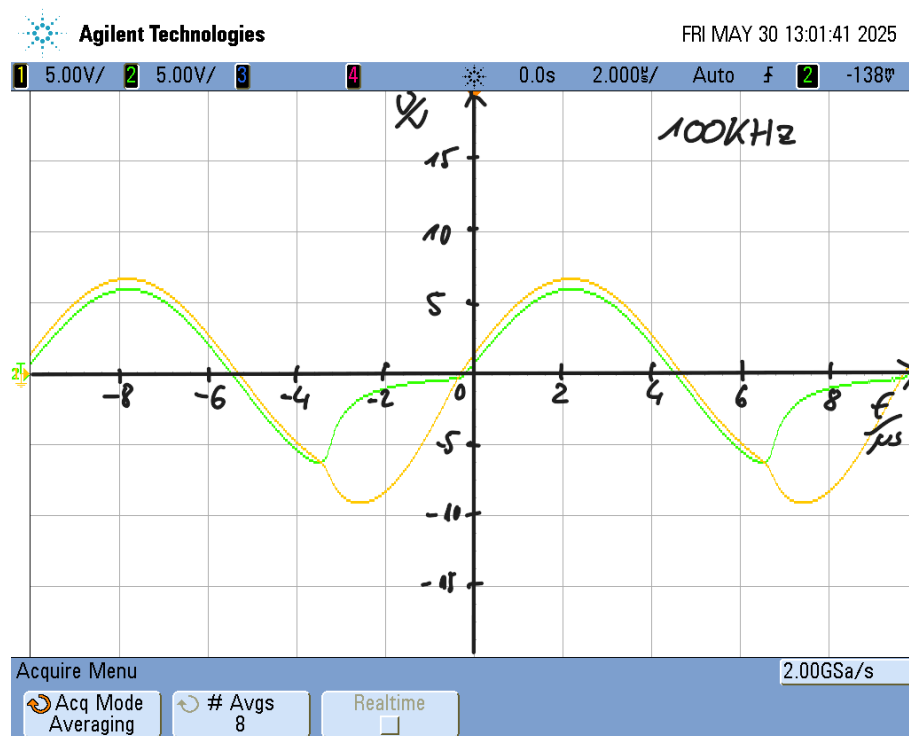


Abbildung 11: Gleichrichtverhalten bei 100 kHz.

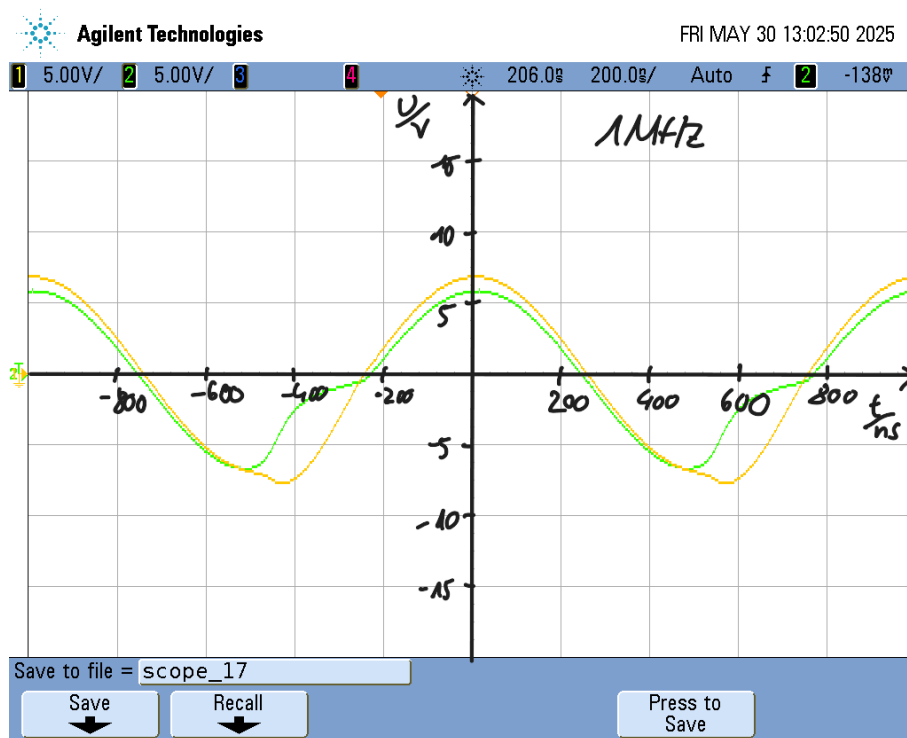


Abbildung 12: Gleichrichtverhalten bei 1 MHz.

#### B.3.4 Dynamische Bestimmung des Bahnwiderstands

$$\Delta I_D \approx \Delta U_{gen}/R \quad R_B \approx \frac{\Delta U_D}{\Delta U_{gen}/R}$$

## C Auswertung

### C.1 Sperrschichtkapazität, Diffusionsspannung und Dotierstoffdichte

$$C_S = \frac{C_{S0}}{(1 + \frac{U}{U_D})^M} \quad f(U) = \frac{1}{C_S^{\frac{1}{M}}}$$

Stufenfaktor von x ist ein indiz für einen linearen pn-Übergang.

$$C_{S0} = 0 \text{ pF} \quad \epsilon_{r, \text{Si}} = 11,7 \quad A_{RLZ} = 2,5 \text{ mm}^2$$

$$\begin{aligned} N_A &\gg N_D \rightarrow \text{abrupter pn-Übergang} \\ \rightarrow C_{S0} &= \sqrt{\frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot e N_D \cdot N_A}{2 \cdot (N_D + N_A) \cdot U_D}} \cdot A_{RLZ} \\ \leftrightarrow N_D &= \frac{C_s^2 \cdot 2 \cdot (U_D - U)}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A_{RLZ}^2} \end{aligned}$$

## C.2 Vergleich verschiedener Dioden

Für Vergleich in Übersichtsdarstellung siehe B.2.2 Grafik.

$$\left. \begin{aligned} W_g &= h \cdot f \\ \lambda &= \frac{c}{f} \end{aligned} \right\} \lambda = \frac{c \cdot h}{W_g} \cdot e \leftrightarrow W_g = \frac{c \cdot h}{\lambda \cdot e}$$

Daraus folgt  $\lambda = x$ .

$$\left. \begin{aligned} I|_{U>3U_T} &= I_S \cdot e^{U/U_T} \leftrightarrow U = U_T \cdot \ln\left(\frac{I}{I_S}\right) \\ I_{Slang} &= qAn_i^2 \left( \frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \\ n_i^2 &= \sqrt{N_C N_V} \cdot \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right) \end{aligned} \right\} I_S \propto n_i^2 \propto \exp\left(-\frac{W_g}{2kT}\right)$$

Desto kleiner  $I_S$  bzw. desto größer  $W_g$ , umso größer muss  $U$  sein, um einen Strom  $I$  zu halten.

Bandgaps aller Dioden aus Abbildung 4.

AA136 (Germanium)  $W_g = 0,67 \text{ eV}$

P600A, IN4002 (Silizium)  $W_g = 1,12 \text{ eV}$

IR383 ( $\lambda = 940 \text{ nm}$ )  $W_g = 1,32 \text{ eV}$

LTL-4253 ( $\lambda = 585 \text{ nm}$ )  $W_g = 2,12 \text{ eV}$

LTL-4223 ( $\lambda = 635 \text{ nm}$ )  $W_g = 1,95 \text{ eV}$

LTL-4233 ( $\lambda = 565 \text{ nm}$ )  $W_g = 2,19 \text{ eV}$

L-7113MBDL ( $\lambda = 430 \text{ nm}$ )  $W_g = 2,88 \text{ eV}$

## C.3 Schaltdioden

### C.3.1 Kennlinienparameter

Für graphische Darstellung für  $U_F$  und  $R_B$  siehe B.2.1.

$U_{Z5 \text{ mA}}$  wird bei B.2.3 grafisch Bestimmt.

	$U_{F,Datenblatt}$	$U_{F,Gemessen}$	$R_{B,Datenblatt}$	$R_{B,Gemessen}$
1N4002	<1,1V	710mV	N.A	0,55Ω
AA136	0,55V	345mV	N.A	1,0194Ω

Da im Datenblatt nur sehr schwammige Aussagen über die Forward-Spannung getroffen werden und keine Aussage über den Bahnwiderstand ist es schwierig die werte zu vergleichen.

### C.3.2 Bahnwiderstand

$R_{B1N4002B3.4} = 0 \text{ m}\Omega$   $R_{B1N4002B3.1} = 0 \text{ m}\Omega \rightarrow$  Ergebnisse liegen im Rahmen der Messgenauigkeit.

### C.3.3 Ideale Kennlinie

Für zeichnerisch dargestellte Idealkennlinie siehe B.2.1.

### C.3.4 Sperrsättigungsstrom und Emissionskoeffizient 1N4002

$$m = \frac{\Delta U_F}{25,8 \text{ meV} \cdot \ln(I_{F2}/I_{F1})} \rightarrow m = 99,99$$

Verlauf Durchlaßkennlinien siehe B2.1.

Zudem sind Temperaturabhängigkeiten sowie Messgenauigkeiten und Verunreinigungen mögliche Ursachen.

$I_{SGrafisch} = 00,0 < I_{SB1.2}$ . Diese Abweichung lässt sich auf thermischer Generation zurückzuführen. Für größere  $U_R$  weitet sich die RLZ aus, wodurch thermische Generation einen größeren Einfluss hat.

$$I_F = I_S(e^{U/25,8 \text{ meV}} - 1)$$

In der gemessenen Kennlinie werden reale Parameter wie Leitungswiderstand, nichtideales Verhalten des Halbleiters sowie Temperaturabhängigkeiten abgebildet. Der Emissionskoeffizient passt dabei die Idealkennlinie etwas an die gemessene an. Trotzdem besteht noch eine nähere Übereinstimmung mit der idealen Kennlinie.

### C.3.5 Schaltverhalten

Symbol	Wert
Anstiegszeit $t_r$	_____
Einschaltzeit $t_{in}$	_____
Speicherzeit $t_s$	_____
Abfallzeit $t_f$	_____
Rückholzeit $t_{rr}$	_____

Zu erwarten wäre eine Funktion ähnlich  $y = \hat{u} \sin(x)$  für  $y < 0 \rightarrow 0$ .

Bei hohen Frequenzen können Dioden den Strom nicht mehr ideal gleichrichten, da ihre Schaltzeiten begrenzt sind. Besonders durch die Speicherzeit fließt nach dem Umschalten kurzzeitig ein Rückstrom. Auch die Rückholzeit führt zu negativen Stromimpulsen beim Sperren. Dadurch entstehen bei höheren Frequenzen Verzerrungen im Stromverlauf, da die Diode nicht mehr rechtzeitig schalten kann.

## D Sample Calculation

Mass of magnesium metal = 8,59 g - 7,28 g  
 = 1,31 g  
 Mass of magnesium oxide = 9,46 g - 7,28 g  
 = 2,18 g  
 Mass of oxygen = 2,18 g - 1,31 g  
 = 0,87 g

Because of this reaction, the required ratio is the atomic weight of magnesium: 16,00 g of oxygen as experimental mass of Mg: experimental mass of oxygen or  $\frac{x}{1.31} = \frac{16}{0.87}$  from which,  $M_{Mg} = 16.00 \times \frac{1.31}{0.87} = 24.1 = 24 \text{ g/mol}$  (to two significant figures).

- a. The *atomic weight of an element* is the relative weight of one of its atoms compared to C-12 with a weight of 12.0000000... , hydrogen with a weight of 1.008, to oxygen with a weight of 16.00. Atomic weight is also the average weight of all the atoms of that element as they occur in nature.
- b. The *units of atomic weight* are two-fold, with an identical numerical value. They are g/mole of atoms (or just g/mol) or amu/atom.
- c. *Percentage discrepancy* between an accepted (literature) value and an experimental value is:

$$\frac{\text{experimental result} - \text{accepted result}}{\text{accepted result}}$$

## E Formelzeichen

Symbol	Bedeutung
$C_s$	Sperrschichtkapazität
$I_c$	Fluß- oder Vorwärtstrom
$I_a$	Sperrstrom- oder Rückwärtstrom
$I_s$	Sperrsättigungsstrom
$M$	Stufenfaktor (grading coefficient)
$m$	Emissionskoeffizient
$N_a$	Akzeptordichte
$N_0$	Donatordichte
$R_a$	Bahnwiderstand
$t_0$	Injektionszeit
$t_1$	Anstiegszeit (Risetime)
$t_1$	Sperrverzögerungszeit (Reverse Recovery Time)
$t_s$	Speicherzeit
$U_0$	Diffusionsspannung
$U_c$	Fluß- oder Vorwärtsspannung
$U_s$	Sperr- oder Rückwärtsspannung
$U_{s\_5mk}$	Durchbruchspannung an der Z-Diode bei $I_2 = 5\text{mA}$

width=!,height=!,pages=-