

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

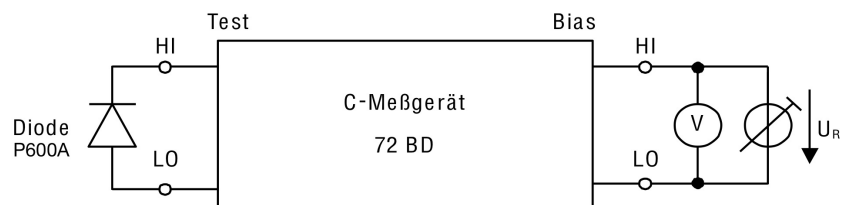


Abbildung 1: Versuchsaufbau für Messung der Sperrschichtkapazität

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

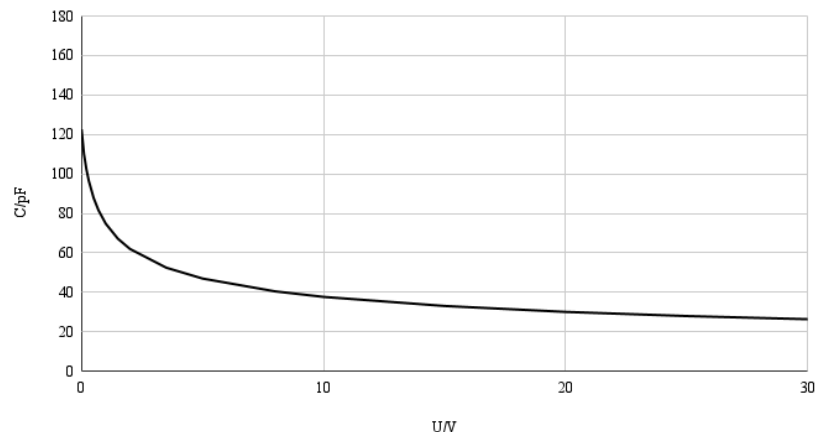


Abbildung 2: P600A Sperrschichtkapazität über Spannung.

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 μ	3 μ
U_R/V	10	12.5	15	20	25	30	2	
I/μ	8 μ	15 μ	30 μ	80 μ	150 μ	300 μ	800 μ	

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

B.1.3. Logarithmische Darstellung

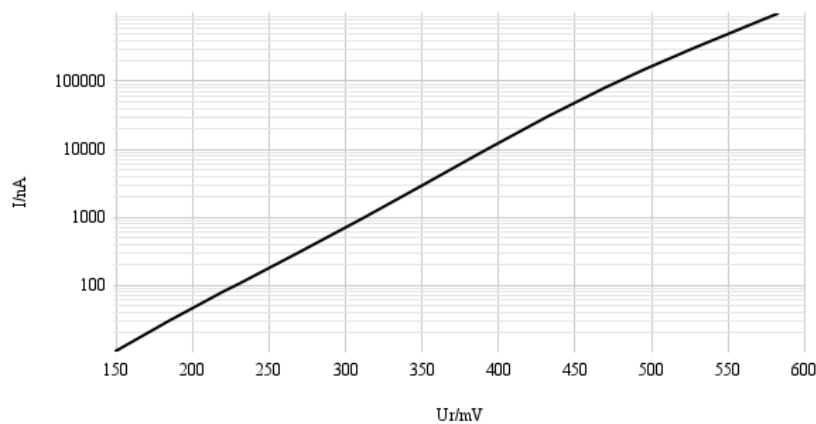


Abbildung 3: Logarithmische Darstellung des Durchlassstroms über Spannung der Diode 1N4002.

B.2 Dynamische Aufnahme von Kennlinien

B.2.1 Durchlaßkennlinien 1N4002 und AA136

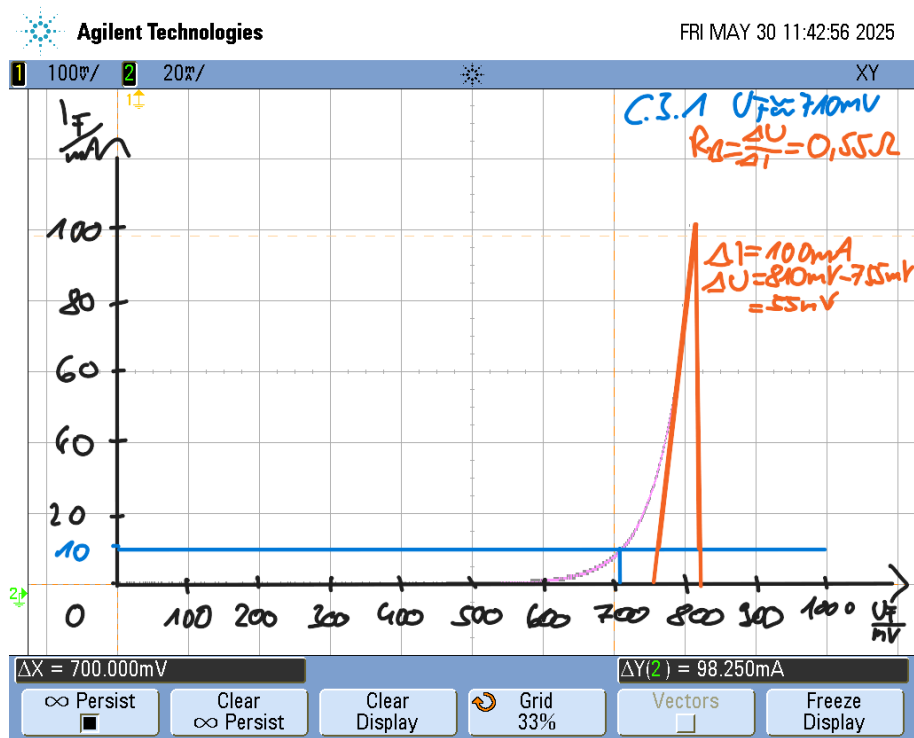


Abbildung 4: 1N4002 Durchlaßkennlinien. $R_D \approx 0,55\Omega$

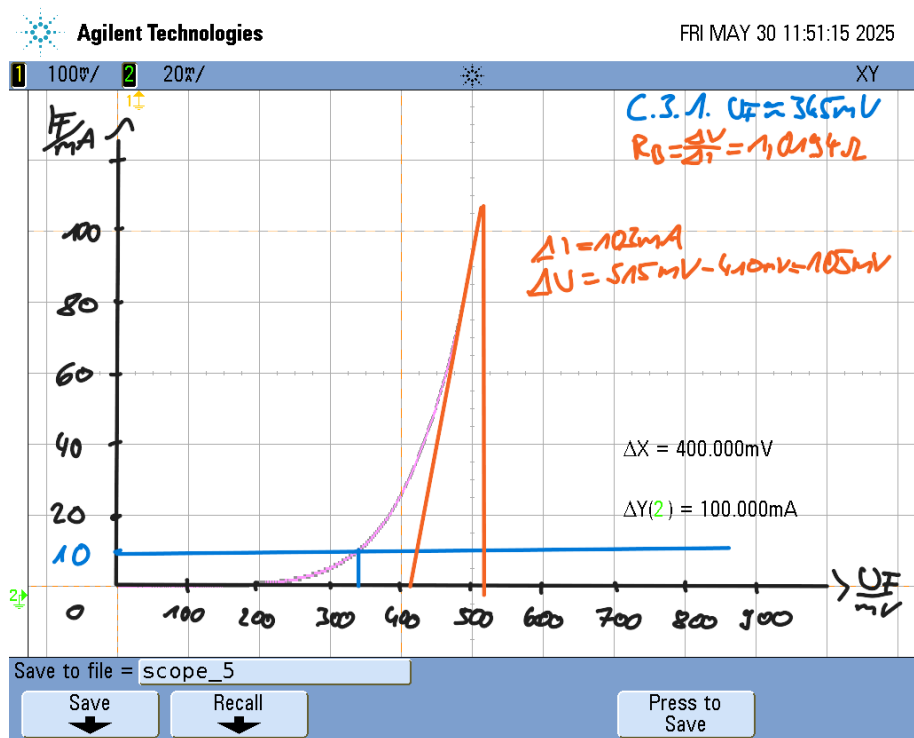


Abbildung 5: AA136 Durchlaßkennlinien

B.2.2 Vergleich der Kennlinien

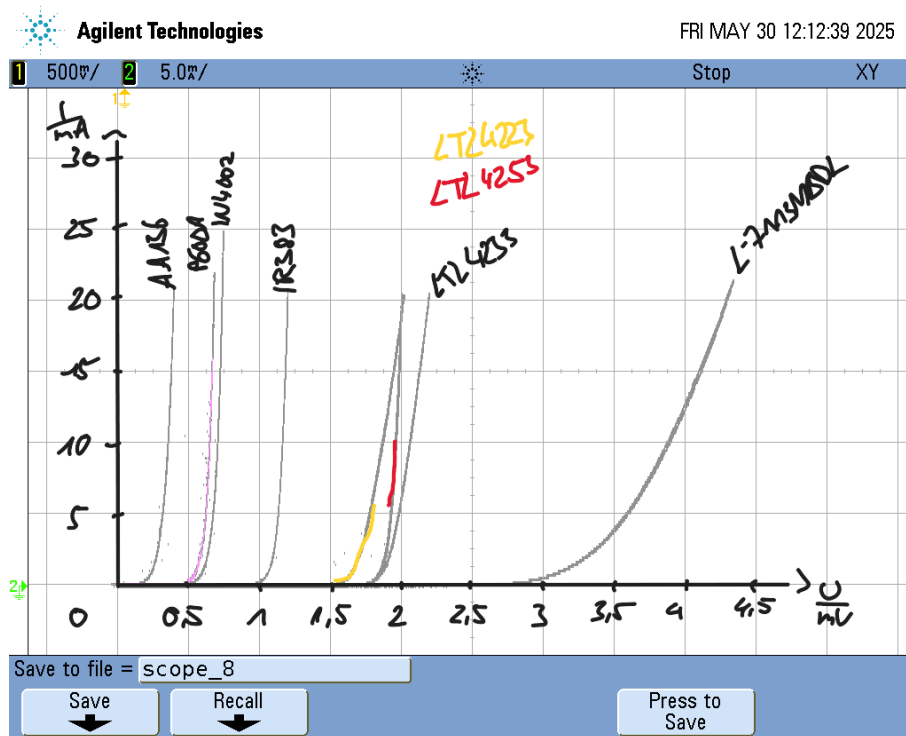


Abbildung 6: Verschiedene Diodenkennlinien.

B.2.3 Z-Dioden

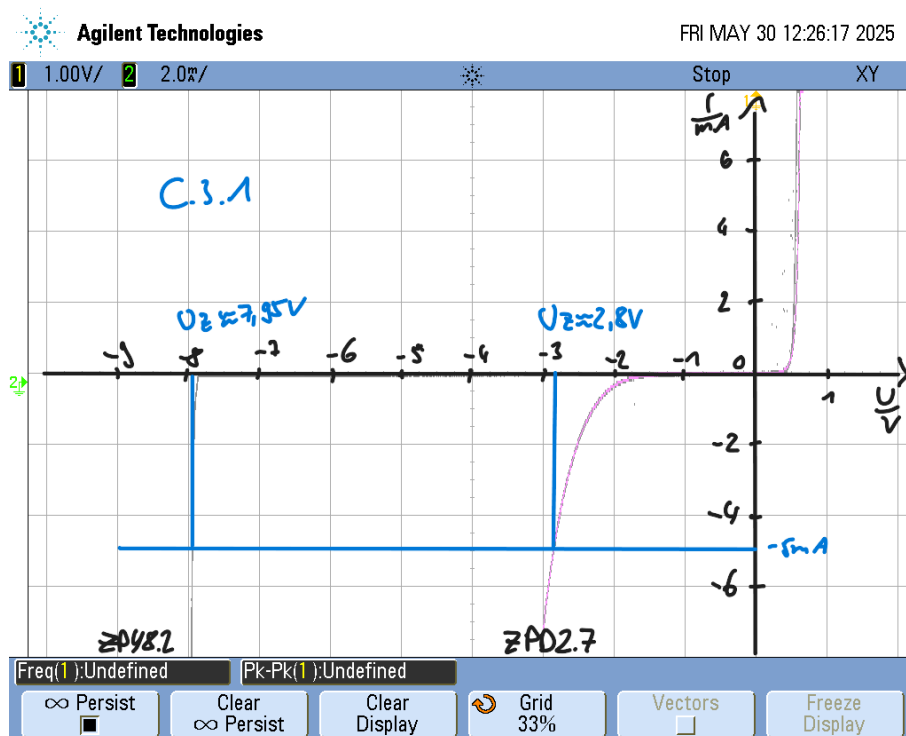


Abbildung 7: Gesamtkennlinie der Zener Dioden ZPD8.2 und ZPD2.7.

B.3 Dynamisches Verhalten der Siliziumdiode (1N4002)

B.3.1 Bestimmung von Speicher- und Abfallzeit

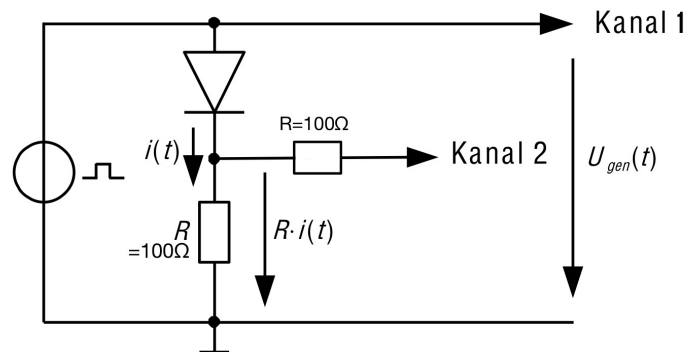


Abbildung 8: Versuchsaufbau zur bestimmung der Speicher- und Abfallzeit.

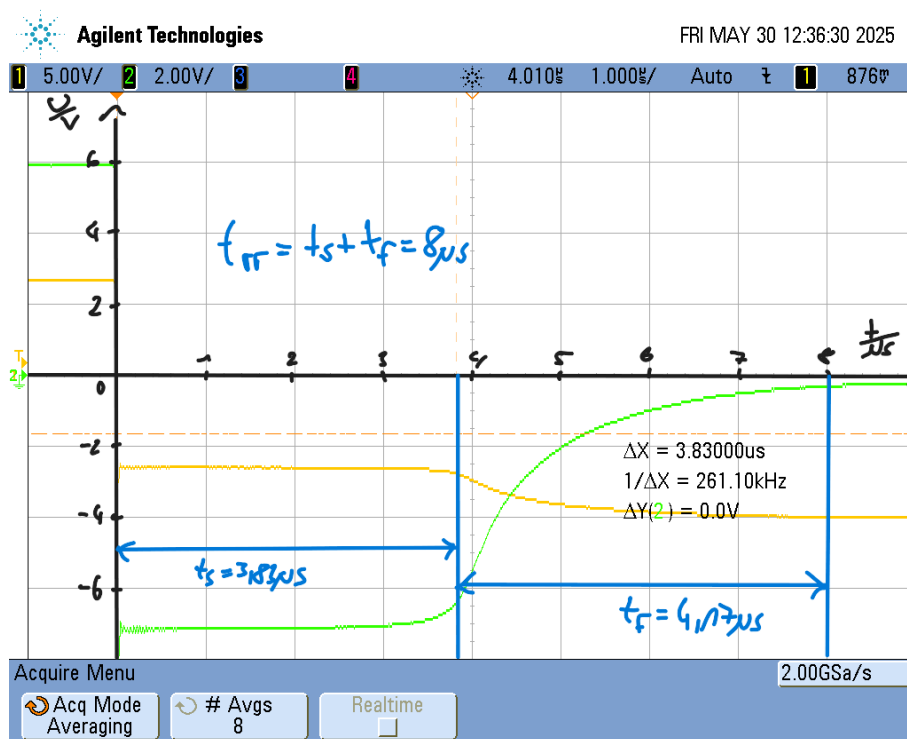


Abbildung 9: Grafische bestimmung von t_s , t_f und t_{rr} .

B.3.2 Bestimmung der Einschaltzeiten

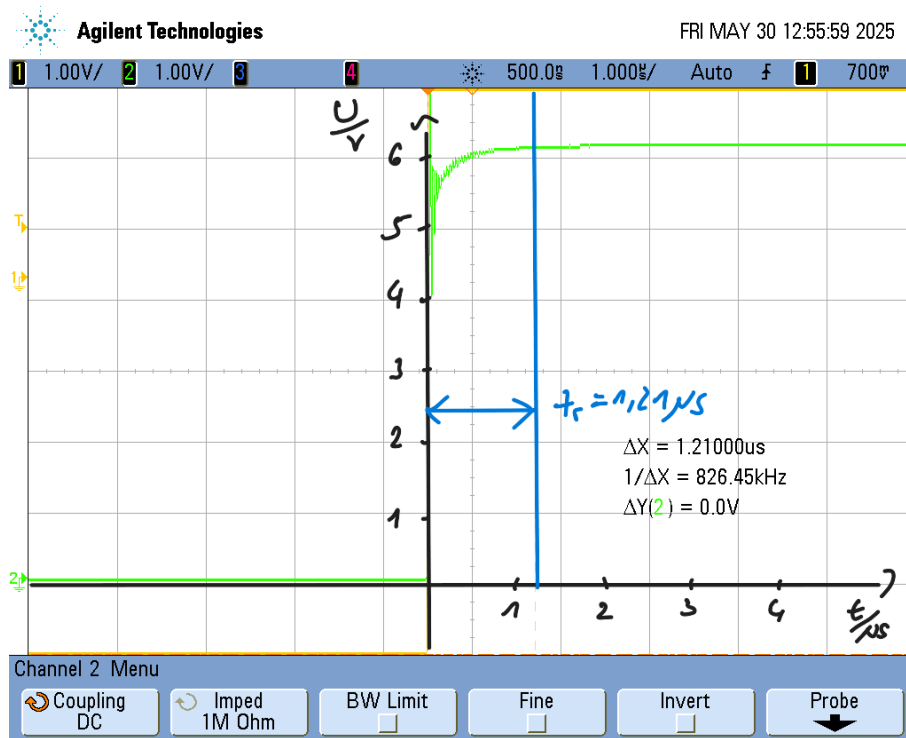


Abbildung 10: Grafische bestimmung von t_r .

Nun soll die gesuchte Injektionszeit t_i bestimmt werden. Erhöhen der Frequenz und beobachten der Speicherzeit ergab folgenden Wert für f_{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

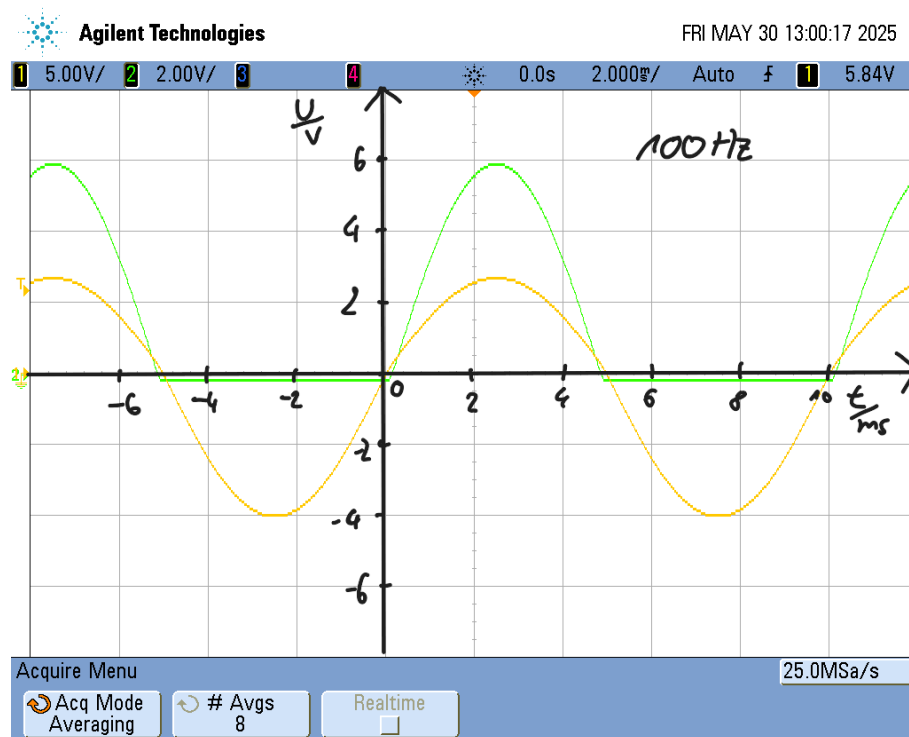


Abbildung 11: Gleichrichtverhalten bei 100 Hz.

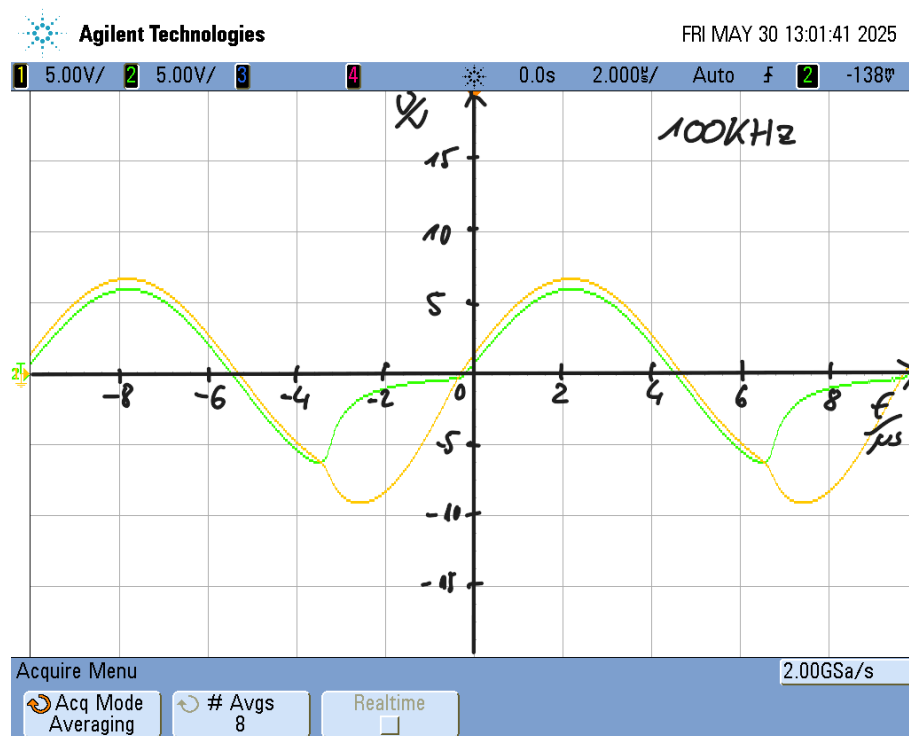


Abbildung 12: Gleichrichtverhalten bei 100 kHz.

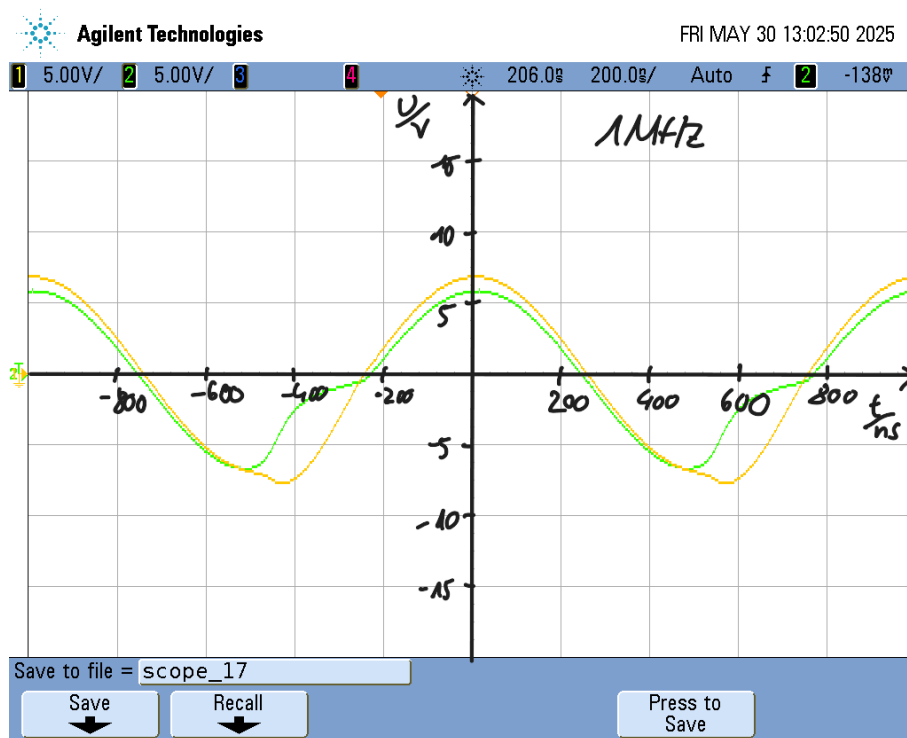


Abbildung 13: Gleichrichtverhalten bei 1 MHz.

B.3.4 Dynamische Bestimmung des Bahnwiderstands

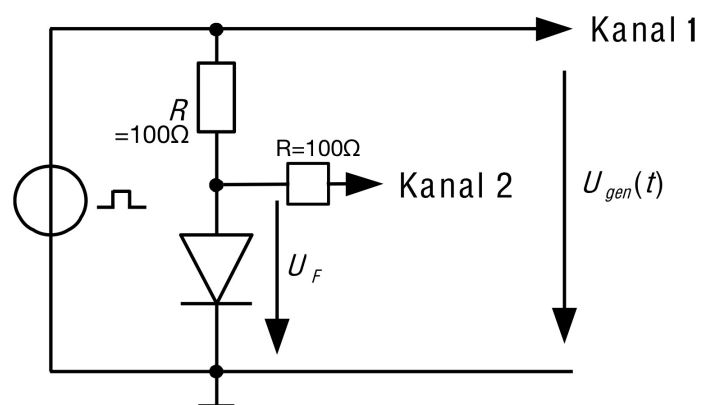


Abbildung 14: Versuchsaufbau zur Bestimmung des Bahnwiderstands.

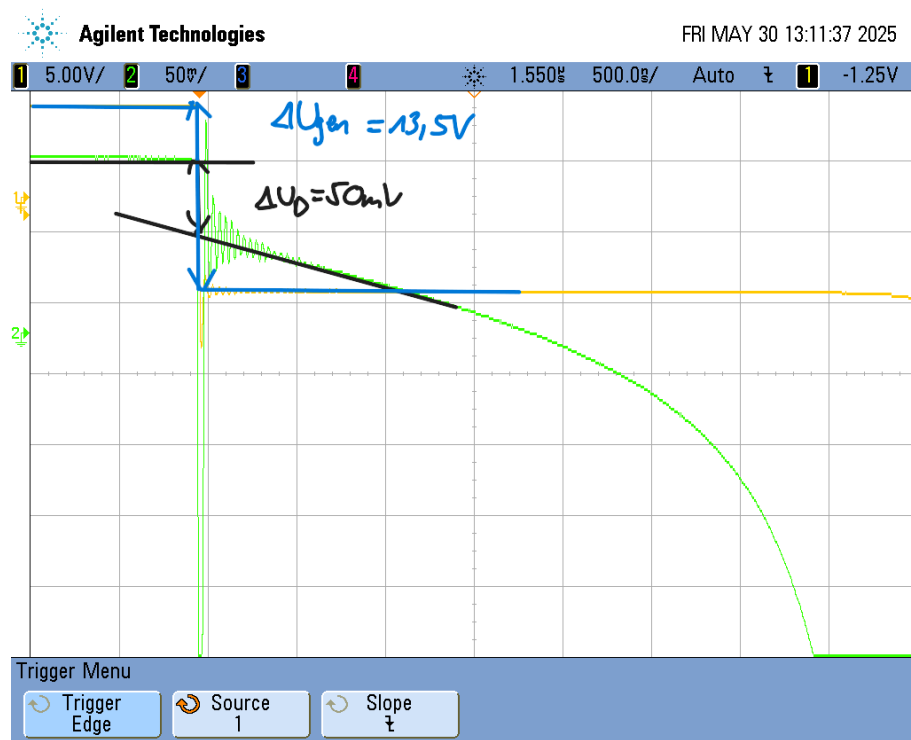


Abbildung 15: Bestimmung des Spannungssprungs U_D .

Anhand der gemessenen Werte kann nun R_B bestimmt werden:

$$\Delta U_{\text{gen}} = 13,5 \text{ V}$$

$$\Delta U_D = 50 \text{ mV}$$

$$\Rightarrow R_B \approx \frac{\Delta U_D}{\Delta U_{\text{gen}}/R}$$

$$\Rightarrow R_B = \frac{50 \text{ mV}}{13,5 \text{ V}/100 \Omega} = 370 \text{ m}\Omega$$

C Auswertung

C.1 Sperrschichtkapazität, Diffusionsspannung und Dotierstoffdichte

B1.1 Lineare Darstellung

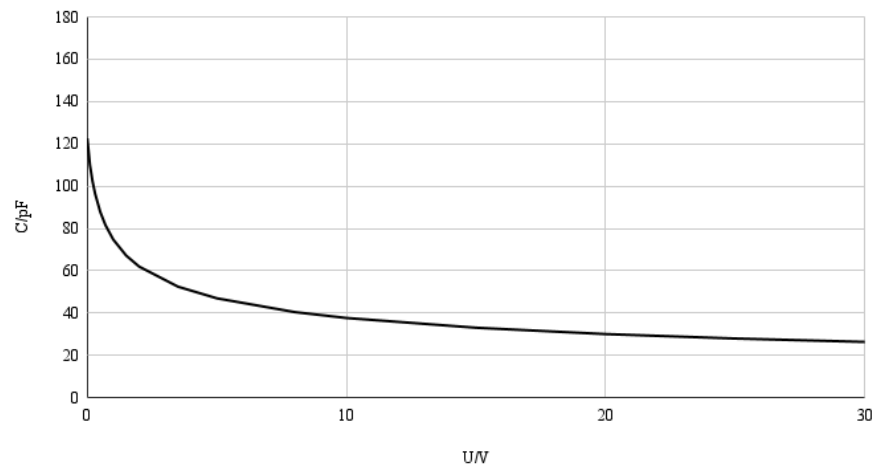


Abbildung 16: Sperrschichtkapazität über Spannung der P600A Diode.

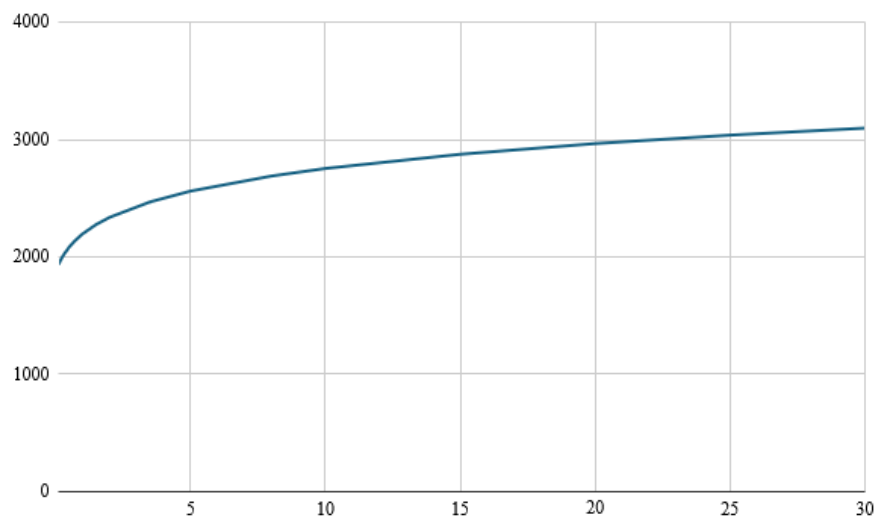


Abbildung 17: $(\frac{1}{C})^2$ bei Stufenfaktor $M = 0.33$.

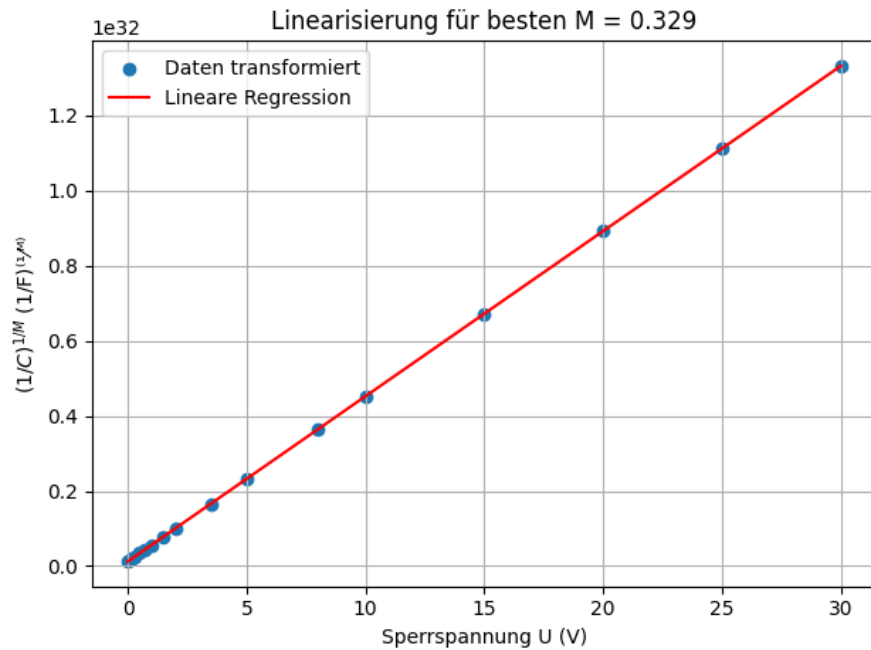


Abbildung 18: Nichtlineare Regression in Python.

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

Der Stufenfaktor wurde durch lineare Regression der Kapazitäts-Spannungs-Daten, abhängig von M linearisiert. Die beste linearisierung entspricht in etwa dem Stufenfaktor. Der Schnittpunkt der Ausgleichsgerade mit der Spannungsachse entspricht der Diffusionsspannung U_D (hier $\approx 0,275$ V). Stufenfaktor von $M \approx 3.33$ ist ein Indiz für einen abrupten pn-Übergang.

Das hierbei verwendete Python Skript findet sich im Anhang.

$$U_D = 0,275 \text{ V} \quad C_{S0} = 122,6 \text{ pF} \quad \epsilon_{r,\text{Si}} = 11,7 \quad A_{RLZ} = 2,5 \text{ mm}^2$$

$$N_A \gg N_D \rightarrow \text{abrupter pn-Übergang}$$

$$\rightarrow C_{s0} = \sqrt{\frac{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot e N_D \cdot N_A}{2 \cdot (N_D + N_A) \cdot U_D}} \cdot A_{RLZ}$$

$$\leftrightarrow N_D = \frac{C_s^2 \cdot 2 \cdot (U_D - U)}{\epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot A_{RLZ}^2}$$

$$N_D \approx 84,04 \cdot 10^{12} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

$$U_{db} \approx 10 \text{ V} (10^{17} \cdot N_D^{-1}) \rightarrow U_{db} > 1400 \text{ also plausibel}$$

C.2 Vergleich verschiedener Dioden

Für Vergleich in Übersichtsdarstellung siehe B.2.2 Grafik.

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

Daraus folgt $\lambda = x$.

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

Desto kleiner I_S bzw. desto größer W_g , umso größer muss U sein, um einen Strom I zu halten. Dies führt zu einer größeren bzw. kleineren Bandlücke:

Diode	Wellenlänge λ	Bandlücke W_g [eV]
AA136 (Germanium)	–	0,67
P600A (Silizium)	–	1,12
1N4002 (Silizium)	–	1,12
IR383 (IR-LED)	940 nm	1,32
LTL-4253 (Gelb-LED)	585 nm	2,12
LTL-4223 (Rot-LED)	635 nm	1,95
LTL-4233 (Grün-LED)	565 nm	2,19
L-7113MBDL (Blau-LED)	430 nm	2,88

Tabelle 6: Bandlücken der verschiedenen Dioden

C.3 Schaltdioden

C.3.1 Kennlinienparameter

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

U_{Z5mA} wird bei B.2.3 grafisch Bestimmt.

	$U_{F,Datenblatt}$	$U_{F,Gemessen}$	$R_{B,Datenblatt}$	$R_{B,Gemessen}$
1N4002	0,93 V	0,71 V	N.A	0,55 Ω
AA136	0,55 V	0,345 V	N.A	1,0194 Ω

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.

1N4001 thru 1N4007

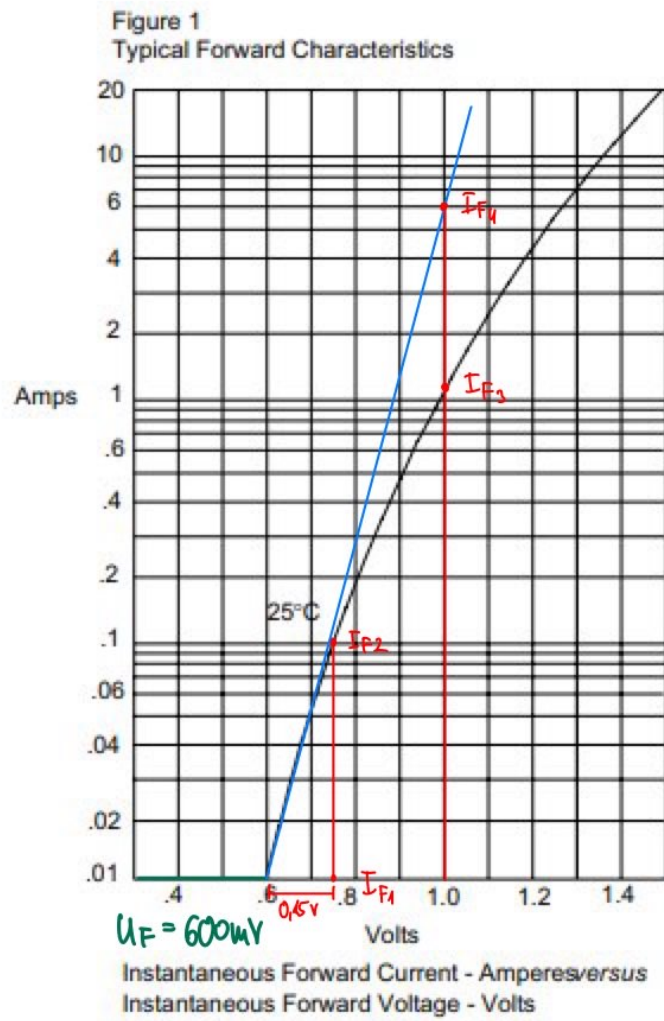


Abbildung 19: Grafische bestimmung von U_F und R_B .

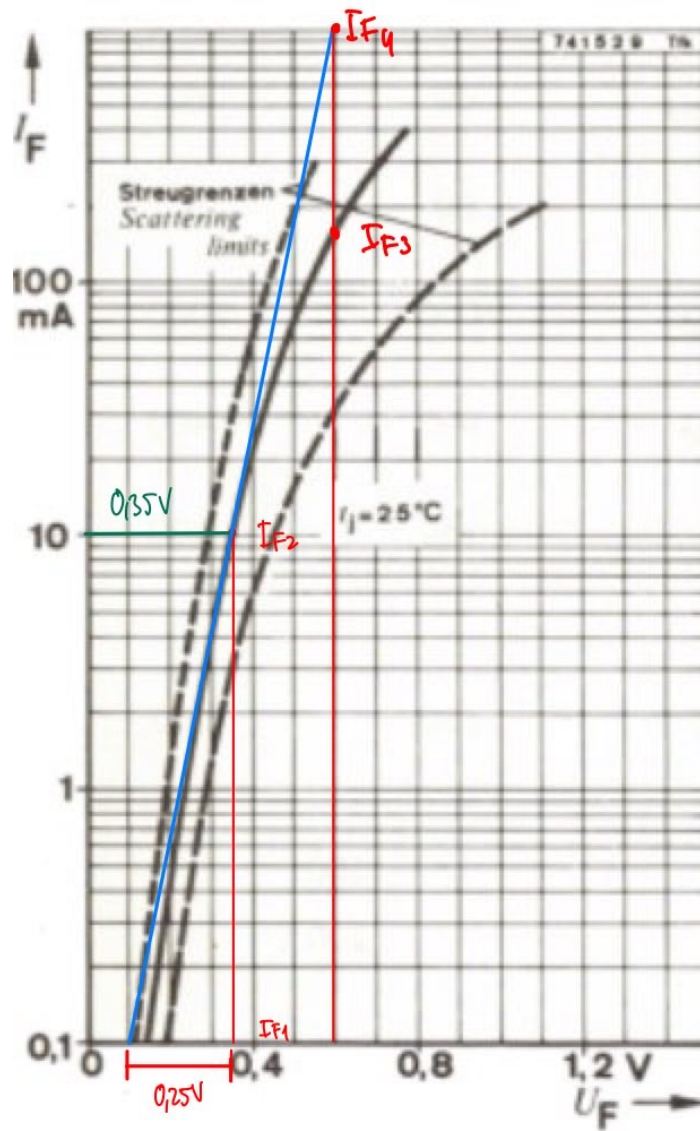


Abbildung 20: AA136 Grafische Bestimmung von U_F und R_B .

Die Berechnung der Bahnwiderstände ergibt:

a) 1N4002:

$$m = \frac{\Delta U_F}{U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{F2}}{I_{F1}}\right)} = 0,02525$$

$$R_B = \frac{m \cdot U_T}{I_{F1}} \cdot \ln\left(\frac{I_{F0}}{I_{F1}}\right) = 87,572 \text{ m}\Omega$$

b) AA136:

$$m = \frac{\Delta U_F}{U_T \cdot \ln\left(\frac{I_{F2}}{I_{F1}}\right)} = 4,2083$$

$$R_B = \frac{m \cdot U_T}{I_{F1}} \cdot \ln\left(\frac{I_{F0}}{I_{F1}}\right) = 1,172 \Omega$$

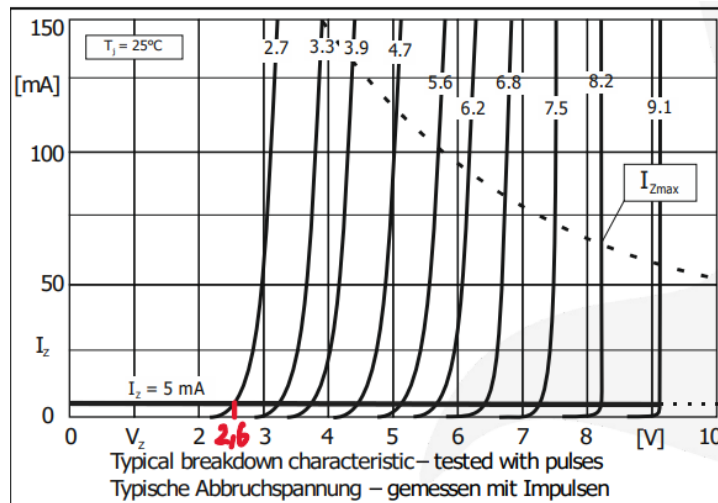


Abbildung 21: Grafische Bestimmung der Zenerspannung von ZPD2.7.

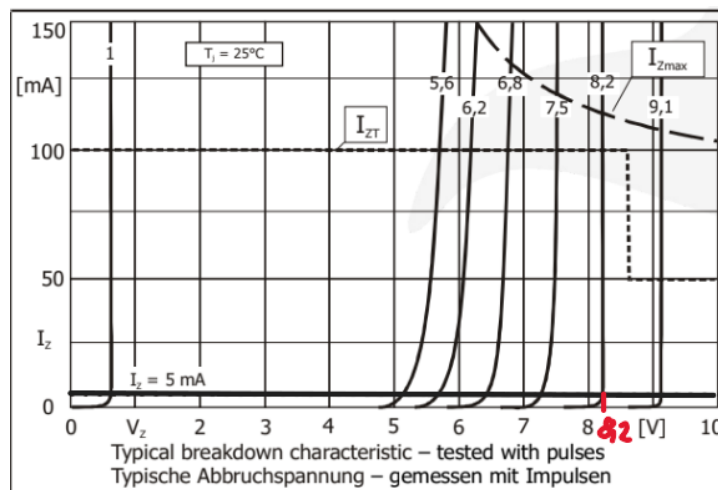


Abbildung 22: Grafische bestimmung der Zenerspannung von ZPD8.2.

	$U_{Z, \text{Datenblatt}}$	$U_{Z, \text{Gemessen}}$
ZPD2.7	2,6 V	2,8 V
ZPD8.2	8,2 V	7,95 V

Die gemessenen Werte stimmen im Rahmen der Messgenauigkeit mit den Werten aus dem Datenblatt überein.

C.3.2 Bahnwiderstand

$$R_{B1N4002B3.4} = 370 \text{ m}\Omega$$

$$R_{B1N4002C3.1} = 87,572 \text{ m}\Omega$$

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	1,21 μs
Einschaltzeit	33,755 μs
Speicherzeit	3,83 μs
Abfallzeit	4,17 μs
Rückerholzeit	8 μs

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 Rückerholzeit führt zu negativen Stromimpulsen beim Sperren. Dadurch entstehen bei höheren Frequenzen Verzerrungen im Stromverlauf, da die Diode nicht mehr rechtzeitig schalten kann.

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 $I_2 = 5\text{mA}$

Vorbereitung Aufgabe 1

Schaltodiode	1N4002	AA136 at 25°C, I_F 1000mA, U_R 50V	P600A at 25°C, I_F 6000mA
T_{jmin} in °C		-50	N.A.
T_{jmax} in °C		175	100
R_{thA} in K/W		45	N.A.
U_{FMAX} in V		< 1.1	0.55
U_{RMAX} in V		100	60
I_{FMAX} in mA		1000-800	500
I_{RTYP} in μ A		< 5	6
τ in ns		1500	N.A.
Preis		36,89 €	2.950 €

AA136 at 25°C, I_F 1000mA, U_R 50V
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/aa136.pdf>
23.05.2025, 10:57 Uhr

P600A at 25°C, I_F 6000mA
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/p600a.pdf>
16.05.2025, 13:03 Uhr

1N4002
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/1n4002.pdf>
Preis in € pro 1000 Stück
Datum Zugriff: 16.05.2025, 14:58 Uhr

Z-Dioden	ZPD2.7 at T_A 25°C, I_Z 5mA	ZPY8.2 at T_A 50°C, I_Z 100mA
T_{jmin} in °C	-50	-50
T_{jmax} in °C	175	175
R_{thAir} in K/W	< 300	45,00
U_{ZMIN} in V	2,5	7,7
U_{ZMAX} in V	2,9	8,7
I_{ZMAX} in mA	172	149
Preis	261,80 €	770,00 €

ZPY8.2 at T_A 50°C, I_Z 100mA

<https://www.mouser.de/ProductDetail/Diodes-Semiconductor/ZPY8.2?qs=OIC7AeGdDmziQPzR8Nq%3D%3D>
16.05.2025, 13:25 Uhr

ZPD2.7 at T_A 25°C, I_Z 5mA
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/zpd2.7.pdf>
Preis in € pro 1000 Stück
Datum Zugriff: 16.05.2025, 13:25 Uhr

Leucht Diode	LTL4223 at T_A 25°C, I_F 20mA
T_{jmin} in °C	-55
T_{jmax} in °C	100,00
U_{FTYP} in V	2,00
U_{RMAX} in V	5,00
I_{FMAX} in mA	120,00
Preis	420,00 €
λ_d in nm	623
$2\theta_{1/2}$ in deg	36
I_v in mcd	19

LTL4223 at T_A 25°C, I_F 20mA
<https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/l4223.pdf>
Preis in € pro 1000 Stück
Datum Zugriff: 16.05.2025, 13:32 Uhr

Schaltodiode 1N4002

Repetitive peak forward current – Periodischer Spitzenstrom	$f > 15$ Hz	$T_A = 75^\circ\text{C}$	I_{FSM}	5.4 A ³⁾
Peak forward surge current	Half sine-wave	50 Hz (10 ms)	I_{FSM}	27 A
Stoßstrom in Fluss-Richtung	Sinus-Halbwellen	60 Hz (8.3 ms)	I_{FSM}	30 A

LED	LTL-4223	LTL-4223	LTL-4223	LTL-4223	LTL-4223
Farben	rot	grün	gelb	blau	infrarot

Legende

T_{jmin} $\hat{=}$ Mindesttemperatur

T_{jmax} $\hat{=}$ Maximaltemperatur

R_{thA} $\hat{=}$ Wärmewiderstand, Sperrschichtumgebung

U_{FMAX} $\hat{=}$ Maximale Forward Spannung

U_{RMAX} $\hat{=}$ Maximale Reverse Spannung

I_{FMAX} $\hat{=}$ Maximale Forward Strom

I_{RTYP} $\hat{=}$ Sperrstrom

τ $\hat{=}$ Schaltzeit

U_{ZMIN} $\hat{=}$ Minimale Zener Voltage

U_{ZMAX} $\hat{=}$ Maximale Zener Voltage

λ_d $\hat{=}$ Wellenlänge

$2\theta_{1/2}$ $\hat{=}$ Viewing Angle

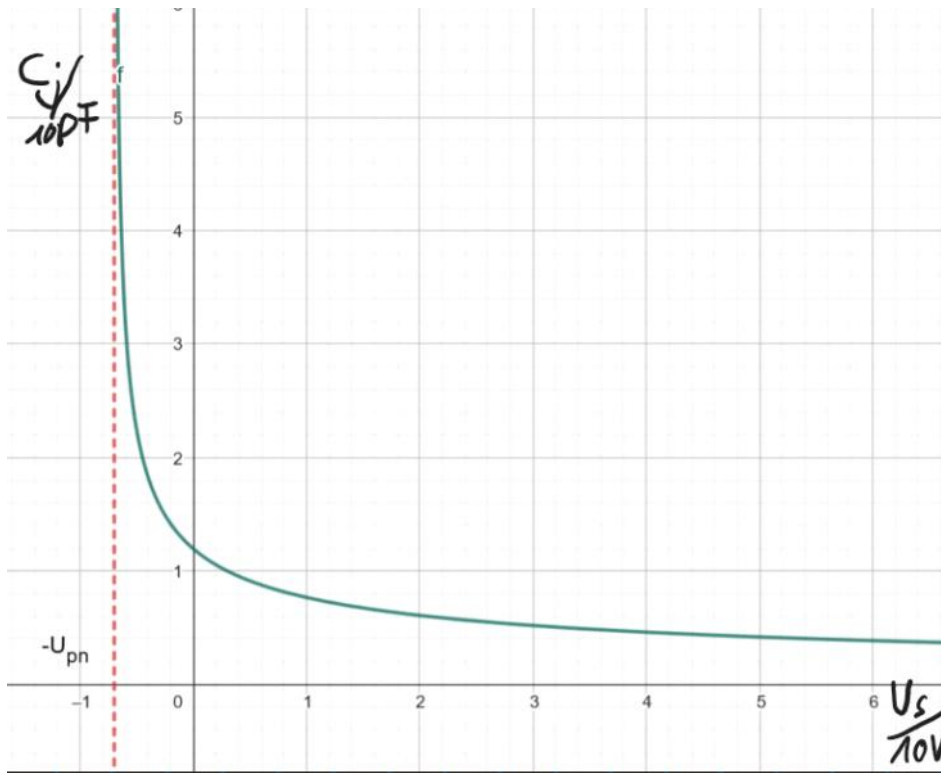
I_v $\hat{=}$ Luminous Intensity

Aufgabe 2.2

$C_j = 40\text{pF}$ $V_R = 4\text{V}$ Spitzenspannung SOV

$$C_s = \sqrt{\frac{\epsilon_0 \epsilon_r N_D e}{2 \cdot (N_D + N_A) \cdot U_D}} \cdot A_{\text{Rez}} \sim \frac{1}{\sqrt{U_s}}$$



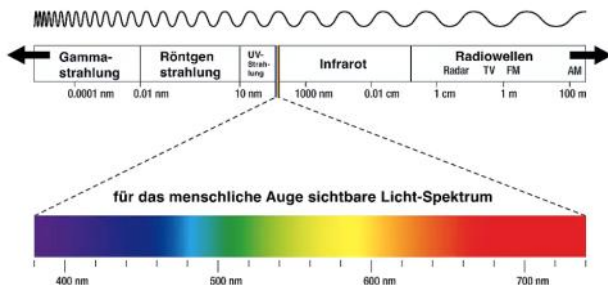


Aufgabe 2.3.

a) Dotierung und die Länge des RZ bestimmen die Spannungsgröße

$$U = \int \vec{E} d\vec{s} \quad (\text{je größer die Dotierung, desto kleiner RZ} \rightarrow \text{Spannung sinkt})$$

b)



1. AA136 ($\lambda_g = 0,67 \text{ eV}$) \hookrightarrow je kürzer die Wellenlänge λ ,
2. 1N4002, P600A ($\lambda_g = 1,12 \text{ eV}$) desto größer der Bandabstand
3. 1R383 (infrarot)
4. LTZ-4223 (rot)
5. LTZ-4253 (gelb)
6. LTZ-4233 (grün)
7. L-713/MBD2 (blau)

c) AA136 größeres I_s wegen kleinerer Bandlücke

$$I_s \sim n_i^2 = \sqrt{N_c N_v} e^{-\frac{W_g}{2kT}}$$

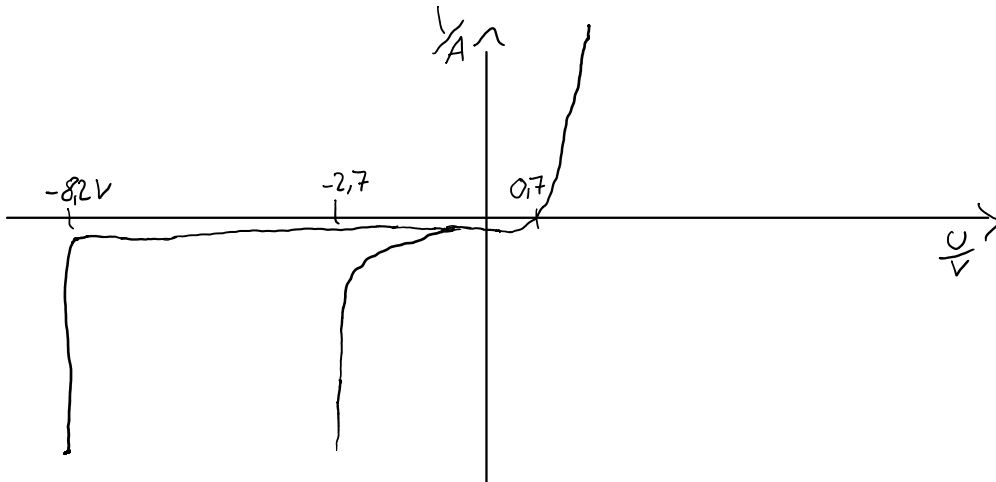
Aufgabe 2.4.

ZPD2.7. $U_{Zener} = 2,9 \text{ V} < 5 \text{ V} \rightarrow$ Zener-Effekt (Tunnel-Effekt), sanfter Durchbruch

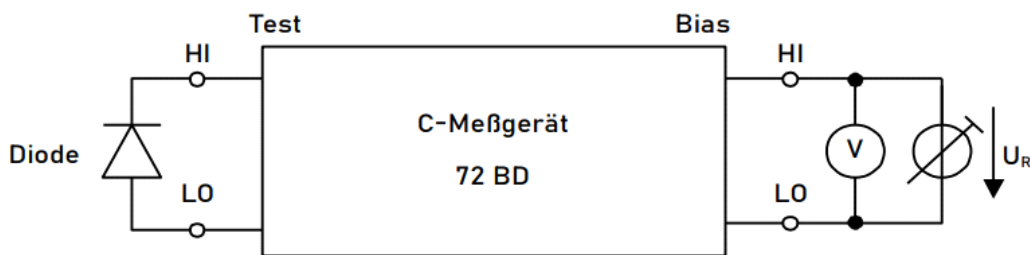
Aufgabe 2.4.

ZPD2.7. $U_{Zmax} = 2,9V < 5V \rightarrow$ Zener-Effekt (Tunnel-Effekt), sanfter Durchbruch

ZPY8.2. $U_{Zmax} = 7,7V > 5V \rightarrow$ Lawinendurchbruch, scharfer Durchbruch



Aufgabe B.1.1 Speerschichtkapazität P600A

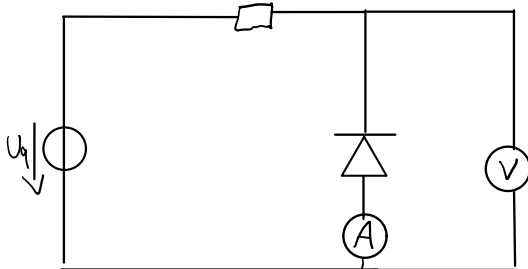


Aufgabe B.1.2

Sperrströme 1N4002, AA136 (Stromrichtigemessung)

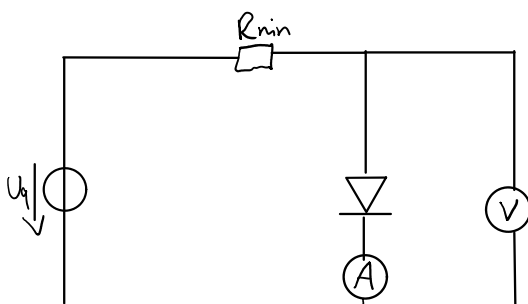
$$R_{min} = \frac{30V}{10\mu A} = 3k\Omega \rightarrow R_{min} \gg 3k\Omega$$

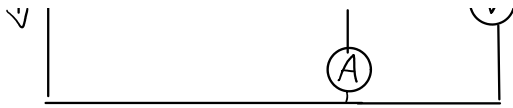
Mit Picoamperemeter R_{min}



Aufgabe B.1.3.

Diode umgepolt





Aufgabe B.2.

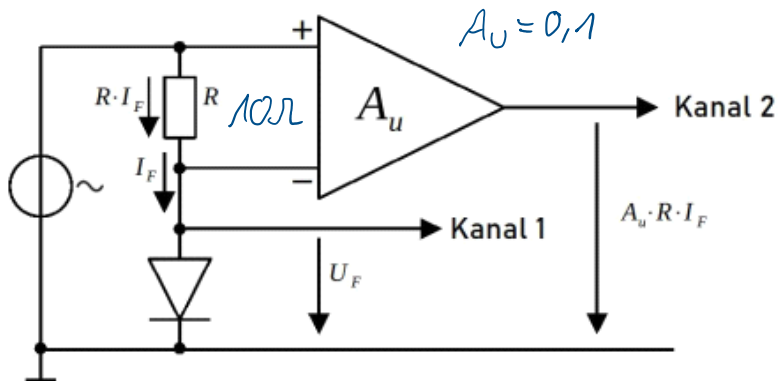


Abbildung 2: Dynamische Messung der Kennlinie

B.2.1 Durchlaßkennlinien 1N4002 und AA136

Stellen Sie die Durchlaßkennlinien der Dioden 1N4002 und AA136 im Bereich $I_D = 0..100\text{mA}$ auf je einem Bild dar.

- Verwenden Sie einen Meßwiderstand von $R = 10\Omega$ und $A_u = 0,1$.
- Wählen Sie am Generator eine sinusförmige Spannung mit einer Frequenz $f = 50\text{Hz}$ ohne negative Anteile.
- Wählen Sie die maximale Spannung so, daß der maximale Strom durch die Dioden 100mA beträgt.
- Wählen Sie die Position des Koordinatenursprungs und die Skalierung der Achsen so, daß der Bildschirm möglichst gut ausgenutzt wird. Achten Sie darauf, daß der Ursprung auf dem Schnittpunkt zweier Gitterlinien liegt, das erleichtert das Ablesen von Werten.

Aufgabe B.2.2 (Achtung, $I_{F\text{max}} = 25\text{mA}$, $U_{R\text{max}} = 3\text{V}$)

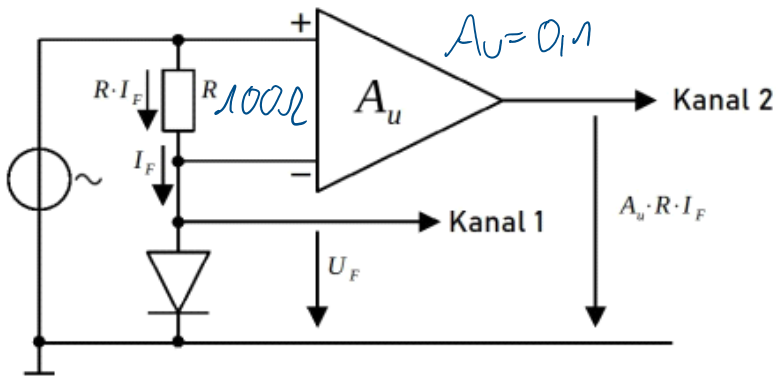


Abbildung 2: Dynamische Messung der Kennlinie

Aufgabe B.2.3

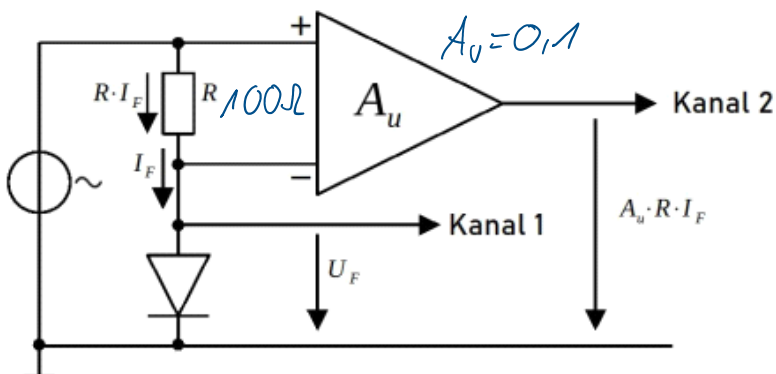


Abbildung 2: Dynamische Messung der Kennlinie

Stellen Sie nun mit der gleichen Meßschaltung die kompletten Kennlinien der Z-Dioden (Durchlaß- und Sperrkennlinie) auf einem einzigen Ausdruck dar.

- Verwenden Sie einen Meßwiderstand von $R = 100\Omega$ und am Differenzverstärker $A_u = 0,1$.
- Wählen Sie am Generator eine sinusförmige Spannung ohne Gleichanteil mit einer Frequenz $f = 50\text{Hz}$. Stellen Sie zunächst eine Amplitude von wenigen 100mV ein.
- Wählen Sie die Position des Koordinatenursprungs und die Skalierung der Achsen so, daß der Bildschirm möglichst gut ausgenutzt wird. Bedenken Sie dabei, daß der dritte Quadrant der Kennlinien mehr Platz benötigt, als der erste.
- Beginnen Sie mit der $8,2\text{V}$ Z-Diode und skalieren Sie die Kanäle so, daß deren Kennlinie gut dargestellt wird.
- Erhöhen Sie nun die Amplitude am Generator, bis im Durchbruch der Dioden ein Strom $I = 8\text{mA}$ fließt.

Aufgabe B.3.1

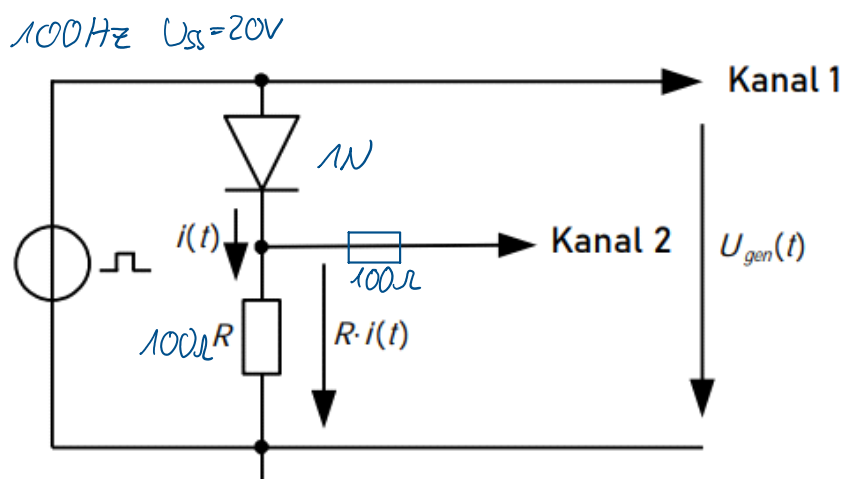


Abbildung 3: Bestimmung der Schaltzeiten

B.3.1 Bestimmung von Speicher- und Abfallzeit

Es sollen die Speicherzeit sowie die Abfallzeit der Diode bestimmt werden. In z.B. Kurve F der Abbildung 4 sind ab $t = 100\text{ns}$ die beiden Phasen des Abschaltens deutlich erkennbar.

- Wählen Sie als Triggerquelle am Oszilloskop Kanal 1 und triggern Sie das Signal auf die fallende Flanke.
- Stellen Sie die Zeitbasis so ein, daß der Ausschaltvorgang gut dargestellt wird.
- Nehmen Sie ein Bild auf, aus dem die Zeiten bestimmt werden können.

Aufgabe B.3.2 100Hz $U_{ss}=20\text{V}$, Schaltung aus Aufgabe B.1

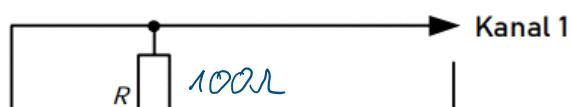
- Wählen Sie als Triggerquelle am Oszilloskop Kanal 1 und triggern Sie das Signal auf die steigende Flanke.
- Stellen Sie die Zeitbasis so ein, daß der Einschaltvorgang gut dargestellt wird.
Hinweis: Das Meßsignal kann durch Schwingungen aus Reflexionen überlagert sein. Um diese Störung etwas zu unterdrücken, sollte ein 100Ω Widerstand in die Leitung zu Kanal 2 eingefügt werden. Folgende Skalierungen führen zu einer günstigen Darstellung: Zeitbasis: $1\mu\text{s}/\text{Div}$, Kanal 2: $1\text{V}/\text{Div}$.
- Nehmen Sie ein Bild auf, aus dem Anstiegszeit t_r aus dem Stromverlauf bestimmt werden kann.

↳ danach mit symmetrischem Rechtecksignal bei 5kHz $U_{ss}=20\text{V}$

Aufgabe B.3.3

- Legen Sie bei unveränderter Meßschaltung eine sinusförmige Spannung mit einer Amplitude von 10V ($U_{pp} = 20\text{V}$) an.
- Nehmen Sie den Verlauf des Stroms für Frequenzen von 100Hz , 100kHz und 1MHz auf in ein Bild auf. Passen Sie dabei jeweils die Zeitbasis so an, daß die positiven Halbwellen trotz unterschiedlicher Frequenzen auf dem Bildschirm genau deckungsgleich dargestellt werden.

Aufgabe B.3.4



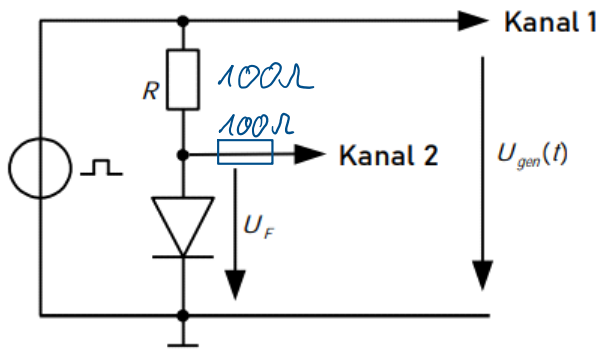


Abbildung 5: Dynamische Bestimmung des Bahnwiderstands

```

import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from sklearn.linear_model import LinearRegression
from sklearn.metrics import r2_score

U = np.array([0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.5, 0.7, 1, 1.5, 2, 3.5, 5, 8, 10, 15, 20, 25, 30])
C_pF = np.array([122.6, 110.1, 102.4, 96.5, 87.8, 81.6, 74.8, 67.2, 62, 52.5, 47, 40.5, 37.7, 33.1, 30.1, 28, 26.4])
C = C_pF * 1e-12

M_values = np.linspace(0.2, 1.0, 100)
best_r2 = -np.inf
best_M = None
best_Y = None

for M in M_values:
    Y = (1 / C)**(1 / M)
    model = LinearRegression()
    model.fit(U.reshape(-1, 1), Y)
    Y_pred = model.predict(U.reshape(-1, 1))
    r2 = r2_score(Y, Y_pred)

    if r2 > best_r2:
        best_r2 = r2
        best_M = M
        best_Y = Y
        best_Y_pred = Y_pred

#Regressionskoeffizienten
model = LinearRegression()
model.fit(U.reshape(-1, 1), best_Y)
a = model.coef_[0]
b = model.intercept_

#UD = b / a
print(f"Diffusionsspannung U_D ≈ {UD:.3f} V")

print(f"Optimaler Stufenfaktor M: {best_M:.3f} mit R² = {best_r2:.5f}")

# Plot
plt.scatter(U, best_Y, label="Daten transformiert")
plt.plot(U, best_Y_pred, color="red", label="Lineare Regression")
plt.xlabel("Sperrspannung U (V)")
plt.ylabel("$\frac{1}{C}^{\frac{1}{M}}$ (1/F)^(1/M)")
plt.title(f"Linearisierung für besten M = {best_M:.3f}")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()

```