

# **E24 – Halbleiterdioden**

Protokoll zum Versuch des Physikalischen Praktikums I  
von  
**Julian Molt & Valentin Stopper**

Universität Stuttgart

Verfasser:	Julian Molt (Physik), 3803097
	Valentin Stopper (Physik), 3774391
Gruppennummer:	A-016
Versuchsdatum:	29.09.2025
Assistentin:	Julian Vollmer

Stuttgart, den 1. Oktober 2025

# **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Versuchsziel</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>3</b>	<b>Messprinzip</b>	<b>3</b>
<b>4</b>	<b>Messwerte</b>	<b>4</b>
<b>5</b>	<b>Auswertung</b>	<b>6</b>
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>14</b>
<b>7</b>	<b>Literatur</b>	<b>14</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>14</b>

# 1 Versuchsziel und Versuchsmethode

In diesem Versuch werden Halbleiterdioden untersucht. Dazu werden die Kennlinien einer Silizium- und Germaniumdiode, einer Z-Diode und von zwei LEDs aufgezeichnet. Für die Z-Diode und die LEDs geschieht dies mithilfe eines Oszilloskops.

## 2 Grundlagen

Elektronen können in einem Atom diskrete Energieniveaus einnehmen. Nähern sich Atome einander an werden die Energieniveaus zu mehreren naheliegenden Energieniveaus aufgespalten. Innerhalb eines Einkristalls, mit vielen wechselwirkenden Atomen, kommt es zu vielen Aufspaltungen, weshalb naheliegende Energieniveaus zu Bändern zusammengefasst werden. Diese Bänder können von Elektronen besetzt werden. Das höchste vollbesetzte Band heißt Valenzband. Das energetisch über dem Valenzband liegende Band heißt Leitungsband. Ein Kristall ist dann leitend, wenn er ein teilweise besetztes Band hat, da die Elektronen nur dann ein höheres Energieniveau einnehmen können, um Energie zu übertragen.

Als Bandlücke wird der Energiebereich zwischen Valenz- und Leitungsband bezeichnet. Die Energieniveaus innerhalb der Bandlücke können von Elektronen nicht eingenommen werden. Bei Isolatoren ist das Leitungsband unbesetzt und die Bandlücke groß, weshalb keine Elektronen einfach ins Leitungsband gelangen. Bei Halbleitern ist die Bandlücke kleiner, wodurch Elektronen unter moderater Energiezufuhr, wie bspw. Wärme oder Licht, ins Leitungsband gelangen können.

Alternativ kann die Leitfähigkeit eines Halbleiters auch durch Dotierung verbessert werden. Bei der p-Dotierung werden in den Halbleiterkristall Atome niedrigerer Wertigkeit, also mit weniger Valenzelektronen, als die Atome des Halbleiterkristalls hat, eingebracht. Diese Fremdatome heißen Akzeptoren. Bei der n-Dotierung werden Atome höherer Wertigkeit eingebracht und sie heißen Donatoren. Dadurch entstehen freie Elektronen, bzw. Elektronenfehlstellen, die Strom leiten können. Werden ein p- und ein n-dotierter Halbleiter zusammengeführt, entsteht ein pn-Übergang. Durch den pn-Übergang bewegen sich Elektronen und Fehlstellen aufeinander zu und rekombinieren. Dadurch bleiben auf der p-dotierten Seite die negativ geladenen Atomrümpfe der Akzeptoren und auf der n-dotierten Seite die positiv geladenen Rümpfe der Donatoren übrig. Dadurch entsteht ein elektrisches Feld, was die Diffusion beider Ladungsträger bremst. Schlussendlich stellt sich ein Gleichgewicht ein, sodass kein Ladungstransport mehr stattfindet. Diesen mittlere Bereich des pn-Übergangs, in dem das Feld wirkt, nennt man Raumladungszone

oder Sperrschicht.

Wird eine Spannung angelegt, mit negativem Pol an der n-dotierten Seite und positivem Pol an p-dotierten Seite, wird das elektrische Feld abgebaut und schließlich fließt Strom in Durchlassrichtung, unter ständiger Rekombination, bei der Energie frei wird. Polt man die angelegte Spannung um, sperrt die Diode und es fließt ausschließlich ein geringer Sperrstrom  $I_S$ , welcher nicht durch Rekombination hervorgeht, sondern durch thermisch aktivierte Elektronen. Für ideale pn-Übergänge von Dioden gilt die Shockley'sche Beziehung

$$I = I_S \cdot \left[ \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right]. \quad (2.1)$$

Dabei steht  $e$  für die Elementarladung,  $k_B$  für die Boltzmannkonstante,  $U$  für die Spannung und  $T$  für die Temperatur. Bei einer sehr hohen Sperrspannung kann es zu einem hohen Sperrstrom, abweichend von der Shockley'schen Beziehung kommen. Der Hintergrund dafür ist einerseits der Zener Effekt, bei dem durch die Sperrspannung das Valenzband des p-dotierten Halbleiters und das Leitungsband des n-dotierten Halbleiters auf dasselbe Energieniveau gehoben werden. Dadurch können Elektronen vom Valenz- direkt ins Leitungsband gelangen und ein Stromfluss wird möglich. Bei Zenerdioden handelt es sich um stark dotierte Siliziumdioden, die sich genau diesen Effekt zunutze machen.

Andererseits kann es zum Lawineneffekt kommen, bei dem freie, beschleunigte Elektronen andere Elektronen so schnell aus dem Gitter stoßen, dass keine Rekombination stattfinden kann. Diese stoßen wiederum gegen andere Elektronen, was einen schlagartigen Stromanstieg zur Folge hat. LEDs sind Dioden, bei denen Lichtquanten unter Rekombination entstehen.

Die elektrische Leitfähigkeit  $\sigma$  ist gegeben durch

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (2.2)$$

mit dem spezifischen Widerstand  $\rho$ . Der Widerstand  $R$  ist gegeben als

$$R = \rho \cdot \frac{\ell}{A}, \quad (2.3)$$

wobei  $\ell$  die Länge des Leiters und  $A$  dessen Querschnitt sind. Daraus folgt für die elektrische Leitfähigkeit

$$\sigma = \frac{\ell}{RA}. \quad (2.4)$$

### 3 Messprinzip mit Abbild und Versuchsablauf



Abbildung 1: Versuchsaufbau mit Gleich- und Wechselspannungsquelle, Digitalmultimetern und Oszilloskop [1].

## 4 Messwerte

Tabelle 1: Gemessene Spannung und Strom der Germanium-Diode in Durchlassrichtung.

Spannung in mV	Strom in $\mu\text{A}$
22,7	0,06
100,2	11,9
152,0	55,5
199,3	182,3
210,2	234,4
220,2	292,3
230,1	360
250,6	550
270,3	810
283,6	1050
320,3	1980
346,0	2990
366,0	4020
383,0	5020
397,0	5990
410,0	6990
422,0	8000

Tabelle 2: Gemessene Spannung und Strom der Silizium-Diode in Durchlassrichtung.

Spannung in mV	Strom in $\mu\text{A}$
99,4	0,2
155,2	0,2
208,2	0,1
304,6	1
400	11,8
452	47,3
500	149,3
520	238,9
539	355
580	820
598	1220
623	2020
641	2970
655	3980
666	5050
674	6020
681	7020
687	8010

Tabelle 3: Gemessene Spannung und Strom der Silizium-Diode.

Temperatur	Spannung in mV	Strom in $\mu\text{V}$
„kalt“	517	199,6
„warm“	510	204,6

Tabelle 4: Gemessene Spannung und Strom der Silizium-Diode.

Temperatur	Spannung in mV	Strom in $\mu\text{V}$
„kalt“	201,9	200,4
„warm“	191,5	207,4

Tabelle 5: Gemessene Spannung und Strom der Silizium-Diode in Sperrrichtung.

Spannung in mV	Strom in $\mu\text{V}$
0,517	0,2
1,061	0,3
2,032	0,4
3,220	0,5
4,060	0,6
5,120	0,7
6,070	0,8
7,060	0,9
7,770	1,0

Tabelle 6: Gemessene Spannung und Strom der Germanium-Diode in Sperrrichtung.

Spannung in mV	Strom in $\mu\text{V}$
0,518	0,7
1,014	0,8
1,527	0,9
2,996	1,1
4,050	1,2
5,200	1,4
6,000	1,5
6,810	1,6
7,510	1,7
7,770	1,0

## 5 Auswertung

Die Kennlinie für den Durchlassbereich der Silizium- und Germanium-Diode wird mit digitalen Multimetern gemessen. Die aufgenommenen Messpunkte werden dann halblogarithmisch als Durchlasskennlinie aufgetragen. Der graphisch extrapolierte Sperrstrom beträgt für die Silizium-Diode  $2,09 \cdot 10^{-9} \text{ A}$  und für die Germanium-Diode  $3,16 \cdot 10^{-9} \text{ A}$ .



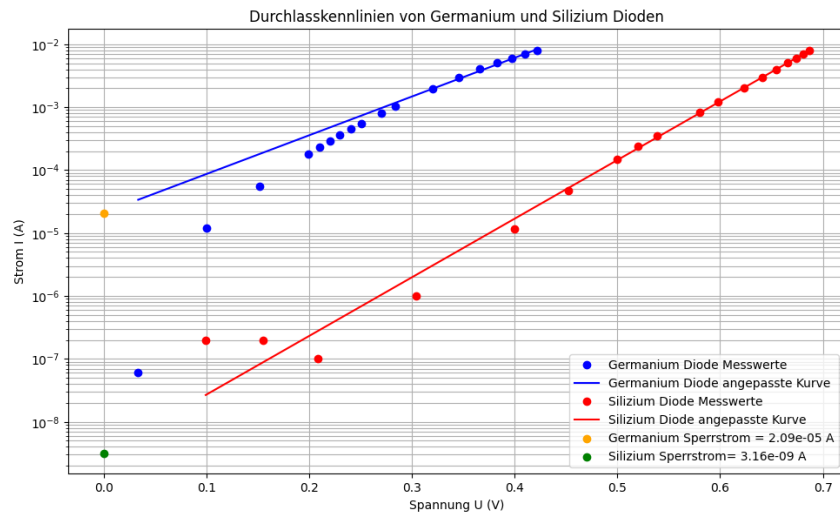


Abbildung 2: Sperrkennlinien der Si- und Ge-Dioden.

Die Leitfähigkeit der kalten Diode beträgt nach Gleichung 2.4

$$\sigma_k = \frac{\ell}{R_k A} \quad (5.1)$$

und für die Wärme

$$\sigma_w = \frac{\ell}{R_w A} \quad (5.2)$$

Somit ist die prozentuale Änderung der Leitfähigkeit  $\Delta\sigma$  für die Silizium-Diode

$$\begin{aligned} \Delta\sigma &= \frac{\sigma_w}{\sigma_k} - 1 = \frac{\frac{\ell}{R_w A}}{\frac{\ell}{R_k A}} - 1 = \frac{R_k}{R_w} - 1 = \frac{\frac{U_k}{I_k}}{\frac{U_w}{I_w}} - 1 \\ &= \frac{\frac{517 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{199,6 \cdot 10^{-6} \text{ A}}}{\frac{510 \cdot 10^{-3} \text{ V}}{204,6 \cdot 10^{-6} \text{ A}}} - 1 = \frac{2492,67 \Omega}{2590,18 \Omega} - 1 \\ &= -4 \%. \end{aligned}$$

Für die Germanium-Diode ergibt sich eine Änderung von  $-8 \%$ .

Bei Messung der Sperrkennlinien der beiden Dioden muss auch der Fehlerstrom  $I_{\text{err}}$  einberechnet werden. Vorher war dieser zu vernachlässigen, da der Innenwiderstand des Voltmeters sehr hoch ist, der der Diode in Durchlassrichtung aber

sehr klein. In Sperrrichtung ist der Widerstand der Diode groß, was bedeutet, dass sich der Strom mehr auf die Diode und das Spannungsmessgerät aufteilt. Er berechnet sich folgendermaßen:

$$I_{\text{err}} = \frac{U}{R_{\text{Messgerät}}}$$

Hierbei wird angenommen, dass der Widerstand des Amperemeters vernachlässigbar klein ist und somit die Spannung, die vom Voltmeter angezeigt wird, die ist, die über die Diode abfällt.

Der Fehlerstrom muss vom gemessenen Strom des Amperemeters abgezogen werden, wonach die Sperrkennlinien wie sie in Abbildung 3 zu sehen sind, zustande kommen.

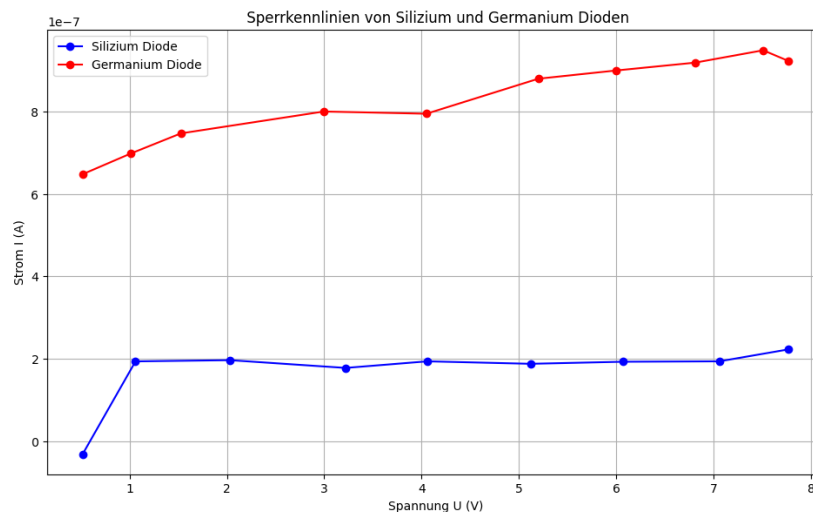


Abbildung 3: Sperrkennlinien der Si- und Ge-Dioden.

Die Kennlinie der Z-Diode wird mit einem Oszilloskop gemessen und kann in einem linearen Diagramm dargestellt werden.

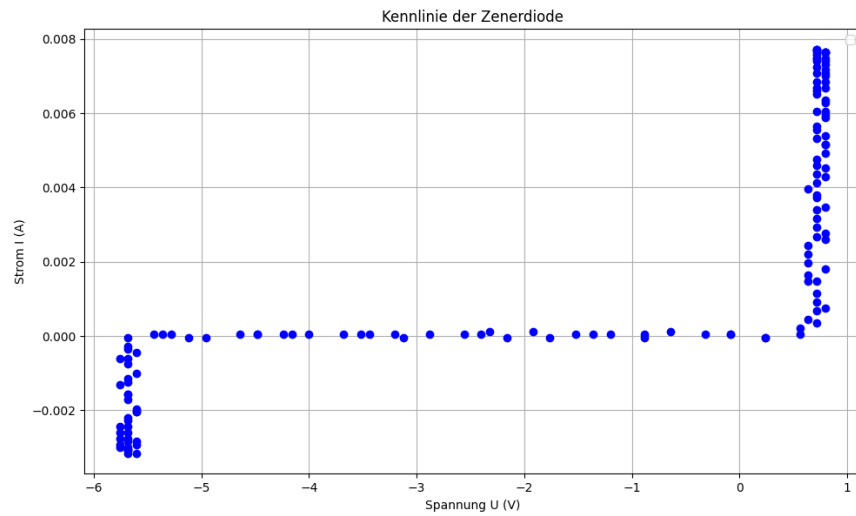


Abbildung 4: Kennlinie der Z-Diode.

## ZENEREFFEKT ERKLÄREN

Die Kennlinien einer roten und blauen LED werden ebenfalls mit einem Oszilloskop aufgenommen führen auf die folgenden Kennlinien.

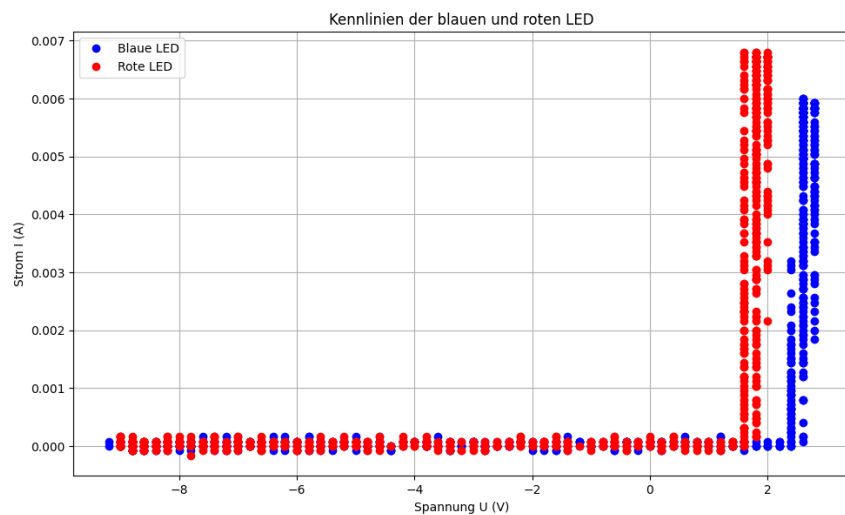


Abbildung 5: Kennlinie einer roten und einer blauen LED.

Es ist deutlich zu erkennen, dass die rote LED eine niedrigere Schwellenspannung besitzt, als die Blaue. Das liegt am unterschiedlichen Aufbau beider Dioden. Bei beiden Dioden wird die Lichtemission dadurch ausgelöst, dass, sobald die LED in Durchlassrichtung geschaltet ist, Elektronen im Leiterband von der n-dotierten Seite auf die p-dotierte Seite gelangen und dort unter Emission von Photonen mit den Defektelektronen rekombinieren.

Ein Elektron hat die Energie

$$E = e \cdot U.$$

Als Näherung kann man annehmen dass diese Energie vollständig als Licht emittiert wird. Die Energie von Licht mit der Wellenlänge  $\lambda$  ist

$$E_L = \frac{hc}{\lambda}$$

mit dem Planck'schen Wirkungsquantum  $h$  und der Lichtgeschwindigkeit  $c$ . Dann lautet die Relation zwischen angelegter Spannung und Wellenlänge

$$U = \frac{hc}{e\lambda}$$

Für rotes Licht wird eine Wellenlänge von  $\lambda_R = 700 \text{ nm}$  angenommen, was zu einer Schwellenspannung von

$$U = \frac{hc}{e\lambda_R} = \frac{6,626\,070\,15 \cdot 10^{-34} \text{ J s} \cdot 299\,792\,458 \text{ m/s}}{1,602\,176\,634 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 700 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 1,77 \text{ V}$$

führt. Für blaues Licht wird eine Wellenlänge von  $\lambda_B = 450 \text{ nm}$  angenommen woraus sich eine Schwellenspannung von  $U \approx 2,76 \text{ V}$  ergibt.

Bei der roten LED wird eine Schwellspannung von  $1,54 \text{ V}$  und bei der Blauen  $2,3 \text{ V}$  gemessen. Für diese einfachste Näherung lässt sich unter den berechneten und experimentell bestimmten Werten eine qualitative Übereinstimmung schließen.

Die abgegebene Leistung  $P_4$  in den Widerstand  $R_4$ , sowie die Eingangsleistung  $P_2$  werden durch die Effektivwerte der Spannung und des Stromes bestimmt. Dafür gilt

$$P_{\text{eff}} = U_{\text{eff}} \cdot I_{\text{eff}} = \frac{\hat{U}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\hat{I}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} \cdot \hat{U} \cdot \hat{I},$$

wobei  $\hat{U}$  und  $\hat{I}$  der Scheitelwert der Wechselspannung bzw. des Wechselstromes sind. Für die Eingangsleistung mit der Silizium-Diode ergibt sich zum Beispiel

$$P_2 = \frac{(8,33 \text{ V})^2}{2 \cdot 1 \text{ k}\Omega} = 34,69 \text{ mW}.$$

In Tabelle 7 sind alle Eingangsleistungen, sowie die Leistungen über  $R_4$  dargestellt.

Tabelle 7: Eingangsleistungen und Leistungen über Widerstand  $R_4$

Diode	$P_2$ in mW	$P_4$ in mW
Silizium	34,69	29,18
Germanium	34,44	30,81
LED (Blau)	34,36	15,96
LED (Rot)	34,36	21,51

Die mittlere Spannung  $\hat{U}$  über eine Halbwelle kann durch das Integral

$$\hat{U} = \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} U(t) dt$$

bestimmt werden. Dies wurde numerisch in Python durchgeführt, da das Oszilloskop keine stetige Funktion liefert, sondern Daten in Form von Datenpunkten. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 tabelliert.

Tabelle 8: Eingangsleistungen und Leistungen über Widerstand  $R_4$

Diode	$\hat{U}_4$ in V	$\hat{U}_2$ in V
Silizium	5,00	5,50
Germanium	5,24	5,55
LED (Blau)	3,15	5,58
LED (Rot)	3,91	5,56

Die Eingangsleistungen, sowie die abfallenden Leistungen können zudem in Diagrammen sichtbar gemacht werden:

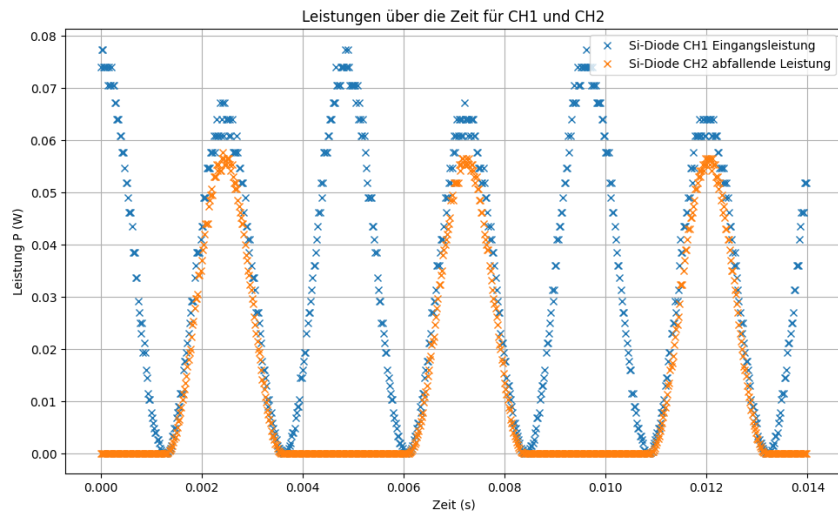


Abbildung 6: Eingangsleistung, sowie abfallende Leistung über die Silizium-Diode.

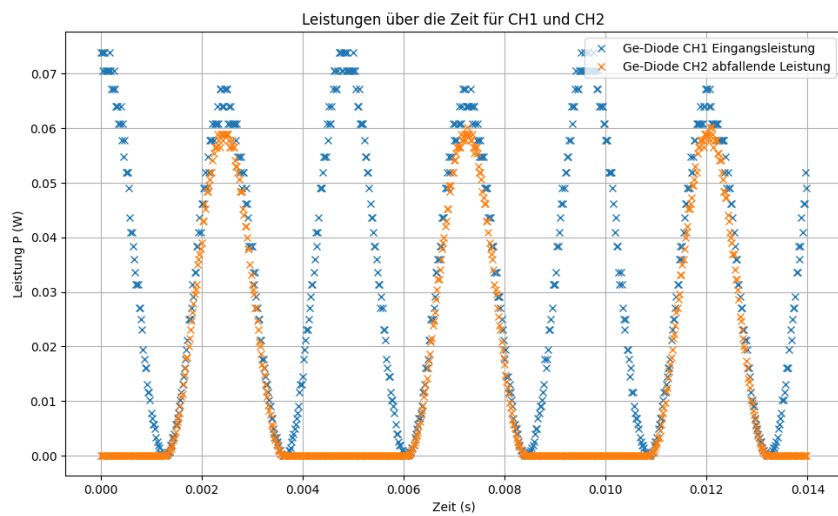


Abbildung 7: Eingangsleistung, sowie abfallende Leistung über die Germanium-Diode.

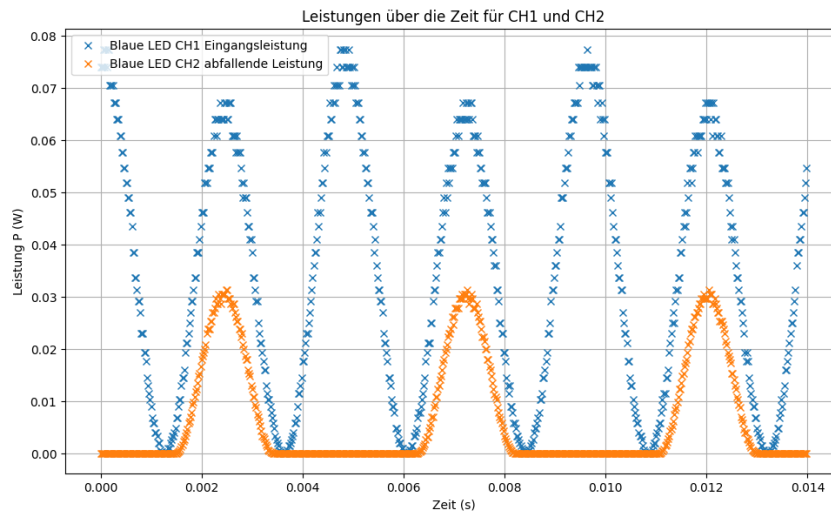


Abbildung 8: Eingangsleistung, sowie abfallende Leistung über die blaue LED.

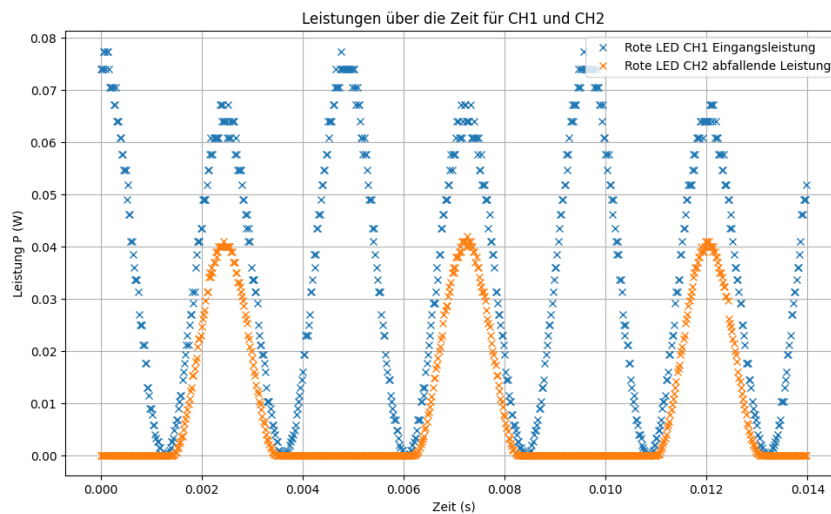


Abbildung 9: Eingangsleistung, sowie abfallende Leistung über die rote LED.

Dabei fällt auf, dass die abfallenden Leistungen bei den LEDs deutlich niedriger sind, als bei den anderen beiden Dioden. Es ist zu beachten, dass die aufgetragenen abgefallenen Leistungen am Widerstand  $R_4$  gemessen wurden, weshalb der Rückschluss sein muss, dass an den beiden LEDs mehr Leistung als an den

anderen beiden Dioden abfällt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die LEDs Leistung in Form von Licht abstrahlen.

## **6 Zusammenfassung**

Zuerst wurden die Kennlinien von einer Silizium- und einer Germanium-Diode gemessen. Anschließend wurde die Änderung der Leitfähigkeit nach erwärmen auf Körpertemperatur untersucht und die prozentualen Änderungen konnte auf  $-4\%$  für die Silizium-Diode und  $-8\%$  für die Germanium-Diode quantifiziert werden.

Es wurden die Sperrkennlinien der Silizium- und Germanium-Diode, sowie die Kennlinie einer Z-Diode und einer roten und einer blauen LED aufgezeichnet. Die unterschiedlichen Schwellspannungen der LEDs wurden aufgrund ihrer Wellenlängen berechnet und konnten die experimentell bestimmten Werte stützen.

Schließlich wurden die abgefallenen Leistungen für alle Dioden graphisch dargestellt und verglichen.

## **7 Literatur**

- [1] Versuchsanleitung zu *E24 – Halbleiterdioden* (Abgerufen am 29.09.2025).  
Online verfügbar unter: [https://www3.physik.uni-stuttgart.de/studium/praktika/ap/pdf\\_dateien/E24.pdf](https://www3.physik.uni-stuttgart.de/studium/praktika/ap/pdf_dateien/E24.pdf)

## **8 Anhang**



# Germanium & Silizium Probe

a) 1.1 Ge:

I	0,06 $\mu$ A	77,9 $\mu$ A	55,5 $\mu$ A	782,3 $\mu$ A	234,4 $\mu$ A
U	227 mV	100,2 mV	1520 mV	190,3 mV	210,2 mV

I	292,3 $\mu$ A	360 $\mu$ A	550 $\mu$ A	0,87 mA
U	220,2 mV	230,7 mV	250,6 mV	270,3 mV

I	447 $\mu$ A	93,2 $\mu$ A	22,4 $\mu$ A
U	240,4 mV	777,4 mV	720,7 mV

(27 k $\Omega$  entfernt)

I	7,05 mA	1,98 mA	2,99 mA	4,02 mA	5,02 mA
U	383,6 mV	329,2 mV	346 mV	366 mV	383 mV

I	5,99 mA	6,99 mA	8 mA
U	397 mV	470 mV	422 mV

I	0,2 $\mu$ A	0,2 $\mu$ A	0,7 $\mu$ A	1 $\mu$ A	77,8 $\mu$ A
U	29,4 mV	755,2 mV	208,2 mV	304,6 mV	400 mV

I	423 $\mu$ A	749,3 $\mu$ A	238,9 $\mu$ A	355 $\mu$ A	0,82 mA
U	452 mV	500 mV	520 mV	539 mV	580 mV

I	7,22 mA	2,02 mA	2,97 mA	3,98 mA	5,05 mA
U	598 mV	623 mV	647 mV	655 mV	666 mV

I	6,02 mA	7,02 mA	8,07 mA
U	674 mV	687 mV	687 mV

b)

(Si) „kalt“

I	792,6 $\mu$ A
U	577 mV

„warm“

I	704,6 $\mu$ A
U	570 mV



(Ge)  $I_{\text{eff}} = \frac{1}{4} \cdot 200,4 \mu\text{A} = 50,1 \mu\text{A}$   
 $U = 707,9 \text{ mV}$

$I_{\text{avg}} = \frac{1}{4} \cdot 207,4 \mu\text{A} = 51,85 \mu\text{A}$   
 $U = 722,5 \text{ mV}$

c)

(Si) Sperrspannung

$I$	$0,2 \mu\text{A}$	$0,3 \mu\text{A}$	$0,4 \mu\text{A}$	$0,5 \mu\text{A}$	$0,6 \mu\text{A}$	$0,7 \mu\text{A}$
$U$	$577 \text{ mV}$	$1,067 \text{ V}$	$2,032 \text{ V}$	$3,22 \text{ V}$	$4,06 \text{ V}$	$5,72 \text{ V}$

$I$	$0,8 \mu\text{A}$	$0,9 \mu\text{A}$	$1 \mu\text{A}$
$U$	$6,07 \text{ V}$	$7,06 \text{ V}$	$7,77 \text{ V}$

(Ge) Sperrspannung

$I$	$0,7 \mu\text{A}$	$0,8 \mu\text{A}$	$0,9 \mu\text{A}$	$1,1 \mu\text{A}$	$1,2 \mu\text{A}$
$U$	$578 \text{ mV}$	$1,014 \text{ V}$	$1,527 \text{ V}$	$2,996 \text{ V}$	$4,05 \text{ V}$

$I$	$1,4 \mu\text{A}$	$1,5 \mu\text{A}$	$1,6 \mu\text{A}$	$1,7 \mu\text{A}$	$1,7 \mu\text{A}$
$U$	$5,2 \text{ V}$	$6 \text{ V}$	$6,87 \text{ V}$	$7,57 \text{ V}$	$7,77 \text{ V}$

II Zenerdiode

c)

LEDs

Frequenz Netzteil  $200 \text{ Hz}$   $208,7 \text{ Hz}$

Blau LED  $2,3 \text{ V}$

rot LED  $1,54 \text{ V}$

III

Ch 1  $I_{\text{eff}}$  Spannung

Ch 2 Spannung

R4

Germanium Diode: ~~5D50000~~ 7

Silizium Diode: ~~5D50000~~ 7

LED rot: 5D50000

LED blau: 5D50000

29.07.2025  
J. Wied