

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
1 Theoretische Grundlagen	1
1.1 Energielevel und Bänder in Halbleitern	1
1.2 Unterscheidung verschiedener Halbleiter	1
1.3 Ladungsbewegung in Halbleitern	2
1.4 Dotierung von Halbleitern	3
2 Versuchsaufbau und Durchführung	5
2.1 Aufbau	5
2.1.1 Versuchsteil 1, Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium	5
2.1.2 Versuchsteil 2, Beweglichkeit, Lebensdauer und Diffusion von Ladungsträgern in Germanium	5
2.1.3 Versuchsteil 3, Absorptionskoeffizienten und Energieauflösung eines Detektors	5
2.2 Durchführung	6
2.2.1 Versuchsteil 1, Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium	6
2.2.2 Versuchsteil 2, Beweglichkeit, Lebensdauer und Diffusion von Ladungsträgern in Germanium	6
2.2.3 Absorptionskoeffizienten und Energieauflösung eines Detektors	7
3 Auswertung und Fehleranalyse	8
3.1 Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium	8
3.2 Beweglichkeit, Diffusion & Lebensdauer von Ladungsträgern im Halbleiter	13
3.2.1 Gauß-Fits	13
3.2.2 Quantifizierung der Signalschwankung	13
3.2.3 Auswertung der Messreihe bei konstanter Lichtleiterposition	13
3.2.4 Auswertung der Messreihe bei konstanter Spannung	18
3.3 Halbleiterdetektoren	21
4 Diskussion der Ergebnisse	24
4.1 Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium	24
4.2 Beweglichkeit, Diffusion und Lebensdauer von Ladungsträgern in Germanium	24
4.3 Halbleiterdetektoren	25
A Anhang zu Teil 1	27
B Anhang zu Teil 2	30

C Anhang zu Teil 3	35
Abbildungsverzeichnis	39
Literatur	40

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Energielevel und Bänder in Halbleitern

Die Elektronen zweier Atome, die sich in einiger Distanz zueinander befinden, leben in unterschiedlichen Energieniveaus. Bringt man die Atome nun näher aneinander, so kommt es zu Wechselwirkung zwischen den Elektronen. Die Wellenfunktionen der einzelnen Elektronen überlappen sich und die Energielevel rücken energetisch gesehen näher aneinander. Betrachtet man nun ein Material wie Silizium, so hat man bereits auf kleinem Raum sehr viele Elektronen die wechselwirken. Da die einzelnen Energielevel getrennt voneinander sind, aber immer näher aneinander rücken, je mehr Elektronen sich auf kleinem Raum befinden, kommt es zu einer Ausbildung von kontinuierlichen Energiebändern. Da die Elektronen nah am Kern stärker gebunden sind, hat die Wechselwirkung der einzelnen Elektronen in den höheren Energielevels mehr Einfluss und die ausgebildeten Energiebänder sind dort breiter.

Für sehr kleine Abstände überlagert die Bildung der Energiebänder die Feinstrukturaufspaltung und auch Orbitale überlagern sich so, dass sie als ein Hybrid-orbital bezeichnet werden.

Bändermodell Man unterscheidet zwischen verschiedenen Bändern, wobei zwei von besonderem Interesse sind. Das Valenzband ist dadurch festgelegt, dass es das energetisch höchstgelegene Band ist, welches bei einer Temperatur von 0 K vollständig mit Elektronen besetzt ist und somit nicht zur Leitfähigkeit des Materials beitragen kann. Das Leiterband ist energetisch gesehen direkt über den Valenzband. Das Leiterband ist nicht von Elektronen besetzt und kann somit, sobald ein Elektron in das Leiterband angehoben wird, leiten.

Isolatoren, Leiter, Halbleiter Mit Hilfe des Bändermodells kann man Isolatoren, Leiter und Halbleiter unterscheiden. In Isolatoren sind Valenz- und Leiterband so weit voneinander entfernt, dass unabhängig von äußeren Einflüssen keine Elektronen in das Leiterband gehoben werden können. Ohne Elektronen im Leiterband kann ein Material nicht leiten, es ist isoliert also immer. Im Leiter überlappen sich Valenz- und Leiterband unabhängig von äußeren Einflüssen und es befinden sich somit immer leitfähige Elektronen im Leiterband. Die Energielücke in Halbleitern ist gerade so groß, dass bei einer Temperatur von 0 K keine Elektronen im Leiterband sind, die Energiedifferenz zwischen Leiter- und Valenzband aber gering genug ist, als dass bei höheren Temperaturen relativ einfach Elektronen in das Leiterband angehoben werden können.

1.2 Unterscheidung verschiedener Halbleiter

Eine wichtige Unterscheidung bei Halbleitern ist direkt oder indirekt. Bei einem direkten Halbleiter ist das Minimum des Leiterbands direkt über dem Maximum des Valenzbandes, was bedeutet, dass die Energiedifferenz zwischen Valenz- und Leiterband minimal ist. Bei einem indirekten Halbleiter sind dieses Minimum und Maximum gegeneinander verschoben, es muss also mehr Energie aufgebracht werden um ein Elektron aus den Valenz- in das Leiterband zu heben.

Außerdem gibt es intrinsische und extrinsische Halbleiter, wobei es sich bei intrinsischen Halbleitern um das relativ theoretische Konstrukt eines perfekten Halbleiters ohne Störstellen handelt. In der Realität haben alle Halbleiter, allein durch die Tatsache, dass sie endlich groß sind Störstellen.

Nicht zu verwechseln, und deshalb hier erwähnt, sind die Begriffe indirekter/direkter Halbleiter und indirekter/direkter Übergang. Der direkte/direkte Halbleiter ist wie oben beschrieben eine Beschreibung für die Eigenschaften des Stoffes. Direkte und indirekte Übergänge können in beiden Arten von Halbleitern vorkommen. Bei einem direkten Übergang löst ein Photon, welches exakt die Energie der Bandlücke besitzt, ein Elektron und hebt es in das Leiterband. Für den indirekten Übergang ist, um sowohl Impuls, als auch Energieerhaltung nicht zu verletzen, ein zweites Teilchen, ein Phonon, das Teilchen der Gitterschwingung eines Festkörpers, notwendig. Das Phonon gleicht die Impulsdifferenz aus, die es gibt, da das Photon durch die Bandlücke eine feste Energie und somit auch einen festen Impuls hat.

1.3 Ladungsbewegung in Halbleitern

Wird eine Spannung an einen Halbleiter angelegt, so können Elektronen aus dem Valenzband in das Leiterband übergehen. Im Leiterband bewegen sich die Elektronen dann gemäß der angelegten Spannung. Im Valenzband hinterlässt das Elektron eine Art Loch, welches als positive Ladung verstanden werden kann. Die benachbarten Elektronen hüpfen nun, wenn die auf Grund der angelegten Spannung sinnvoll ist, in das Loch und hinterlassen ihrerseits ein neues Loch. Die Elektronen im Valenzband bewegen sich also ebenfalls gemäß der Spannung wie die Elektronen im Leiterband und das Loch bewegt sich in genau entgegengesetzte Richtung.

Stellt man sich diesen Ladungstransport nun vor, so kann man den Elektron-Loch-Paaren eine gewisse Lebensdauer τ zuordnen. In dieser Lebensdauer werden Elektronen und Löcher durch das elektrische Feld beschleunigt und erreichen Geschwindigkeiten von

$$v_{p/n} = \pm \frac{e\tau}{m_{pn}} \vec{E} = \pm \mu_{p/n} \vec{E}, \quad (1)$$

wobei es sich bei μ um die Beweglichkeit der Ladungen handelt. Ein weiterer interessanter Punkt bei der Ladungsbewegung ist Diffusion. In Ladungswolken kommt es auf Grund der Stöße der Ladungsträger untereinander schnell zur Verbreiterung der Wolke. Die Diffusionskonstante D , welches ein Maß für die Verbreiterung darstellt ist abhängig von der Konzentration der Ladungsträger.

Die Bewegung einer solchen Ladungsträgerwolke kann mit Hilfe einer Differentialgleichung formuliert werden:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \tilde{\mu} \vec{E} \vec{\nabla} c + \tilde{D} \nabla^2 c - \frac{c_0}{\tau_n}. \quad (2)$$

Die Differentialgleichung entsteht aus Kombination dreier Einzelterme. Der erste Term der Gleichung beschreibt die Beweglichkeit von Ladungsträgern in einem Halbleiter, der zweite Term beachtet die Diffusion und der dritte Term ergänzt die Gleichung um die Lebensdauer. Vergleicht man diese Differentialgleichung mit der Kontinuitätsgleichung für Elektronen

$$\frac{\partial n}{\partial t} = -\vec{\nabla} \vec{j}_n - \frac{n - n_0}{\tau_n} = \vec{E} \mu_n \vec{\nabla} n + D_n \nabla^2 n - \frac{n - n_0}{\tau_n}, \quad (3)$$

sind die Größen wieder bekannter und die einzelnen Terme einleuchtend. Eine zu Gleichung (3) analoge Differentialgleichung gibt es auch für die Löcher im Halbleiter. Da die Rekombinationsrate der Löcher und Elektronen mit beiden Differentialgleichungen gleich sein muss, sind diese gekoppelt. Die Differentialgleichungen können entkoppelt werden und

die ambipolare Ladungsträgerkonzentration c , soei die reduzierte Diffusionskonstante $\tilde{D}$ und die reduzierte Beweglichkeit $\tilde{\mu}$ werden eingeführt. Damit erhält man dann die verwendete Differentialgleichung aus Gleichung (2).

Bei der Lösung dieser Differentialgleichung handelt es sich um eine Gauss-Funktion der Form

$$c(t, x) = C \exp\left(\frac{t}{\tau_n}\right) \frac{1}{\sqrt{4\pi\tilde{D}t}} \exp\left(-\frac{(x + \tilde{\mu}Et)^2}{4\tilde{D}t}\right) - C_0. \quad (4)$$

Da es sich um einen p-dotierten Germaniumblock handelt, der in dem Versuch verwendet wird, können die Näherungen $\tilde{D} \rightarrow D_n$, $\tilde{\mu}u \rightarrow -\mu_e$ vorgenommen werden und die Lösung der Differentialgleichung dann mit der bekannten Gauss-Funktion

$$y(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \left(\frac{x - x_0}{\sigma}\right)^2\right) \quad (5)$$

vergleichen. Man erkennt, dass die Fläche des Signals exponentiell abnimmt und mit

$$A(t) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad (6)$$

die mittlere Lebensdauer bestimmt werden kann. Der Schwerpunkt der Gaussfunktion bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit durch die Germaniumprobe und kann mit

$$x(t) = -\vec{E}\tilde{\mu}t \quad (7)$$

beschrieben werden, wobei es sich bei x und den Abstand von Laser und Nadel handelt. Die Diffusion lässt sich ebenfalls aus der Gaußskurve bestimmen und es wird

$$\sigma(t) = \sqrt{2\tilde{D}t} \quad (8)$$

genutzt.

1.4 Dotierung von Halbleitern

Um die Leitfähigkeit von Halbleitern gezielt zu erhöhen, können diese dotiert werden. Ein einfacher Halbleiter besteht aus Atomen mit vier Valenzelektronen. Bringt man nun gezieht Atome mit fünf Valenzelektronen ein, so gibt es freie Elektronen, die die Leitfähigkeit erhöhen. Die so dotierten Halbleiter nennt man n-dotiert. Bringt man Atome mit drei Valenzelektronen ein, so fügt man gezielt Löcher hinzu, was ebenfalls die Leitfähigkeit erhöht. Diese Halbleiter heißen dann p-dotiert.

pn-Diode Ein viel genutztes elektrisches Bauteil sind Halbleiterdioden. Eine pn-Diode besteht aus einem p-dotierten Halbleiter und einem n-dotierten Halbleiter, die fest miteinander verbunden sind. Da im p-dotierten Halbleiter freie Löcher und im n-dotierten Halbleiter freie Elektronen sind, bildet sich eine Schicht, in der die überschüssigen Elektronen aus dem einen Teil in die Löcher des zweiten Halbleiters hüpfen. Da beide Halbleiter an sich elektrisch neutral waren, bleiben in der p-dotierten Schicht nun negativ geladene Atomrümpfe und in der n-dotierten Schicht positiv geladene Atomrümpfe zurück. Zwischen diesen bildet sich nun ein elektrisches Feld aus, bis ein Gleichgewicht herrscht.

Legt man nun in Richtung des elektrischen Feldes der Diode eine verstärkende Spannung an, so kann kein Strom fließen und die Diode sperrt. Eine entgegengerichtete äußere Spannung hingegen kompensiert das elektrische Feld und die Diode wird leitfähig.

Halbleiterdetektoren Trifft ausreichend energetische, ionisierende Strahlung auf einen Halbleiter, so wird ein Elektron freigesetzt. Ist dieser Halbleiter nun Teil einer Diode, so wird das Elektron im Feld zwischen den beiden unterschiedlich dotierten Schichten beschleunigt. In einem Halbleiterdetektor wird dies ausgenutzt und Elektroden so angebracht, dass sie das, im elektrischen Feld der Diode beschleunigte Elektron detektieren können. Das entstehende Stromsignal kann dann verstärkt und ausgewertet werden.

2 Versuchsaufbau und Durchführung

2.1 Aufbau

2.1.1 Versuchsteil 1, Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium

Auf zwei optischen Bänken, die in einem Öffnungswinkel von 15° zueinander stehen, sind eine Lampe mit einem davor platzierten Chopper und einer Linse auf dem einen Arm und eine weitere Linse, ein Filter und ein Detektor mit Probenhalterung auf dem anderen Arm angebracht. Am Schnittpunkt der beiden Arme befindet sich eine motorisiert drehbare Winkelplatte, auf welcher ein optisches Gitter befestigt ist. Es stehen in diesem Versuch sowohl Gitter, Filter und Probe für Silizium, als auch für Germanium zur Verfügung.

Der gesamte Aufbau ist so geplant, dass das Licht aus der Lampe, durch den Chopper in Lichtpulse geteilt, durch die Linse kollimiert auf das optische Gitter fällt, dort interferiert und die Interferenzmaxima durch die zweite Linse auf den Filter fallen und dann durch die Probe über den Detektor gemessen werden.

Die aufgenommenen Daten des Detektors, sowie die Winkeleinstellung der Platte werden elektronisch an einen Computer weitergegeben und können dort ausgelesen werden.

2.1.2 Versuchsteil 2, Beweglichkeit, Lebensdauer und Diffusion von Ladungsträgern in Germanium

Ein p-dotierter Germaniumblock ist fest in eine Fassung eingelassen. Über den Germaniumblock befinden sich ein beweglicher Lichtleiter und eine leitende Spitze. Über den Lichtleiter können gezielte Laserpulse auf den Block geleitet werden und die leitende Spitze misst fließende Ströme. An den Germaniumblock ist eine Beschleunigungsspannung angelegt, welche über ein Rädchen verstellt werden kann. Der Abstand von Lichtleiter und Spitze kann ebenfalls über ein Rädchen eingestellt werden und bis auf ein Offset an einer Millimeterskala abgelesen werden. Zum Vermessen des Offsets steht ein elektrischer Messschieber zur Verfügung. Das Signal des Lasers, sowie das Signal der Spitze werden an ein Oszilloskop weitergegeben und können dort ausgelesen werden.

2.1.3 Versuchsteil 3, Absorptionskoeffizienten und Energieauflösung eines Detektors

In einer fertig angeschlossenen Box kann ein Silizium-Detektor oder ein CdTe-Detektor angebracht werden. Schließt man den Deckel der Box, so kann man über einem kleinen Loch mit Hilfe einer Schablone einer der beiden radioaktiven Proben, Cobalt oder Americium aufgelegt werden. Die Signale der Detektoren werden verstärkt und mit Hilfe eines Shaping-Amplifiers in gauss-form gebracht und können mit Hilfe eines Messprogramms und eines analog-digital-Wandlers am Computer ausgelesen werden.

2.2 Durchführung

2.2.1 Versuchsteil 1, Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium

Zunächst wurde der Versuchsaufbau so ausgerichtet, dass das Licht möglichst parallel auf das Gitter gefallen ist. Dann wurde der Versuch so vorbereitet, dass Germanium vermessen werden konnte, es wurde also das passende Gitter und der dazugehörige Filter ausgewählt. Nun wurde mit Hilfe der Anzeige des Messprogramms die Verstärkung des Probenstroms und des Pyrossignals so eingestellt, dass diese fünf Volt nicht überschritten haben, da das Signal sonst nicht mehr aufgenommen werden kann, außerdem wurde die Blende so verstellt, dass das Signal gut zu erkennen war. Diese Einstellungen wurden dann während der Messreihen zu einer Probe nicht mehr verändert. Nun wurden fünf Messungen durchgeführt auf deren Zweck und Inhalt in der Analyse noch mal näher eingegangen wird. Prinzipiell laufen jedoch alle Messungen gleich ab:

Zunächst wurde das Messprogramm gestartet und dann der positive und der negative Winkelbereich mit der langsamen Einstellung des Motors abgefahren. Da alle Messungen bei 0° gestartet wurden, wurden beide Winkelbereiche jeweils zwei mal abgefahren, da auch das Rückfahren in die Nullposition mit aufgenommen wurde.

Bei den Messungen bei festem Winkel wurde das Gitter zunächst in eine Position gefahren, bei der messbare Transmission- und Absorption erwartet wurden und dann das Messprogramm gestartet.

Die Messung ohne Lampe wurde durchgeführt, indem diese lichtundurchlässig abgedeckt wurde, da der Motor direkt an die Lampe gekoppelt ist und nicht funktioniert, wenn das Licht aus ist.

Nach fünf Messreihen wurden das Gitter, der Filter und die Probe ausgetauscht und die selben Messungen wie bei Germanium noch mal mit Silizium durchgeführt.

Außerdem wurde noch der Abstand vom Gitter zum Filter, sowie die eingestellte Breite der Blende gemessen und notiert.

2.2.2 Versuchsteil 2, Beweglichkeit, Lebensdauer und Diffusion von Ladungsträgern in Germanium

Im zweiten Versuchsteil wurden zwei unterschiedliche Messreihen aufgenommen.

Zunächst wurde der Abstand zwischen Laser und Nadel konstant gehalten und die Spannung, die an dem Germaniumblock anliegt schrittweise erhöht. Dabei wurde bei der niedrigsten Spannung, bei der noch ein Signal zu erkennen war begonnen und die Spannung dann erhöht. Das Signal wurde auf einem Oszilloskop angezeigt und auch direkt von diesem aus gespeichert. Das Offset wurde bei den Messungen immer so gestellt, dass das beobachtete Gauss-Signal möglichst zentriert und auf der Nulllinie lag.

Bei der zweiten Messung wurde die Spannung konstant gehalten und der Abstand zwischen Laser und Nadel variiert. Zunächst wurde dafür der Abstand zwischen Nadel und Laser in der Nullposition mit Hilfe eines Messschiebers ermittelt. Danach wurde der größte Abstand mit erkennbarem Signal gesucht und von da aus schrittweise der Abstand verstellt und gemessen. Der Abstand, abgesehen von dem Offset wurde an der Skala oben auf dem Messaufbau abgelesen. Hier wurde ebenfalls das Signal so gut wie möglich zentriert und die Daten dann abgespeichert.

2.2.3 Absorptionskoeffizienten und Energieauflösung eines Detektors

Da der Detektor bereits fertig angeschlossen und alles verkabelt war, wurde in diesem Versuchsteil lediglich die radioaktive Probe, einmal Americium und einmal Cobalt auf dem Detektor plaziert. Dafür wurde eine Schablone über ein Loch gelegt und die Probe daran ausgerichtet. Dann wurde im Messprogramm eine Laufzeit eingestellt - für die Messungen der Proben jeweils eine Stunde - und die Messung gestartet. Sobald eine Counts gemessen wurden und somit davon ausgegangen werden konnte, dass die Messung so funktioniert wie geplant, wurde das Programm geschlossen und erst zum Speichern der Daten wieder geöffnet.

Beide Proben wurden mit beiden Detektoren, dem Siliziumdetektor und dem CdTe-Detektor vermessen, dieser wurde zwischen den Messungen vorsichtig ausgetauscht.

Außerdem wurden für beide Detektoren Untergrundmessungen durchgeführt, in denen jeweils für eine halbe Stunde gemessen wurde ohne dass eine Probe aufgelegt wurde.

3 Auswertung und Fehleranalyse

3.1 Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium

Um die Bandlücke von Germanium und Silizium zu bestimmen sollten jeweils vier Messreihen aufgenommen werden. Um die Fehler besser abzuschätzen wurden zwei weitere Datensätze aufgenommen, damit gibt es insgesamt für beide Halbleiter die in Tabelle 1 dargestellten Messreihen. Die Bestimmung der Bandlücke, sowie die Berechnung der Fehler

Tabelle 1: Jeweils aufgenommene Datensätze zu beiden Halbleitern

Messreihe	Inhalt der Messung	Zweck der Messung
1	Durchfahren des Winkels bei eingeschalteter Lampe, ohne Probe	Normierung der späteren Ergebnisse
2	Durchfahren des Winkels bei eingeschalteter Lampe, mit Probe	Auszuwertende Daten
3	fester Winkel bei eingeschalteter Lampe, mit Probe	Bestimmung des Fehlers auf die Probe (Absorption)
4	Durchfahren des Winkels ohne Lampe, mit Probe	Bestimmung des Untergrunds
5	fester Winkel bei eingeschalteter Lampe, ohne Probe	Bestimmung des Fehlers auf die Lampe (Transmission)

erfolgt für beide Halbleiter analog, weshalb in der Auswertung nur Germanium ausführlich besprochen wird, es sind allerdings alle Fitdaten, sowie die genutzten Plots in Anhang A.

Winkelangleichung der aufgenommenen Messreihen Bevor die aufgenommenen Daten der Transmission und Absorption aus Messreihe 2 gegen den Winkel aufgetragen werden können, müssen die Daten auf die Lampenleistung aus Messreihe 1 normiert werden. Außerdem wurde der aufgenommene Untergrund aus Messreihe 4 ausgewertet und überprüft, ob die Messdaten bereinigt werden müssen. In Abb. 1 wurden Absorption und Transmission von Messreihe 4 gegen den Winkel aufgetragen. In Abb. 1 ist gut zu erken-

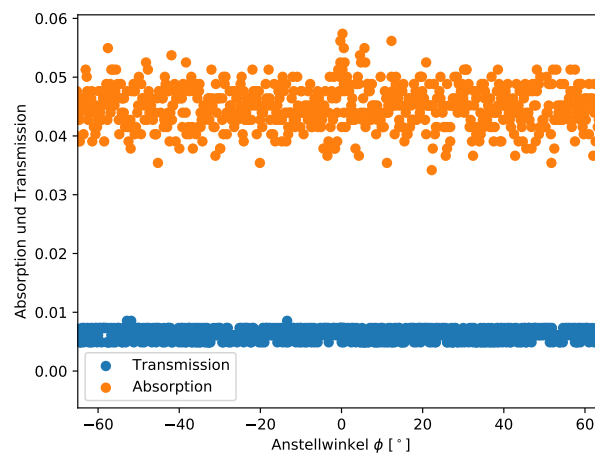


Abbildung 1: Plot zur Auswertung des Untergrunds

nen, dass der Untergrund nicht winkelabhängig ist. Da außerdem keine Absolutwerte der

Rohdaten von Interesse sind, wurde darauf verzichtet die Daten vom Untergrund zu bereinigen. Neben der Zeitersparnis hat dies noch einen weiteren, schwerwiegenderen Vorteil:

Um die Daten weiter auszuwerten, muss jedem Wertetupel aus Messung 2 ein Wertetupel aus Messung 1 zugeordnet werden können. Da aber nicht in allen Messreihen die selben Winkel abgefahren werden, kann die Zuordnung nicht einfach über die gemessenen Winkel erfolgen. Um dieses Problem zu lösen, und trotzdem die aufgenommenen Daten auf die Lampenleistung normieren zu können, gibt es mehrere Lösungen. Eine Möglichkeit ist es, die Daten in Bins einzuteilen und diesen gebinneten Datensatz dann auszuwerten. Bei dieser Methode stellt sich allerdings die Frage, wie hier die Binsgrenzen zu wählen sind, sodass weder ein Großteil der Informationen verloren geht, noch einige Bins auf Grund der geringen Menge an Daten unbesetzt bleiben. Ein sinnvolles Binning der Daten wäre demnach nur bei deutlich mehr Datensätzen möglich.

Als Alternativlösung wurde ein Daten-Merge vorgenommen, welcher aus zwei Datensätzen mit leicht unterschiedlichen Winkeln einen Datensatz zu gleichen Winkeln erstellt. Am Beispiel der Tupel aus Winkel und Transmission (ϕ_1, T_1) aus Messreihe 1 und den Tupeln (ϕ_2, T_2) aus Messreihe 2:

Zunächst werden alle Winkel ϕ_1 und ϕ_2 in eine Liste gefüllt und Dopplungen gelöscht, diese Liste enthält nun also mehr Winkel als in einer der beiden Messreihen einzeln aufgenommen wurden. Nun wird zu jedem Winkel in der Liste in den Datentupeln aus Messreihe 1 und 2 nach dem Winkel der besten Übereinstimmung gesucht und die dazugehörigen Werte T_1 und T_2 zwei weiteren Listen hinzugefügt. Man erhält nun also drei Listen, mit denen sich jedem gemessenen Winkel eine Transmission aus Messung 1 und eine aus Messung 2 zugeordnet wird. Auch mit dieser Methode werden die Daten verunreinigt, jedoch werden nicht Datenpunkte zusammengefasst, sondern neue Daten generiert. Bei jeweils zwei Messreihen ist diese Verunreinigung noch vertretbar, da die Winkel der Messreihen auch nahezu die selben sind. Für mehr Datensätze, wie man es hätte, wenn man auch noch den Untergrund für jede Messreihe betrachten würde, kämen aber noch mehr generierte Daten dazu und jegliche Bereinigung der Daten vom Untergrund wäre allein schon auf Grund der Wahl der Methode nichtig.

Normierung der Daten auf die Lampenleistung Nun wurden die Messdaten für Transmission T_2 und Absorption A_2 aus Messreihe 2 für die weitere Auswertung mit der Lampenleistung A_1 aus Messreihe 1 verrechnet wurden:

$$\begin{aligned}\mathfrak{T} &= \frac{T_2}{A_1} \\ \mathfrak{A} &= \frac{A_2}{A_1}.\end{aligned}\tag{9}$$

Um die Fehler auf normierte Transmission und Reflexion bestimmen zu können, müssen zunächst Fehler auf die einzelnen Größen ermittelt werden.

Da aus der graphischen Auswertung von Abb. 1 kein Fehler entnommen wurde und erkannt wurde, dass der Fehler auf gemessene Absorption und Transmission nicht winkelabhängig ist, wurden Messungen von Transmission und Absorption ohne Veränderung des Winkels durchgeführt. Aus Messreihe 3 und Messreihe 5 wurde jeweils die Standardabweichung der Messwerte bestimmt und als weiterer Fehler verwendet (hier für Germanium angegeben):

$$\begin{aligned}s_T &= 0,009 \text{ V} \\ s_A &= 0,03 \text{ V}.\end{aligned}\tag{10}$$

Mit diesen Werten wurden nun Fehler auf normierte Transmission und Absorption mit gausscher Fehlerfortpflanzung mit

$$\begin{aligned} s_{\mathfrak{T}} &= \sqrt{\left(\frac{s_T}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{s_A T_2}{A_1^2}\right)^2} \\ s_{\mathfrak{A}} &= \sqrt{\left(\frac{s_A}{A_1}\right)^2 + \left(\frac{s_A A_2}{A_1^2}\right)^2} \end{aligned} \quad (11)$$

bestimmt.

Auftragung der Daten und Bestimmung der Bandlücke Die normierten Daten wurden nun gegen den Winkel aufgetragen. in [Quelle 1] wurden nun zwei verschiedene

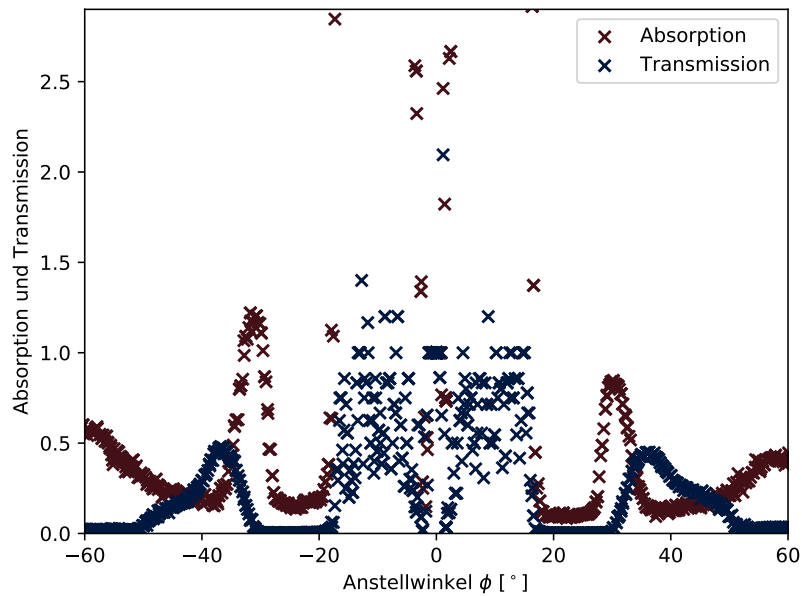


Abbildung 2: Auftragung der Absorption und Transmission gegen den Winkel

Methoden zur Auswertung der Daten aus Abb. 2 vorgeschlagen. Da ein Fit über die Daten doch recht kompliziert und nicht vollständig nachvollziehbar erscheint, wurden die Daten nach der zweiten Methode ausgewertet.

Zur Bestimmung der Bandlücke werden beide Seiten des Plots einzeln graphisch ausgewertet. Zunächst wird der Wertebereich der Winkel auf einen sinnvollen Bereich eingeschränkt. Um die Bandlücke zu Bestimmen werden, wie in Abb. 3 dargestellt lineare Anpassungen der Daten durchgeführt. Die dafür genutzten Wertepaare wurden händisch ausgewählt und ein linearer Fit mit `scipy.optimize.curve_fit` durchgeführt. Des Weiteren wurde das Maximum der Transmissionskurve und das Minimum der Absorptionskurve (jeweils in schwarz durchgezogen eingezeichnet) bestimmt. Die Schnittpunkte der linearen Fits mit den Extrema ergeben nun zwei Winkel, von denen der Mittelwert bestimmt wird. Mit

$$E(\phi) = \frac{hc}{2d \sin \phi \cos \psi} \quad (12)$$

wurde nun die Energie zu dem oben ermittelten Winkel bestimmt.

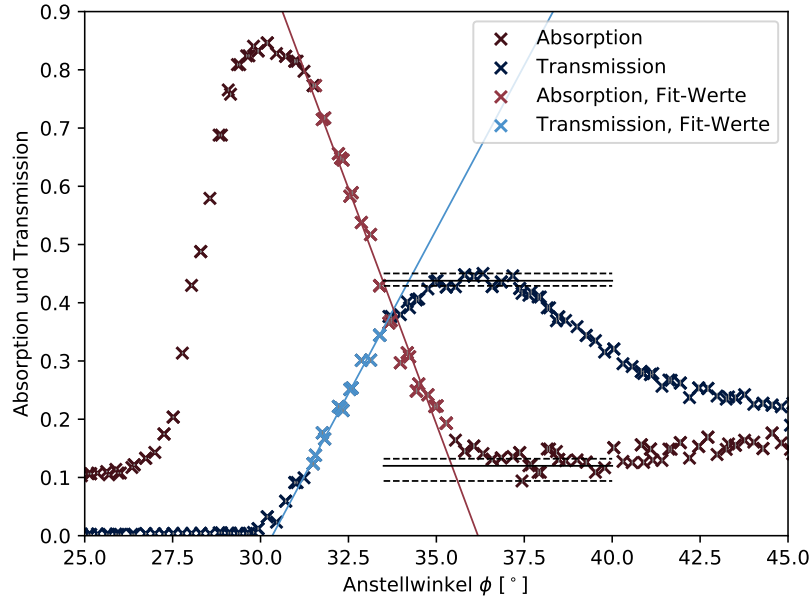


Abbildung 3: Lineare Fits und Bestimmung von Maxima und Minima, Beispielhafte Darstellung der Auswertung mit Hilfe der Messdaten von Germanium im positiven Winkelbereich

Der Fehler auf die Größe $E(\phi)$ ergibt sich nun aus zwei Parametern. Zum einen wurde der Fehler des Fits mit gausscher Fehlerfortplanzung mit

$$s_{\text{Schnittpunkt}}^2 = \left(\frac{s_a}{b}\right)^2 + \left(\frac{(\text{Extremum} - a)s_b}{b^2}\right)^2 + 2\frac{1}{b} \frac{(\text{Extremum} - a)}{b^2} \cdot \text{cov}(a, b) \quad (13)$$

bestimmt und dann der Fehler auf den Mittelwert der Schnittpunkte bestimmt und weitergenutzt, zum anderen wurden für alle genutzten Extrema jeweils zwei maximal abweichende Werte generiert.

Für diese neuen Extrema wurden nun Schnittpunkte mit den gefitteten Geraden bestimmt, wobei jeweils so Extrema gewählt wurden, dass man einmal den maximalen und einmal den minimalen Abstand der Schnittpunkte zueinander erhält. Es wurden also ein maximal kleiner und ein maximal großer Schnittwinkel generiert. Die Differenz dieser Winkel wurde nun halbiert und als weiterer Fehler genutzt. Aus diesem, eher graphisch aus dem Plot bestimmten Fehler wurde nun auch mit der Umrechnung aus Gleichung (12) ein Fehler auf die Energie bestimmt.

Um nun einen entgültigen Fehler auf die Energie dieser einen Seite der vorhandenen Daten zu bestimmen wurden nun der Fehler aus den Fitdaten und der graphisch bestimmte Fehler nach Gauss quadratisch addiert:

$$s_{E_1} = \sqrt{s_{\text{Fit}}^2 + s_{\text{graph.}}^2} \quad (14)$$

Dieses Verfahren wurde analog für die linke Seite des Plots durchgeführt und ebenfalls eine Energie E_2 bestimmt. Um einen kurzen Überblick über die bis hier ermittelten Werte und Fehler zu geben, sind diese in Tabelle 2 aufgeführt.

Der entgültige ermittelte Wert für die Bandlücke ergibt sich nun aus

$$E_{\text{band}} = \frac{E_1 + E_2}{2} \quad (15)$$

Tabelle 2: genutzte und ermittelte Werte zur Bestimmung der Bandlücke bei Silizium

Messgröße	negativer Winkelbereich	positiver Winkelbereich
E_{gap} [eV]	-0,6446	0,6569
s_{Extrema}	0,0009	0,0010
$s_{\text{Schnittpunkt}}$	0,0008	0,0008

mit einem nach Gauss ermittelten Fehler. Dieses Verfahren des Teilen des Plots in zwei Hälften hat den Vorteil, dass ein eventuelles Offset in x-Richtung durch die Bildung des Mittelwerts entfällt.

Mit dieser Methode wurde für die Energiedifferenz in der Bandlücke von Germanium ein Wert von

$$E_{\text{gap, ger}} = (0,6507 \pm 0,0018) \text{ eV} \quad (16)$$

ermittelt.

Bestimmung der Bandlücke bei Silizium Die Auswertung, sowie die Bestimmung der Fehler erfolgt bei Silizium analog und die genutzten Graphen sind in Anhang A nachzusehen. Mit den Werten aus Tabelle 3 ergibt sich dann über Mittelwertbildung der

Tabelle 3: genutzte und ermittelte Werte zur Bestimmung der Bandlücke bei Silizium

Messgröße	negativer Winkelbereich	positiver Winkelbereich
E_{gap} [eV]	-1,0729	1,0827
s_{Extrema}	0,000 12	0,0015
$s_{\text{Schnittpunkt}}$	0,0015	0,0012
Fehler auf die Lampe:	$s_T = 0,03 \text{ V}$	
Fehler auf die Probe:	$s_A = 0,009 \text{ V}$	

Messungen im positiven und negativen Winkelbereich und einem über gausschen Fehlerfortpflanzung ermittelten Fehler

$$E_{\text{gap, si}} = (1,0778 \pm 0,0019) \text{ eV} \quad (17)$$

für die Bandlückenenergie bei Silizium.

3.2 Beweglichkeit, Diffusion & Lebensdauer von Ladungsträgern im Halbleiter

Im Folgenden wird die Auswertung der Messdaten dokumentiert. Es wurden zwei Messreihen aufgenommen. In der ersten Messreihe wurde der Abstand von Nadel und Lichtleiter konstant gehalten und die am Halbleiter angelegte Spannung variiert. Die zweite Messreihe wurde aufgenommen während man die angelegte Spannung konstant hielt und den Nadel-Lichtleiter- Abstand variierte.

3.2.1 Gauß-Fits

In den folgenden Abschnitten werden zur Analyse der Daten Gauß-Fits verwendet. Die Fits haben die Form

$$f(x) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left\{\left(\frac{-(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)\right\} + C \quad (18)$$

wobei A mit der Fläche unter der Gaußkurve assoziiert werden kann (folgt aus Normiertheit der Funktion ohne A) und μ den Lage- und σ den Streuparameter der Gaußfunktion beschreiben. Der hinzugefügte Parameter C soll einen guten Fit gewährleisten auch wenn die Daten nicht gegen die null konvergieren, sprich ein Offset in der Messung existiert ¹ Für die Fits wurde die Funktion `curve_fit` aus dem Pythonmodul `scipy.optimize` verwendet. Diese Funktion nutzt die Methode der kleinsten Quadrate zur Parameterschätzung.

3.2.2 Quantifizierung der Signalschwankung

Während der Messung war ein starkes Schwanken des Signals sichtbar, sodass vorab vier Testmessungen durchgeführt wurden, um einen zusätzlichen Schwankungsfehler zu ermitteln. Diese Testmessungen erfolgten bei konstanter Spannung und konstantem Nadel-Lichtleiter- Abstand und bei einer Einstellung bei der ein Signal von mittlerer Güte (im Vergleich zum restlichen Messbereich) sichtbar war. Um die Schwankung zu visualisieren sind die Daten und die dazu gehörigen Gauß-Fits in Abb. 4 dargestellt. Die Parameter der Gauß-Fits der vier Messungen wurden gemittelt um anschließend die erwartungstreue Standardabweichung der Parameter von diesem Mittelwert zu berechnen. Der so erhaltene Fehler wird, wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, quadratisch auf den Fitfehler des Gauß-Fits addiert um so eine bessere Abschätzung des Fehlers auf die Parameter zu gewährleisten. Die so ermittelten Schwankungsfehler auf die Fitparameter der folgenden Messreihen betragen

$$s_C^{\text{Schwankung}} = 0,011 \text{ V} \quad (19)$$

$$s_A^{\text{Schwankung}} = 3 \cdot 10^{-9} \text{ V s} \quad (20)$$

$$s_\mu^{\text{Schwankung}} = 4 \cdot 10^{-8} \text{ s} \quad (21)$$

$$s_\sigma^{\text{Schwankung}} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ s.} \quad (22)$$

3.2.3 Auswertung der Messreihe bei konstanter Lichtleiterposition

Bei dieser Messreihe wurde die Lichtleiterposition bei konstant $d = (4,10 \pm 0,25) \text{ mm}$ dieser Wert ergibt sich aus dem Offset der am Versuch angebrachten Skala von 2,1 mm und dem an der Skala abgelesenen Wert 2 mm und einem geschätzten Fehler.

¹Es wurde trotzdem versucht mit Hilfe der Offsetspannung die Grundlinie des Signals auf die Nulllinie des Oszilloskops zu stellen.

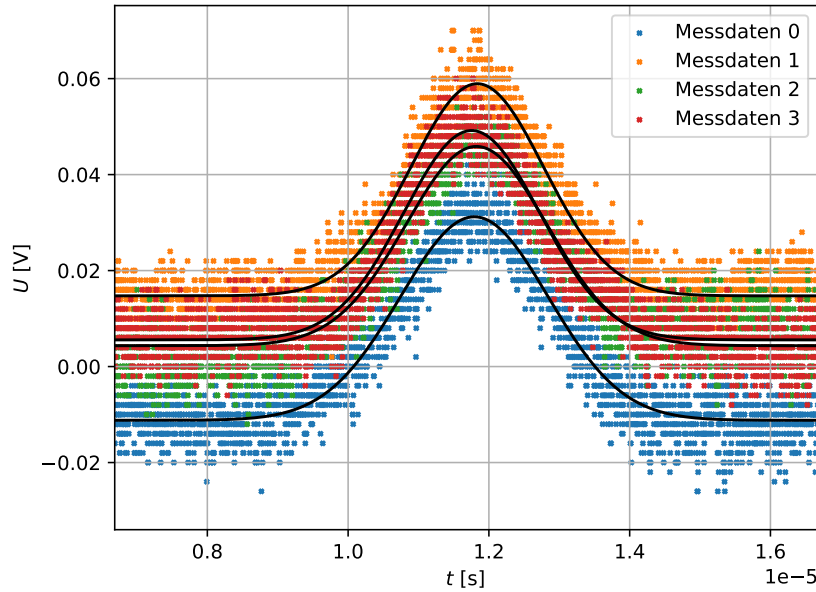


Abbildung 4: Darstellung der zur Veranschaulichung der Signalschwankung aufgenommenen Daten. Die Abbildung ist lediglich zur Veranschaulichung gedacht daher wurde der Übersichtlichkeit zu Gunsten auf eine eindeutige Zuordnung von Datensatz zu Gauß-Fit verzichtet.

Nun wurden für verschiedene Spannungen Signale aufgenommen. Die so erhaltenen Daten wurden geplottet und ein Gauß-Fit berechnet (Siehe Abschnitt 3.2.1). Die Plots mit den Fits sind im Anhang einzusehen. In Abb. 5 ist beispielhaft eine Messung dargestellt.

Die Werte der so berechneten Parameter sind für jede verwendete Spannung in Tabelle 4 aufgelistet. Für die Fehler auf die Parameter wurden, zusätzlich zu den Fehlern welche die Fit-Funktion berechnet hat, auch die Fehler welche die Schwankungsmessung ergab in folgender Weise miteinander berechnet:

$$s_{\text{Param.}} = \sqrt{s_{\text{Fit}}^2 + s_{\text{Schwankung}}^2}. \quad (23)$$

Im Vergleich mit dem theoretisch hergeleiteten Verhalten der Ladungsträger in Halbleitern (Siehe Gleichung (4)) lässt sich erkennen, dass die folgenden Zusammenhänge Geltung haben

$$x_c(t) = \mu_n E t, \quad A(t) = K \exp\left\{\left(-\frac{t}{\tau_n}\right)\right\}, \quad \sigma(t) = \sqrt{2D_n t} \quad (24)$$

Es wurde nun zuerst die Beweglichkeit der Ladungsträger im Halbleiter bestimmt hierzu wurde der Zusammenhang

$$\frac{x_c}{E} = \mu_n t \implies \frac{x_c d}{U} = \mu_n t \quad (25)$$

verwendet. Es wurde Gleichung (25) entsprechend $x_c d / U$ gegen t aufgetragen, wobei die Zeit t hierbei dem Lageparameter des Gauß-Fits entspricht, welcher bei der jeweiligen Spannung U aufgenommen wurde. Über die so gepaarten Daten wurde eine gewichtete

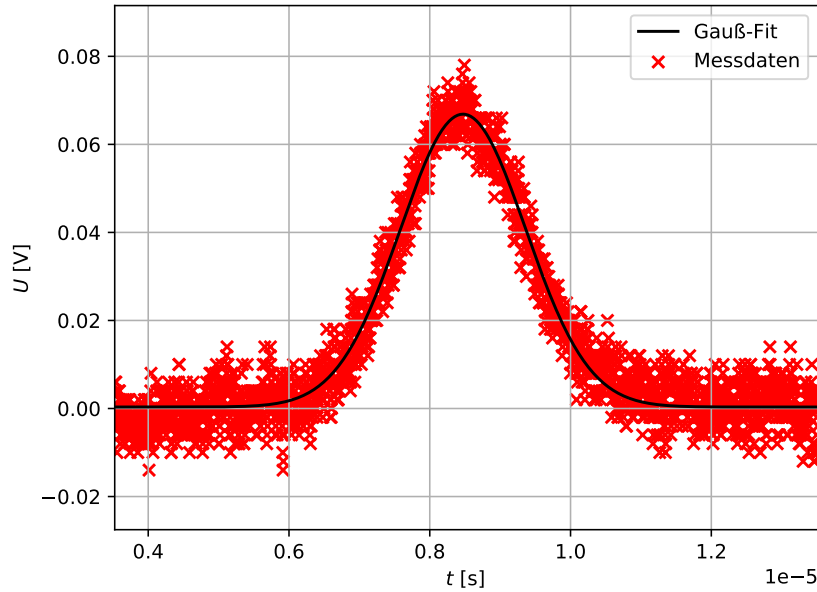


Abbildung 5: Darstellung der Messdaten der Messung 11 bei (44 ± 1) V angelegter Spannung

Tabelle 4: In dieser Tabelle sind die berechneten Fit-Parameter für jede der Messungen bei konstanter Position des Lichtleiters aufgelistet.

Messung	Spannung [V]	C [mV]	A [nV s]	μ [μ s]	σ [μ s]
1	29 ± 1	-4 ± 11	80 ± 4	$11,91 \pm 0,04$	$1,54 \pm 0,05$
2	32 ± 1	3 ± 11	92 ± 4	$10,96 \pm 0,04$	$1,40 \pm 0,05$
3	33 ± 1	3 ± 11	97 ± 4	$10,54 \pm 0,04$	$1,32 \pm 0,05$
4	35 ± 1	0 ± 11	117 ± 4	$9,95 \pm 0,04$	$1,26 \pm 0,05$
5	37 ± 1	15 ± 11	116 ± 4	$9,70 \pm 0,04$	$1,15 \pm 0,05$
6	38 ± 1	7 ± 11	124 ± 4	$9,41 \pm 0,04$	$1,01 \pm 0,05$
7	39 ± 1	-9 ± 11	139 ± 4	$9,07 \pm 0,04$	$1,02 \pm 0,05$
8	40 ± 1	2 ± 11	145 ± 4	$8,98 \pm 0,04$	$1,03 \pm 0,05$
9	41 ± 1	1 ± 11	125 ± 4	$8,72 \pm 0,04$	$0,93 \pm 0,05$
10	43 ± 1	1 ± 11	141 ± 4	$8,56 \pm 0,04$	$0,92 \pm 0,05$
11	44 ± 1	0 ± 11	149 ± 3	$8,47 \pm 0,04$	$0,89 \pm 0,05$
12	45 ± 1	4 ± 11	157 ± 3	$8,13 \pm 0,04$	$0,84 \pm 0,05$
13	46 ± 1	-4 ± 11	164 ± 3	$7,96 \pm 0,04$	$0,82 \pm 0,05$
14	47 ± 1	8 ± 11	177 ± 3	$7,87 \pm 0,04$	$0,86 \pm 0,05$

lineare Regression durchgeführt, wie in Abb. 6 dargestellt. Die dem Fit übergebenen Fehler auf die y -Werte wurden mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung bestimmt.

Die so erhaltene Beweglichkeit beträgt

$$\mu_n = (4120 \pm 50) \frac{\text{cm}^2}{\text{V s}}. \quad (26)$$

Mit Hilfe der Beweglichkeit kann die Diffusionskonstante auf ähnlichem Wege bestimmt werden. Die aus den Messdaten bestimmten zeitlichen Streuungsparameter müssen nun mit der Geschwindigkeit $\mu_n E$ multipliziert werden um so den räumlichen Streuungsparameter zu berechnen. Es gilt der Zusammenhang

$$\sigma(t) = \sqrt{2D_n t} \implies \sigma(t)^2 = 2D_n t \quad (27)$$

Dieser Zusammenhang wurde für eine gewichtete lineare Regression genutzt um somit den Streuparameter zu ermitteln. Die Fehler auf die erhaltenen y -Werte $(\mu_n E \sigma_{\text{Fit}})^2$ wurden mit gaußscher Fehlerfortpflanzung ermittelt. Die Datenpaare und die gewichtete lineare Regression sind in Abb. 7 dargestellt.

Die so erhaltene Diffusionskonstante beträgt

$$D_n = (146 \pm 27) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}. \quad (28)$$

Zur Bestimmung der Lebensdauer der Elektronen im Halbleiter wurden die aus dem Gauß-Fit bestimmten Flächen gegen die auf gleicher Weise bestimmten Lageparameter aufgetragen und es wurde ein gewichteter exponential Fit durchgeführt. Der Fit und die Wertepaare sind in Abb. 8 dargestellt.

Die so erhaltene Lebensdauer beträgt

$$\tau_n = (4 \pm 2) \mu\text{s}. \quad (29)$$

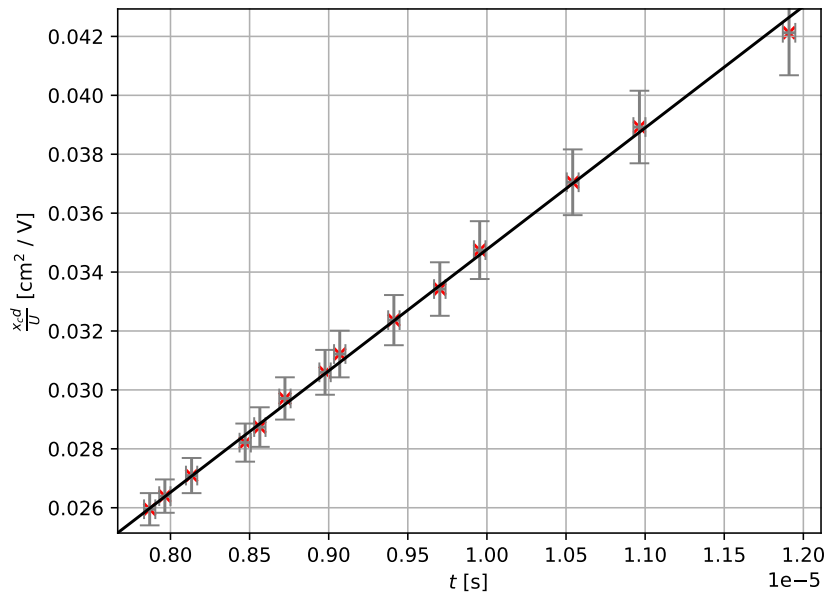


Abbildung 6: In dieser Abbildung sind die Werte für $x_c d/U$ gegen die ermittelten Lageparameter der Gauß-Fits aufgetragen um mit Hilfe einer linearen Regression (schwarz) die Beweglichkeit μ_n zu bestimmen.

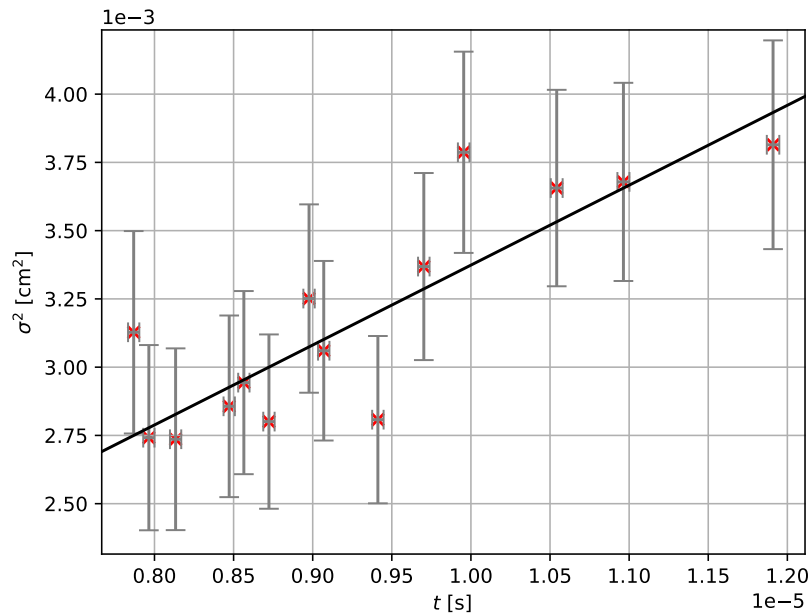


Abbildung 7: In dieser Abbildung sind die Werte $(\mu_n E \sigma_{\text{Fit}})^2$ gegen die Lage- Parameter der Gauß-Fits aufgetragen. Es ist außerdem zur Bestimmung der Diffusionskonstanten eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt worden.

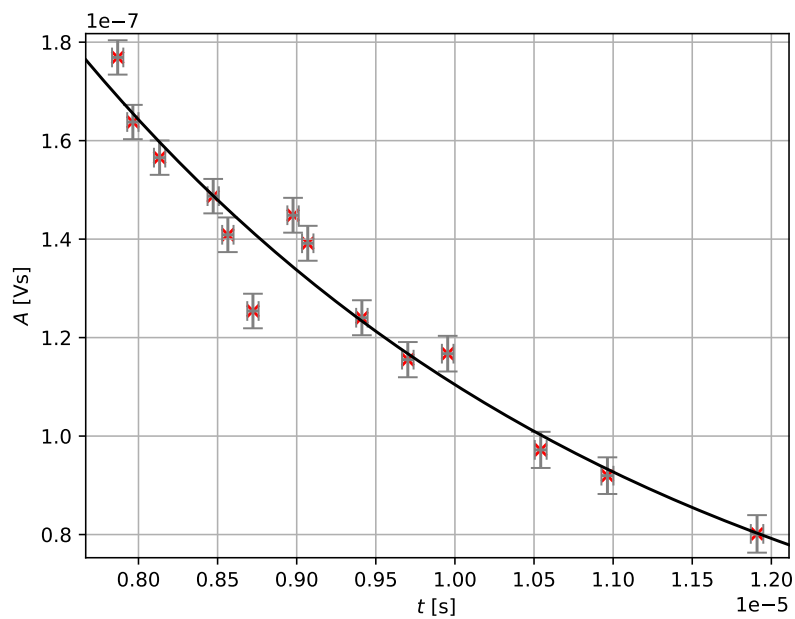


Abbildung 8: In dieser Abbildung sind die Flächen der Gaußfits gegen deren Lageparameter geplottet um somit die Lebensdauer der Elektronen zu bestimmen. Für diese Datenpaare wurde ein exponential Fit (schwarz) durchgeführt.

3.2.4 Auswertung der Messreihe bei konstanter Spannung

Bei dieser Messreihe wurde die angelegte Spannung konstant bei $(48 \pm 1) \text{ V}$ gehalten. Die Position wurde jedoch verändert. Für die so erhaltenen Daten wurden Gauß-Fits durchgeführt. Die Parameter der Fits und die Abstände bei denen die dazugehörigen Daten aufgenommen wurden sind in Tabelle 5 aufgelistet. Die Plots mit den Fits sind im Anhang einzusehen, wobei hier in Abb. 9 eine Messung exemplarisch dargestellt ist. Die Auswertung dieser Messreihe erfolgt prinzipiell analog zu der vorhergegangenen. Die Fehler aus der Streuungsmessung wurden quadratisch auf die Fit-Fehler summiert und die Wurzel daraus als Fehler verwendet. Aus den erhaltenen Parametern wurden erneut die Zusammenhänge aus Gleichung (24) genutzt, während die Fehler auf die y -Werte mit Hilfe von Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet wurden.

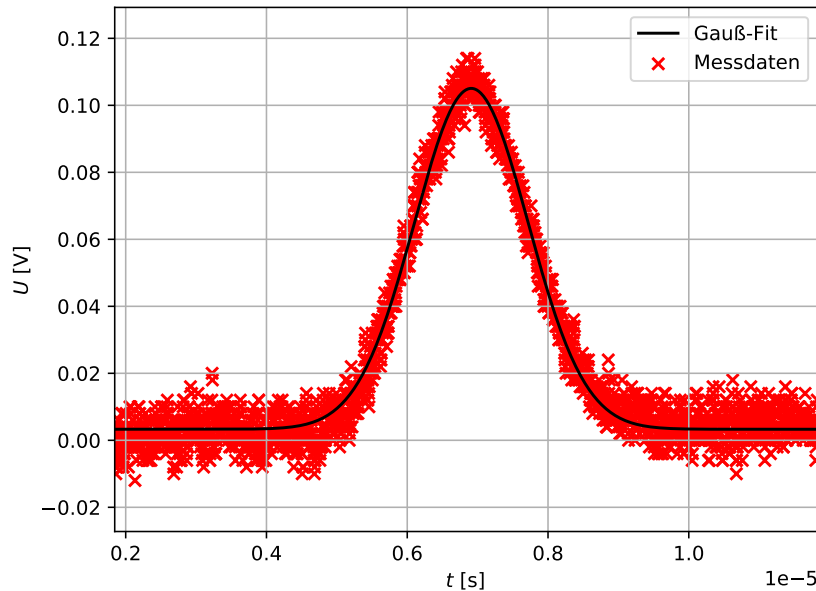


Abbildung 9: Darstellung der Messdaten der Messung 9 bei dem Abstand $(3,60 \pm 0,25) \text{ mm}$.

Tabelle 5: In dieser Tabelle sind die berechneten Fit-Parameter für jede der Messungen bei konstanter Spannung an der Halbleiterprobe

Messung	Abstand [mm]	C [mV]	A [nV s]	μ [μs]	σ [μs]
1	$9,35 \pm 0,25$	3 ± 11	80 ± 4	$18,87 \pm 0,04$	$1,75 \pm 0,06$
2	$8,10 \pm 0,25$	19 ± 11	57 ± 4	$18,15 \pm 0,04$	$-1,26 \pm 0,05$
3	$7,10 \pm 0,25$	9 ± 11	68 ± 4	$16,05 \pm 0,04$	$1,21 \pm 0,05$
4	$6,10 \pm 0,25$	5 ± 11	85 ± 4	$13,99 \pm 0,04$	$1,13 \pm 0,05$
5	$5,60 \pm 0,25$	3 ± 11	121 ± 4	$12,24 \pm 0,04$	$1,11 \pm 0,05$
6	$5,10 \pm 0,25$	-1 ± 11	113 ± 4	$10,94 \pm 0,04$	$0,95 \pm 0,05$
7	$4,60 \pm 0,25$	6 ± 11	134 ± 3	$10,00 \pm 0,04$	$0,90 \pm 0,05$
8	$4,10 \pm 0,25$	4 ± 11	160 ± 4	$8,96 \pm 0,04$	$0,85 \pm 0,05$
9	$3,60 \pm 0,25$	4 ± 11	173 ± 3	$8,04 \pm 0,04$	$0,85 \pm 0,05$
10	$3,10 \pm 0,25$	3 ± 11	206 ± 3	$6,91 \pm 0,04$	$0,81 \pm 0,05$
11	$2,60 \pm 0,25$	3 ± 11	239 ± 3	$5,86 \pm 0,04$	$0,72 \pm 0,05$
12	$2,10 \pm 0,25$	4 ± 11	308 ± 3	$4,76 \pm 0,04$	$0,65 \pm 0,05$

Es wurde erneut erst die Beweglichkeit μ_n bestimmt um damit dann die Geschwindigkeit

der Ladungsträger zu berechnen um den zeitlichen Streuparameter in den räumlichen Streuparameter zu überführen um damit dann die Diffusionskonstante zu bestimmen. Der Plot für die Beweglichkeit ist in Abb. 10 zu sehen. Für die Beweglichkeit wurde der Wert

$$\mu_n = (2900 \pm 100) \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \quad (30)$$

bestimmt. Der Plot für die Diffusion ist in Abb. 11 zu sehen, auch hier wurde der Zusammenhang für den Fit linearisiert. Für die Diffusionskonstante wurde der Wert

$$D_n = (112 \pm 14) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \quad (31)$$

bestimmt. Zuletzt wurde auch aus dieser Messreihe die mittlere Lebensdauer bestimmt indem die Flächen der Gauß-Fits gegen die Lageparameter aufgetragen wurden und ein exponentieller Fit berechnet wurde. Der Plot ist in Abb. 12 dargestellt. Für die mittlere Lebensdauer wurde der Wert

$$\tau_n = (4,6 \pm 0,5) \mu\text{s} \quad (32)$$

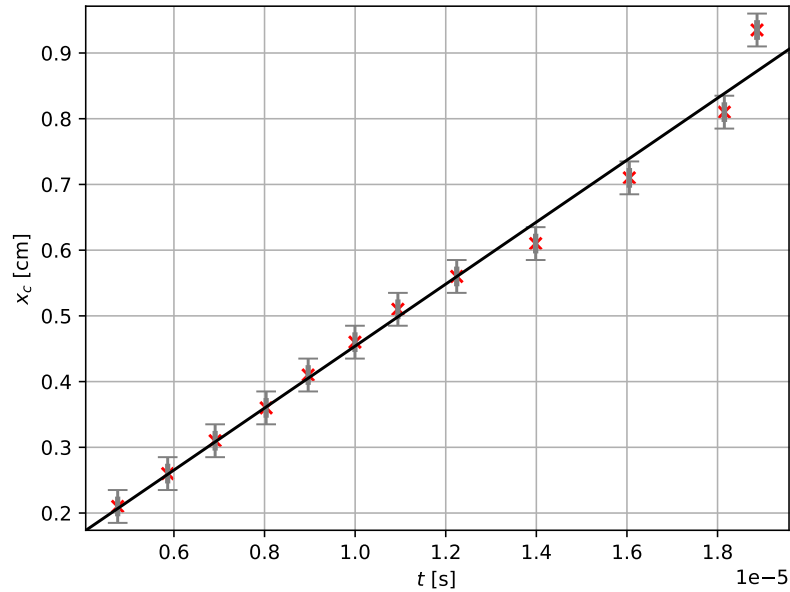


Abbildung 10: In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der Beweglichkeit der Ladungsträger in der Halbleiterprobe und der Fit (schwarz) eingezeichnet

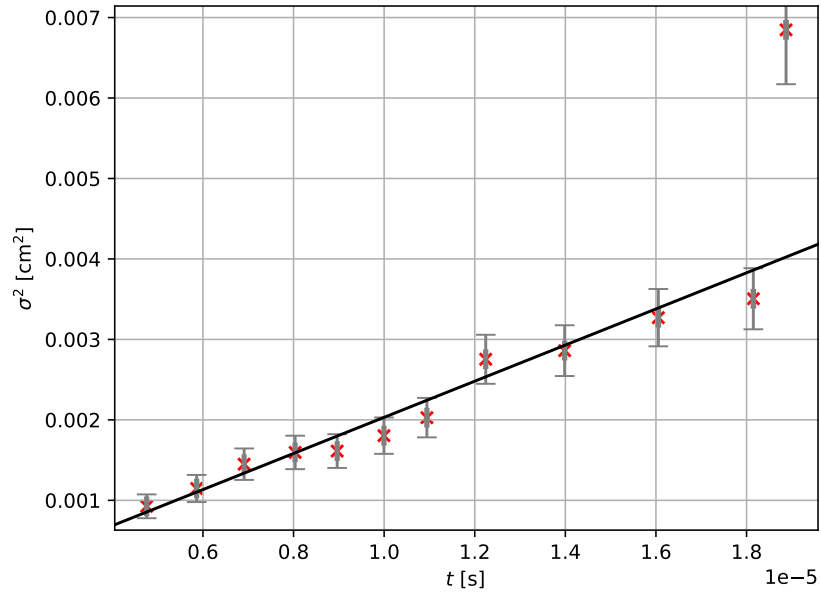


Abbildung 11: In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der Diffusionskonstanten und der Fit (schwarz) eingezeichnet

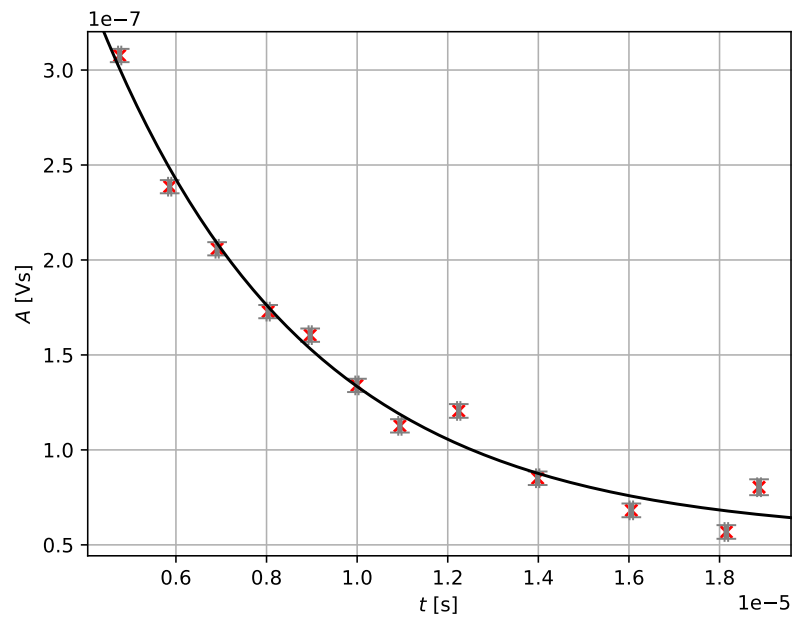


Abbildung 12: In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer der Ladungsträger in der Halbleiterprobe und der Fit (schwarz) eingezeichnet

3.3 Halbleiterdetektoren

Zuletzt wurden zwei radioaktive Proben mit zwei verschiedenen Halbleiterdetektoren untersucht. Für die Halbleiterdetektoren wurde dann mit Hilfe von bekannten Peaks der radioaktiven Proben eine Eichgerade bestimmt. Dies erfolgte mit Hilfe von Gauß-Fits. Für den Silicium-Detektor und der Americium Probe ist einmal exemplarisch der gefitete Peak in Abb. 13 abgebildet, aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die restlichen Plots im Anhang zu finden. Vorher wurde jedoch die pro Detektor einmal durchgeführte Untergrundmessung aus den Daten korrigiert. Dies wurde durch

$$N_{\text{kor.}} = N_{\text{gem.}} - \frac{t_{\text{gem.}}}{t_{\text{unter.}}} N_{\text{unter.}} \quad (33)$$

Als Fehler wurde dem Zählexperiment entsprechend der jeweilige Poisson-Fehler berech-

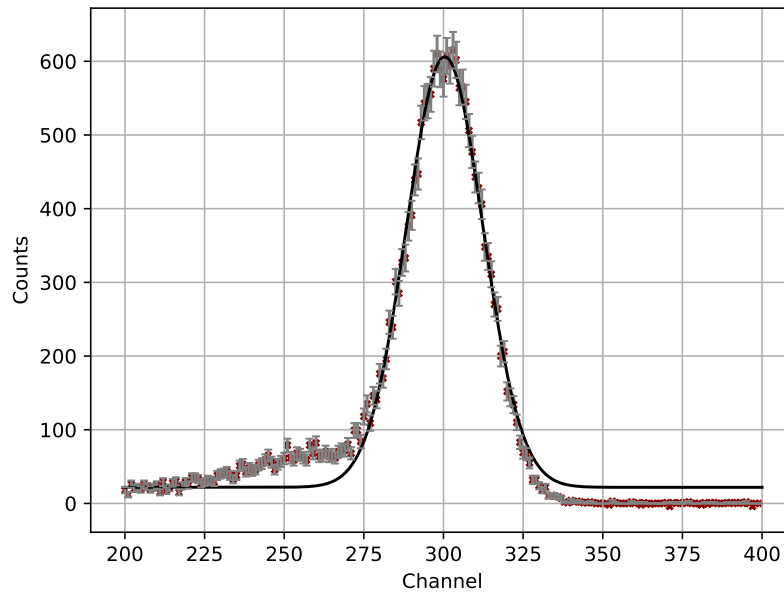


Abbildung 13: In dieser Abbildung ist der bekannte Peak der Americium Probe dargestellt. Zur Bestimmung des Channels welcher der gegebenen Energie von 59,5 keV entspricht wurde ein Gauß-Fit (schwarz) durchgeführt

net und eingezeichnet. In Tabelle 6 sind die durch die Gauß-Fits bestimmten Parameter aufgelistet. Mit Hilfe der Parameter aus Tabelle 6 wurden nun für den Si-Detektor und

Tabelle 6: In dieser Tabelle sind die durch die Gauß-Fits ermittelten Parameter aufgelistet. Die Fehler folgen allein aus dem vom Fit berechneten Fehler.

Messung	C	A	μ	σ
Am [59,5 keV] mit SI	22 ± 2	$17\,560 \pm 230$	$300,39 \pm 0,14$	$11,99 \pm 0,16$
Co [112,06 keV] mit SI	41 ± 15	1900 ± 1400	$432,9 \pm 1,2$	21 ± 7
Co [136,47 keV] mit SI	$15,0 \pm 0,9$	7080 ± 90	$620,05 \pm 0,13$	$11,81 \pm 0,15$
Am [59,5 keV] mit CdTe	-220 ± 70	$196\,000 \pm 5000$	$314,67 \pm 0,10$	$12,6 \pm 0,2$
Co [122,06 keV] mit CdTe	-80 ± 90	$225\,000 \pm 7000$	$652,04 \pm 0,17$	$13,9 \pm 0,3$
Co [136,47 keV] mit CdTe	0 ± 4	$15\,800 \pm 300$	$732,6 \pm 0,2$	$11,7 \pm 0,2$

für den CdTe-Detektor Eichgeraden bestimmt, indem die bekannten Energien gegen die

Lageparameter der Fits aufgetragen wurden und anschließend eine gewichtete lineare Regression durchgeführt wurde. Die Plots der beiden Geraden und der Datenpaare sind in Abb. 14 und Abb. 15 dargestellt.

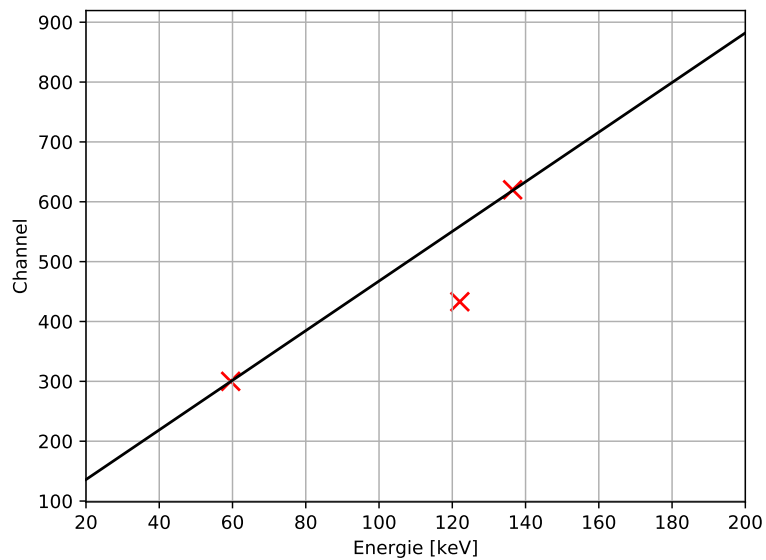


Abbildung 14: In dieser Abbildung sind die Datenpaare für den Silicium-Detektor dargestellt. Zur Bestimmung der Eichgeraden wurde eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt.

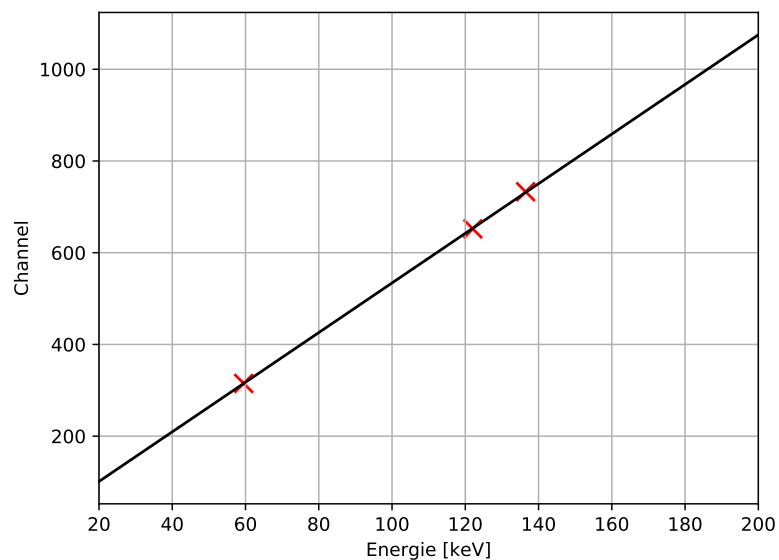


Abbildung 15: In dieser Abbildung sind die Datenpaare für den CdTe-Detektor dargestellt. Zur Bestimmung der Eichgeraden wurde eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt.

Die so erhaltenen Geradengleichungen für die Eichgeraden sind

$$\text{Silicium-Detektor: Channel} = (4,15 \pm 0,27) \frac{1}{\text{keV}} \cdot E + (53 \pm 29) \quad (34)$$

$$\text{CdTe-Detektor: Channel} = (5,411 \pm 0,028) \frac{1}{\text{keV}} \cdot E - (7,1 \pm 2,6). \quad (35)$$

Anschließend sollten noch für die drei Energien die Absorbtionsverhältnisse ausgerechnet werden. Dies geschieht unter Nutzung der Rechenvorschrift

$$\frac{\text{Abs}_{\text{Si}}}{\text{Abs}_{\text{CdTe}}} = \frac{A_{\text{Si}}/a_{\text{Si}}}{A_{\text{CdTe}}/a_{\text{CdTe}}}, \quad (36)$$

wobei a_i die Fläche des jeweiligen Halbleiterdetektors darstellt. Die Fehler wurden mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 dargestellt. betrachtet man jedoch Abb. 14 so fällt auch, dass einer der Werte sehr aus der Reihe

Tabelle 7: Die Verhältnisse der Absorbtionswahrscheinlichkeiten der beiden Halbleiterdetektoren für die drei bekannten Energien.

Energie [keV]	Verhältnis
59,5	$0,0206 \pm 0,0005$
112,06	$0,0020 \pm 0,0013$
136,47	$0,103 \pm 0,003$

fällt. Daher ist davon auszugehen, dass das Verhältnis für 112,06 keV nicht gut sein wird. Zuletzt sollte noch die Relative Auflösung für einen Peak berechnet werden, hier wurde der Americium-Peak gewählt, da dieser bei beiden Detektoren gut gemessen wurde. Die relative Auflösung wurde nach der Vorschrift

$$RER = \frac{2,35\sigma_{\text{mEich}}}{E} \quad (37)$$

berechnet, wobei m_{Eich} die inverse Steigung der Eichgeraden entspricht um aus dem Streuparameter der Channel einen Streuparameter der Energie zu berechnen. Die Berechnung des Fehlers erfolgte mit Gaußscher Fehlerfortpflanzung. Die berechneten Werte sind

$$\text{Si-Detektor: } RER = 0,114 \pm 0,008 \quad (38)$$

$$\text{CdTe-Detektor: } RER = 0,0919 \pm 0,0015 \quad (39)$$

4 Diskussion der Ergebnisse

4.1 Bestimmung der Bandlücke von Germanium und Silizium

Die Bandlücken von Germanium und Silizium konnten zu

$$\begin{aligned} E_{\text{gap, ger}} &= (0,6507 \pm 0,0018) \text{ eV} \\ E_{\text{gap, si}} &= (1,0778 \pm 0,0019) \text{ eV} \end{aligned} \quad (40)$$

bestimmt werden. Die Literaturwerte [Quelle 3] für die beiden Bandlücken liegen bei:

$$\begin{aligned} E_{\text{lit, ger}} &= 0,67 \text{ eV} \\ E_{\text{lit, si}} &= 1,14 \text{ eV}. \end{aligned} \quad (41)$$

Die von uns ermittelten Werte zeigen eine zufriedenstellende Genauigkeit und auch der Fehler liegt in einer akzeptablen Größenordnung.

Obwohl sich mit dem genutzten Verfahren sehr gute Werte ermitteln lassen, ist das genutzte Auswerteverfahren sehr anfällig. Wie bereits in der Analyse versucht wurde zu zeigen, finden sehr viele Auswertungsschritte durch optisches Anpassen der Fitbereiche statt. Es wurde versucht dies möglichst weit mit in die Fehlerrechnung mit einzubeziehen, jedoch könnten auch noch weitere, rein durch das Auswerteverfahren entstandene Fehler mit einbezogen werden. Davon wurde im Rahmen dieser Auswertung auf Grund des straffen Zeitplans verzichtet.

Ein weiterer Makel an dem Versuch ist der relativ labile Aufbau. Besonders die Optimierung des Strahlenganges ist fast unmöglich und liefert schlechtere Signale als ein eigentlich schlechterer Strahlengang.

4.2 Beweglichkeit, Diffusion und Lebensdauer von Ladungsträgern in Germanium

Die Beweglichkeit, Diffusion und Lebensdauer von Ladungsträgern in p-dotiertem Germanium wurden, einem historischen Versuchsaufbau nachempfunden auf zwei unterschiedliche Methoden bestimmt. Die erhaltenen Ergebnisse sind:

Abstandsvariation:

$$\begin{aligned} \mu_n &= (2900 \pm 100) \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ D_n &= (112 \pm 14) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \\ \tau_n &= (4,6 \pm 0,5) \mu\text{s} \end{aligned} \quad (42)$$

Spannungsvariation:

$$\begin{aligned} \mu_n &= (4120 \pm 50) \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ D_n &= (146 \pm 27) \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \\ \tau_n &= (4 \pm 2) \mu\text{s}. \end{aligned}$$

Die in [Quelle 1] gegebenen Literaturwerte liegen bei:

$$\begin{aligned}\mu_{\text{lit.}} &= 3900 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ D_{\text{lit.}} &= 101 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}} \\ \tau_{\text{lit}} &= (45 \pm 2) \mu\text{s}.\end{aligned}\tag{43}$$

Betrachtet man diese Werte, so liegen die von uns ermittelten kaum im richtigen Wertebereich. Lediglich die Diffusionskonstante konnte annähernd sinnvoll bestimmt werden.

Um einen sinnvolleren Vergleichswert heranzuziehen und die erhaltenen Ergebnisse besser einzuordnen, wurde das damals von Shockes, Haynes und Peason veröffentlichte Paper über das Experiment herangezogen. Die mit ihrem Versuchsaufbau erhaltenen Werte sollten Aufschluss über die mögliche Genauigkeit des Experiments geben. Es wurden

$$\begin{aligned}\mu_n &= 2600 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}} \\ D_n &= 45 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\end{aligned}\tag{44}$$

[Quelle 4] entnommen. Betrachtet man nun diese Werte, so lässt sich daraus schließen, dass das Grundgerüst des genutzten experimentellen Aufbaus eventuell auch verbessert werden müsste, um gut Ergebnisse zu erhalten. In jedem Fall überlässt das Experiment dem Studierenden Daten, die sehr viel Feinarbeit beim Fitten der Funktion erfordern, da die Daten zu sehr streuen und rauschen.

Es muss bei diesem Versuch natürlich auch das allgemeine Setting berücksichtigt werden. Die verwendete Halbleiter Probe ist Temperaturschwankungen und einer Atmosphäre ausgesetzt und war vermutlich als sie neu war schon nicht markellos. Defekte in der Kristallstruktur sorgen natürlich für eine veränderte Beweglichkeit der Ladungsträger aber auch die Lebensdauer wird davon beeinflusst. Es lässt sich also allgemein sagen, dass das Experiment nicht unter optimalen Bedingungen stattfindet und somit vermutlich die Literaturwerte auch nicht messbar sind.

4.3 Halbleiterdetektoren

Im letzten Versuchsteil wurden die Eigenschaften zweier Halbleiterdetektoren untersucht. Es handelte sich hierbei um einen Silicium-Detektor und um einen CdTe-Detektor. Es wurde für beide Detektoren das Zerfallsspektrum von Americium und von Cobalt aufgenommen und anschließend aus drei bekannten Energien eine Eichgerade bestimmt. Für die Eichgeraden erhielten wir

$$\begin{aligned}\text{Silicium-Detektor: Channel} &= (4,15 \pm 0,27) \frac{1}{\text{keV}} \cdot E + (53 \pm 29) \\ \text{CdTe-Detektor: Channel} &= (5,411 \pm 0,028) \frac{1}{\text{keV}} \cdot E - (7,1 \pm 2,6).\end{aligned}\tag{45}$$

Es sollte jedoch beachtet werden, dass bei dem Silicium-Detektor einer der drei Punkte nicht besonders gut auf der Gerade liegt. Da der Fehler auf diesen Punkt allerdings deutlich höher ist als der Fehler auf die anderen Punkte wurde er bei der gewichteten linearen Regression kaum berücksichtigt. Außerdem ist es in Frage zu stellen wie genau eine lineare Regression über drei Messpunkte sein kann und die Fehler auf Grund der geringe Stichprobengröße vom Fit unterschätzt wurden.

Anschließend wurden die Absorbtionsverhältnisse der beiden Halbleiterdetektoren bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 8 aufgelistet. Außerdem wurden die relative Auf-

Tabelle 8: Die Verhältnisse der Absorbtionswahrscheinlichkeiten der beiden Halbleiterdetektoren für die drei bekannten Energien.

Energie [keV]	Verhältnis
59,5	$0,0206 \pm 0,0005$
112,06	$0,0020 \pm 0,0013$
136,47	$0,103 \pm 0,003$

lösung des Americium Peaks für beide Detektoren bestimmt. Wir erhielten

$$\text{Si-Detektor: } RER = 0,114 \pm 0,008 \quad (47)$$

$$\text{CdTe-Detektor: } RER = 0,0919 \pm 0,0015 \quad (48)$$

A Anhang zu Teil 1

Tabelle 9: Parameter des linearen Fits zur Ermittlung der Bandlücke

Silizium, links:			
Fitparameter Transmission	$a = -3,76$	$b = -0,098 \frac{1}{\text{eV}}$	
Maxima:	0,476	0,485	0,419
Fitparameter Absorption	$a = 10,98$	$b = 0,238 \frac{1}{\text{eV}}$	
Minima:	0,104	0,098	0,104
Silizium, rechts:			
Fitparameter Transmission	$a = -3,06$	$b = -0,081 \frac{1}{\text{eV}}$	
Maxima:	0,405	0,412	0,399
Fitparameter Absorption	$a = 9,46$	$b = -0,208 \frac{1}{\text{eV}}$	
Minima:	0,081	0,074	0,084
Germanium, links:			
Fitparameter Transmission	$a = -3,42$	$b = -0,110 \frac{1}{\text{eV}}$	
Maxima:	0,470	0,480	0,462
Fitparameter Absorption	$a = 9,33$	$b = 0,254 \frac{1}{\text{eV}}$	
Minima:	0,185	0,153	0,211
Germanium, rechts:			
Fitparameter Transmission	$a = -3,42$	$b = -0,113 \frac{1}{\text{eV}}$	
Maxima:	0,438	0,450	0,429
Fitparameter Absorption	$a = 5,86$	$b = -0,162 \frac{1}{\text{eV}}$	
Minima:	0,120	0,094	0,153

Kovarianzmatrizen der linearen Fits

$$\sigma_{\text{si, l, T}} = \begin{pmatrix} 2,18 \cdot 10^{-2} & 5,47 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ 5,47 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 1,38 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{si, r, T}} = \begin{pmatrix} 7,30 \cdot 10^{-3} & -1,83 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ -1,83 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 4,59 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{ger, l, T}} = \begin{pmatrix} 5,85 \cdot 10^{-3} & -1,78 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ 1,78 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 5,40 \cdot 10^{-6} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

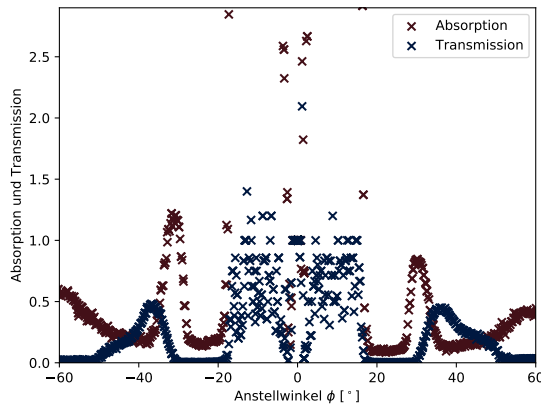
$$\sigma_{\text{ger, r, T}} = \begin{pmatrix} 1,55 \cdot 10^{-2} & -4,79 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ -4,79 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 1,48 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{si, l, A}} = \begin{pmatrix} 6,17 \cdot 10^{-2} & 1,46 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{eV}} \\ 1,46 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{eV}} & 3,45 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

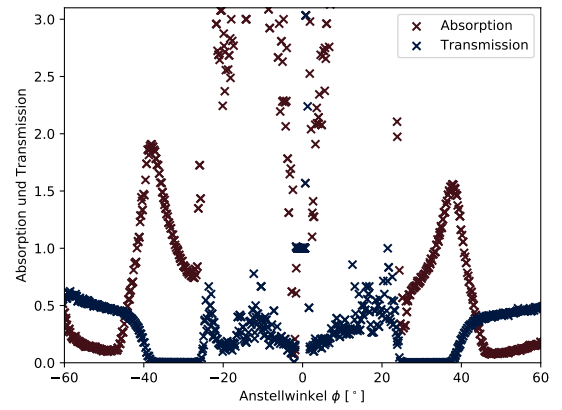
$$\sigma_{\text{si, r, A}} = \begin{pmatrix} 3,18 \cdot 10^{-2} & -7,60 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ -7,60 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 1,82 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{ger, l, A}} = \begin{pmatrix} 1,20 \cdot 10^{-1} & -3,54 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{eV}} \\ 3,54 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{eV}} & 1,04 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

$$\sigma_{\text{ger, r, A}} = \begin{pmatrix} 2,86 \cdot 10^{-2} & -8,51 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} \\ -8,51 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{eV}} & 2,54 \cdot 10^{-5} \frac{1}{\text{eV}^2} \end{pmatrix}$$

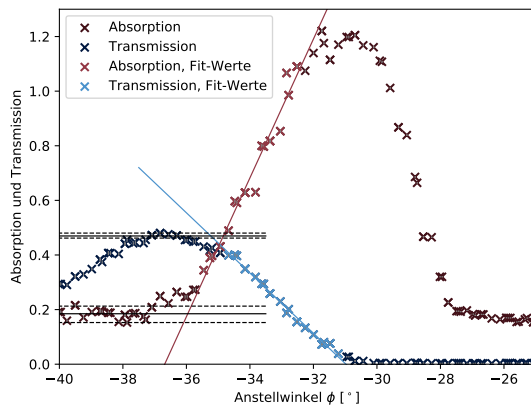


(a) Vollständiger Wertebereich bei Germanium

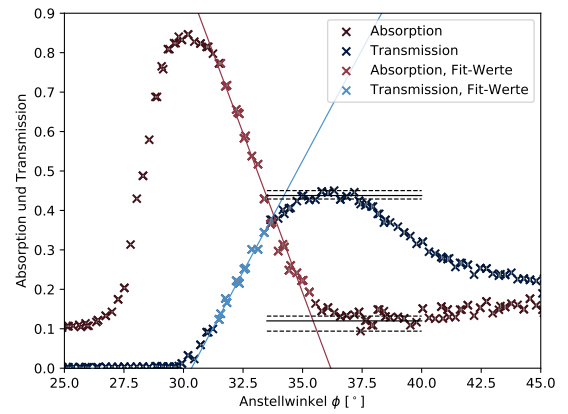


(b) Vollständiger Wertebereich bei Silizium

Abbildung 16: Aufgenommene Rohdaten zur Bestimmung der Bandlücke.

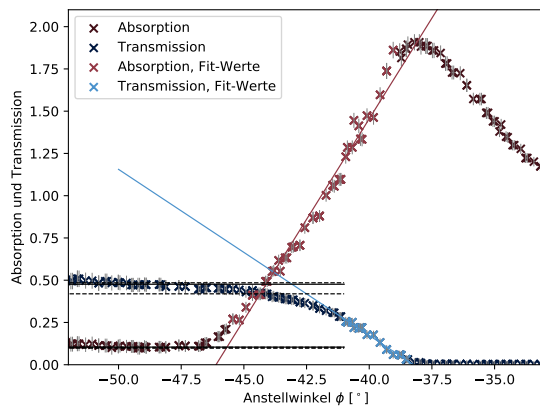


(a) negativer Winkelbereich

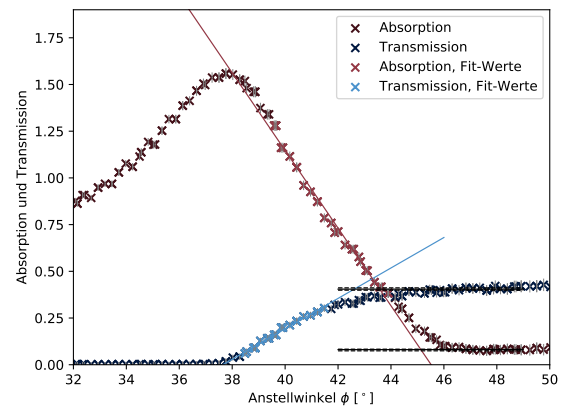


(b) positiver Winkelbereich

Abbildung 17: Durchgeführte Fits zur Bestimmung der Bandlücke von Germanium.



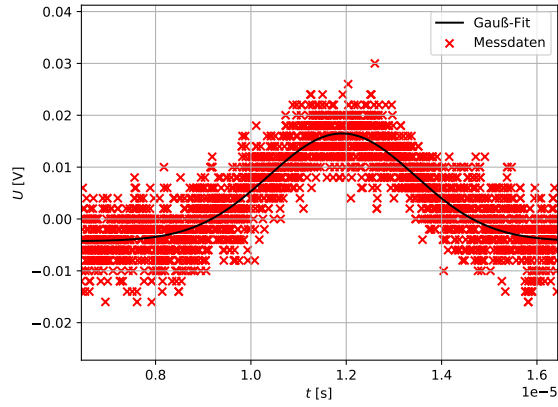
(a) negativer Winkelbereich



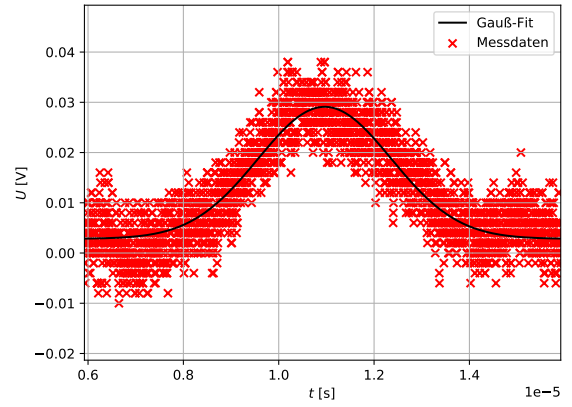
(b) positiver Winkelbereich

Abbildung 18: Durchgeführte Fits zur Bestimmung der Bandlücke von Silizium.

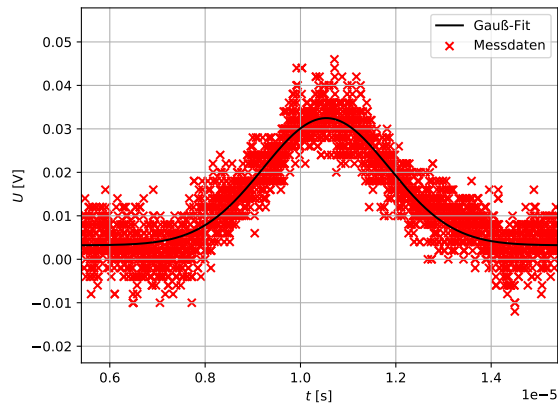
B Anhang zu Teil 2



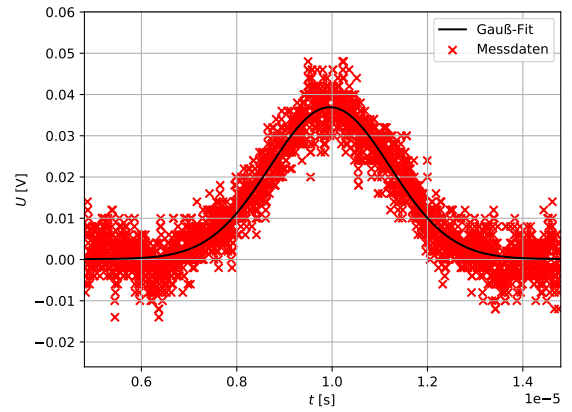
(a) Messung 0 mit variablem E-Feld



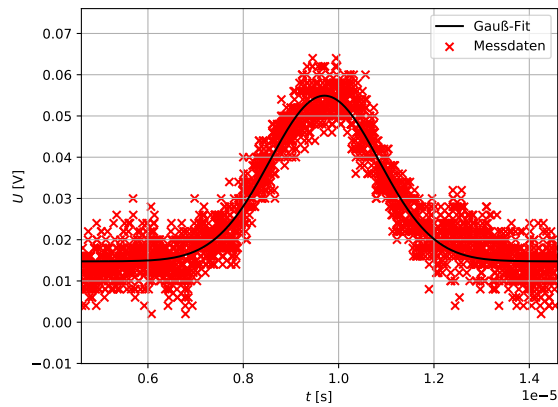
(b) Messung 1 mit variablem E-Feld



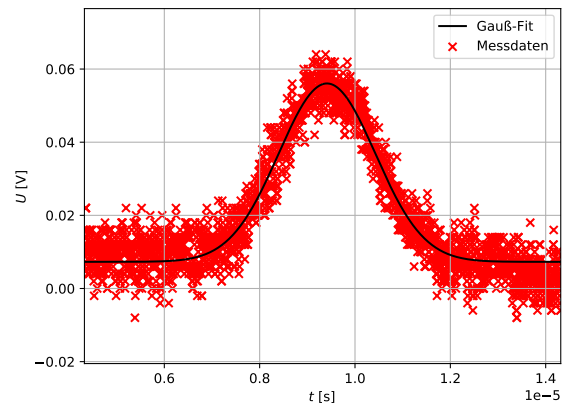
(a) Messung 2 mit variablem E-Feld



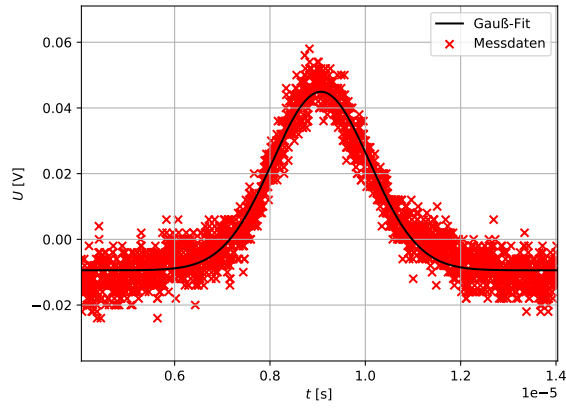
(b) Messung 3 mit variablem E-Feld



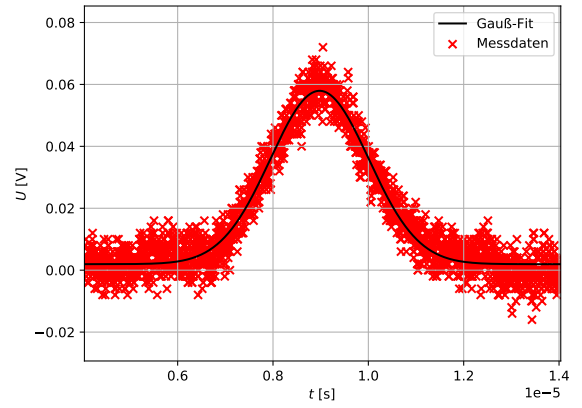
(a) Messung 4 mit variablem E-Feld



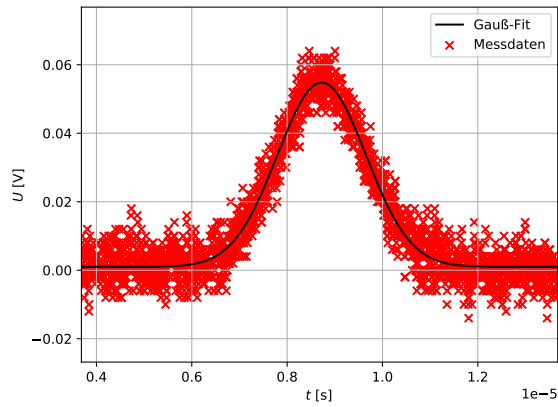
(b) Messung 5 mit variablem E-Feld



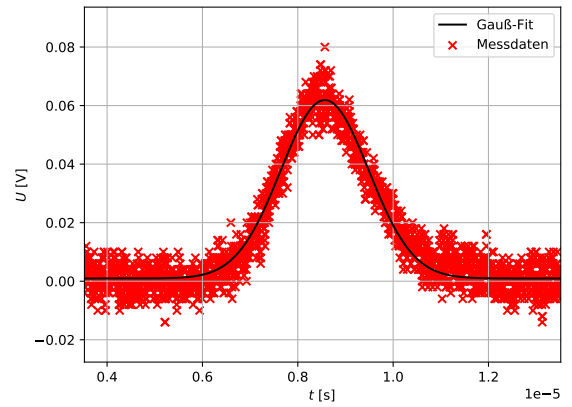
(a) Messung 6 mit variablem E-Feld



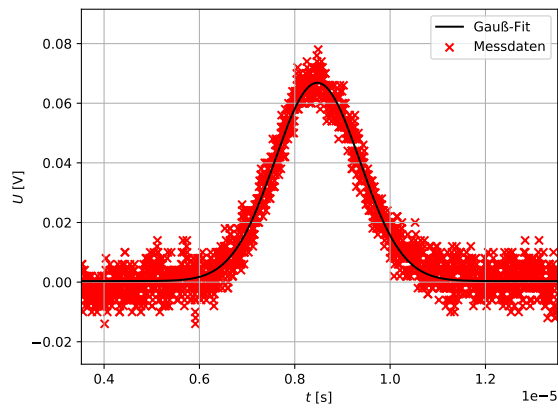
(b) Messung 7 mit variablem E-Feld



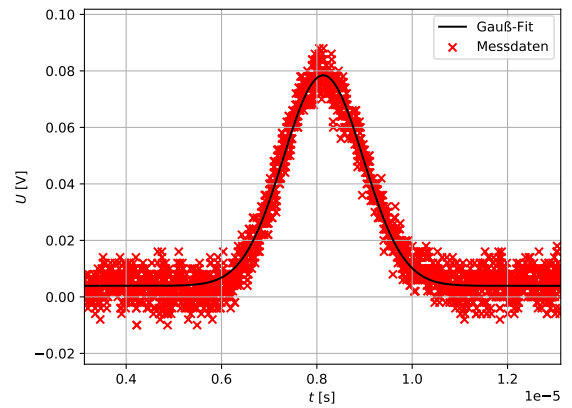
(a) Messung 8 mit variablem E-Feld



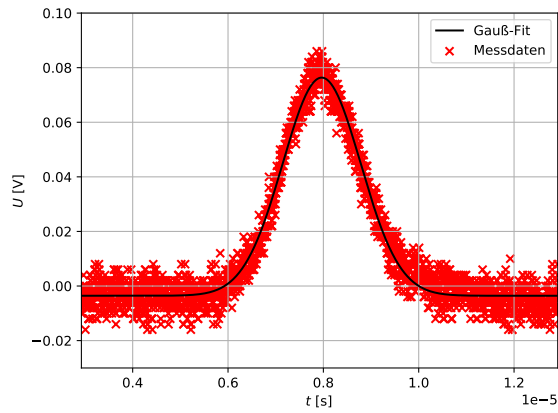
(b) Messung 9 mit variablem E-Feld



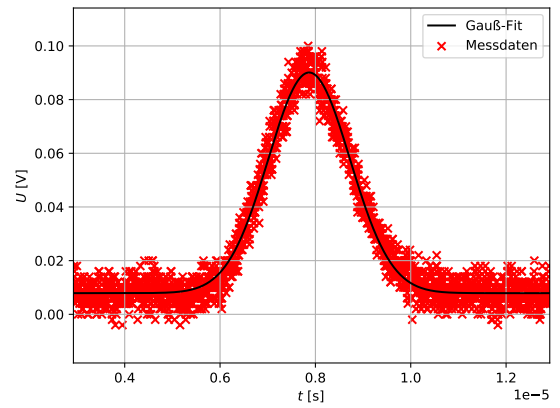
(a) Messung 10 mit variablem E-Feld



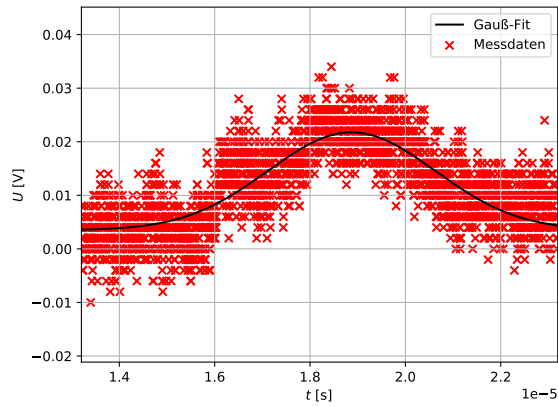
(b) Messung 11 mit variablem E-Feld



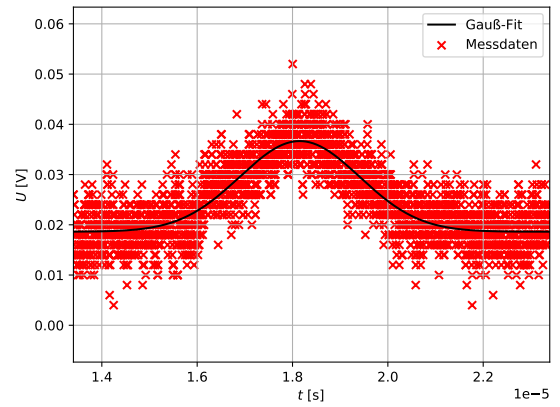
(a) Messung 12 mit variablem E-Feld



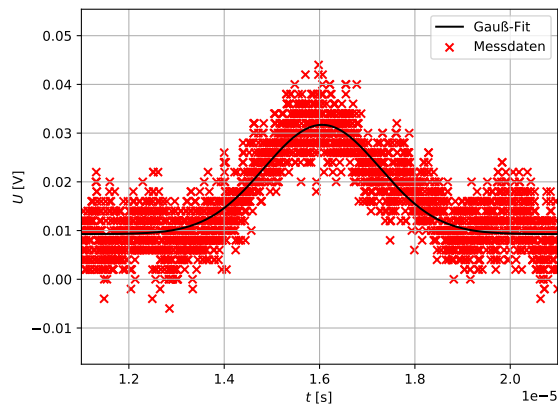
(b) Messung 13 mit variablem E-Feld



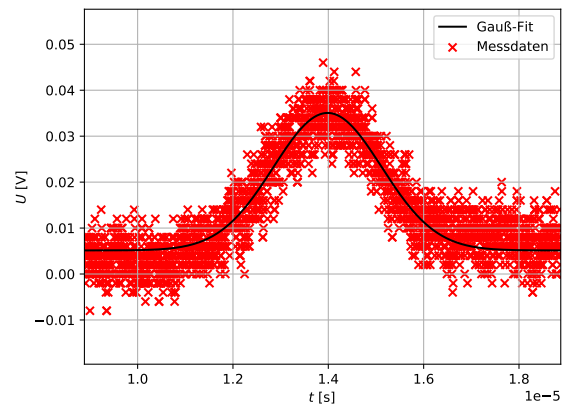
(a) Messung 0 mit variabler Position



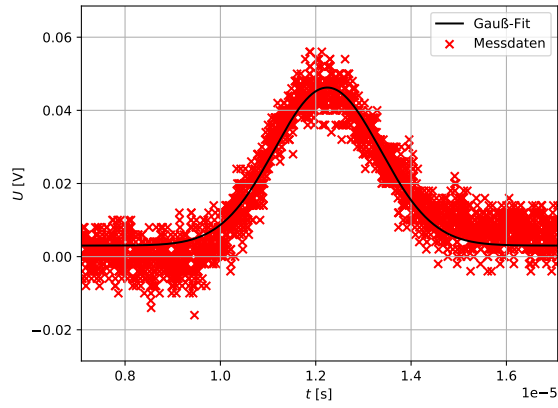
(b) Messung 1 mit variabler Position



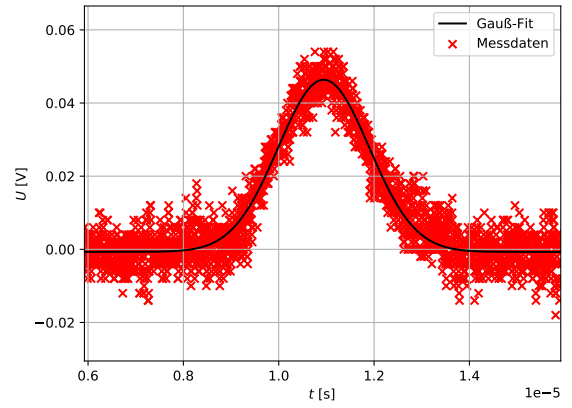
(a) Messung 2 mit variabler Position



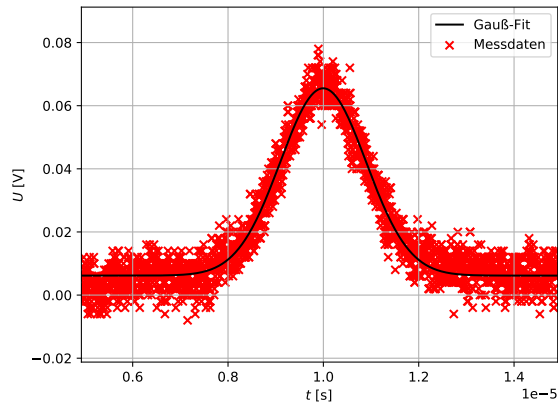
(b) Messung 3 mit variabler Position



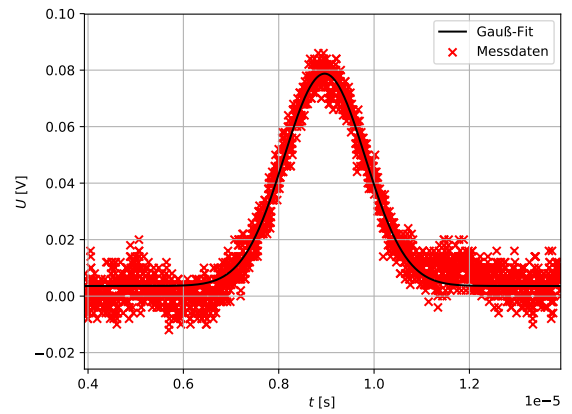
(a) Messung 4 mit variabler Position



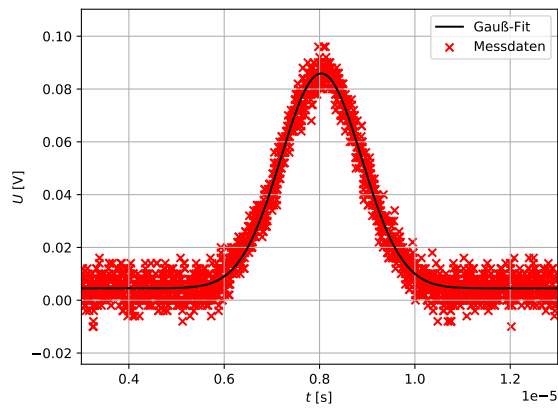
(b) Messung 5 mit variabler Position



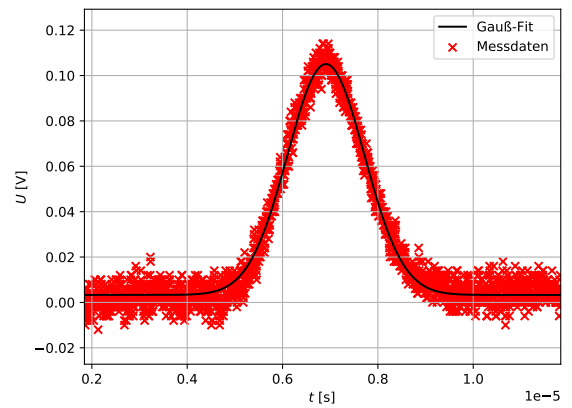
(a) Messung 6 mit variabler Position



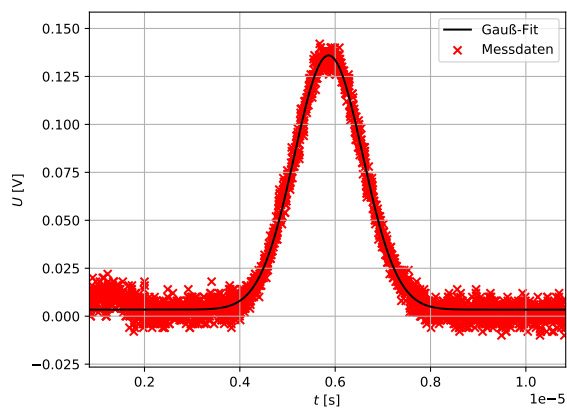
(b) Messung 7 mit variabler Position



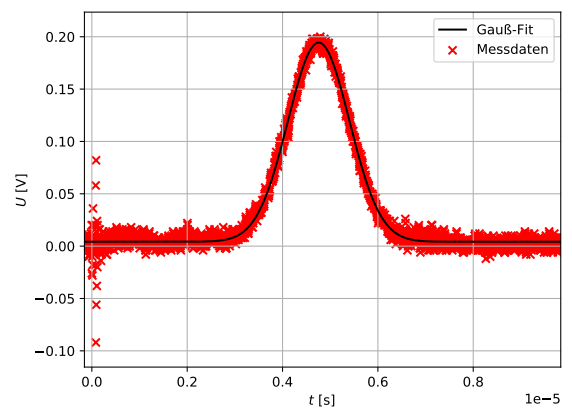
(a) Messung 8 mit variabler Position



(b) Messung 9 mit variabler Position



(a) Messung 10 mit variabler Position



(b) Messung 11 mit variabler Position

C Anhang zu Teil 3

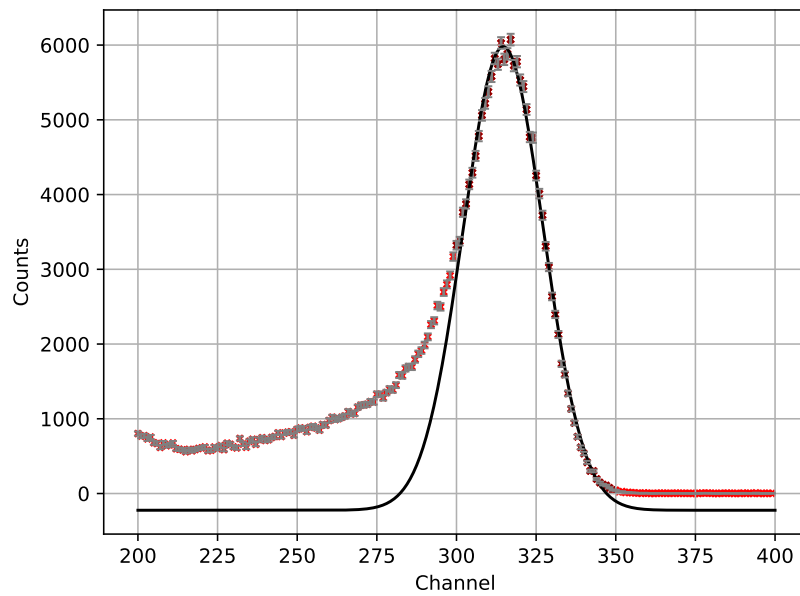


Abbildung 19: Abbildung des Americium Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor

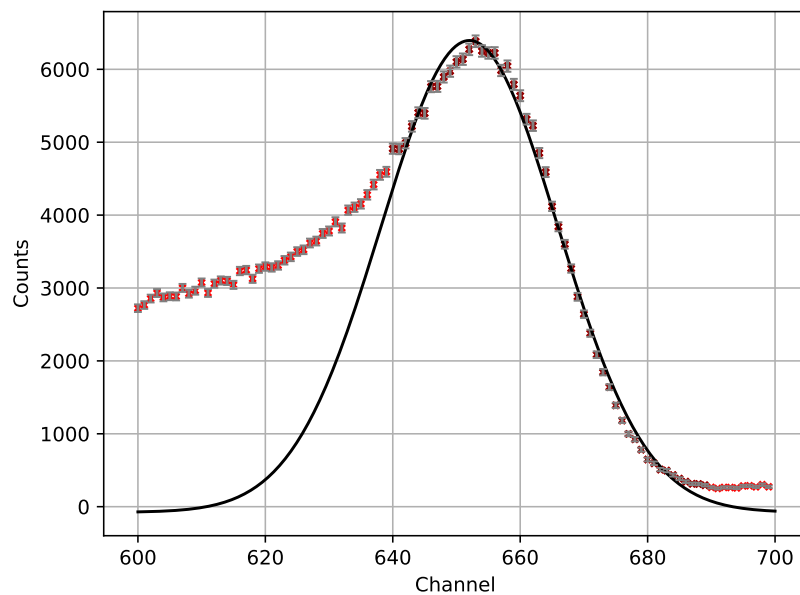


Abbildung 20: Abbildung des ersten Kobalt Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor

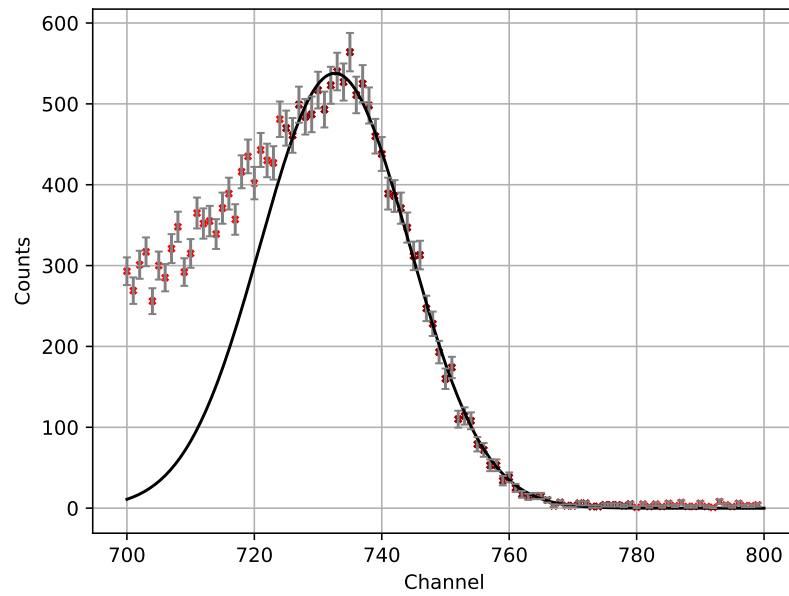


Abbildung 21: Abbildung des zweiten Kobalt Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor

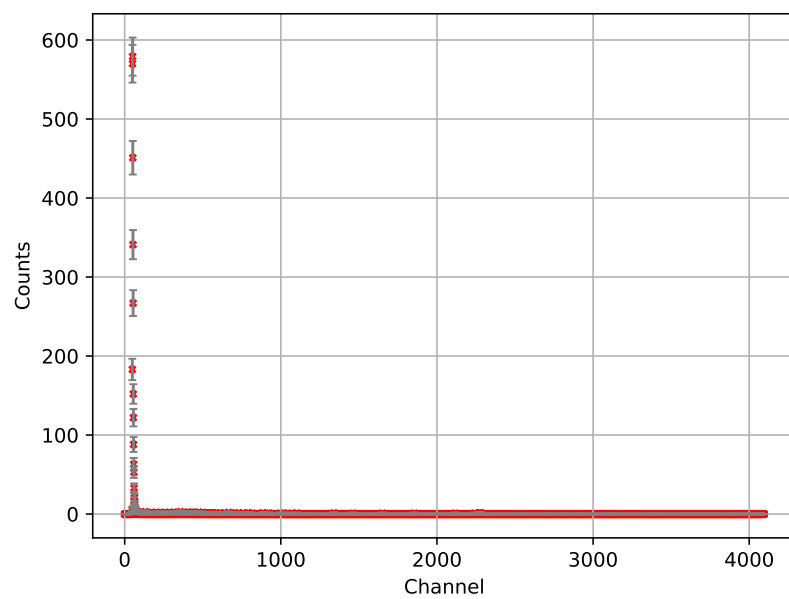


Abbildung 22: Abbildung des Untergrunds gemessen von dem CdTe-Detektor

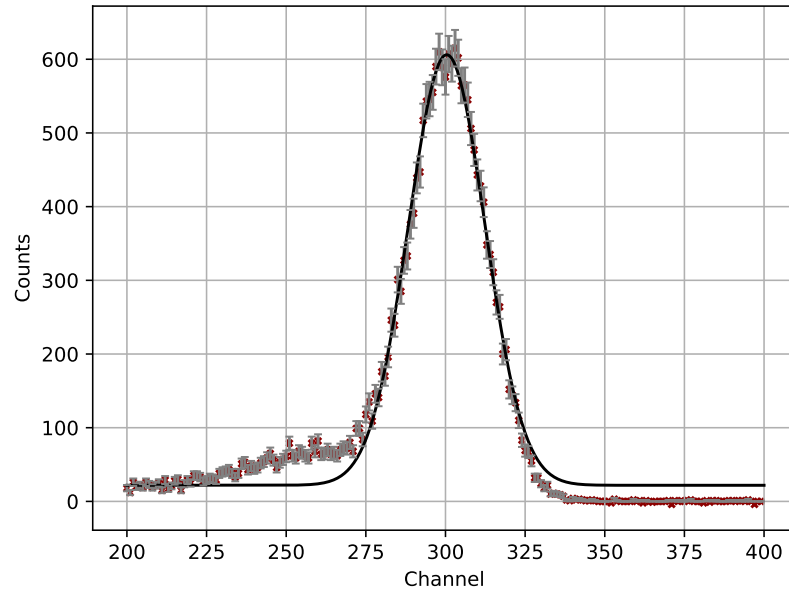


Abbildung 23: Abbildung des Americium Peaks gemessen von dem Si-Detektor

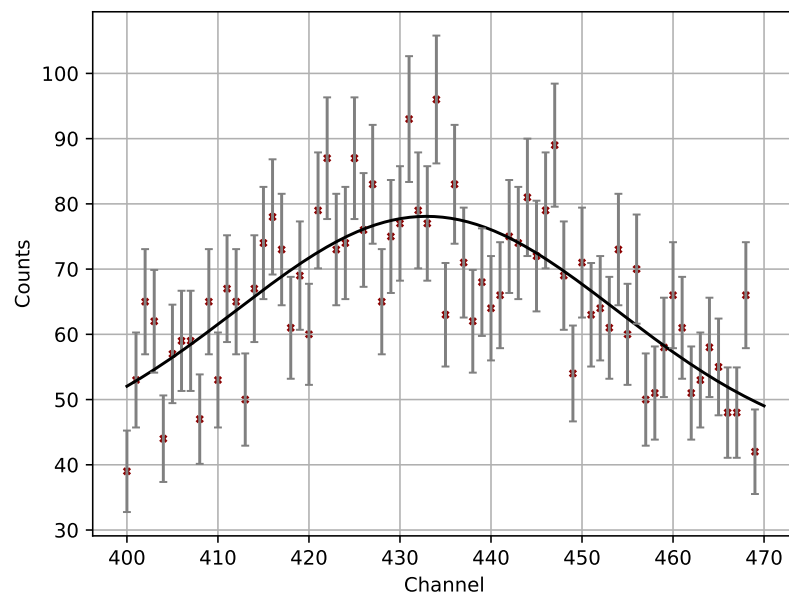


Abbildung 24: Abbildung des ersten Kobalt Peaks gemessen von dem Si-Detektor

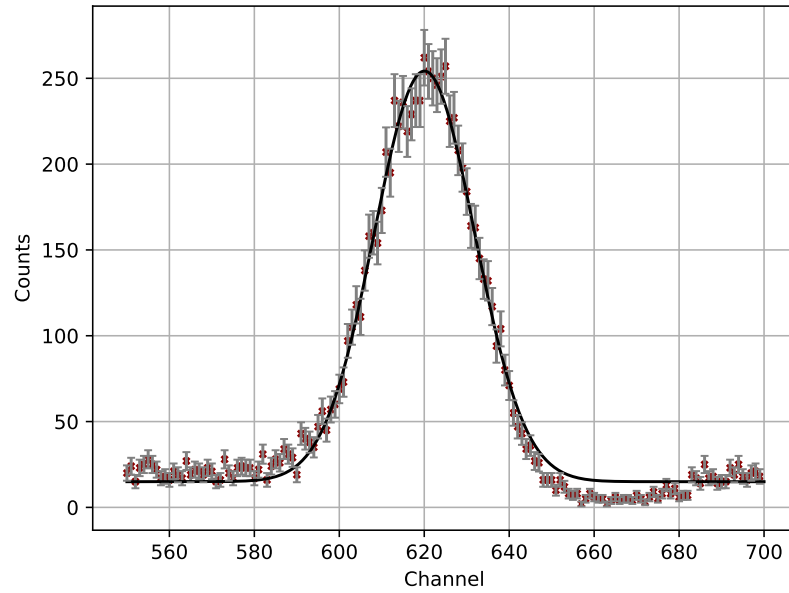


Abbildung 25: Abbildung des zweiten Kobalt Peaks gemessen von dem Si-Detektor

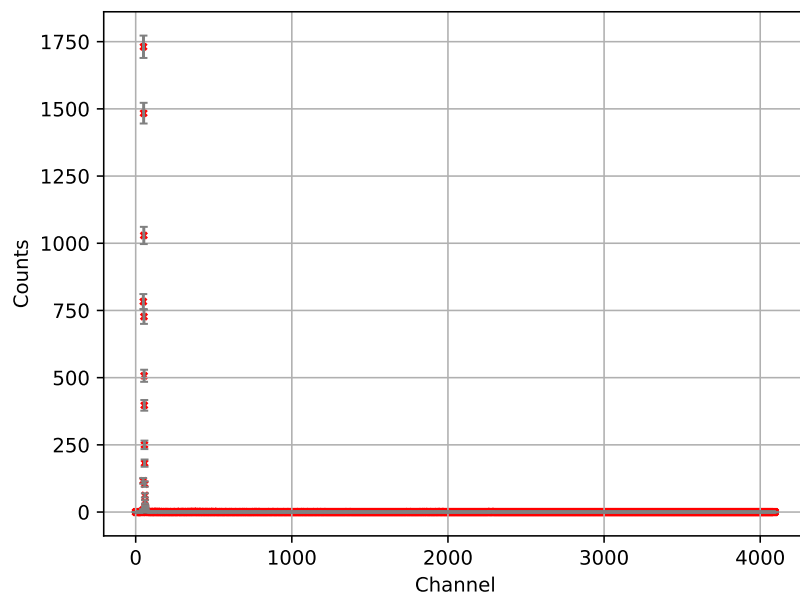


Abbildung 26: Abbildung des Untergrunds gemessen von dem Si-Detektor

Abbildungsverzeichnis

1	Plot zur Auswertung des Untergrunds	8
2	Auftragung der Absorption und Transmission gegen den Winkel	10
3	Lineare Fits und Bestimmung von Maxima und Minima, Beispielhafte Darstellung der Auswertung mit Hilfe der Messdaten von Germanium im positiven Winkelbereich	11
4	Darstellung der zur Veranschaulichung der Signalschwankung aufgenommenen Daten. Die Abbildung ist lediglich zur Veranschaulichung gedacht daher wurde der Übersichtlichkeit zu Gunsten auf eine eindeutige Zuordnung von Datensatz zu Gauß-Fit verzichtet.	14
5	Darstellung der Messdaten der Messung 11 bei (44 ± 1) V angelegter Spannung	15
6	In dieser Abbildung sind die Werte für $x_c d/U$ gegen die ermittelten Lageparameter der Gauß-Fits aufgetragen um mit Hilfe einer linearen Regression (schwarz) die Beweglichkeit μ_n zu bestimmen.	16
7	In dieser Abbildung sind die Werte $(\mu_n E \sigma_{\text{Fit}})^2$ gegen die Lage-Parameter der Gauß-Fits aufgetragen. Es ist außerdem zur Bestimmung der Diffusionskonstanten eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt worden.	17
8	In dieser Abbildung sind die Flächen der Gaußfits gegen deren Lageparameter geplottet um somit die Lebensdauer der Elektronen zu bestimmen. Für diese Datenpaare wurde ein exponential Fit (schwarz) durchgeführt. . .	17
9	Darstellung der Messdaten der Messung 9 bei dem Abstand $(3,60 \pm 0,25)$ mm. 18	
10	In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der Beweglichkeit der Ladungsträger in der Halbleiterprobe und der Fit (schwarz) eingezeichnet 19	
11	In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der Diffusionskonstanten und der Fit (schwarz) eingezeichnet	20
12	In dieser Abbildung sind die Datenpaare zur Bestimmung der mittleren Lebensdauer der Ladungsträger in der Halbleiterprobe und der Fit (schwarz) eingezeichnet	20
13	In dieser Abbildung ist der bekannte Peak der Americium Probe dargestellt. Zur Bestimmung des Channels welcher der gegebenen Energie von 59,5 keV entspricht wurde ein Gauß-Fit (schwarz) durchgeführt	21
14	In dieser Abbildung sind die Datenpaare für den Silicium-Detektor dargestellt. Zur Bestimmung der Eichgeraden wurde eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt.	22
15	In dieser Abbildung sind die Datenpaare für den CdTe-Detektor dargestellt. Zur Bestimmung der Eichgeraden wurde eine gewichtete lineare Regression (schwarz) durchgeführt.	22
16	Aufgenommene Rohdaten zur Bestimmung der Bandlücke.	28
17	Durchgeführte Fits zur Bestimmung der Bandlücke von Germanium.	28
18	Durchgeführte Fits zur Bestimmung der Bandlücke von Silizium.	29
19	Abbildung des Americium Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor	35

20	Abbildung des ersten Kobalt Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor . . .	35
21	Abbildung des zweiten Kobalt Peaks gemessen von dem CdTe-Detektor . .	36
22	Abbildung des Untergrunds gemessen von dem CdTe-Detektor	36
23	Abbildung des Americium Peaks gemessen von dem Si-Detektor	37
24	Abbildung des ersten Kobalt Peaks gemessen von dem Si-Detektor	37
25	Abbildung des zweiten Kobalt Peaks gemessen von dem Si-Detektor	38
26	Abbildung des Untergrunds gemessen von dem Si-Detektor	38

Literatur

[Quelle 1] *"Versuchsanleitung Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 - Halbleiter, S.Amrein, K.Lohwasser, M.Köhli, S.Kühn"* Stand 03/2019.

[Quelle 2] *"Halbleiter und Halbleiterdetektoren - Staatsexamensarbeit, Simon Amrein"* 01.04.2008.

[Quelle 3] *"Solid State electronic Devices (5th ed.), Ben G. Streetman, Sanjay Banerjee"*

[Quelle 4] *"Hole injection in germanium - Quantitative studies and filamentary transistors, The Bell System Technical Journal, W.Shockley, G.L.Pearson, J.R.Haynes"* Juli 1949

Halbleiter

[Teil 1] Blende : 2 cm

germanium_1.txt → Lampenmessung

germanium_2/3.txt → Germanium Probe

germanium_4.txt → Germanium Schwankung

germanium_5.txt → ohne Lampe

Pyro : 10 Sample : 5 (DC-Gain)

Blende : 1 cm

silicium_1.txt → Lampe

silicium_2.txt → Silicium - Probe

silicium_3.txt → Silicium - Schwankung

silicium_4.txt → ohne Lampe

Pyro : 5 Sample : 5 (DC gain)

[Teil 2] Skala Offset : 2,10 mm

Messreihe E - Feld : Skala : 2 mm

Regeln : 28 V - 30 V

Ende : 48,4 V

Messreihe Position : Spannung : 48,4 V

Regeln : 7,25 mm Skala

Ende : 0 mm Skala

Datel 1 : 7,25

2 : 6

3 : 5

4 : 4

5 : 3,5

6 : 3

7 : 2,5

8 : 2

9 : 1,5

10 : 1

11 : 0,5

12 : 0

13 : 0

Ch1: 50mV mit
veränderten Offset

Ch1: 100mV mit
ähnlichen Offset

V. 17/04/19
~~17/04/19~~