

Fortgeschrittenes Physik Lab SS19

Experiment: Halbleiter

(Durchgeführt am: 26-27.09.19 bei Marc Hauser)

Erik Bode, Damian Lanzenstiel
(Group 103)

6. Oktober 2019

Zusammenfassung

Im Versuch Halbleiter ging es darum sich mit Halbleitern und ihren unterschiedlichen Anwendungen vertraut zu machen. Hierbei wird im ersten Versuchsteil die Absorption und Transmission Werte eines Silizium und eines Germanium Halbleiters untersucht. Im zweiten Teil geht es um die Elektronenwolken welche sich innerhalb eines Halbleiters bei Bestrahlung mit einem Laser bilden. Im letzten Teil wurden zwei Strahlende Proben (^{57}Co und ^{241}Am) mit zwei verschiedenen Halbleiter Detektoren untersucht indem ihr Energiespektrum aufgezeichnet wurde.

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
1.1	Definition von Halbleitern	2
1.2	Bändermodell	2
1.3	Quasi freie Ladungen und Löcher	3
1.4	Arten von Halbleitern	3
1.4.1	Elementare und Verbindungshalbleiter	3
1.4.2	Direkte und Indirekte Halbleiter	3
1.4.3	Intrinsisch und Extrinsisch Halbleiter	4
1.5	p-n-Dioden	4
2	Durchführung des Versuches	5
3	Analyse der Bandlückenenergiebestimmung	6
3.1	Verfahren	6
3.2	Berechnung der Bandlückenenergie für Silizium	6
3.3	Berechnung der Bandlückenenergie für Germanium	8
4	Auswertung von Haynes & Shockley	13
4.1	Messung bei Konstanter Abstand	13
4.2	Messung bei Konstante Spannung	16
5	Auswertung von Halbleiter Experiment	19
6	Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 1	24
7	Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 2	25
8	Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 3	26
9	Tabellen	27
10	Bilder	27
11	Bibliograpy	28
	Literatur	28
12	Anhang	28
12.1	Laborbuch	29

1 Theoretische Grundlagen

1.1 Definition von Halbleitern

Insgesamt werden Materialien mit elektrischer Leitfähigkeit in drei Kategorien aufgeteilt. Der Unterschied liegt im spezifischen Widerstand ρ . Dieser über die Fläche A die Länge l so wie den Ohmschen Widerstand R definiert.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{l} \quad (1)$$

Wenn für den spezifische Widerstand ($\rho \geq 10^8 \Omega\text{cm}$) ist handelt es sich um einen Isolator. Für einen Leiter muss ($\rho \leq 10^3 \Omega\text{cm}$) gelten. Im Bereich dazwischen handelt es sich um Halbleiter. Halbleiter sind sehr Temperatur abhängig so werden bei höheren Temperaturen mehr Elektronen frei was die Leitfähigkeit erhöht.

1.2 Bändermodell

Für ein besseres Verständnis von Halbleitern wird das Bändermodell genutzt. Dieses kann man Quantenmechanisch oder durch Wechselwirkungen herleiten.

Wenn man sich ein einzelnes Atom anschaut haben sind Elektronen auf diskrete Energieniveaus verteilt. Wenn man nun mehrere Atome nahe zusammen bringt Wechselwirken die Elektronen miteinander. Dass heißt die Wellenfunktionen überschneiden sich und es entstehen mehrere leicht von einander getrennte Energieniveaus aufgrund des Pauliprinzip. Bei einer hohen Anzahl von Atomen werden aus diesen Einzelnen Niveaus sogenannte Energiebänder aus den ganzen einzelnen Niveaus. Abbildung 1 zeigt dies noch einmal Grafisch.

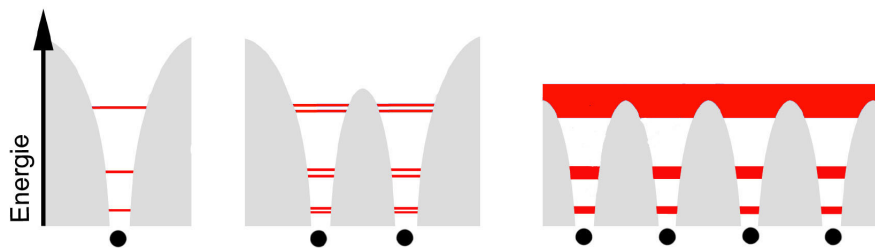


Abbildung 1: Energieniveaus der Atome in rot. Ganz links die Energieniveaus eines einzelnen Atoms. In der Mitte die die Niveaus von zwei Atomen. Rechts die erzeugt die Wechselwirkung von mehreren Elektronen erzeugt zusätzliche Energieniveaus und damit die Energiebänder.

Eine Eigenschaften dieser Bänder ist, dass sie bei niedrigerem Energieniveau kleiner werden da die Elektronen stärker an den Kern gebunden sind. Die Breite hängt aber weiterhin von der Nähe der Atomrümpfe ab. Bei einer Gitterkonstante der Atome die klein genug ist kann die Wechselwirkung sogar die Feinstruktur überwinden. Z.B kann man in Silizium ab einem gewissen Punkt nicht mehr von s oder p-Orbitalen sprechen kann. Diese werden in so einem Fall zu sp^3 -Hybridorbital zusammengefasst.

Von besonderem Interesse sind zwei Bänder einmal das Valenzband welches die höchste Energie besitzt und bei 0K voll besetzt ist und damit nicht mehr zum Leitfähigkeit beiträgt da sich die Elektronen Impulse alle auslöschen.

Das andere wichtige Band ist das Leitungsband. Dieses liegt über dem Valenzband (Energetisch gesehen). Hier sind Elektronen die zur Leitfähigkeit beitragen können da ihr Impuls bei einer Spannung nicht zu Null wird. D.h bei Material mit Elektronen im Leitungsband kann ein Strom fließen.

Wenn man nun sich die Definitionen von Leitern, Halbleitern und Isolatoren anschaut wird klar, dass Isolatoren bei 0K ein voll besetztes Valenzband haben und keine Elektronen im Leitungsband. Ganz im Gegensatz zu Leitern bei dehnen sich die beiden Bänder überschneiden so dass ein Strom ohne zusätzlichen Energie aufwand von Valenz in das Leitungsband wechseln können. Wenn man jetzt Halbleiter bei 0K betrachtet ist klar haben diese auch ein Vollbesetztes Valenzband jedoch ist der Abstand zwischen Valenzband und Leitungsband E_g klein genug ($E_g \approx 1$)eV um durch thermische Anregung Elektronen in das Leitungsband zulassen. Dies ist bei Isolatoren Theoretisch auch möglich jedoch wegen dem hohen Abstand unwahrscheinlich.

Auf den Quantenmechanischen Ansatz wird hier nicht weiter eingegangen. Eine genaue Erklärung ist jedoch im Staatsexamen zu Halbleitern und Halbleiter Detektoren von Simon Amrein. [2]

1.3 Quasi freie Ladungen und Löcher

Das Bändermodell kann nun genutzt werden um die Ladungsträger die bei Halbleitern durch das anlegen einer Spannung fließen. Sollte bei einem Halbleiter kein Elektron im Leitungsband sein wird zu Beginn durch das Anlegen einer Spannung kein Strom fließen, erst wenn einem Elektron im Valenzband genug Energie zugeführt wird, dass es in Leitungsband übergeht kann es sich bewegen. Jedoch ist dieses Elektron nur Quasi frei da es sich nicht frei sondern nur in einem Periodischen Potenzial bewegen kann.

Eine andere Möglichkeit die Ladungsübertragung zu sehen ist mit der Hilfe von Defektelektronen oder Löchern. Wenn ein Elektron durch die Spannung abgesaugt wird hinterlässt es ein Loch. Dieses Loch kann als Positive Ladung gesehen werden. Wenn nun ein anderes Elektron dieses Loch füllt hinterlässt es seinerseits ein Loch. Dadurch wandert das Defektelektron in die entgegengesetzte Richtung zu den Elektronen als ein gedachter Positiver Ladungsträger.

1.4 Arten von Halbleitern

Halbleiter können in verschiedene Klassen aufgeteilt werden.

1.4.1 Elementare und Verbindungshalbleiter

Ein Elementarer Halbleiter ist ein Halbleiter welcher nur aus einem einzigen Material erstellt wurde. Silizium ist hierfür ein klassisches Beispiel. Es gibt aber neben diesen auch Verbindungshalbleiter welche aus mindestens zwei Materialien erstellt wurde. Hierbei ergänzen sich die Materialien so, dass sie die selbe Struktur wie ein elementarer Halbleiter bilden.

1.4.2 Direkte und Indirekte Halbleiter

Bei dieser Unterteilung wird ein weiterer Faktor betrachtet. Bisher wurden die Bänder nur in der Form von Energieniveaus betrachtet. Jedoch kann man das ganze auch im Impulsraum darstellen. Abbildung 2 stellt hier den Unterschied im Impulsraum dar. Wenn wie auf der rechten Seite der Abbildung das Maxima des Valenzbandes und das Minima des Leitungsbandes übereinander liegen haben wir einen direkten Halbleiter bei dem der Impuls keine Rolle spielt. Auf der linken Seite ist dies jedoch nicht der Fall. D.h wir haben einen indirekten Halbleiter bei dem zusätzlich noch ein Impuls Δp benötigt wird.

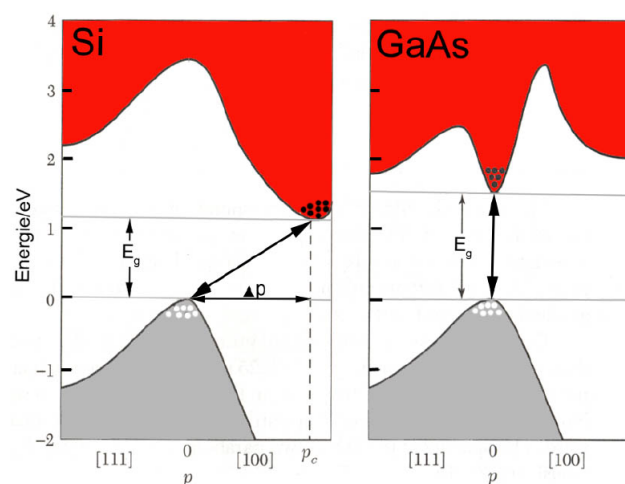


Abbildung 2: Links ein Indirekter Halbleiter im Impulsraum bei dem neben der Bandlückenenergie E_g noch ein Impuls Δp . Rechts ein Direkter Halbleiter im Impulsraum der keinen Impuls benötigt.

1.4.3 Intrinsisch und Extrinsisch Halbleiter

Intrinsische Halbleiter sind frei von Unreinheiten durch andere Stoffe und keine Fehler in der Gitterstruktur. Dass heißt sie kommen in der Realität nicht vor. Echte Halbleiter sind Extrinsische Halbleiter und haben Unreinheiten. Dies kann zu ungewollten Energieniveaus und damit anderen Eigenschaften führen. So kann z.B ein Extrinsischer Halbleiter aus Atomen mit vier Bindungen bestehen. Wenn nun ein anderes Atom in der Struktur ist mit nur drei oder fünf Elektronenbindungen bleibt ein Elektron ungebunden oder es entsteht ein Loch. Diese Unreinheiten sind meistens ungewollt können aber auch gewollt sein. Dies nennt man dann Dotierung also ein künstliches erzeugen von quasi freien Elektronen oder Löchern.

1.5 p-n-Dioden

Allgemein wird Dotierung in zwei Typen aufgeteilt. In n und p Dotierung. Bei der p-Dotierung werden Atome in das Gitter implantiert welche als Elektronen Akzeptoren dienen wodurch ein Elektronenüberschuss entsteht. Bei einer n-Dotierung werden Elektronen Donatoren eingesetzt welche Löcher verursachen. Dieses hinzufügen von von freien Elektronen oder Löchern wirkt sich positiv auf die Leitfähigkeit des Halbleiters aus.

Diese Dotierungen werden bei dem Bau von p-n-Dioden verwendet. Hierbei werden zwei Halbleiter, ein p und ein n Dotierter, aneinander gesetzt. An der Grenze diffundieren die Elektronen aus der p-Type-Schicht in die n-Type-Schicht. Die freien Ladungen löschen sich also in diesem Bereich aus. Die weiter von einander getrennten Ladungen können dies nicht machen da die Atome in ein Gitterstruktur eingebunden sind. Dies sorgt dafür dass sich ein Elektrisches Feld im Kontaktbereich ausbildet. Die dabei entstehende Spannung wird Kontakt Potential U_{bi} genannt.

2 Durchführung des Versuches

Vor der mündlichen Abfrage wurde die Messung vom Cobalt Spektrum mit dem CdTe Kristall gestartet mit einer Messzeit von einer Stunde. Nach der mündlichen Abfrage wurde der CdTe Kristall gegen eine Silizium Diode getauscht und das zweite Cobalt Spektrum wurde mit der Messzeit von einer Stunde aufgenommen.

Während die obige Messung lief wurde mit den Vorbereitungen Absorptions- und Transmissionsmessungen zu Silizium gestartet. Es wurde der Strahlengang eingestellt und vorläufige Parameter des Lock-in Verstärkers gefunden.

Nun wurde auch das Cobalt Spektrum mittels der Silizium Diode aufgenommen, weshalb die Probe auf Americium gewechselt wurde und dessen Spektrum aufgezeichnet wurde. Die Messzeit betrug wieder eine Stunde.

Nach der ersten Testmessung zu Transmission und Absorption wurden die finalen Verstärkereinstellungen vorgenommen. Es wurden zwei normale Messungen und drei Untergrundmessungen aufgezeichnet: Eine ohne die Silizium Probe, eine ohne das Gitter und eine mit abgedunkeltem Spalt. Hierzu wurde das Gitter von -90° bis $+90^\circ$ gedreht und immer die Position des Gitters und der Widerstand der Probe sowie die Spannung des Pyrodetektors aufgezeichnet.

Nach Abschluss der ersten Americium Messung wurde klar, dass die Probe in der falschen Orientierung auf den Detektor platziert wurde, die Zählrate war viel niedriger als erwartet. Nachdem die Probe richtig platziert wurde, konnte die Messung mit Dauer einer Stunde erneut gestartet werden.

Da die Absorptions- und Transmissionsmessungen nun für Silizium abgeschlossen sind, wurde der Aufbau für die Germanium Probe vorbereitet: Das Gitter, der Filter und die Probe wurden vertauscht. Nun wurde der Verstärker für die Germanium Probe angepasst. Leider gab es zunächst Probleme, sodass man die realen Maxima erst bei maximaler Verstärkung finden konnte. Als die Fehlersuche sich hinzog wurde beschlossen sich aufzuteilen und die Haynes und Shockley Messungen parallel durchzuführen.

Zunächst wurde der Offset von Glasfaser zu Elektrode bestimmt, anschließend wurde der Versuchsaufbau in Betrieb genommen. Es wurde nun die minimale Spannung gefunden, bei welcher vermutet wurde, dass eine Auswertung der Messung in Form einer angepassten Gaußkurve möglich ist. Dann wurde in 2 V, später 4 V Schritten die Spannung erhöht bis zur maximal möglichen Spannung von 48 V.

Nun war die Messung des Americium Spektrums mit der Silizium Diode abgeschlossen und sie wurde gegen den CdTe Kristall getauscht. Anschließend wurde die letzte Messung gestartet.

Für das Haynes und Shockley Experiment wurden nun die Abstandsmessungen durchgeführt. Hierbei wurde zunächst die maximale Spannung an der Probe angelegt, und der Abstand so lange erhöht bis zur maximalen Distanz, bei welcher es für möglich gehalten wurde, eine Auswertung durchzuführen. Diese lag bei 9 mm auf der angebrachten Skala. Der Abstand wurde immer um einen mm zwischen den gespeicherten Messungen reduziert, bis zum minimalen Abstand von 2 mm. Es wurde nun noch einmal der Offset zwischen Glasfaser und Elektrode bestimmt, welcher jetzt 3.6 mm betrug.

Währenddessen wurde der Strahlenverlauf der Absorptions- und Transmissionsmessungen angepasst, sodass hier auch die oben erwähnten Messungen aufgenommen werden konnten.

3 Analyse der Bandlückenenergiebestimmung

3.1 Verfahren

Das allgemeine Verfahren zur Bestimmung der Bandlückenenergie ist wie folgt: Zum Beginn wurden zuerst die Messreihen vom Untergrund bereinigt und auf die Lampenenergie normiert. Hierzu wurde die Formel 2 verwendet.

$$\text{Trans}_{\text{Real}} = \frac{\text{Trans} - \text{Untergrund}}{\text{Lampe}_{\text{Trans}}} \quad \text{Absorp}_{\text{Real}} = \frac{\text{Absorp} - \text{Untergrund}}{\text{Lampe}_{\text{Absorp}}} \quad (2)$$

Nach dieser Korrektur wurden an den Stellen, wo Absorption und Transmission Gleichwahrscheinlich sind, Geraden angelegt und diese mit der Horizontalen des jeweiligen Maximum oder Minimum geschnitten. Bei der Transmission wurde das Maximum zum anlegen der Horizontalen verwendet, bei der Absorption (Widerstand der Probe) wurde die Horizontale an das Minimum angelegt. Dies kann man in Abbildung 3 sehen. Aus diesen Punkten erhielt man die obere und untere Grenze für die Elektronen und Lochbildung. Der Wert für die Bandlückenenergie ist der Mittelwert dieser beiden Grenzen.

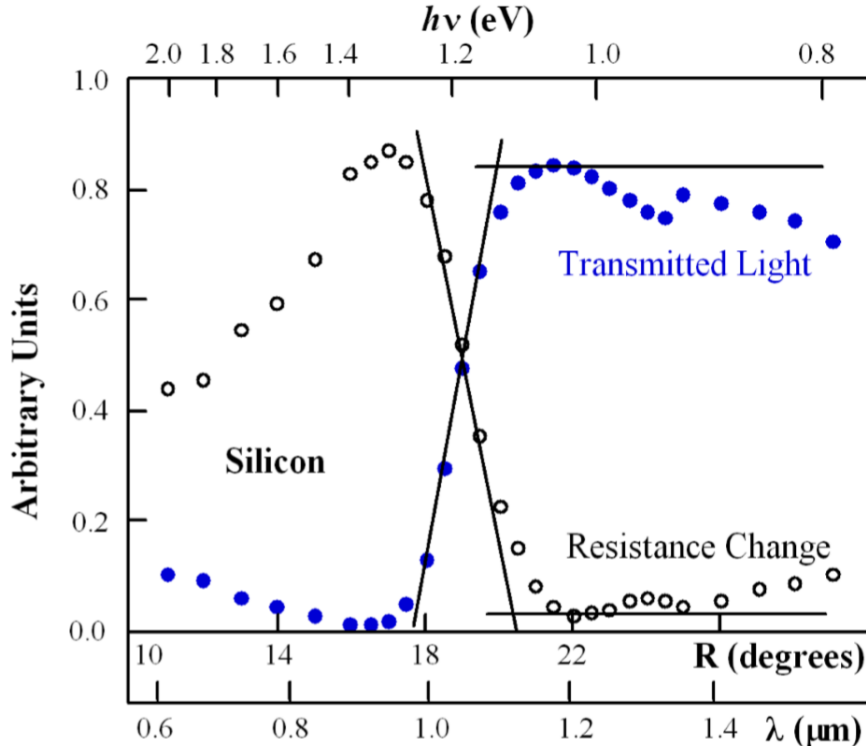


Abbildung 3: Beispiel zu den angepassten Geraden für die Bestimmung der Bandlückenenergie. Entnommen aus der Versuchsanleitung [1]

3.2 Berechnung der Bandlückenenergie für Silizium

Der erste Schritt bei der Normierung ist, die Messung der Lampe und die Silizium Messung auf die selbe Länge und Winkeländerung zu Synchronisieren. Die aufgezeichneten Messungen hatten leider beide oben erwähnten Änderungen, was korrigiert wurde. Es wurde begonnen, die ersten 18 zu verwerfen da hier keine Winkeländerung stattfindet. Als nun die Winkel zum Start der Daten nahezu übereinstimmten, wurde deutlich dass die Winkeländerungsrate der beiden Messungen unterschiedlich ist. Hierzu wurden bei einem Winkel in der Nähe von 0° einige Datenpunkte ignoriert. Damit war die Anpassung abgeschlossen. Das Ergebnis der Anpassung ist in Abbildung 4 sichtbar.

Es wurden mehrere Untergrundmessungen durchgeführt, wobei die ohne Gitter als am repräsentativsten gewählt wurde. Diese ist sichtbar in Abbildung 5 Da die Länge von der Untergrundmessung viel kürzer als die der eigentlichen Messungen, wurde bei dieser jeweils der Mittelwert als Repräsentation verwendet.

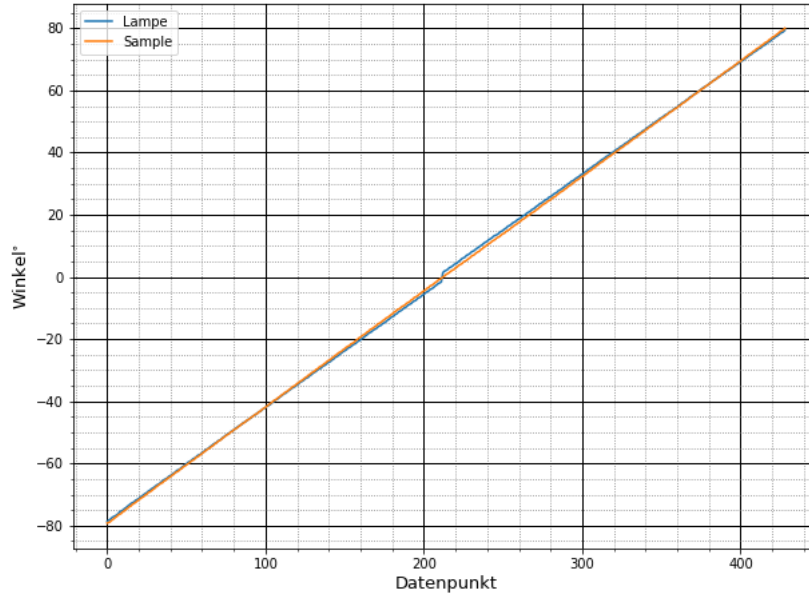


Abbildung 4: Auftragung der gemessenen Winkel für die Lampenmessung und erste Silizium Messung nach der Korrektur. Beide stimmen in den relevanten Bereichen bei ca. $30^\circ - 40^\circ$ weitgehend überein.

Tabelle 1: Parameter der angepassten Geraden, Horizontalen, Winkel der Schnittpunkte und die Energien zu den Schnittwinkeln der ersten Silizium Messung.

Messreihe	Steigung und Offset der Geraden	Position der Horizontalen	Winkel beim Schnittpunkt	Energien der Schnittpunkte in eV
1. Absorbtion	$[0.0273 \pm 0.0008, 1.261 \pm 0.033]$	0.0281946	-45.2 ± 1.7	-1.06 ± 0.04
1. Transmission	$[-0.0494 \pm 0.0026, -1.86 \pm 0.10]$	0.190734	-41.5 ± 3.0	-1.13 ± 0.06
2. Absorbtion	$[-0.0370 \pm 0.0015, 1.73 \pm 0.06]$	0.0309053	46.0 ± 2.5	1.04 ± 0.05
2. Transmission	$[0.0431 \pm 0.0026, -1.66 \pm 0.11]$	0.204556	43 ± 4	1.09 ± 0.07

Das Ergebnis der Normalisierung ist in der Abbildung 6 dargestellt.

Anschließend wurden die oben erwähnten Geraden angepasst. Dies wurde bei beiden Stellen der Messung durchgeführt. Anschließend wurden die Schnittpunkte der Geraden ($y = a \cdot x + b$) mit den jeweiligen Horizontalen mittels der Formel 3 bestimmt.

$$x = \frac{x - b}{a} \quad (3)$$

In Abbildungen 7 und 8 sind die angepassten Geraden, die horizontalen und deren Schnittpunkte dargestellt. Die Parameter der Geraden, Horizontalen und die Winkel, bei welchen sie sich schneiden können aus der Tabelle 1 entnommen werden. Die so bestimmten Winkel der Schnittpunkte wurden mit der Energie Datenreihe verglichen. Leider konnten sie nicht direkt abgelesen werden wegen der endlichen Genauigkeit der aufgezeichneten Daten. Zunächst wurde versucht, eine Exponentialfunktion an die Daten anzupassen, was fehlschlug. Letztendlich wurde eine Gerade an den Bereich angepasst, in welchem sich die Messwerte befinden. Diese sind in Abbildungen 9 beispielhaft aufgetragen.

Für die zweite Silizium Messung wurde nahezu analog vorgegangen. Es wurde zusätzlich eine Nullpunktkorrektur vorgenommen, da der Nullpunkt der Datenreihen deutlich von 0° abwich. Die Korrektur betrug -2.25° . Die Bilder zur Korrektur, den angepassten Geraden und der Energiebestimmung sind Anhang zu finden. Die Ergebnisse zur Auswertung stehen in Tabelle 2.

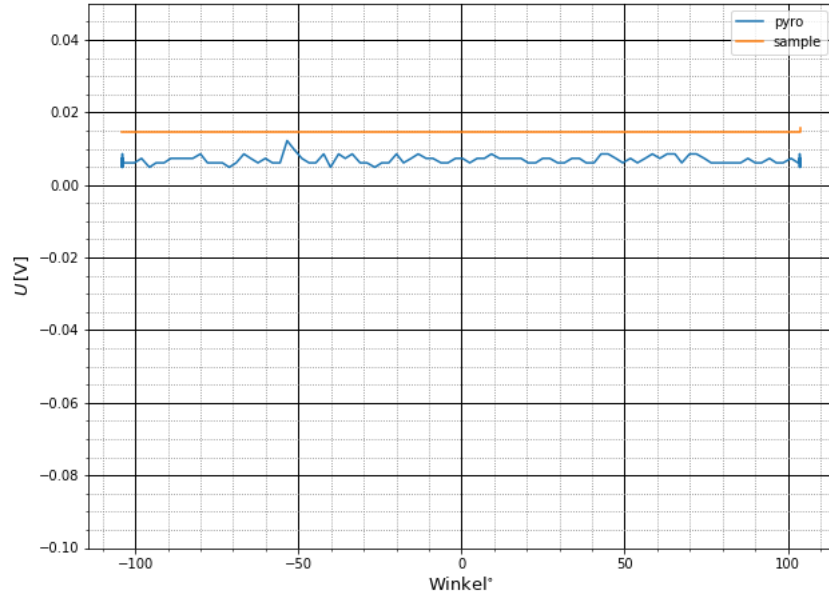


Abbildung 5: Auftragung von gemessener Spannung der Untergrundmessung gegen die Winkel.

Tabelle 2: Parameter der angepassten Geraden, Horizontalen, Winkel der Schnittpunkte und die Energien zu den Schnittwinkeln der zweiten Silizium Messung.

Messreihe	Steigung und Offset der Geraden	Position der Horizontalen	Winkel beim Schnittpunkt	Energien der Schnittpunkte in eV
1. Absorbtion	$[0.0327 \pm 0.0013, 1.49 \pm 0.05]$	0.0274841	-44.8 ± 2.3	-1.11 ± 0.05
1. Transmission	$[-0.0398 \pm 0.0023, -1.49 \pm 0.09]$	0.188553	-42.2 ± 3.3	-1.17 ± 0.07
2. Absorbtion	$[-0.0418 \pm 0.0017, 1.94 \pm 0.07]$	0.0300767	45.7 ± 2.5	1.01 ± 0.04
2. Transmission	$[0.0486 \pm 0.0021, -1.88 \pm 0.09]$	0.205715	42.9 ± 2.6	1.06 ± 0.04

3.3 Berechnung der Bandlückenenergie für Germanium

Die Normierung von der Lampenmessung von Germanium war herausfordernder als die bisherigen, da hier die Lampenmessung nicht nur eine unterschiedliche Länge hatte sondern auch eine größere Winkeländerungsdifferenz. Nachdem die Reihenfolge der Daten umgekehrt wurde, wurden immer wieder kleine Teile des Datensatzes ignoriert, dass sich der Datensatz von Lampe und der eigentlichen Messung besser angleichen. Das ist in Abbildung 10 dargestellt.

Die restlichen Teile der Auswertung verliefen analog zu den Silizium Auswertungen. Die angepassten Geraden sind in Abbildung 11 zu sehen, die Ergebnisse in Tabelle 3.

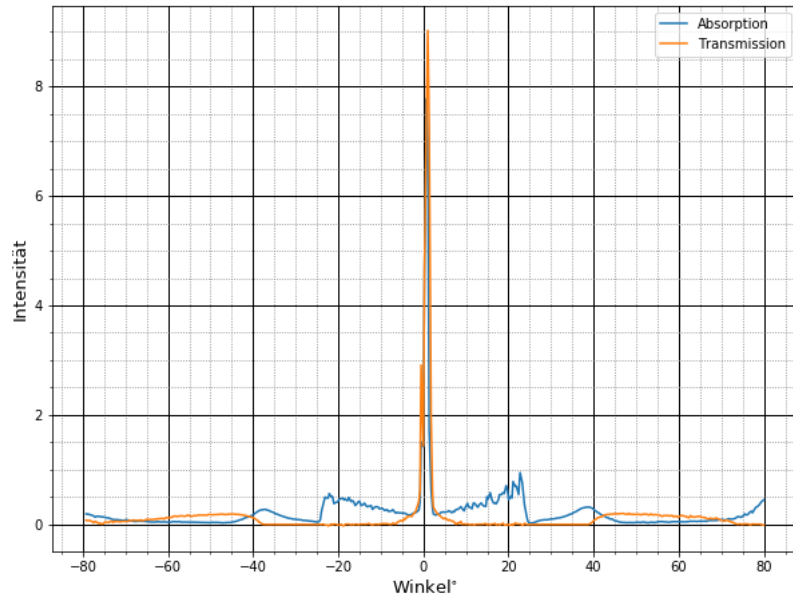


Abbildung 6: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel.

Tabelle 3: Parameter der angepassten Geraden, Horizontalen, Winkel der Schnittpunkte und die Energien zu den Schnittwinkeln der zweiten Silizium Messung.

Messreihe	Steigung und Offset der Geraden	Position der Horizontalen	Winkel beim Schnittpunkt	Energien der Schnittpunkte in eV
1. Absorbtion	$[-0.0589 \pm 0.0033, 2.09 \pm 0.11]$	-0.0245099	36.0 ± 2.7	0.64 ± 0.05
1. Transmission	$[0.066 \pm 0.006, -1.97 \pm 0.19]$	0.263931	34 ± 4	0.68 ± 0.07
2. Absorbtion	$[0.073 \pm 0.005, 2.58 \pm 0.15]$	-0.0239853	-35.7 ± 3.1	-0.64 ± 0.05
2. Transmission	$[-0.0817 \pm 0.0030, -2.46 \pm 0.10]$	0.552449	-36.9 ± 1.9	-0.625 ± 0.029

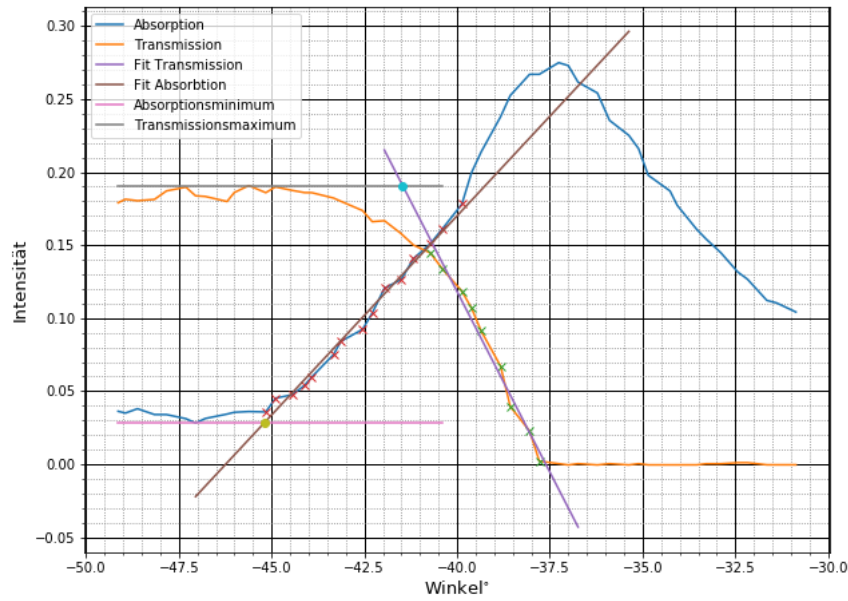


Abbildung 7: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel der ersten Silizium Messung in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln kleiner als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

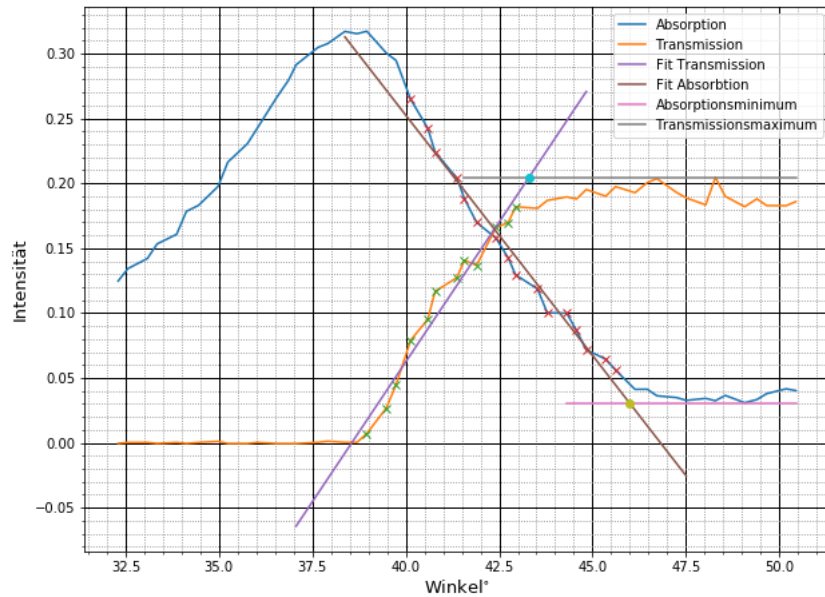


Abbildung 8: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel der ersten Silizium Messung in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln größer als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

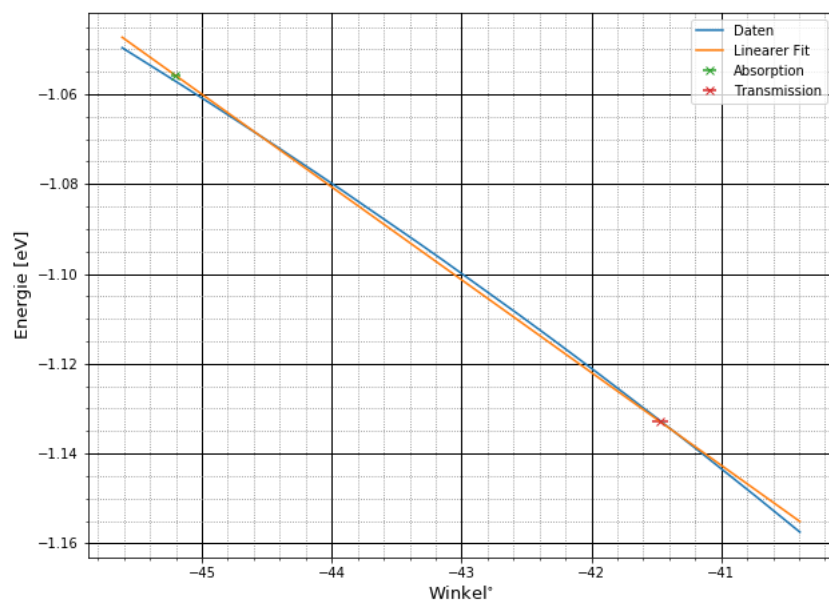


Abbildung 9: Auftragung der Energie gegen den Winkel. Die angepasste Gerade und die beiden Schnittpunkte sind auch eingetragen.

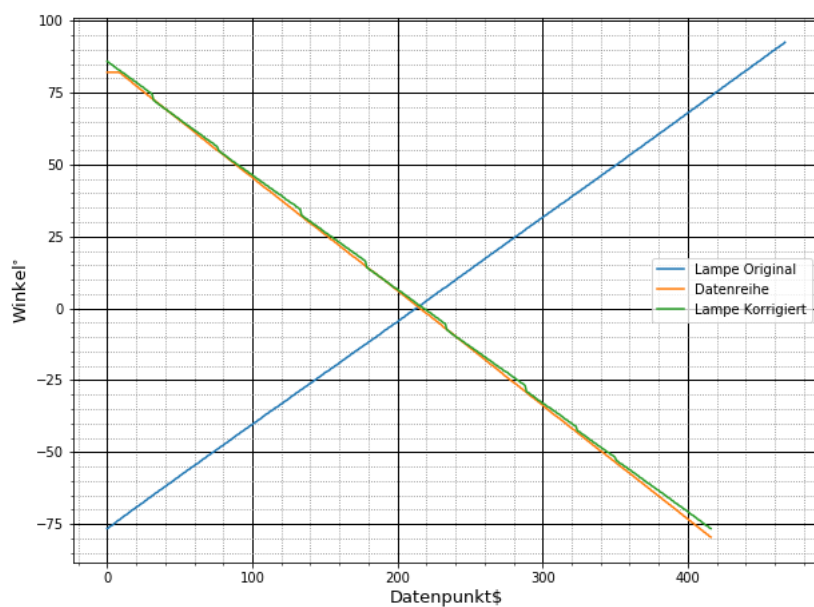


Abbildung 10: Hier sind die Winkel der Original Lampendaten, die Daten der Messung und die Korrigierten Lampendaten gegen die Stellen der Datenpunkte aufgetragen.

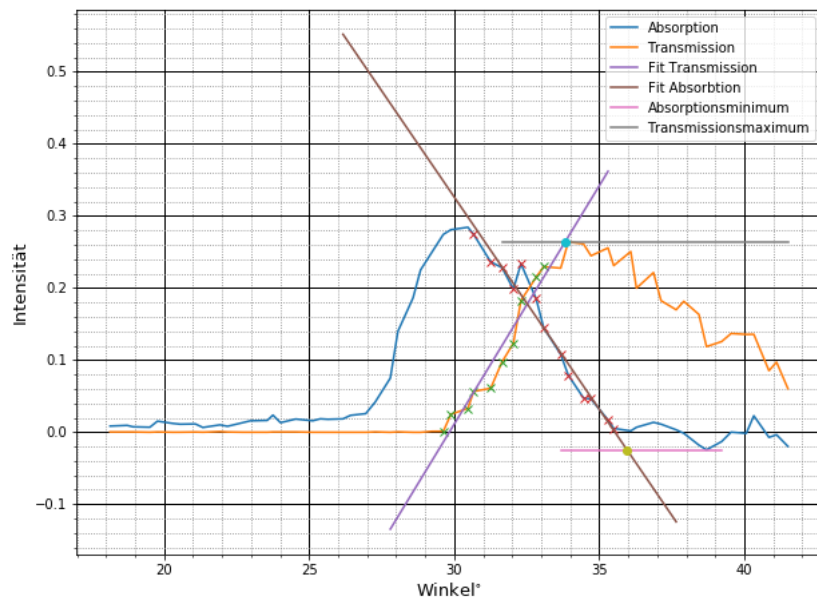


Abbildung 11: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen von Germanium gegen die Winkel in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln größer als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

4 Auswertung von Haynes & Shockley

4.1 Messung bei Konstanter Abstand

Als erstes wurden die einzelnen gemessenen Datenreihen geplottet und mit einer Gaußschen Normalverteilung gefittet. Die verwendete Form ist in Gleichung 4 zu finden.

$$f(x) = A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(x - x_c)^2}{\sigma^2}\right) + h \quad (4)$$

Hierfür wurde das Python Paket `scipy.optimize` mit der Funktion `curve_fit` verwendet. Die Bilder der Messungen sind im Anhang. Die Erhaltenen Parameter wurden ohne Offset h abgebildet in Abbildung 12 dargestellt. Wenn man die Gaußkurve mit der Differentialgleichung 5 welche die Bewegung der Elektronenwolken in Halbleiter beschreibt, vergleicht

$$c(t, x) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu_n Et)^2}{4D_n t}\right) \quad (5)$$

erhält man folgende Gleichungen für die einzelnen Parameter der Gaußkurve 4:

$$x_c(t) = \mu_n Et \quad A(t) = \exp\left(-\frac{t}{\tau_n}\right) \quad \sigma(t)^2 = 2D_n t \quad (6)$$

Hierbei sind μ_n die Beweglichkeit der Elektronenwolken, τ_n ihre Lebenszeit und D_n die Diffusionskonstante.

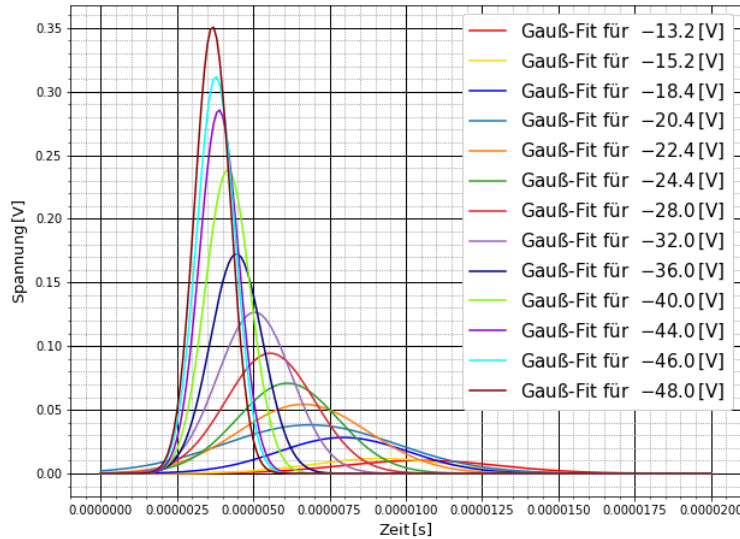


Abbildung 12: Gemeinsame Darstellung der Gaußkurven bei konstanten Abstand ohne Offset nebeneinander.

Als erstes wird versucht die Beweglichkeit μ_n zu bestimmen. Hierfür wurde die Inverse Spannung $\frac{1}{U(t)}$ gegen die Zeit geplottet und mit einer gewichteten linearen Regression gefittet. Als Fehler wurden die Fehler der Zeit auf der y-Achse verwendet. Siehe Abbildung 15. Das multiplizieren der Steigung m mit der Länge des Halbleiters $l = 3 \text{ cm}$ so wie dem Abstand zwischen Laser und Nadel $d = 3.6 \text{ mm}$ ergibt nun die gesuchte Beweglichkeit.

$$\mu_1 = ldm \quad (7)$$

Der Fehler ergibt sich durch Gaußsche Fehlerfortpflanzung mit der Gleichung 8 wo bei die Fehler auf die Abstände beide auf 0.1 mm geschätzt wurden.

$$\sigma_{\mu_1} = \sqrt{(dm\sigma_l)^2 + (lm\sigma_d)^2 + (dl\sigma_m)^2} \quad (8)$$

Dies ergab einen Wert von $\mu_1 = (3.90 \pm 0.07) \times 10^3 \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$. Nun wurde die Lebenszeit über die Amplitude der Gaußfits bestimmt. Hierfür wurde als Amplitude $A \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}}$ verwendet und dies gegen die Zeit geplottet. Die Datenpunkte wurden dann wie in Abbildung 13 zu sehen exponentiell gefittet mit der Form 9.

$$f(x) = C \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + h \quad (9)$$

Für den Parameter und damit die Lebenszeit ergab sich ein Wert von $\tau_1 = (1.28 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ s}$. Nun wird die Diffusionskonstante D_1 bestimmt, indem σ^2 gegen die Zeit dargestellt wird und eine linearer Fit an diese Werte angepasst wird (siehe Abbildung 14). Da die Fehler auf das Sigma durch das Quadrieren relativ groß wurden wurde ein gewichteter fit mit Fehlern auf σ^2 durchgeführt. Das halbieren der Steigung des Fits ergibt für die Diffusionskonstante $D_1 = (3.4 \pm 0.5) \times 10^{-5} \frac{\text{cm}^2}{\text{s}}$. Die Werte sind noch einmal gemeinsam in Tabelle 4 dargestellt, zusammen mit dem erwarteten Literaturwert.

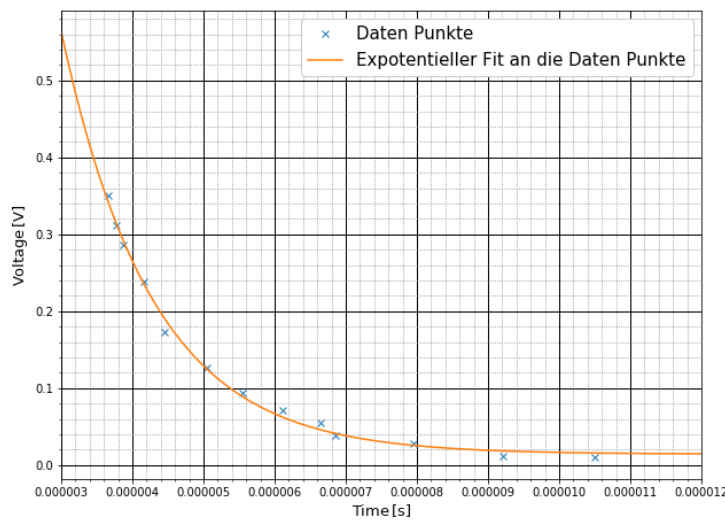


Abbildung 13: Exponentieller Fit der Amplituden bei Konstantem Abstand. Fehler wurden nicht eingezeichnet, da sie nicht sinnvoll zu erkennen waren.

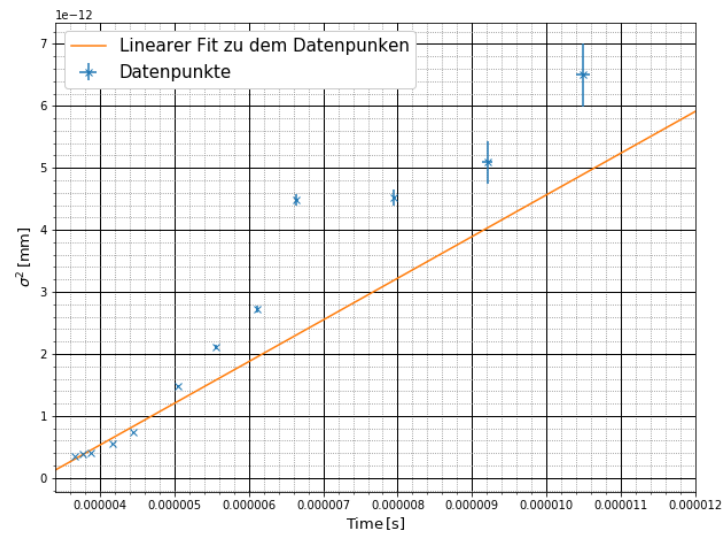


Abbildung 14: Datenpunkte von σ^2 gegen die Zeit mit Fehlern. In orange der gerade Fit zur Bestimmung der Diffusionskonstante.

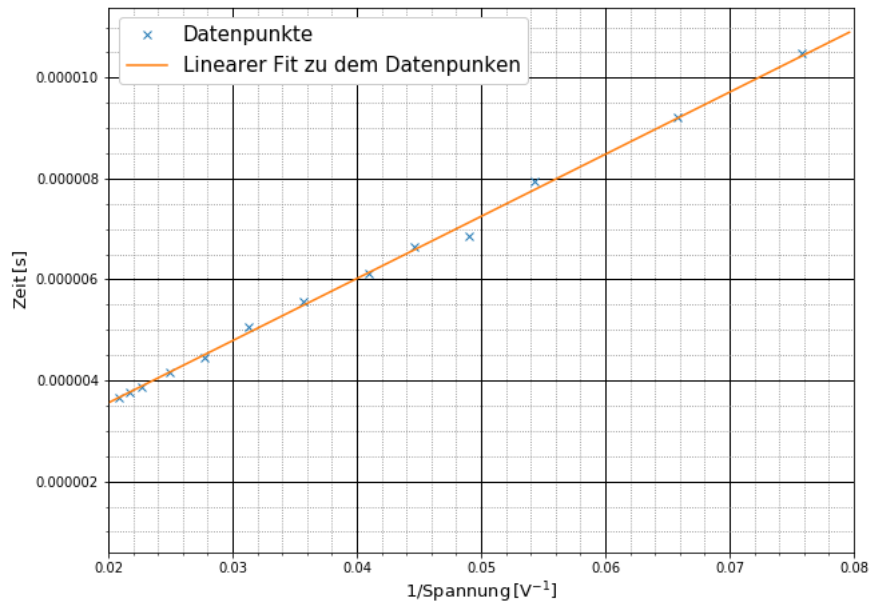


Abbildung 15: Linearer Fit zur Bestimmung der Beweglichkeit bei konst. Abstand. Fehler wurden nicht beigefügt, da diese sich nicht sinnvoll darstellen ließen.

4.2 Messung bei Konstanter Spannung

Für die Messung mit Konstanter Spannung werden wie zuvor die Daten mit der Gleichung 4 gefittet und sind in Abbildung 16 ohne Offset dargestellt.

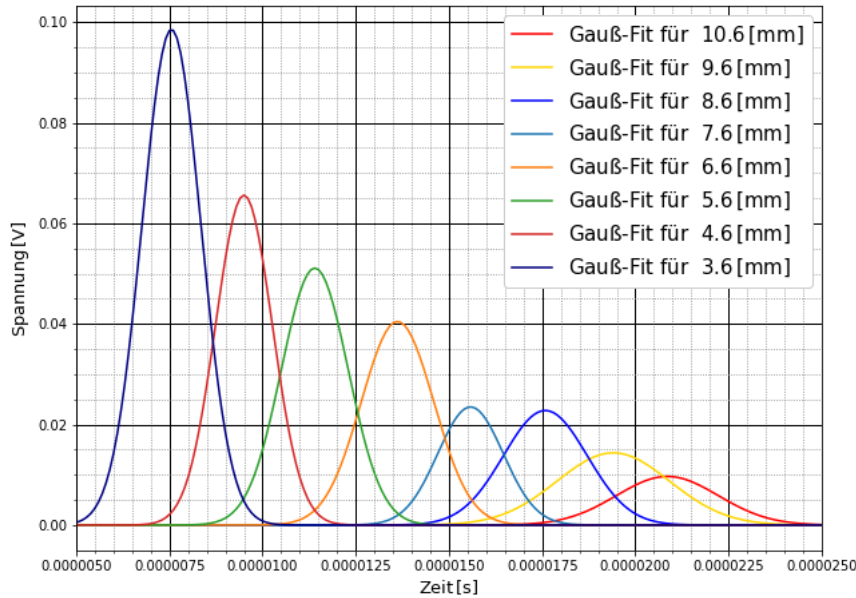


Abbildung 16: Gemeinsame Darstellung der Gaußkurven bei konstanter Spannung ohne Offset nebeneinander.

Als nächstes wurde die Beweglichkeit μ_2 bestimmt indem der gemessene Abstand zwischen Nadel und Laser gegen die Zeit gefittet, welche die Elektronenwolke benötigte. Hierbei wurden die Fehler auf die Zeit mitberücksichtigt. Die Steigung m erhält man mit Gleichung 10.

$$\mu_2 = \frac{1}{mE} \quad \sigma_{mu_2} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_m}{m^2 E}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_E}{mE^2}\right)^2} \quad (10)$$

E kann hier über die angelegte Spannung $U = (48 \pm 0.5) \text{ V}$ und die Länge $l = 3 \pm 0.1 \text{ cm}$ mit Gleichung 11 bestimmt werden.

$$E = \frac{U}{l} \quad \sigma_E = \sqrt{\left(\frac{\sigma_U}{l}\right)^2 + \left(\frac{U\sigma_l}{l^2}\right)^2} \quad (11)$$

Damit ergibt sich für $\mu_2 = (3136 \pm 32) \frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}$.

Danach wird wie bei dem Konstanter Spannung die Lebenszeit wie zuvor über die Amplitude bestimmt. Hierzu wird Gleichung 9 benutzt wie in Abbildung 18 dargestellt. Für die Lebenszeit ergibt sich dadurch ein Wert von $\tau_2 = (5.9 \pm 1.0) \times 10^{-6} \text{ s}$.

Für die Diffusionskonstante wird wieder der Parameter σ^2 mit Fehlern gegen die Zeit aufgetragen und mit einem gewichteten Fit angepasst. Beide sind in Abbildung 19. Es ergibt sich durch halbieren der Steigung ein Wert von $D_2 = (2.8 \pm 0.7) \times 10^{-6}$. Die Werte sind noch einmal gemeinsam in Tabelle 4 dargestellt zusammen mit dem erwarteten Literaturwert.

	Beweglichkeit $\mu \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{Vs}}\right]$	Lebenszeit $\tau \left[\mu\text{s}\right]$	Diffusion $D \left[\frac{\text{cm}^2}{\text{s}}\right]$
Messung bei konst. Abstand	(3900 ± 70)	(1.28 ± 0.08)	$(3.4 \pm 0.5) \times 10^{-5}$
Messung bei konst. Spannung	(3136 ± 32)	(5.9 ± 1.0)	$(2.8 \pm 0.7) \times 10^{-6}$
Literaturwert	3900	(45 ± 2)	101

Tabelle 4: Messwerte von Versuchsteil 2 mit Literaturwerten[1]

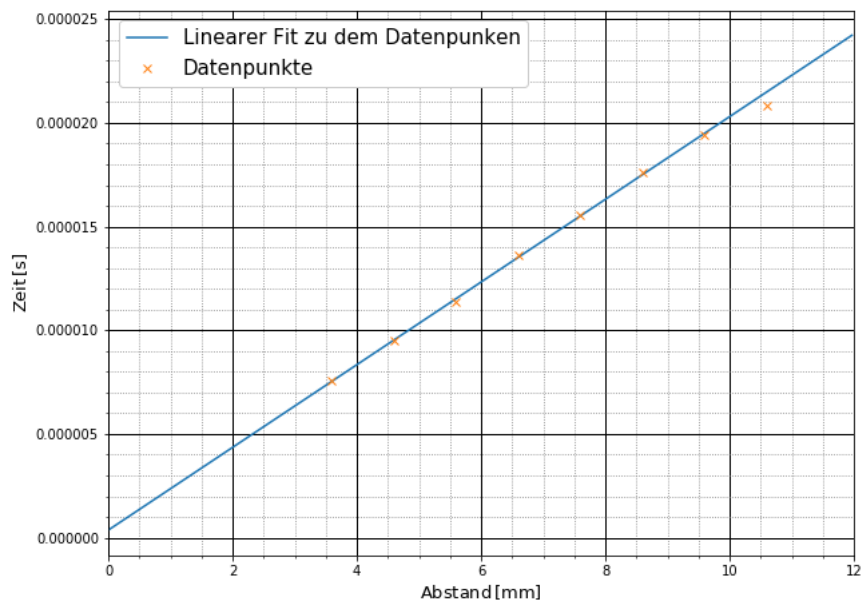


Abbildung 17: Linearer Fit zur Bestimmung der Beweglichkeit bei konst. Spannung. Fehler wurden nicht beigelegt, da diese sich nicht sinnvoll darstellen ließen.

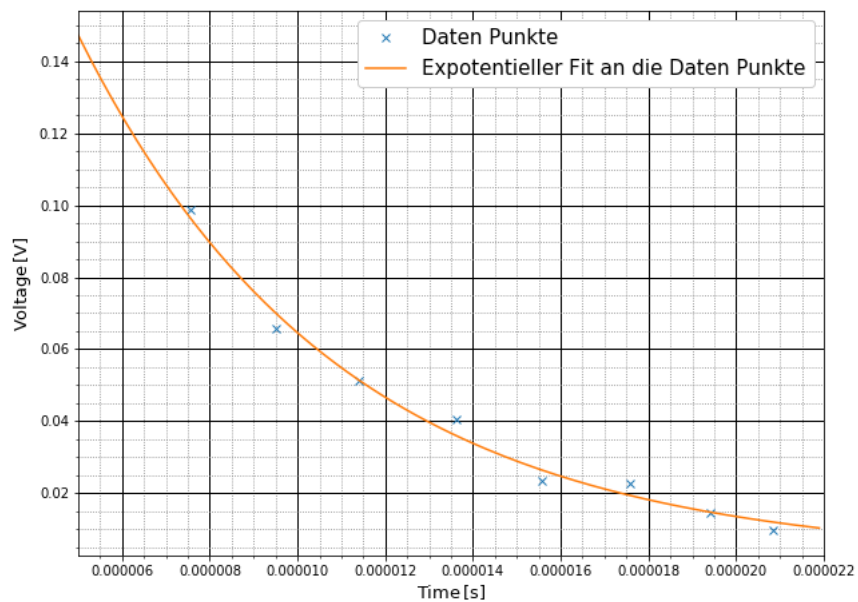


Abbildung 18: Exponentieller Fit der Amplituden bei Konstanter Spannung. Fehler wurden nicht eingezeichnet, da sie nicht sinnvoll zu erkennen waren.

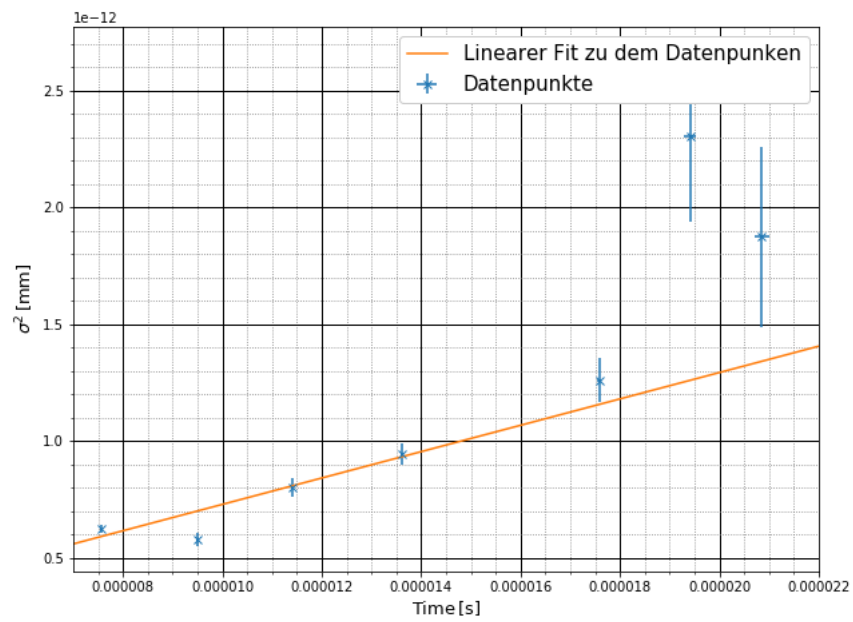


Abbildung 19: Datenpunkte von σ^2 gegen die Zeit mit Fehlern. In orange der gerade Fit zur Bestimmung der Diffusionskonstante.

5 Auswertung von Halbleiter Experiment

Im Versuchsteil 3 wurden die Energiespektren von ^{241}Am und ^{57}Co mit zwei unterschiedlichen Detektoren aufgenommen. Für die Auswertung wurden hier der 122.06 keV so wie der 136.47 keV Photopeak von Cobalt so wie der 59.5 keV Peak von Americium mit einer Gaußkurve wie in Gleichung 4 gefittet. Die Peaks so wie die dazugehörigen Anpassungen für ^{57}Co sind in Abbildung 20 und 21 zu sehen. Die für Americium sind in Abbildung 22 und 23 zu finden. Die gesamten Spektren sind im Anhang.

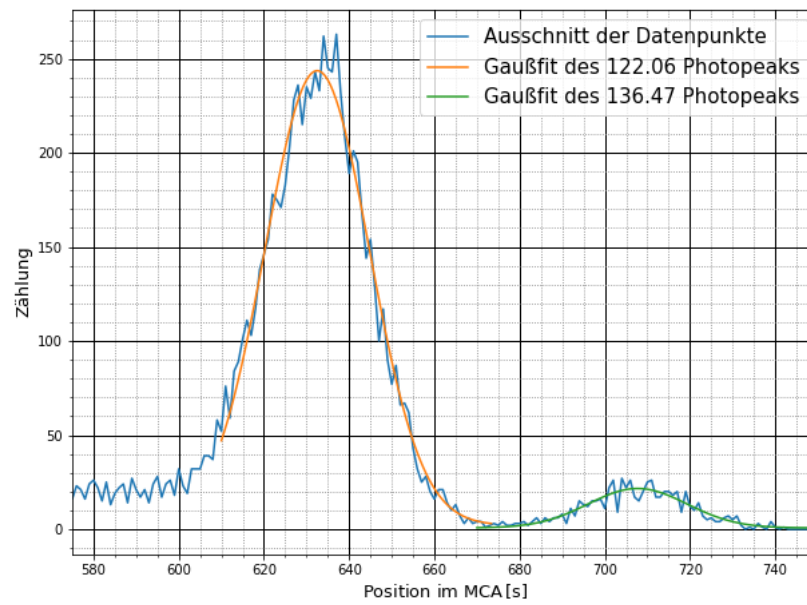


Abbildung 20: Gaußfit für einen denn Datenbereich der 122.06 keV und 136.47 keV Photopeaks mit dem Silizium Detektor.

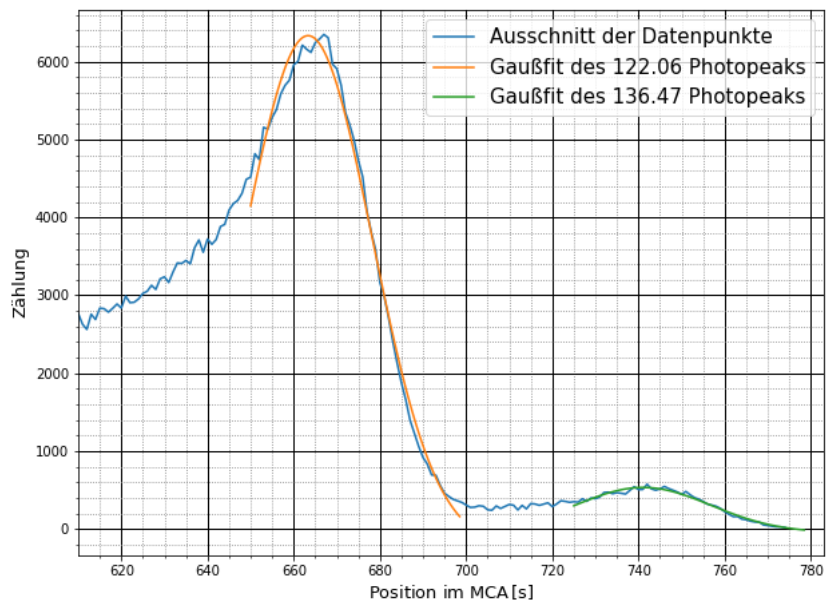


Abbildung 21: Gaußfit für einen denn Datenbereich der 122.06 keV und 136.47 keV Photopeaks mit dem CdTe Detektor.

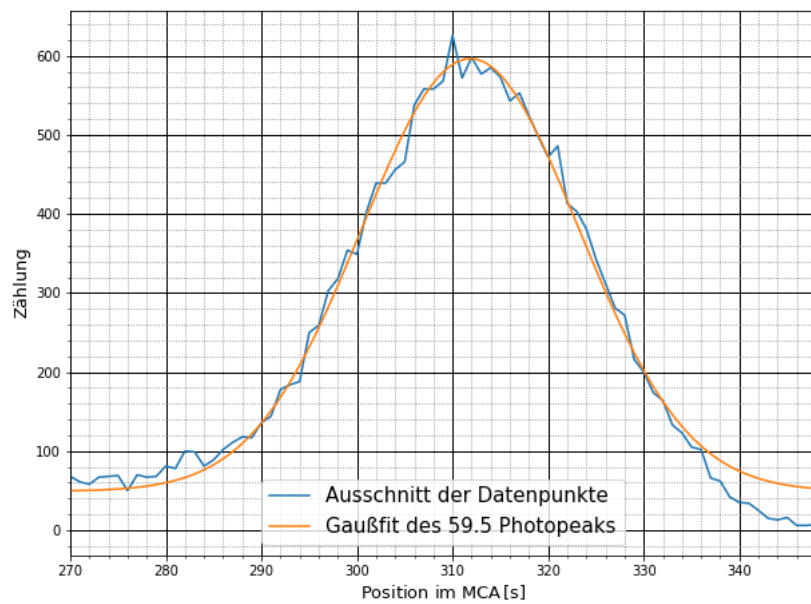


Abbildung 22: Gaußfit für einen denn Datenbereich der 59.5 keV Photopeaks mit dem Silizium Detektor.

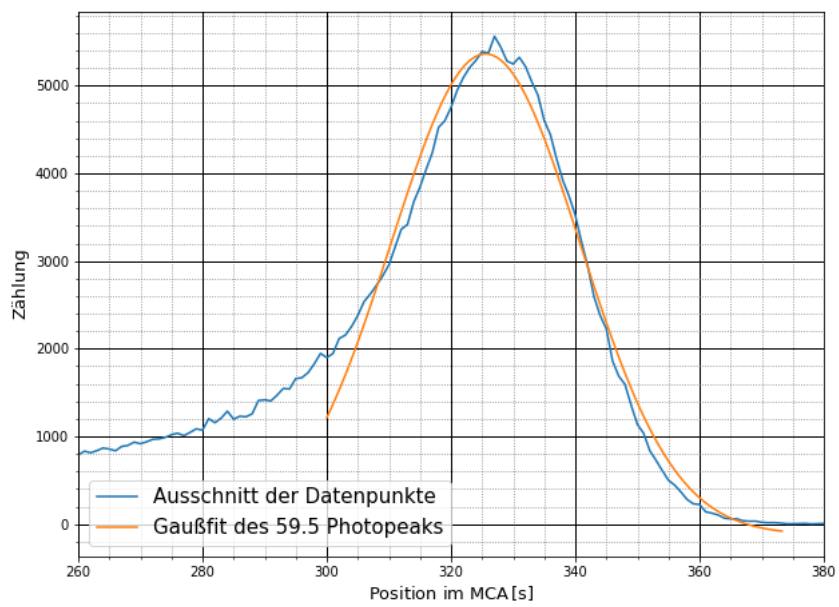


Abbildung 23: Gaußfit für einen demn Datenbereich der 59.5 keV Photopeaks mit dem CdTe Detektor.

Die Position der Peaks welche die Kanalnummer des MCA's ist kann nun mit Hilfe der bekannten Energien geeicht werden, indem man separat für beide Detektoren Energie gegen Position aufträgt und die Werte dann linear anpasst. Hierbei wurde ein gewichteter Fit verwendet welche die Fehler auf die Position der Peaks berücksichtigte. Die Werte so wie die angepasste Kurve sind in Abbildung 24 zu sehen. Die erhaltenen Gleichungen für den Zusammenhang zwischen Kanal und Energie sind:

$$f(E)_{Kanal} = (5.3988 \pm 0.0010) \frac{1}{\text{keV}} E + (4.33 \pm 0.10)$$

$$f(E)_{Kanal} = (5.128 \pm 0.008) \frac{1}{\text{keV}} E + (6.7 \pm 0.8)$$

Nun wird mit das Absorptionsverhältnis der beiden Detektoren bei unterschiedlichen Energien bestimmt.

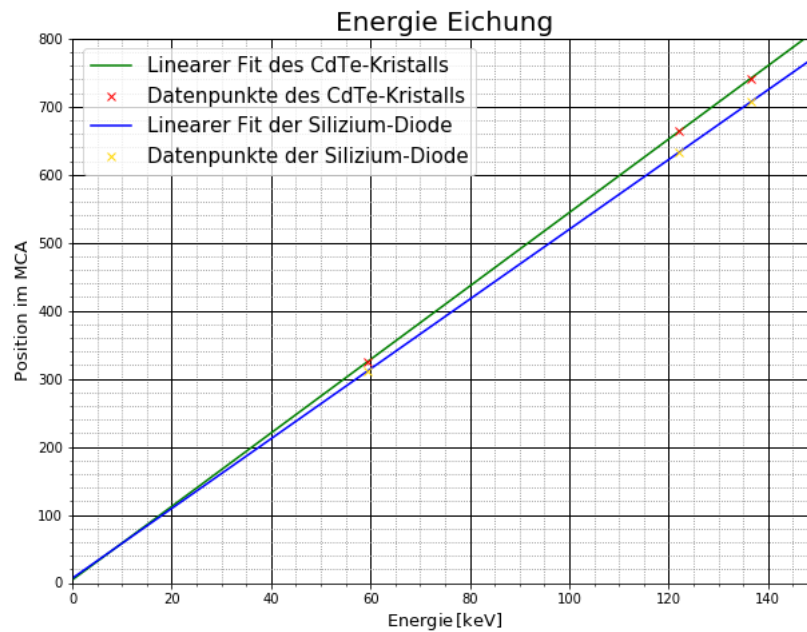


Abbildung 24: Geraden zur Eichung der beiden Detektoren. In blau die Eichung für den Silizium Detektor und in grün für den CdTe Detektor. Fehler sind nicht mit eingezeichnet da sie zu klein waren um sie sinnvoll darzustellen.

Dafür müssen die aus den Fit bestimmten Amplituden erst einmal aktive Fläche normiert werden und dann durcheinander geteilt wie in Gleichung 12 dargestellt:

$$\frac{Abs_{Si}}{Abs_{CdTe}} = \frac{A_{Si}/a_{Si}}{A_{CdTe}/a_{CdTe}} \quad (12)$$

Die Fläche des CdTe Detektors beträgt $a_{CdTe} = 23 \text{ mm}^2$ und die des Si Detektors $a_{Si} = 100 \text{ mm}^2$. Die erhaltenen Werte sind zusammen mit den Literaturwerten aus der Anleitung[1] in Tabelle 5 zu finden. Als letztes wird die Relative Energieauflösung der einzelnen Peaks bestimmt. Zur Berechnung wird die Halbwertsbreite verwendet wodurch sich folgende Gleichung ergibt:

$$RER(E) = \frac{FWHM}{E} \approx \frac{2.35\sigma(E)}{E} \quad (13)$$

Die erhaltenen Werte sind in Tabelle 6 zu finden.

Photopeak Energie [keV]	Berechnete Werte [%]	Literaturwerte [%]
59.5	1.28 ± 0.07	1,40
122.06	0.58 ± 0.05	1,83
136.47	0.45 ± 0.06	2,00

Tabelle 5: Absorptionsverhältnis von Versuchsteil 3 mit Literaturwerten[1]

Detektor und Energie	Energieauflösung
Silizium 59.5	0.449 ± 0.007
Silizium 122.06	0.236 ± 0.005
Silizium 136.47	0.200 ± 0.010
CdTe 59.5	0.600 ± 0.012
CdTe 122.06	0.285 ± 0.007
CdTe 136.47	0.272 ± 0.010

Tabelle 6: Energieauflösung von Versuchsteil 2 mit Literaturwerten[1]

6 Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 1

In Versuchsteil 1 ging es darum, die Bandlückenenergie von Silizium und Germanium zu ermitteln. Dies wurde durch die Aufzeichnung der Transmission und des Widerstandes bei der Bestrahlung der Probe mit Photonen verschiedener Energien erreicht. Durch die oben genannte Methode konnten nun aus den aufgenommenen Datensätzen die Bandlückenenergien bestimmt werden. In der obigen Analyse wurden die Mittelwerte der Absorptions- und Transmissions Energien noch nicht erwähnt, welche die Endergebnisse für die jeweiligen Rechnungen wären. Diese wurden nun in Tabelle 7 eingetragen. Die Literaturwerte zu den Ergebnissen stammen aus der Versuchsanleitung [1]. Die Literaturwerte wurden über die Formel 14 mit den berechneten Ergebnissen verglichen.

Tabelle 7: Ergebnisse der Bandlücke Energiebestimmung in Silizium (Si) und Germanium (Ge).

	Mittelwerte der Messergebnisse in eV	Literaturwert in eV	Kompatibilität
1. Si Messung links	1.09+/-0.04	1.12	0.671224
1. Si Messung rechts	1.07+/-0.04	1.12	1.1568
2. Si Messung links	1.14+/-0.05	1.12	0.418861
2. Si Messung rechts	1.035+/-0.031	1.12	2.71722
Ge Messung links	0.66+/-0.04	0.66	0.00882199
Ge Messung rechts	0.633+/-0.029	0.66	0.93153

Man sieht, dass alle Ergebnisse außer dem rechten der zweiten Silizium Messung ihren Literaturwerten kompatibel sind. Bei Betrachtung der zugehörigen linearen Regressionen (Abbildung 27) wird deutlich, dass dies an falsch gewählten Bereichen liegen könnte.

Alles in allem verlief die Durchführung des Versuches annehmbar, abgesehen davon dass zunächst vergessen wurde der Strahlengang für Germanium zu optimieren was die Durchführung beträchtlich verlängerte. Die Hintergrundmessungen, welche durch entfernen der Gitter statt die Blende komplett zu verschließen stellten sich als brauchbar heraus. Unangenehm fiel während der Auswertung auf, dass die Geschwindigkeit des Motors variierte, was sich in einer unterschiedlichen Winkeländerungsrate niederschlug.

7 Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 2

Im Versuchsteil 2 ging es darum die Elektronenwolken innerhalb eines Halbleiters zu untersuchen. Hierfür wurden ein 3cm langer Germanium Block genutzt. Zur Messung wurde einmal der Abstand zwischen Laser und Nadel verändert und einmal die am Germanium angelegte Spannung. Die berechneten Werte sind die Lebensdauer, Beweglichkeit so die Diffusion der Wolken und sind in Tabelle 4 zu finden. Zum Vergleich der Werte mit dem Literaturwert wurde die Gleichung 14 verwendet. Die Werte sind in Tabelle 8 notiert.

$$t = \frac{x_{Mess} - x_{Literatur}}{\sigma_{x_{Messung}}} \quad (14)$$

	t bei konst. Abstand [σ]	t bei konst. Spannung [σ]
μ	0.0	23.875
τ	546.5	39.1
D	202.0	144.3

Tabelle 8: Vergleichswerte der Berechneten Werte mit dem Literaturwerten über Gleichung 14

Wenn man sich diese Werte anschaut passen bis auf den Wert bei μ mit konstantem Abstand keine der Werte überein. Die große Abweichung bei der Lebenszeit kann man damit erklären, dass die freien Elektronen tiefer in der Germanium Probe erzeugt werden. Gittereffekte naher der Oberfläche können daher zu ein Grund für die starke Verkürzung der Lebenszeit sein. Wenn man sich die Diffusionskonstanten anschaut fällt auf, dass diese nicht einmal in der selben Größenordnung sind. Hier könnte der Grund ein Fehler in der Auswertung sein, welcher jedoch nicht gefunden worden ist. Ein weiterer Grund für die großen Unterschiede könnte auch sein, dass man den Gaußfit mit einer Gerade hätte überlagern sollen. Da dies nicht getan wurde kann dies zu systematischen Fehlern geführt haben die, die Unterschiede hervorrufen. Jedoch sollte die hierbei entstandene Diskrepanz nicht den Unterschied von mehreren Größenordnungen verursacht haben.

8 Zusammenfassung und Diskussion zum Versuchsteil 3

Im Versuchsteil 3 ging es um Halbleiterdetektoren. Hierbei wurde eine Silizium Diode und ein CdTe Kristall verwendet. Mit ihnen wurden die Energiespektren von ^{57}Co und ^{241}Am aufgezeichnet. Mit diesen Spektren wurde eine Energieeichung durchgeführt und dann die Energieauflösung der einzelnen Peaks so, wie das Absorptionsverhältnis der beiden Detektoren bei den Unterschiedlichen Peaks bestimmt.

Wenn man sich die Eichungen anschaut scheinen die Messwerte sehr gut zueinander zu passen, es fällt jedoch auf, dass die geraden eine Abweichung der Steigung voneinander haben, was zeigt, dass eine individuelle Kalibrierung sinnvoll ist.

Wenn man sich die Werte für die Absorptionsverhältnisse anschaut (siehe Tabelle 5) fällt auf das es einen großen unterschied zwischen denen bei höheren Energien also den beiden ^{57}Co Photopeaks der Wert geringer ist als bei der niedrigeren vom 59.5keV Peak von Americium. Dies steht etwas im Widerspruch zu den Literaturwerten bei denen das Absorptionsverhältnis für höhere Energien größer ist. Gründe dafür können Abweichungen der Herstellerangaben sein oder ein großer Verlust an Signalstärke durch Ladungsrekombination verloren haben, dass sie dem ursprünglichen Peak nicht mehr zugeschrieben werden können. Auch wurde die Absorption in der Epoxid-Schicht so wie der SiO₂-Schicht der Silizium-Diode nicht mitberücksichtigt.

Bei Betrachtung der Energieauflösung in Tabelle 6 fällt auf, dass die Auflösung des Silizium Detektors besser ist als die des CdTe Detektors. Auch scheint sich die Auflösung bei höheren Energien merklich zu verbessern. So scheinen sich die Photopeaks von Cobalt fast doppelt so gut auflösen wie beim 59.5keV Peak von Americium.

9 Tabellen

Tabellenverzeichnis

1	Parameter erste Silizium Messung	7
2	Parameter der zweiten Silizium Messung	8
3	Parameter der zweiten Silizium Messung	9
4	Messwerte von Versuchsteil 2 mit Literaturwerten[1]	16
5	Absorptionsverhältnis von Versuchsteil 3 mit Literaturwerten[1]	23
6	Energieauflösung von Versuchsteil 2 mit Literaturwerten[1]	23
7	Ergebnisse V1	24
8	Vergleichswerte V2	25

10 Bilder

Abbildungsverzeichnis

1	Bändermodell	2
2	Indirekt und Direkte Halbleiter	3
3	Referenz zur Geraden Anpassung	6
4	Korrigierter Lampendatensatz	7
5	Auftragung von gemessener Spannung der Untergrundmessung gegen die Winkel.	8
6	Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel.	9
7	Geraden Anpassungen erste Silizium Messung links	10
8	Geraden Anpassungen erste Silizium Messung rechts	10
9	Beispiel Energiebestimmung	11
10	Korrektur der Lampendaten Germanium	11
11	Geraden Anpassungen Germanium Messung links	12
12	Darstellung der Gaußkurven bei konst. Abstand	13
13	Exponentieller Fit der Amplituden bei konstantem Abstand	14
14	Fit zur Bestimmung der Diffusion bei konst. Abstand.	15
15	Linearer Fit zur Bestimmung der Beweglichkeit bei konst. Abstand	15
16	Darstellung der Gaußkurven bei konst. Spannung	16
17	Linearer Fit zur Bestimmung der Beweglichkeit bei konst. Spannung	17
18	Exponentieller Fit der Amplituden bei konstanter Spannung	17
19	Fit zur Bestimmung der Diffusion bei konst. Spannung.	18
20	V3 122.06 keV und 136.47 keV Peaks mit Silizium Detektor	19
21	V3 122.06 keV und 136.47 keV Peaks mit CdTe Detektor	20
22	V3 59.5 keV Peaks mit Silizium Detektor	20
23	V3 59.5 keV Peaks mit CdTe Detektor	21
24	Eichung für beide Detektoren	22
25	Korrigierter Lampendatensatz 2. Silizium messung	29
26	Geraden Anpassungen 2. Silizium Messung links	30
27	Geraden Anpassungen 2. Silizium Messung rechts	30
28	Energiebestimmung 2. Si Messung links	31
29	Mittelpunkt der 2. Si Messung vor Winkelkorrektur	31
30	Mittelpunkt der 2. Si Messung vor Winkelkorrektur	32
31	Geraden Anpassungen Germanium Messung links	32
32	Energiebestimmung Ge Messung links	33
33	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 1	33
34	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 2	34
35	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 3	34
36	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 4	35
37	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 5	35
38	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 6	36
39	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 7	36
40	Gaußfit an Messung bei Konst. Spannung 8	37

41	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	37
42	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	38
43	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	38
44	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	39
45	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	39
46	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	40
47	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	40
48	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	41
49	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	41
50	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	42
51	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	42
52	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	43
53	Gaußfit an Messung bei Konst. Abstand	43
54	Gesamtes Spektrum von Americium mit Silizium aufgenommen.	44
55	Gesamtes Spektrum von Americium mit CdTe aufgenommen.	44
56	Gesamtes Spektrum von Cobalt mit Silizium aufgenommen.	45
57	Gesamtes Spektrum von Cobalt mit CdTe aufgenommen.	45

11 Bibliography

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung: Fortgeschrittenen Praktikum Teil 1 Halbleiter.*
- [2] Simon Amrein. Halbleiter und halbleiterdetektoren, 1.4.2008.

12 Anhang

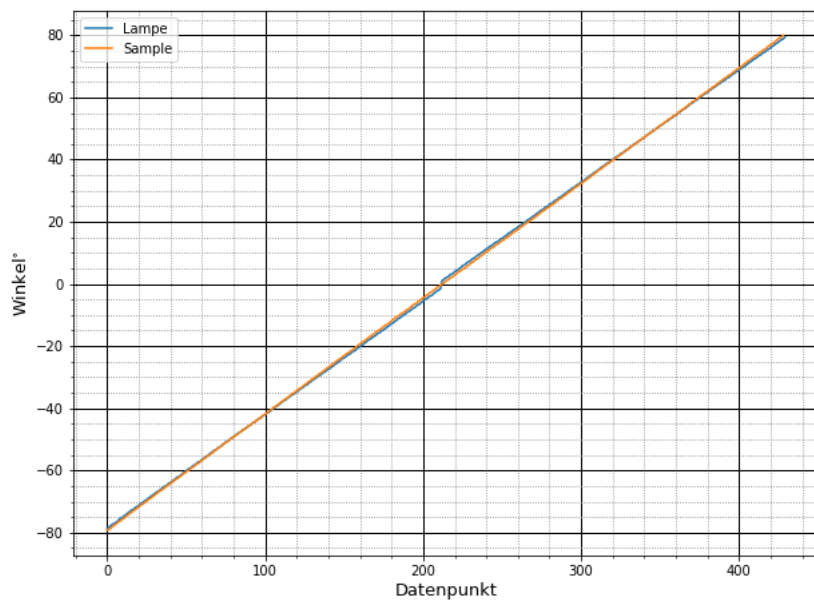


Abbildung 25: Auftragung der gemessenen Winkel für die Lampenmessung und erste Silizium Messung nach der Korrektur. Beide stimmen in den relevanten Bereichen bei ca. $30^\circ - 40^\circ$ weitgehend überein.

12.1 Laborbuch

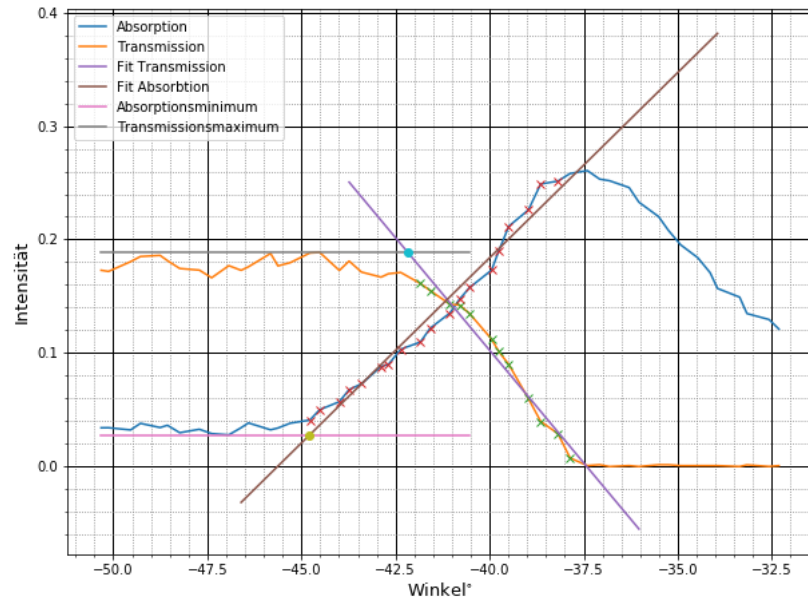


Abbildung 26: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln kleiner als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

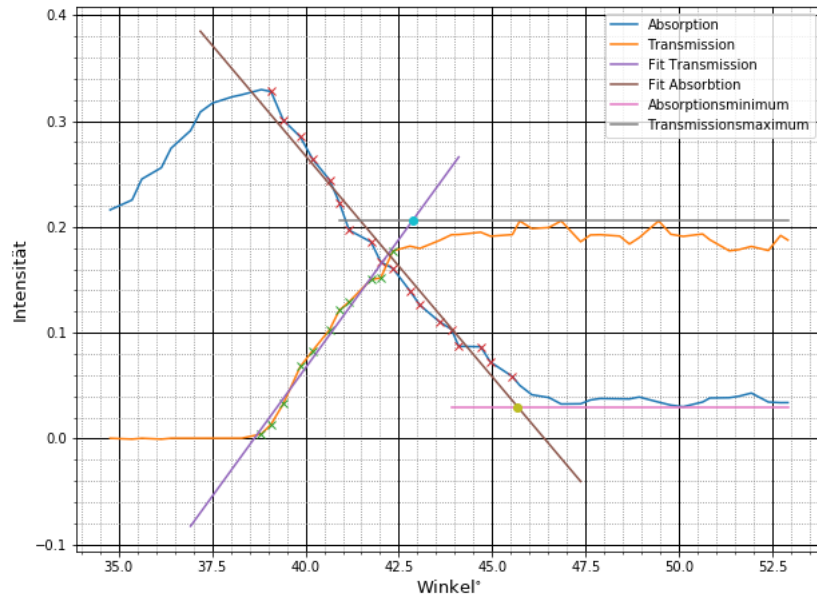


Abbildung 27: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel der zweiten Silizium Messung in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln größer als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

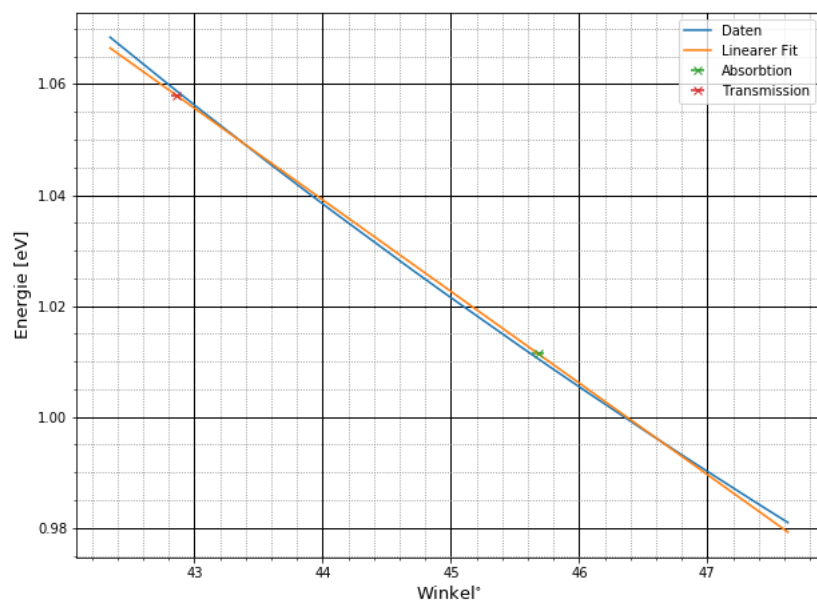


Abbildung 28: Auftragung der Energie gegen den Winkel der zweiten Silizium Messung. Die angepasste Gerade und die beiden Schnittpunkte sind auch eingetragen.

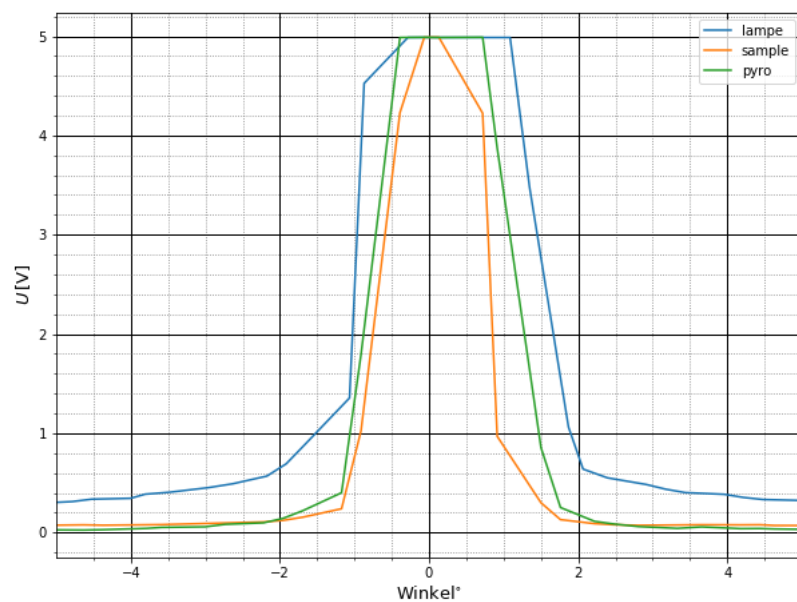


Abbildung 29: Auftragung der Intensität gegen den Winkel der zweiten Silizium Messung in der Nähe von 0° vor der Korrektur.

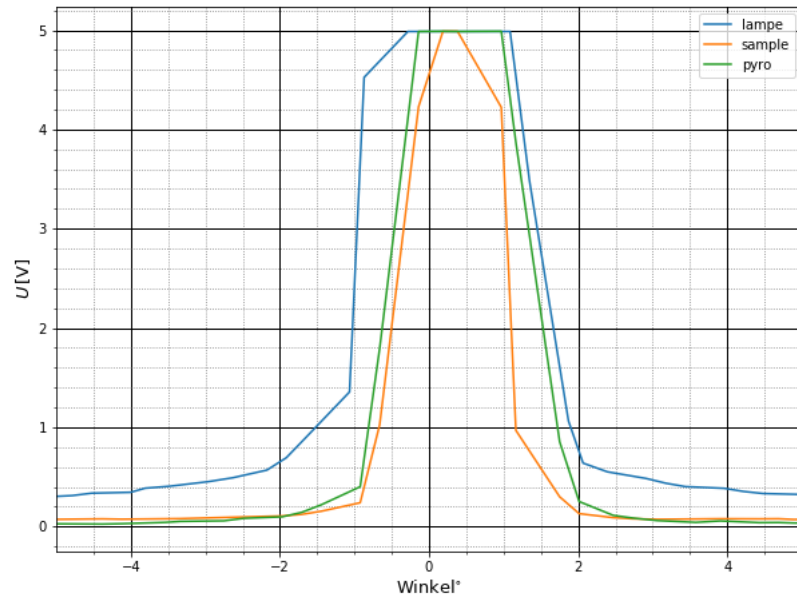


Abbildung 30: Auftragung der Intensität gegen den Winkel der zweiten Silizium Messung in der Nähe von 0° nach der Korrektur.

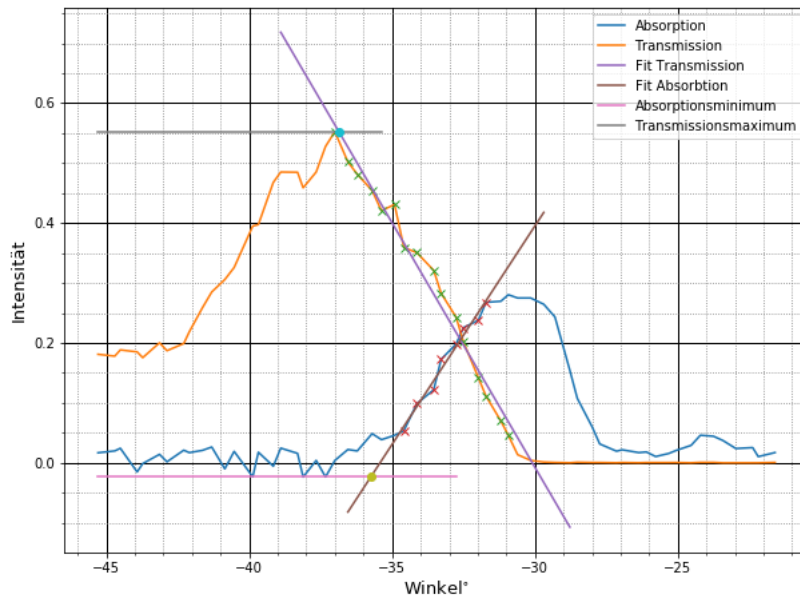


Abbildung 31: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen von Germanium gegen die Winkel in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln größer als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

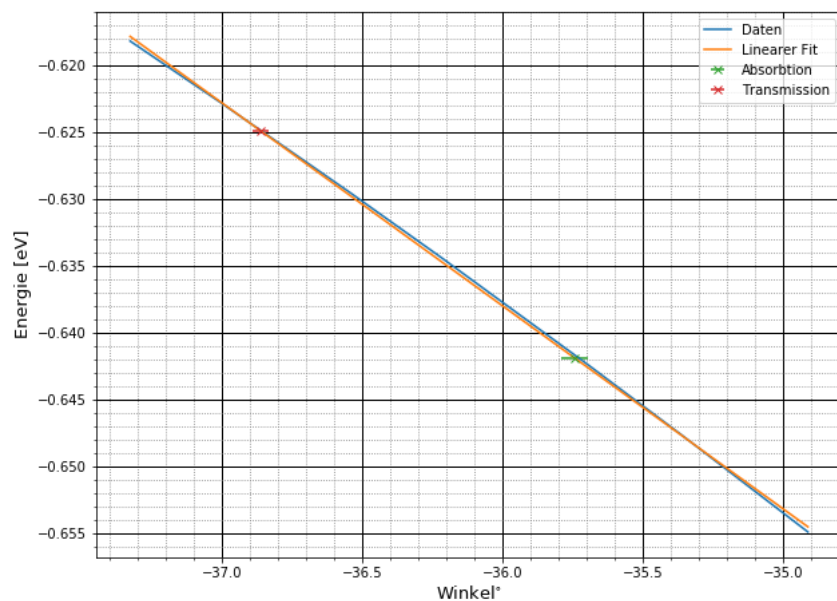


Abbildung 32: Auftragung der Energie gegen den Winkel der Germanium Messung. Die angepasste Gerade und die beiden Schnittpunkte sind auch eingetragen.

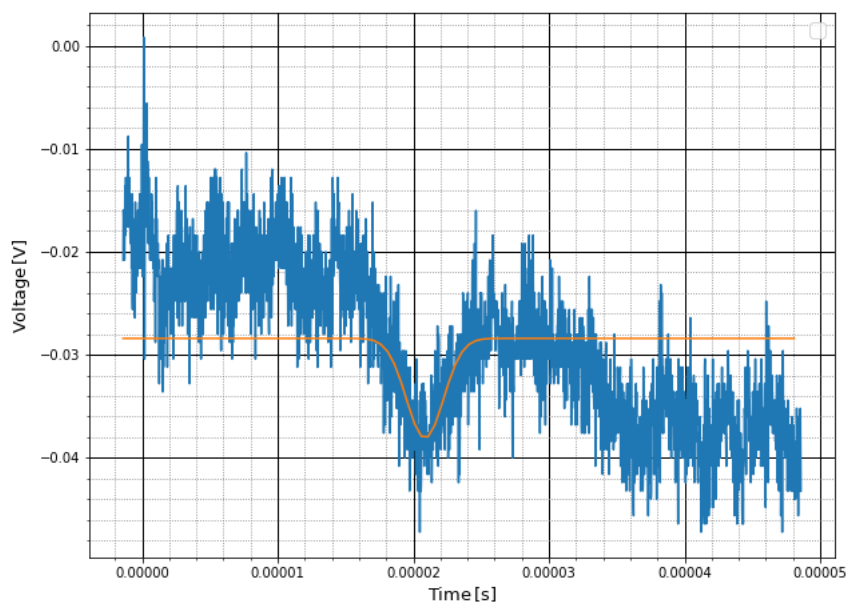


Abbildung 33: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 10.6 mm.

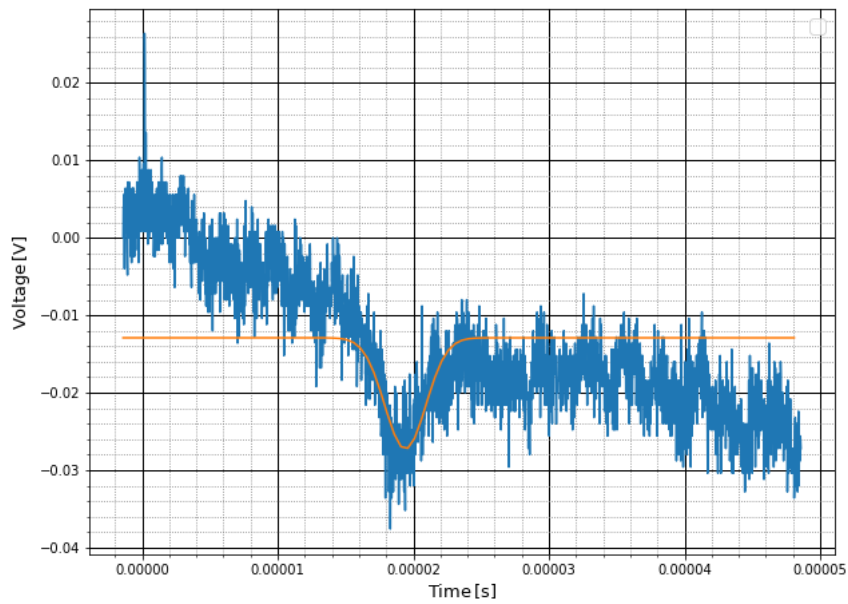


Abbildung 34: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 9.6 mm.

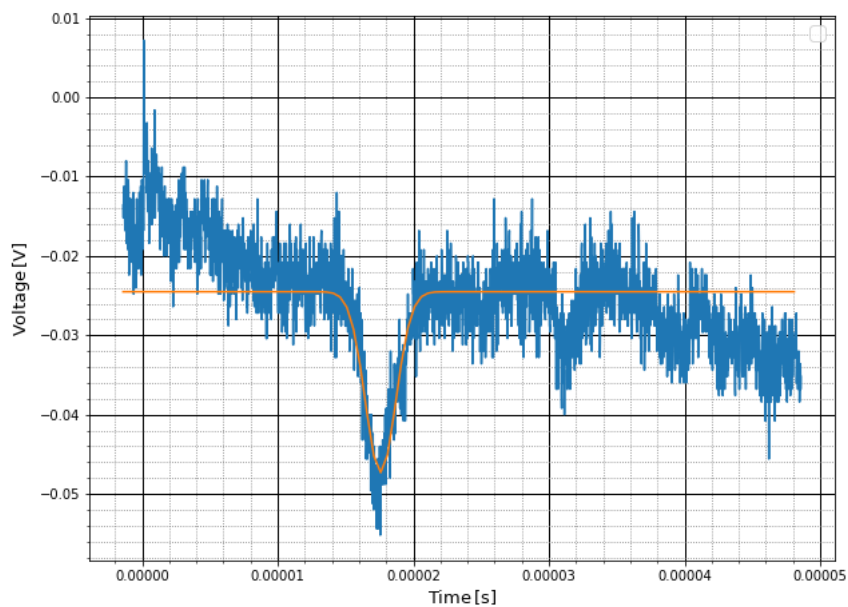


Abbildung 35: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 8.6 mm.

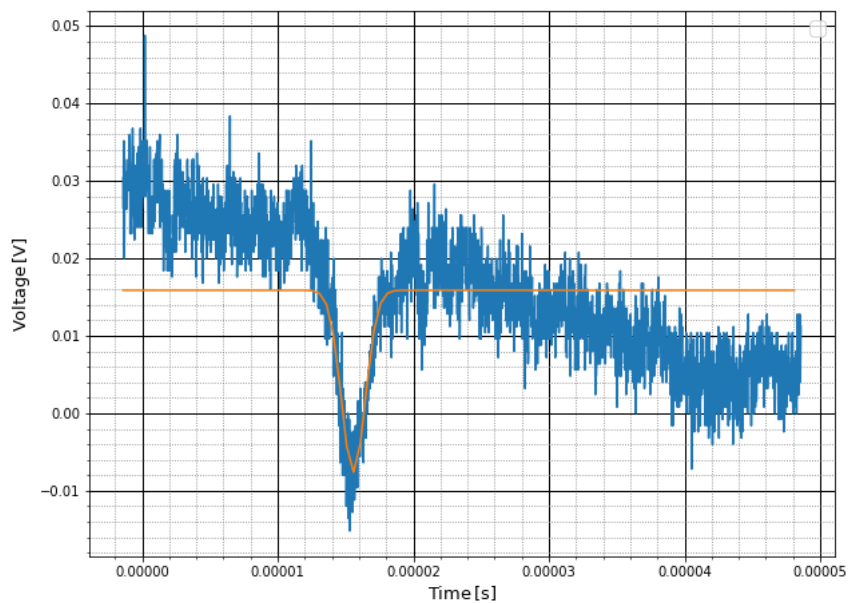


Abbildung 36: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 7.6 mm.

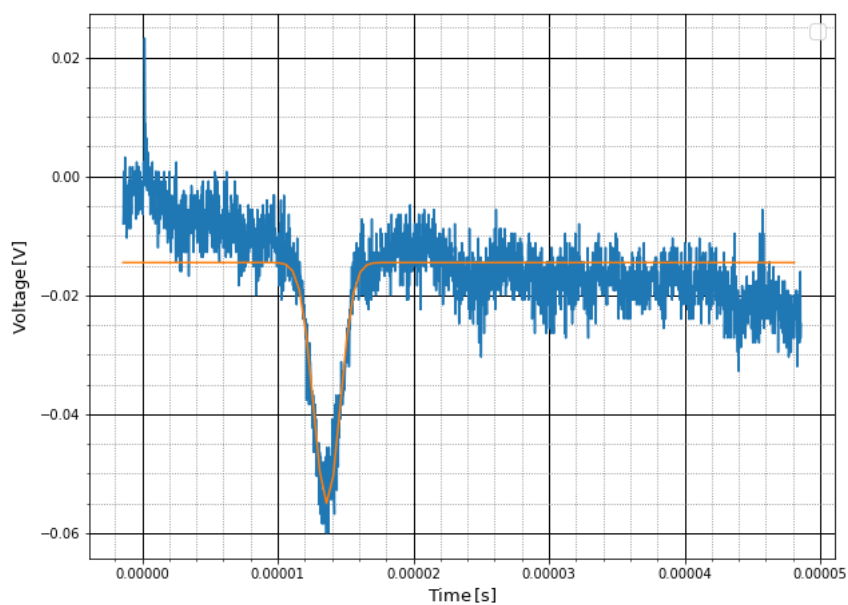


Abbildung 37: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 6.6 mm.

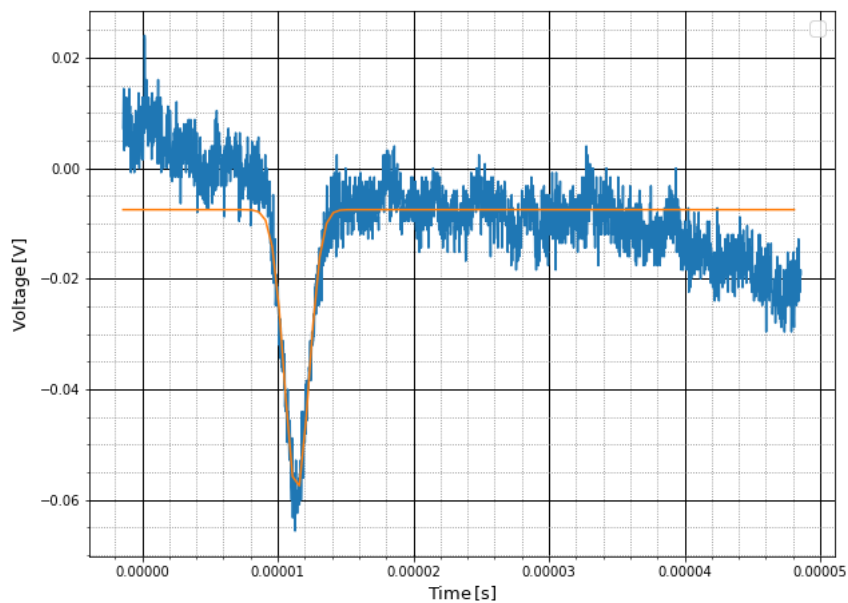


Abbildung 38: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 5.6 mm.

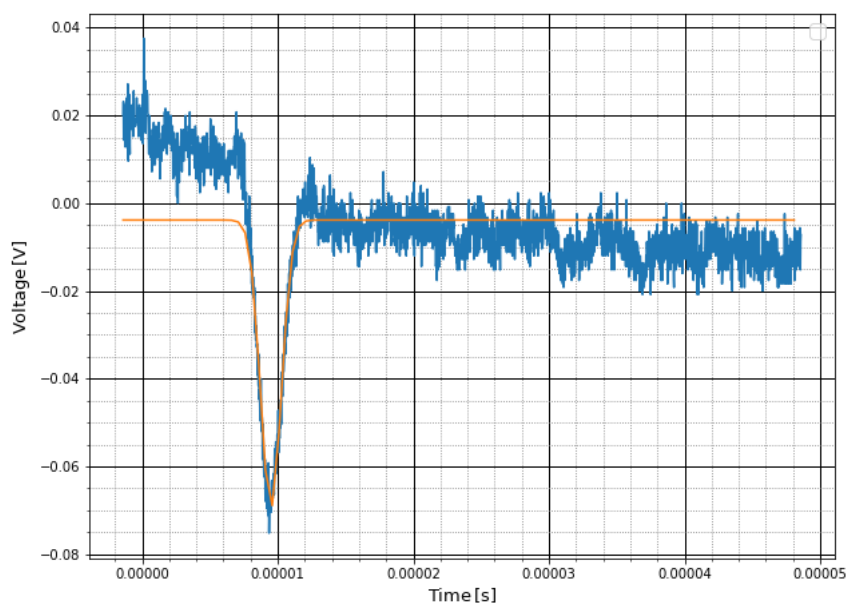


Abbildung 39: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 4.6 mm.

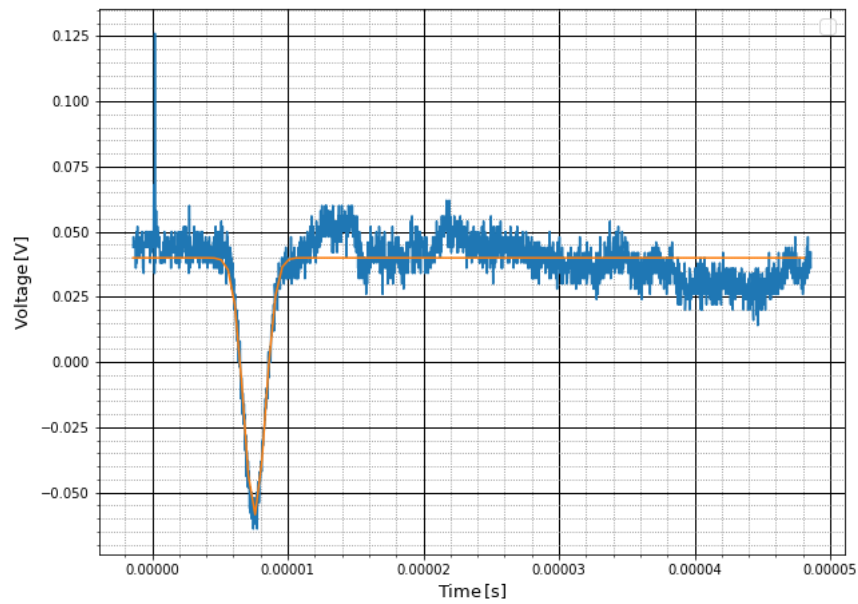


Abbildung 40: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei einer Spannung von 48 V und einem Abstand zwischen Nadel und Lase von 3.6 mm.

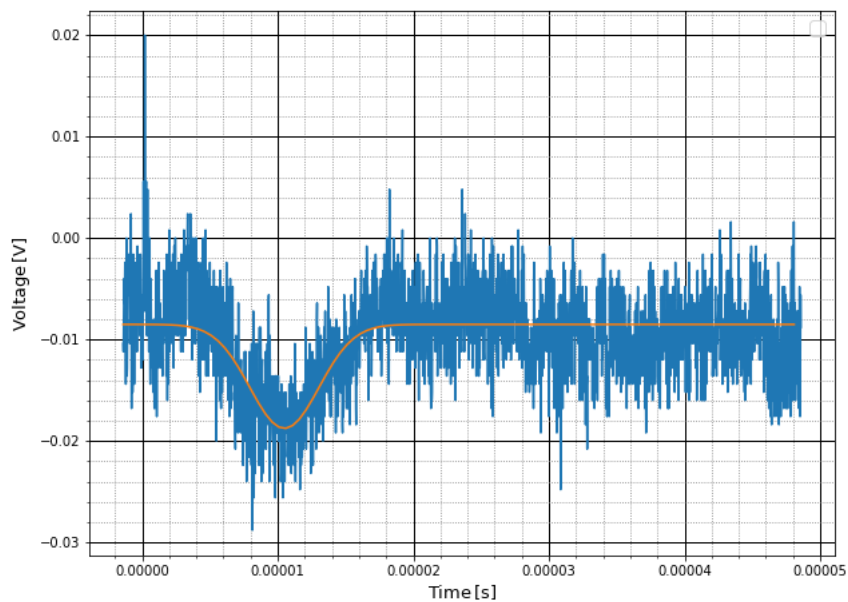


Abbildung 41: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -13.2 V

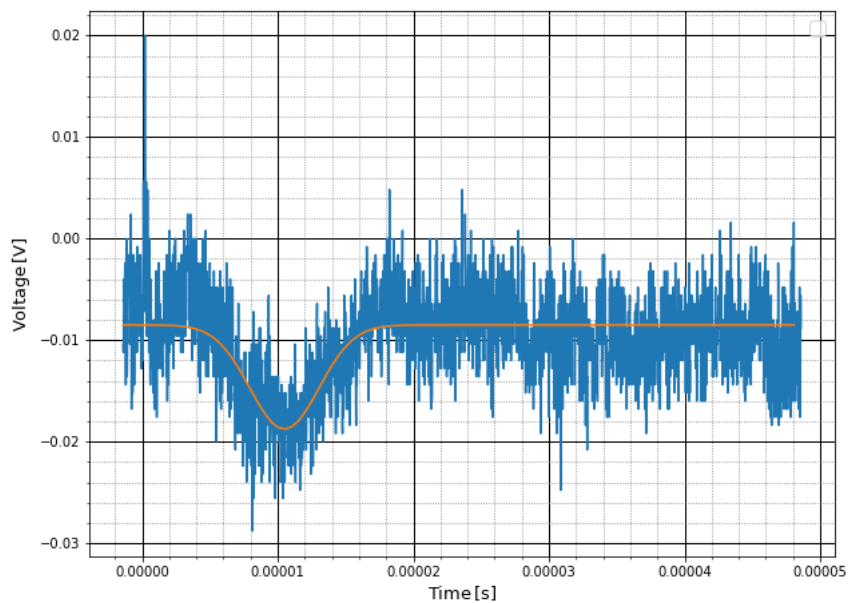


Abbildung 42: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -15.2 V

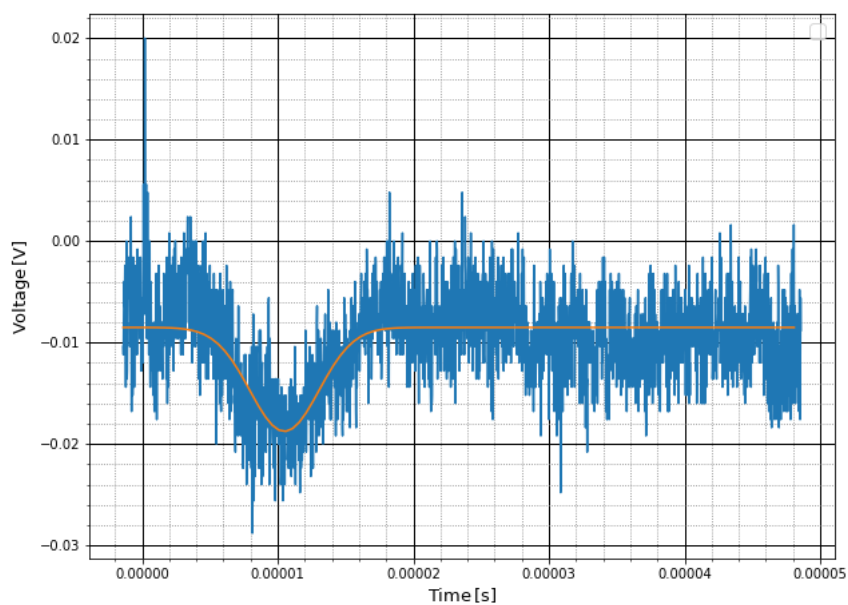


Abbildung 43: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -18.4 V

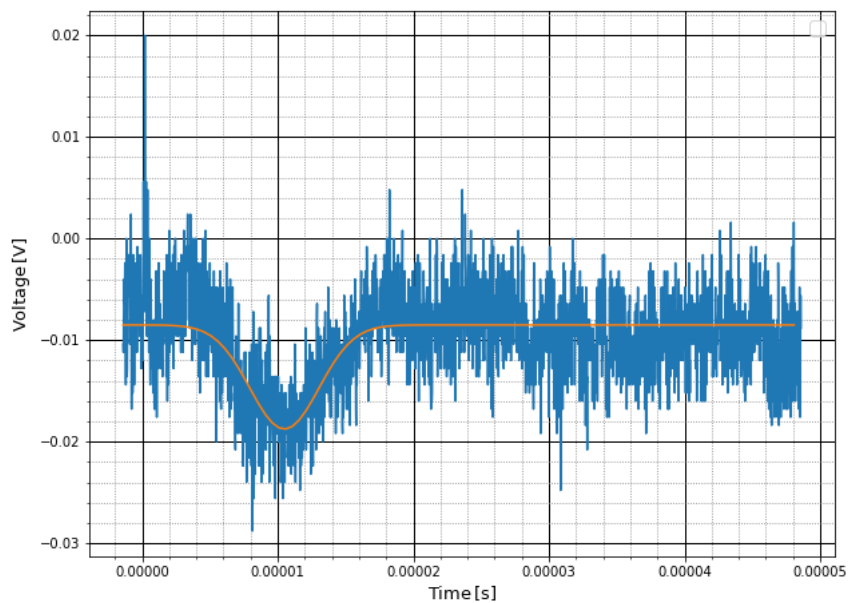


Abbildung 44: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -20.4 V

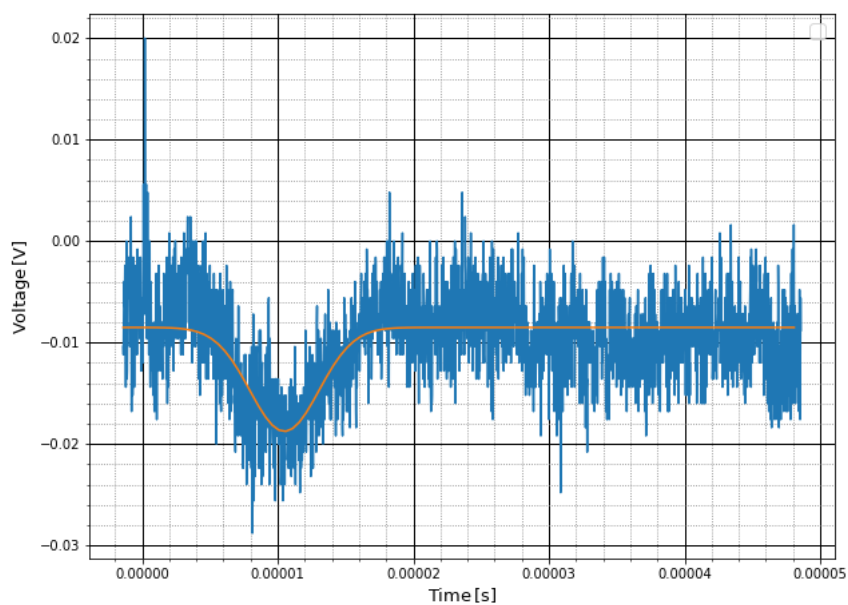


Abbildung 45: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -22.4 V

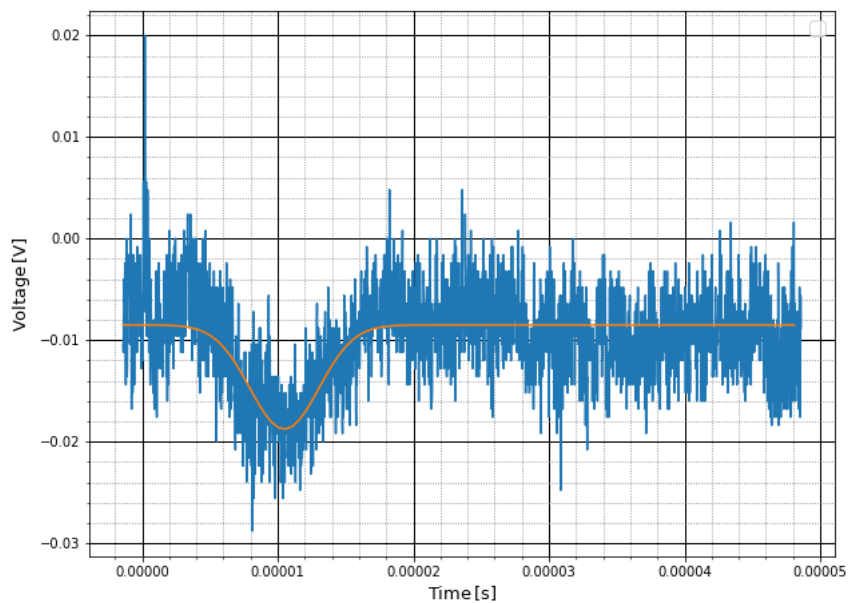


Abbildung 46: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -24.4 V

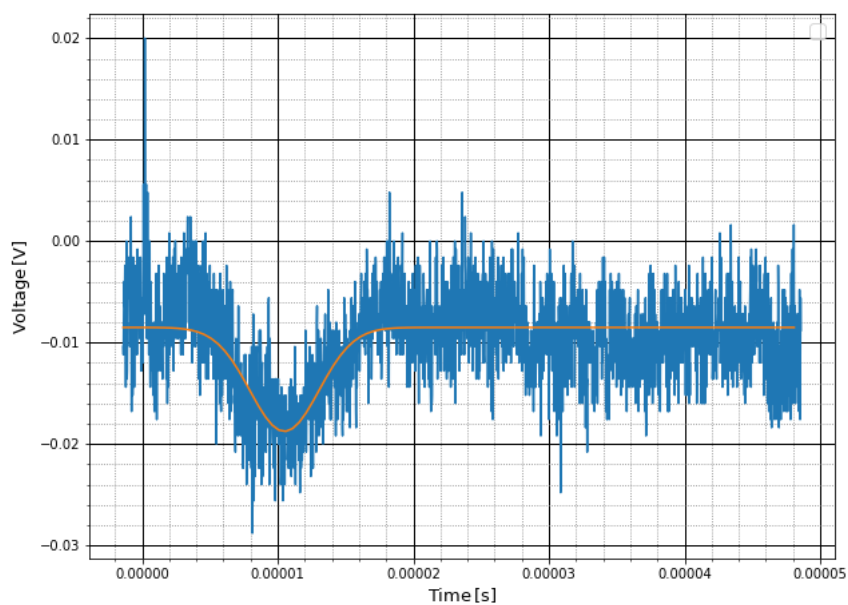


Abbildung 47: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -28.0 V

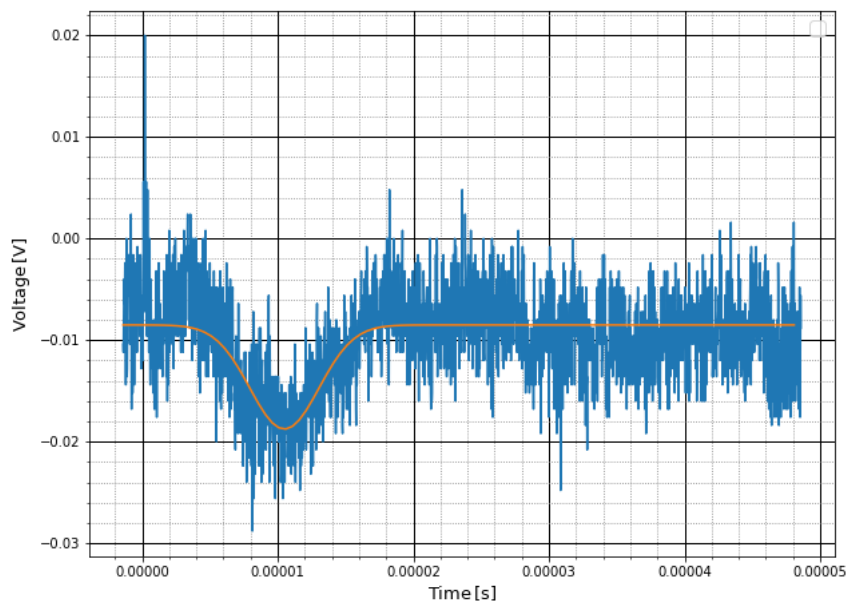


Abbildung 48: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -32.0 V

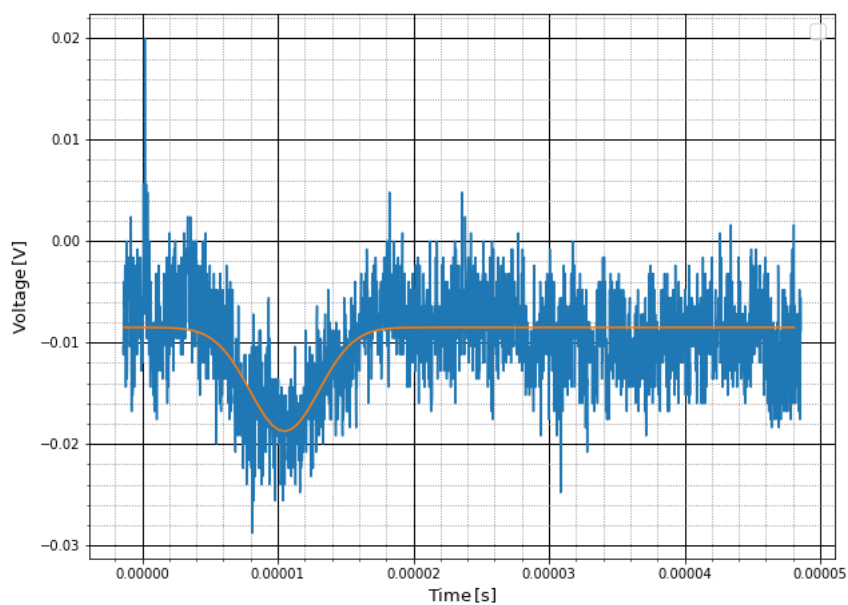


Abbildung 49: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -36.0 V

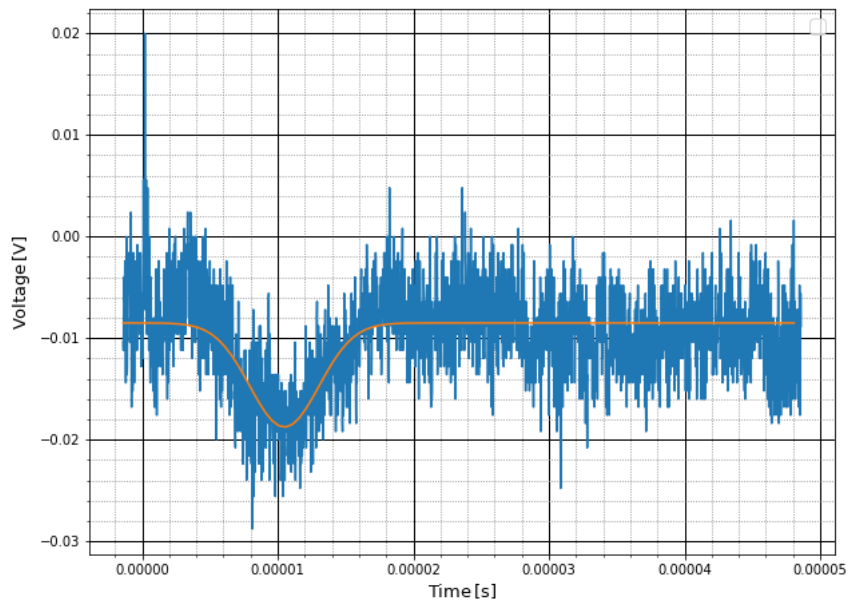


Abbildung 50: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -40.0 V

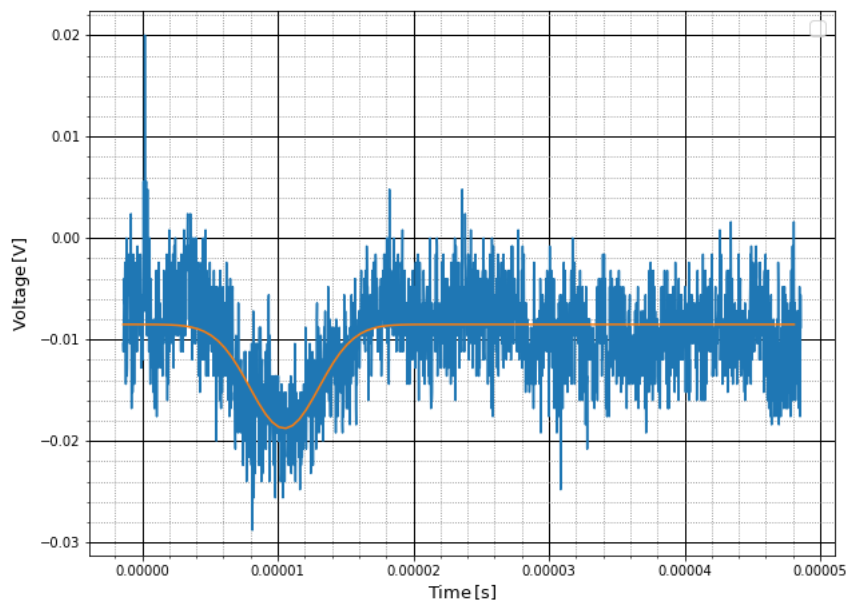


Abbildung 51: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -44.0 V

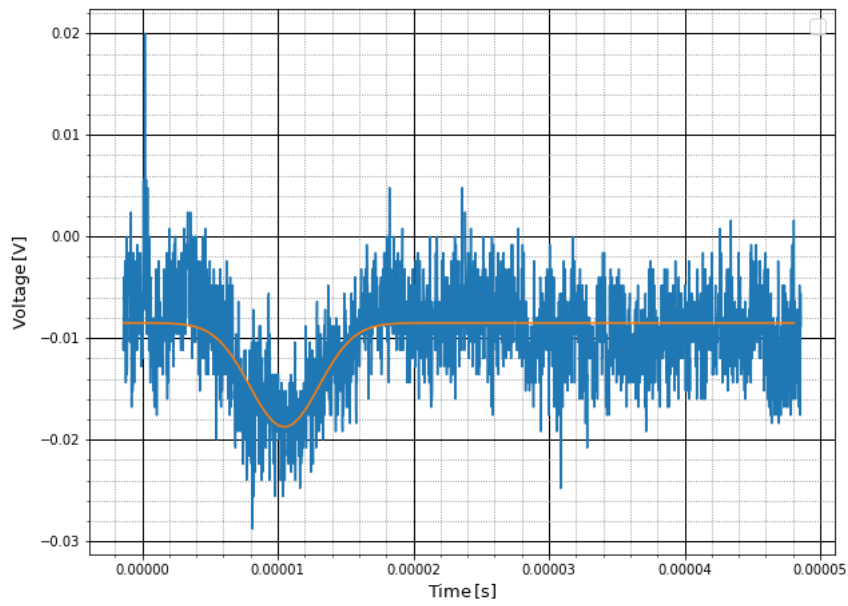


Abbildung 52: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -46.0 V

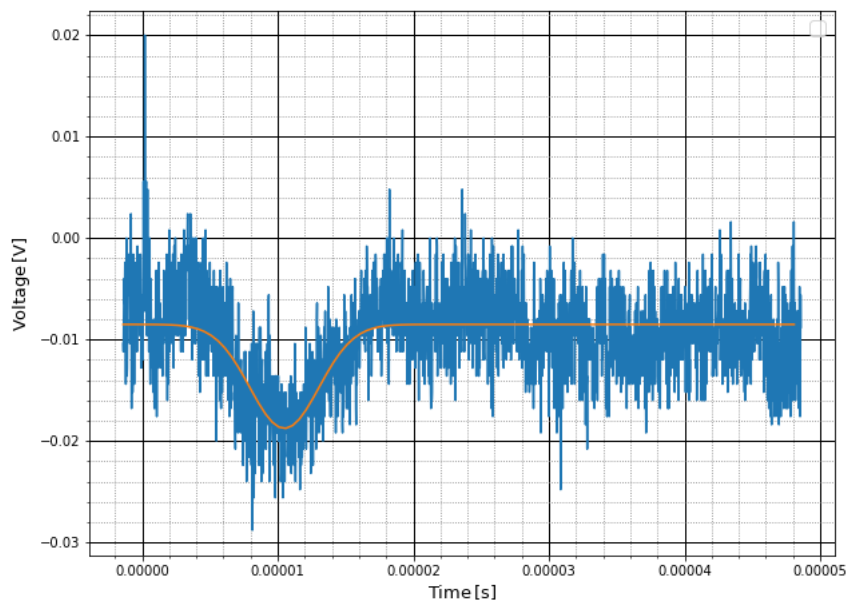


Abbildung 53: Gaußfit an die Messungen der Elektronenwolken bei Konstantem Abstand von 3.6 mm und einer Spannung von -48.0 V

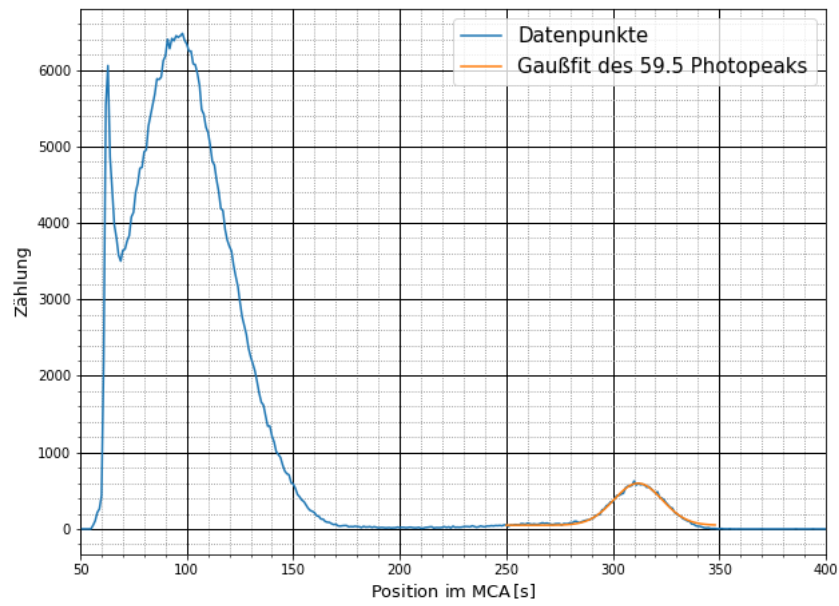


Abbildung 54: Gesamtes Spektrum von Americium mit Silizium aufgenommen.

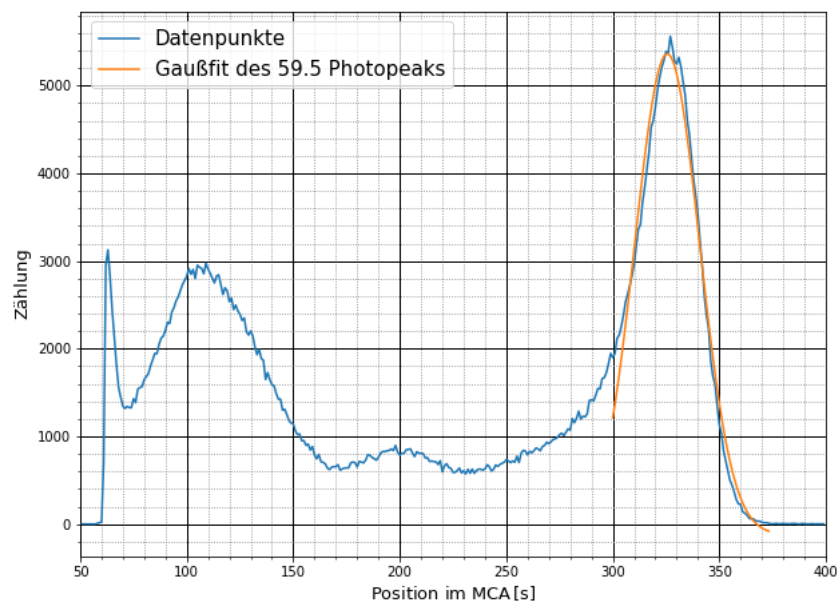


Abbildung 55: Gesamtes Spektrum von Americium mit CdTe aufgenommen.

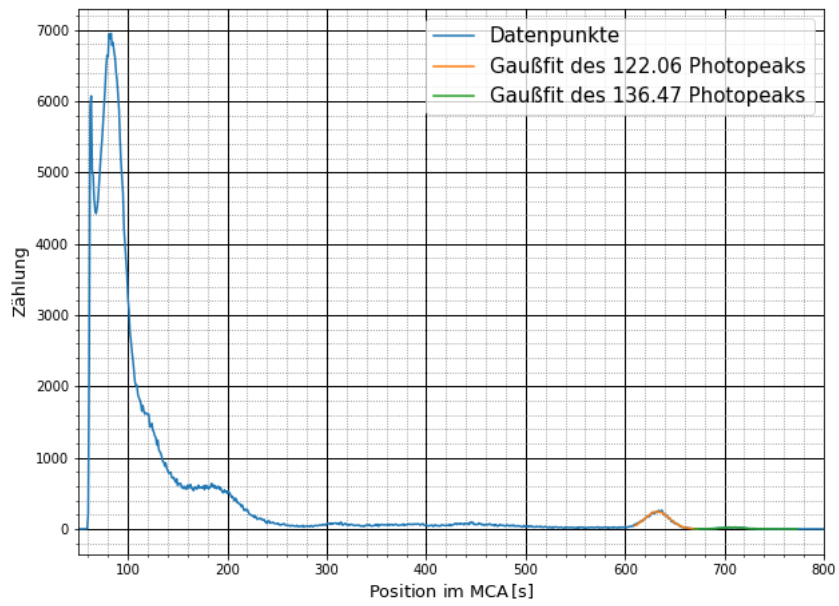


Abbildung 56: Gesamtes Spektrum von Cobalt mit Silizium aufgenommen.

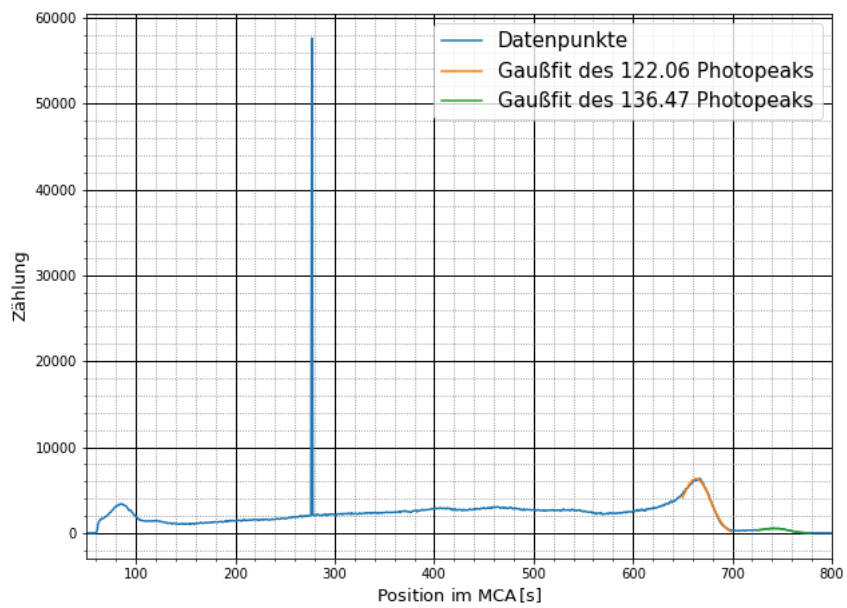


Abbildung 57: Gesamtes Spektrum von Cobalt mit CdTe aufgenommen.