

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

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen	2
1.1	Definition von Halbleitern	2
1.2	Bändermodell	2
1.3	Quasi freie Ladungen und Löcher	2
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	3
1.5	p-n-Dioden	3
2	Durchführung des Versuches	4
3	Analyse der Bandlückenenergiebestimmung	5
3.1	Verfahren	5
3.2	Berechnung der Bandlückenenergie für Silizium	5
4	Tabellen	10
5	Bilder	10
6	Bibliograpy	10
	Literatur	10
7	Anhang	10

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. Das heißt die Wellenfunktionen überschneiden sich und es entstehen mehrere leicht von einander getrennte Energieniveaus aufgrund des Pauliprinzips. Bei einer hohen Anzahl von Atomen werden aus diesen Einzelnen Niveaus sogenannte Energiebänder aus den ganzen einzelnen Niveaus. Abbildung ?? zeigt dies noch einmal Grafisch.

Eine Eigenschaft 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 Atome 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 zur 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 ?? 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.

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 ?? 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.

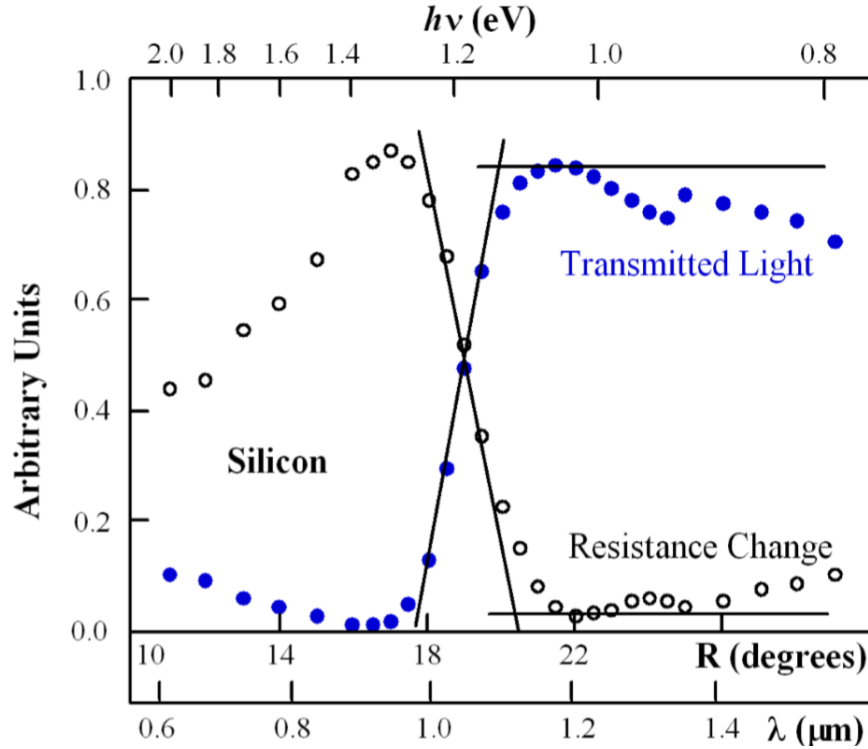


Abbildung 1: Beispiel zu den angepassten Geraden für die Bestimmung der Bandlückenenergie. Entnommen aus der Versuchsanleitung [1]

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 ?? sichtbar.

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

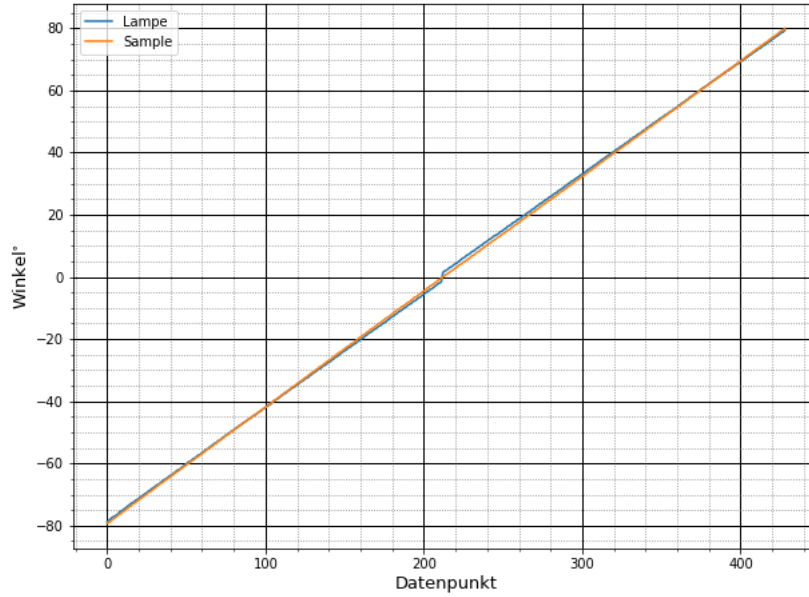


Abbildung 2: Auftragung der gemessenen Winkel für die Lampenmessung und erste Silizium Messung nach der Korrektur. Beide stimmen in den relevanten Bereichen bei ca. $30^\circ - 40^\circ$ weitgehend überein.

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
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 ?? 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 ?? und ?? 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 ?? beispielhaft aufgetragen.

Für die zweite Silizium Messung wurde analog vorgegangen, die Bilder zu dieser sind im Anhang zu finden. Die Ergebnisse zur Auswertung sind in Tabelle 2 zu finden.

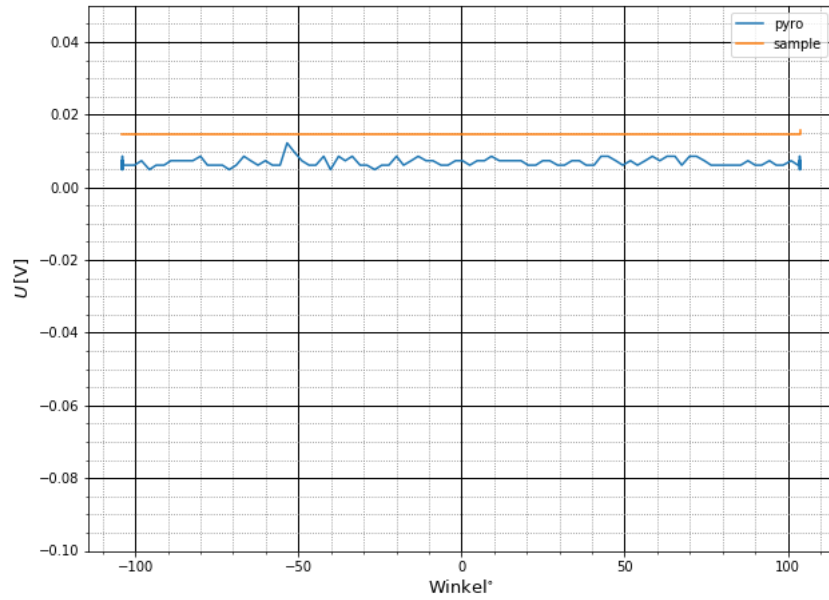


Abbildung 3: Auftragung von gemessener Spannung der Untergrundmessung gegen die Winkel.

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

Mess-reihe	Steigung und Offset der Geraden	Position der Horizontalen	Winkel beim Schnittpunkt	Energien der Schnittpunkte
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

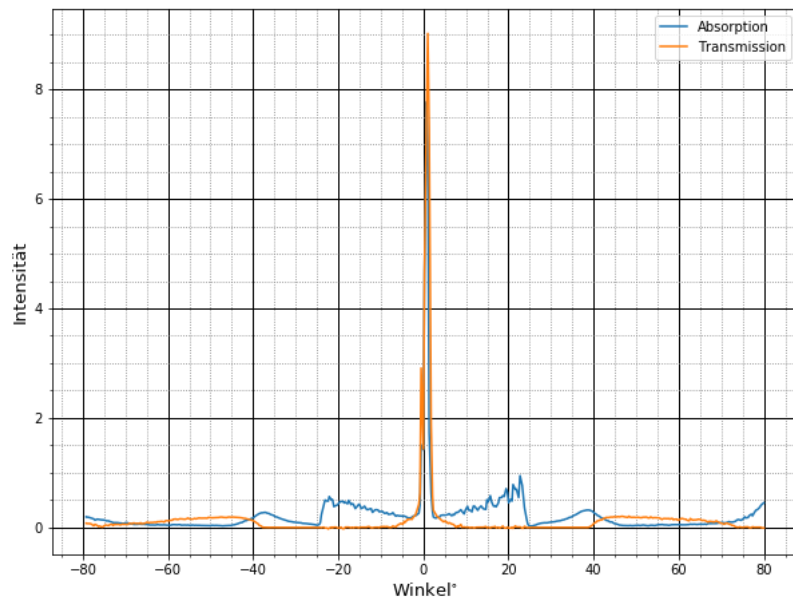


Abbildung 4: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel.

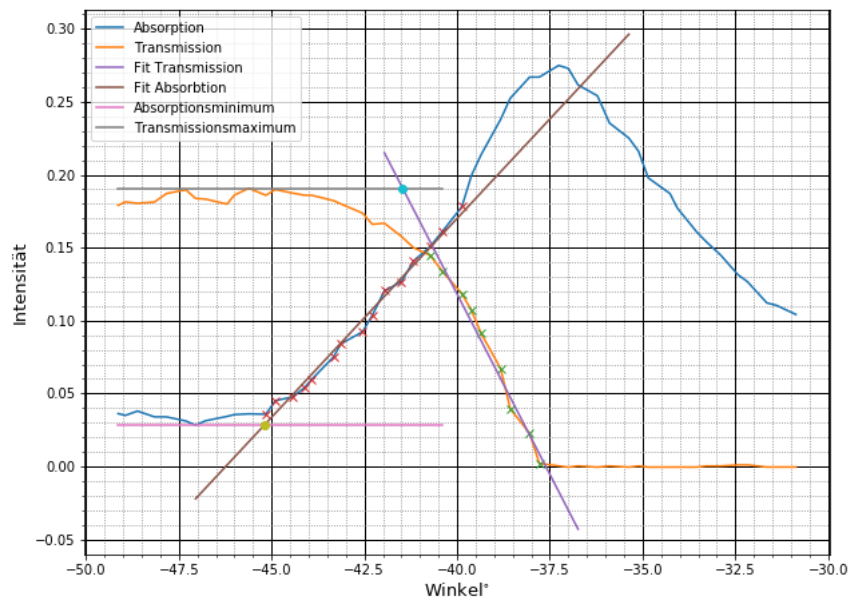


Abbildung 5: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln kleiner als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

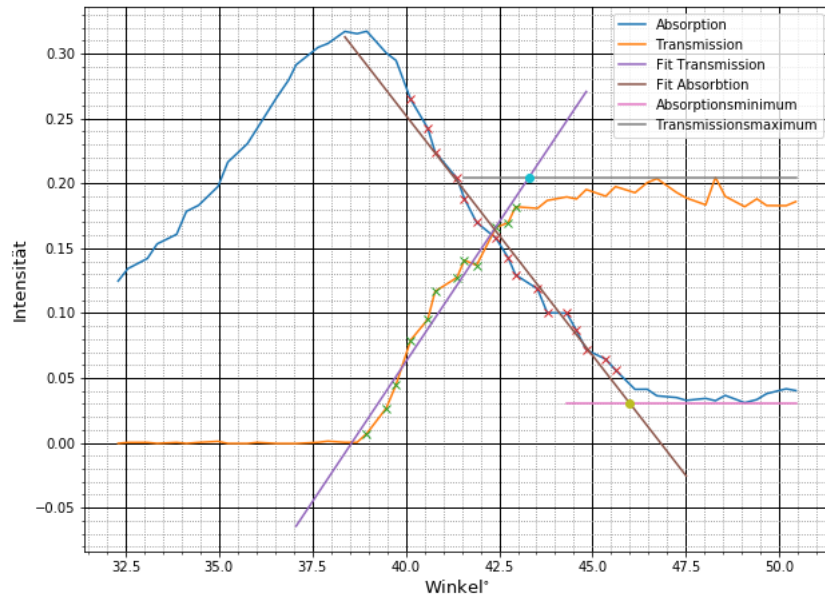


Abbildung 6: Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel in der Nähe der Stelle Gleichwahrscheinlicher Absorption und Transmission bei Winkeln größer als 0° . Es sind zusätzlich die angepassten Geraden zur Absorption und Transmission eingezeichnet. Die Horizontalen wurden durch die Maxima der dahinterliegenden Datenpunkte bestimmt. Die Schnittpunkte der Geraden mit ihren jeweiligen Horizontalen sind auch eingezeichnet.

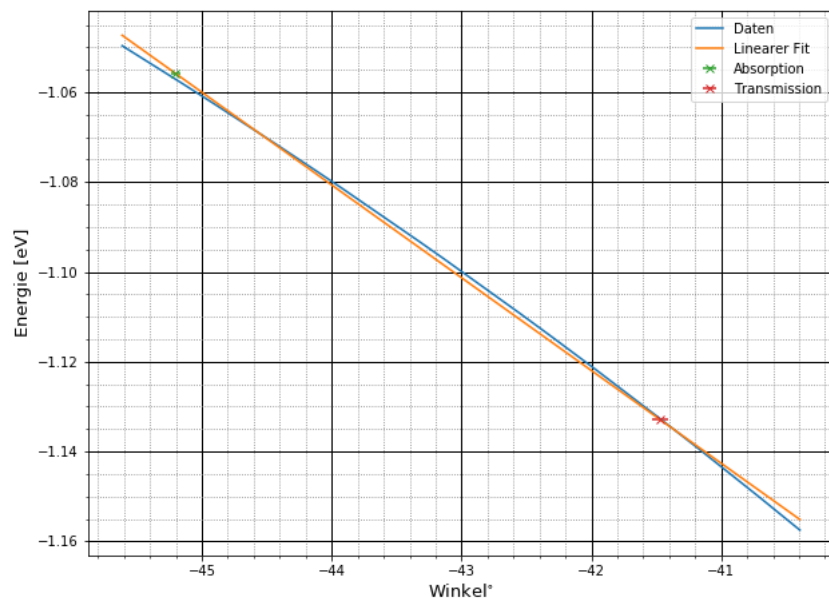


Abbildung 7: Auftragung der Energie gegen den Winkel. Die angepasste Gerade und die beiden Schnittpunkte sind auch eingetragen.

4 Tabellen

Tabellenverzeichnis

1	Parameter erste Silizium Messung	6
2	Parameter der zweiten Silizium Messung	7

5 Bilder

Abbildungsverzeichnis

1	Referenz zur Geraden Anpassung	5
2	Korrigierter Lampendatensatz	6
3	Auftragung von gemessener Spannung der Untergrundmessung gegen die Winkel.	7
4	Auftragung von Intensität der normalisierten Datenreihen gegen die Winkel.	8
5	Geraden Anpassungen erste Silizium Messung links	8
6	Geraden Anpassungen erste Silizium Messung rechts	9
7	Beispiel Energiebestimmung	9

6 Bibliograpy

Literatur

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

7 Anhang