

Martin-Luther-Universität
Halle-Wittenberg



Institut für Physik, Fakultät für Naturwissenschaften II

Protokoll:

**Projekt: Bestimmung von Diffusionslängen in
Halbleitermaterialien**

eingereicht von

Jendrik Vofß (123456789)
jendrik.voss@student.uni-halle.de

und

Johannes Peter Knoll (123456789)
johannes.knoll@student.uni-halle.de

Betreuer:

PD Dr. Karl-Michael SCHINDLER

Projektzeitraum 04.11.2022 bis 20.01.2023

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
2 Grundlagen	1
3 Experimentell	2
3.1 Aufbau	2
4 Winkelabhängigkeit der Sekundärelektronenausbeute	4
5 Manuelle Bestimmung der Diffusionslängen	5
5.1 Ergebnisse	5
5.2 Probleme der Methode	8
6 Automatisierung	9
6.1 Ziele	9
6.2 Umsetzung	9
6.3 Auswahl des Fitbereichs	12
6.4 Zugriff auf das Programm	12
6.5 Vorstellung der Benutzeroberfläche	13
6.6 Zugriff auf die berechneten Rohdaten	20
6.7 Verhalten bei Kompilierfehlern	21
6.8 Auswertung der neuen Messergebnisse	22
7 Fazit und Ausblick	24

1 Einführung

Die Leistung von modernen Halbleiterbauelementen wie Solarzellen wird maßgeblich durch die Dynamik der Ladungsträger bestimmt. Hierbei sind unter anderem die Diffusionslängen von Elektronen an pn-Übergängen von Interesse. Die Bestimmung kann mit Bildern erfolgen, die durch „electron beam induced currents“ (EBIC) erzeugt werden.

Im Rahmen dieses Projekts wurden solche Bilder aufgenommen. Die Diffusionslängen wurden für verschiedene an die Probe angelegte Spannungen manuell bestimmt. Bei der Auswertung der Daten wurde festgestellt, dass die Abhängigkeit der Diffusionslänge von der Spannung nur mit deutlich mehr Bildern ermittelt werden kann. Da die manuelle Auswertung dieser Bilder sehr zeitaufwändig ist, wurde ein Programm entwickelt, das die Auswertung automatisiert.

Es werden die ursprünglichen Daten und die offenen Fragen dargestellt. Die Funktionsweise des Programms wird anhand einer umfangreicheren Messreihe erläutert. Es wird untersucht, inwiefern die zusätzlichen Daten den Zusammenhang zwischen Diffusionslänge und Spannungen präzisieren können. Zum Schluss werden die Ergebnisse zusammengefasst.

2 Grundlagen

Die Informationen in diesem Abschnitt wurden der Anleitung zum Versuch M07 [1] entnommen.

Durch einen Elektronenstrahl können in einem Halbleiter Elektron-Loch-Paare generiert werden. Die Ladungsträger können mit einem pn-Übergang getrennt werden. Die angeregten Ladungsträger rekombinieren nach der Zeit τ und legen dabei die Diffusionslänge L zurück. Die Ladungsträgerdichte n lässt sich dann folgendermaßen schreiben:

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{L}} \quad (2.1)$$

Hierbei ist x der Abstand zur Raumladungszone (RLZ) und n_0 die Ladungsträgerkonzentration in der RLZ. Zwischen der Diffusionslänge, der Lebensdauer und dem Diffusionskoeffizienten D gilt folgender Zusammenhang:

$$L = \sqrt{\tau D} \quad (2.2)$$

3 Experimentell

Sofern nicht anders angegeben, wurden die Informationen in diesem Abschnitt der Anleitung zum Versuch M07 [1] entnommen.

3.1 Aufbau

Funktionsweise eines Rasterlektronenmikroskops

In einem Rasterlektronenmikroskop (REM) rastert ein kollimierter Elektronenstrahl über eine Probe. Durch Wechselwirkung zwischen den Elektronen des Strahls und den Probenatomen wird das Bild erzeugt. Hierfür müssen die Produkte dieser Wechselwirkung detektiert werden:

1. **Sekundärelektronen** entstehen durch inelastische Streuung an den Elektronen der Atomhülle.
2. **Rückstreuelektronen** entstehen durch elastische Streuung an den Atomkernen.

Rückstreuelektronen haben eine größere Energie als Sekundärelektronen, wodurch eine selektive Detektion möglich ist. Hierfür müssen die Detektoren auf die entsprechenden Energiebereiche eingestellt sein.

Bei einer Verkippung der Probe zum Elektronenstrahl um den Winkel φ gilt für die Anzahl N der Sekundärelektronen:

$$N(\varphi) \sim \frac{1}{\cos \varphi} \quad (3.1)$$

Strahlerzeugung

Die Elektronen werden von einer Glühkathode emittiert und zu einer Anode beschleunigt. Die Fokussierung zu einem Strahl erfolgt mit einem WEHNELT-Zylinder, siehe Abbildung 3.1.

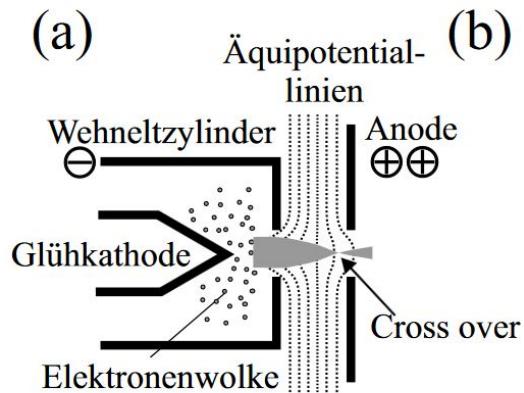


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau eines WEHNELT-Zylinders. Die von der Glühkathode emittierten Elektronen werden im „Crossover“ fokussiert und bewegen sich dann kegelförmig durch ein Loch in der Anode [2].

Der Strahl durchläuft dann ein Linsensystem, durch das der Crossover verkleinert auf die Probe abgebildet wird.

EBIC

Beim EBIC befindet sich die Probe in einem Hochvakuum, das mit einer Turbomolekularpumpe erzeugt wird. Während der Messung wird die Probe mit einem Elektronenstrahl abgerastert und für jede Position des Strahls der Strom gemessen. Der Strom wird verstärkt und von einem Messsystem in ein Bild übertragen. Helle Punkte entsprechen einem hohen Strom, wohingegen dunkle Punkte einem niedrigen Strom entsprechen. Die Messung kann sowohl unter Kurzschlussbedingungen, als auch mit einer äußeren Spannung erfolgen.

Probe

Bei der untersuchten Probe handelt es sich um eine pn-Diode.

4 Winkelabhängigkeit der Sekundärelektronenausbeute

Die Sekundärelektronenausbeute einer Pd-Probe wurde für Kippwinkel zwischen 0° und 45° gemessen. Die Anzahl der Counts in Abhängigkeit des Winkels ist in Abbildung 4.1 dargestellt. Die Ausbeute steigt mit dem Winkel, nur bei $\varphi = 40^\circ$ liegt ein Ausreißer vor. Die Ergebnisse entsprechen dennoch nicht den Erwartungen, da die Kurve nach Gleichung 3.1 einen konvexen Verlauf haben sollte. Dies ist auch bis $\varphi = 10^\circ$ der Fall, danach flacht die Kurve aber ab und steigt erst ab $\varphi = 35^\circ$ wieder konvex an.

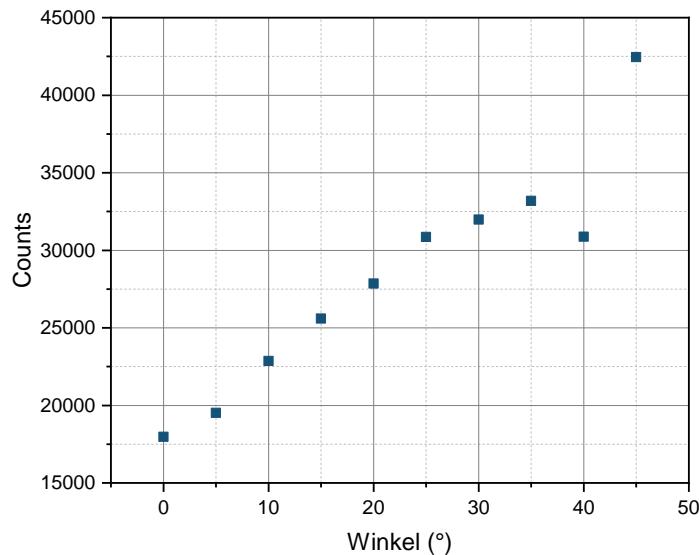


Abbildung 4.1: Ergebnis der winkelabhängigen Messung der Sekundärelektronenausbeute. Es ist ein Trend zu höheren Ausbeuten für starke Kippung erkennbar. Bei 40° liegt eventuell ein Ausreißer vor. Die Messdaten entsprechen nicht den Erwartungen aus Abschnitt 3.1.

Aufgrund dieser großen Diskrepanz zwischen Modell und Experiment, haben wir uns entschieden, diesen Aspekt nicht weiter zu untersuchen.

5 Manuelle Bestimmung der Diffusionslängen

5.1 Ergebnisse

Zunächst wird die manuelle Bestimmungen der Diffusionslängen erläutert. Hierfür wurden mit dem EBIC Bilder der Probe aufgenommen. Die Spannung wurde zwischen 0,0 V und 5,0 V variiert; die Schrittweite betrug 1,0 V. Eine zusätzliche Messung wurde bei 214 mV durchgeführt.

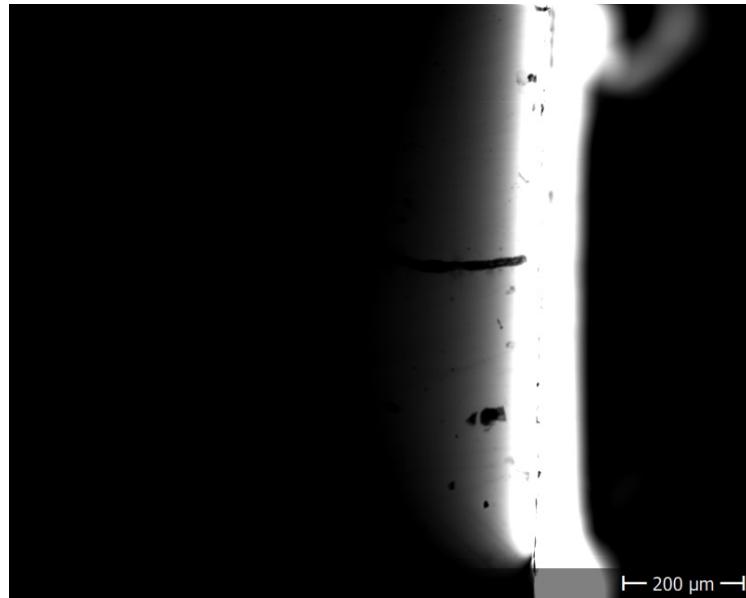


Abbildung 5.1: Ergebnis der EBIC-Messung für eine angelegte Spannung von 214 mV. Die dunklen Bereiche entsprechen niedrigen Strömen, die hellen Bereiche hohen Strömen. Der große weiße Bereich (rechts) entspricht der RLZ. Vereinzelte schwarze Stellen im weißen Bereich entstehen durch Defekte.

Die Messdaten werden anhand der 214 mV-Messung erläutert. Das erzeugte Bild ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Die Diffusionslänge wird hieraus mit einem Exponentialfit gemäß folgender Gleichung bestimmt:

$$n(x) = n_0 e^{-\frac{x}{L}} + C \quad (5.1)$$

Die Parameter entsprechen denen aus Gleichung 2.1. Der Summand C berücksichtigt einen Offset der Grauwerte. Mögliche Ursachen hierfür sind die

Kontrast- und Helligkeitseinstellungen des REMs. Für den Fit wurde eine Zeile mit möglichst wenigen Defekten gewählt und die Intensität der Pixel gegen den Ort aufgetragen. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.2 dargestellt.

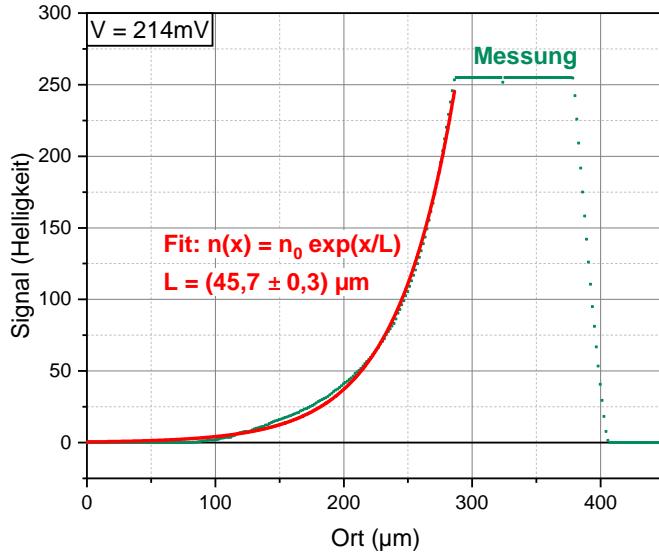


Abbildung 5.2: Ergebnis des Exponentialfits für eine Spannung von 214 mV. Die grünen Punkte stellen die Messpunkte dar, die rote Linie das Ergebnis des Fits. Der Fitbereich wurde so gewählt, dass alle Punkte ab dem Sättigungsbereich ausgeschlossen werden. Fit und Messung sind in guter Übereinstimmung.

Die Umrechnung von Pixeln zu Mikrometern erfolgte mit dem Maßstab in Abbildung 5.1. Die Intensität steigt zunächst exponentiell an, sättigt dann bei einem Abstand von ca. 280 μm und fällt anschließend rapide auf null herab. Der exponentielle Anstieg zur RLZ entspricht den Erwartungen aus Abschnitt 2. Die Sättigung folgt aus der Grauwertauflösung des Bildes: Diese beträgt 8 bit, es können also maximal 256 verschiedene Helligkeiten dargestellt werden. Im Bereich der Sättigung ist das Signal also größer, wird aber aufgrund der Auflösung auf den Grauwert 256 skaliert.

Die Diffusionslängen wurden mit dieser Methode für unterschiedliche Spannungen in Vorwärtsrichtung ermittelt, siehe Abbildung 5.3. Es ist ein Trend zu steigenden Diffusionslängen für größere Spannungen erkennbar. Dies widerspricht den Erwartungen, da die Diffusionslänge eine Materialeigenschaft

sein sollte, die unabhängig von der Spannung ist. Aus den Daten lässt sich aber kein exakter Verlauf erkennen. In allen Bereichen des Diagramms gibt es Unklarheiten:

1. **Kleine Spannungen (0V - 1V):** Es ist kein Trend erkennbar. Es muss geklärt werden, ob es sich bei dem Messergebnis unter Kurzschlussbedingungen um einen Ausreißer handelt.
2. **Mittlere Spannungen (1V - 2V):** Hier ist nicht klar, ob die Diffusionslänge kontinuierlich mit der Spannung zunimmt oder in diesem Intervall einen Sprung hat.
3. **Große Spannungen (ab 2V):** Der Anstieg ist zunächst sehr steil und flacht dann ab ca. 3 V deutlich ab. Es ist nicht deutlich, ob hier eine Sättigung o.Ä. eintritt.

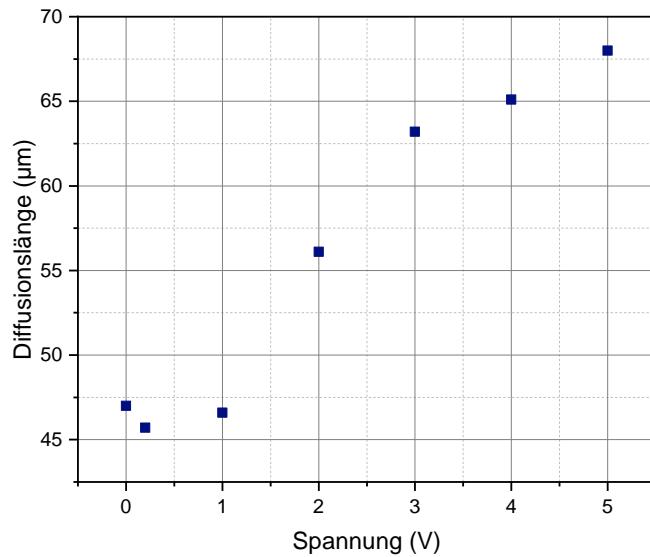


Abbildung 5.3: Ermittelte Diffusionslängen für unterschiedliche Spannungen. Entgegen den Erwartungen für eine ideale pn-Diode wächst die Diffusionslänge mit der Spannung. Ein funktionaler Zusammenhang ist nicht erkennbar.

5.2 Probleme der Methode

Die Klärung der im vorigen Abschnitt gestellten Fragen ist notwendig, um dieses Phänomen besser zu verstehen. Wir haben uns daher dazu entschieden, weitere Messpunkte zwischen den vorhandenen aufzunehmen. Die bisher angewandte Methode hat allerdings drei zentrale Probleme:

1. Mit vertretbarem Aufwand kann für jedes EBIC-Bild nur eine Zeile ausgewertet werden.
2. Die Auswahl dieser Zeile ist willkürlich, was die Vergleichbarkeit der Messungen erschwert.
3. Die manuelle Auswertung ist sehr zeitaufwändig.

Um diese Probleme zu lösen, wurde ein Programm entwickelt, das die Datenauswertung automatisiert.

6 Automatisierung

6.1 Ziele

- **Bestimmen der Diffusionslänge**

Das Programm muss in der Lage sein, die Diffusionslängen automatisch unter vergleichbaren Bedingungen zu bestimmen.

- **Defekte automatisch erkennen und rausfiltern**

Weiterhin ist dem Nutzer die Möglichkeit gegeben, Zeilen manuell auszuwählen. Dies ist sinnvoll, wenn man die Diffusionslänge in einem bestimmten Bereich auswerten möchte oder die Probe nur wenige, für das Auge klar sichtbare Defekte aufweist. In jedem anderen Fall ist das manuelle Auswählen der Zeilen jedoch mühsam, ungenau und zeitaufwendig. Daher soll das Programm ebenso in der Lage sein, Zeilen mit Defekten automatisch herauszufiltern.

6.2 Umsetzung

- **Bestimmen der Diffusionslänge**

Vergleichbare Bedingungen können durch mehrere Wege geschaffen werden. Welcher am Ende am sinnvollsten ist, hängt von der physikalischen Fragestellung ab. Das Programm verfügt daher über mehrere Wege, die Diffusionslänge eines Bildes zu ermitteln:

1. Die finale Diffusionslänge eines Bildes wird als Mittelwert aus den Diffusionslängen aller verfügbaren Zeilen berechnet.
2. Die maximale Diffusionslänge einer Zeile im Bild ist die finale Diffusionslänge.
3. Für jede Zeile werden die Diffusionslängen aller Bilder aufsummiert. Hierdurch findet man die Zeile, bei der im Schnitt die Diffusionslänge über alle Spannungen maximal ist. Die finale Diffusionslänge eines Bildes ist die Diffusionslänge dieser Zeile. (Beachte, dass dies nicht zwangsläufig die maximal im Bild vorkommende Diffusionslänge sein muss.)

Bis auf die zweite Variante werden in jedem Bild somit die gleichen Zeilen zur Auswertung der Diffusionslänge genutzt.

- **Defekte automatisch erkennen und rausfiltern**

Defekte erkennt das Programm wie das menschliche Auge. Es rasterst das Bild entlang der Zeilen (von links nach rechts und von oben nach unten) ab und überprüft, ob es plötzliche Einbrüche in der Helligkeit gibt. Die Funktionsweise, sowie die Sensibilität des Algorithmus, kann vom Benutzer mit ein paar wenigen Parametern beeinflusst werden:

max_darker_area_height:

Neben den Defekten muss auch der dunklere Bereich am unteren Rand entfernt werden. *max_darker_area_height* gibt vor, wie viele Zeilen dieser maximal umfasst. Sollte der Algorithmus den Übergang nicht erkennen, verhindert das den Verlust von zu vielen Zeilen.

compare_to_following:

Bei manchen Defekten fällt der Grauwert abrupt und bei manchen kontinuierlich ab. Daher ist es ratsam nicht die Grauwerte zweier direkt benachbarter Pixel zu vergleichen. Dieser Parameter gibt an, wie viele Nachbarn übersprungen werden.

gray_change_sensitivity_ratio_horizontal:

Dieser Parameter beeinflusst die Sensibilität beim Abrastern in horizontaler Richtung. Sei G_v der Grauwert des vorderen Pixels, der als nicht Defekt eingestuft wurde und G_h der Grauwert des hinteren Pixels, dessen Grauwert getestet werden soll. Gilt:

$$G_h < (1 - \text{gray_change_sensitivity_ratio_horizontal}) \cdot G_v$$

so gilt der zu G_h gehörige Pixel als Defekt.

gray_change_sensitivity_ratio_vertical:

Dieser Parameter beeinflusst die Sensibilität beim Abrastern in vertikaler Richtung. Ansonsten analog zu
gray_change_sensitivity_ratio_horizontal.

compare_min_value:

Pixel mit sehr niedrigen Grauwerten (< 10) sind für das Auge kaum zu unterscheiden. Für den Computer jedoch schon. Fällt also in einem dunklen Bereich der Grauwert von 1 auf 0, so würde dies als Defekt gewertet werden. Um dies zu verhindern darf der Grauwert erst verglichen werden, wenn der des undefekten Pixels einen Wert von *compare_min_value* aufweist.

remove_next_to_defective:

Am Rande eines Defekts fällt der Grauwert nicht so stark ab und kann

dadurch in seltenen Fällen nicht als Defekt identifiziert werden. Um dennoch die Zeilen zu entfernen, in dessen der Rand eines Defekts liegt werden die benachbarten *remove_next_to_defective* Zeilen einer Zeile mit Defekt ebenso entfernt.

ignore_whitespace_faults:

Wenn dieser Parameter auf „True“ gesetzt wird, werden die Defekte ab Beginn des Grauwert-Maximums ignoriert.

Empfohlene Wahl: „True“, da dieser Bereich für den exponentiellen Fit keine Rolle spielt.

check_images_individually:

Wenn dieser Parameter auf „True“ gesetzt wird, wird jedes Bild einzeln auf Defekte untersucht. Ansonsten wird das Bild auf Defekte untersucht, welches bei maximaler Spannung aufgenommen wurde. (Bei diesem sind die Defekte am besten zu erkennen.) Es wird dann angenommen, dass alle anderen Bilder an den gleichen Stellen Defekte aufweisen.

Allgemein ist die Option: „False“ zu empfehlen, da die Auswertung der Diffusionslänge eines Bildes sonst nicht mehr vergleichbar ist. Außerdem wurde die Option: „True“ nicht genug getestet und führt gegebenenfalls zu einem Kompilierfehler. Des Weiteren steigt die Kompilierzeit je nach Menge an Bildern enorm an.

remove_at_max:

Nur sinnvoll, falls *check_images_individually* = „False“. Dieser Parameter liegt hinter einer „fail-save“ Option, die verhindern soll, dass zu viele Zeilen als defekt gewertet werden. Wenn mehr als *remove_at_max · Gesamtzeilen* defekt sind, wird ein anderes Bild, das bei geringerer Spannung aufgenommen wurde, auf Defekte untersucht. Kann kein Bild gefunden werden, welches diese Bedingung erfüllt, wird das Bild genommen, bei dem die wenigsten Defekte erkannt wurden.

reduce_by:

Um im „fail-save“-Szenario des vorherigen Parameters eine zu lange Kompilierzeit zu vermeiden, sollte man nicht jedes Bild einzeln durchgehen. Als nächstes Bild wird das ausgewählt, das bei einem Spannungswert aufgenommen wurde, der dem des vorherigen Bildes geteilt durch *reduce_by* am nächsten ist.

6.3 Auswahl des Fitbereichs

Es ist nicht sinnvoll, den Exponentialfit über die gesamte Zeile durchzuführen (siehe Abschnitt 5). Der Fitbereich wird durch die Grauwertauflösung bestimmt. Die Grauwerte können nur zwischen 0 und 255 liegen. Der Fit wird zwischen dem letzten Wert, der null ist und dem ersten Wert, der 255 ist, durchgeführt.

6.4 Zugriff auf das Programm

Das Programm steht jedem öffentlich in [GitHub](#) zur Verfügung. Aus dem Ordner: „picture_analysis“ sind drei Dateien essentiell:

pa_interface.py erzeugt die Benutzeroberfläche.

pa.py enthält alle Funktionen die benötigt werden um die Zeilen herauszufiltern und die Diffusionslänge zu berechnen.

pa_plot.py umfasst die Funktionen die die berechneten Werte aus einer [.pkl-Datei](#) ausliest und die Plots erstellt.

Es empfiehlt sich jedoch, ihn als Ganzes herunterzuladen. Als Nutzer muss man sich nicht mit Python auskennen. Wenn man pa_interface.py ausführt, gelangt man zur Benutzeroberfläche mit der man alles steuert.

6.5 Vorstellung der Benutzeroberfläche

Hauptfenster

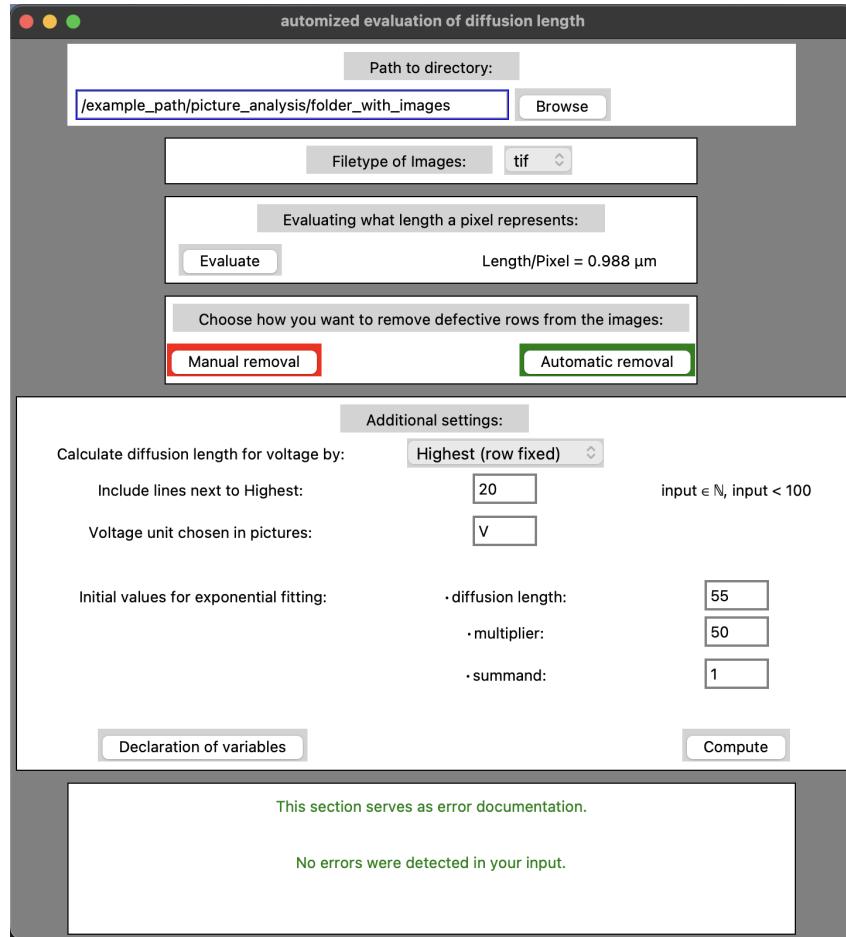


Abbildung 6.1: Hauptfenster

Am Anfang wird der Benutzer mit dem Hauptfenster (siehe Abbildung 6.1) konfrontiert. Dieses ist in mehrere Felder geteilt:

Path to directory

Dieses Feld muss als erstes ausgefüllt werden. Hier gibt man den Pfad zu dem Ordner vor, der die zu analysierenden Bilder enthält. Diesen kann man manuell eintragen oder mittels des Knopfes „Browse“ auswählen.

Filetype of images

Hier gibt man an, von welchem Dateityp die Bilder sind.

Evaluating what length a pixel represents

Erst nachdem die ersten zwei Felder fertiggestellt wurden, kann dieses bearbeitet werden. Durch die Ausführung dieses Feldes gelingt am Ende die Umrechnung von Pixel in Länge. Hierfür wird man, mittels des entsprechenden Knopfes, zu einem weiteren Fenster weitergeleitet (siehe Abbildung 6.2). Erfüllt man die dort nötigen Schritte, erscheint der Umrechnungsfaktor in diesem Feld.

Choose how you want to remove defective rows from the images

Erst nachdem die ersten zwei Felder fertiggestellt wurden, kann dieses bearbeitet werden. Hier entscheidet man sich, ob man die Defekte manuell oder automatisch entfernen möchte und wird dementsprechend zu den jeweiligen Fenstern weitergeleitet (siehe Abbildungen 6.3 und 6.4). Am Ende ist der Weg für den man sich entschieden hat, mit grün hinterlegt.

Additional settings

In diesem Feld stellt man ein, wie sich die Diffusionslänge eines Bildes berechnet. Des Weiteren kann man die Anfangswerte für den exponentiellen Fit verändern. Über „Declaration of variables“ kann man die Erklärung zu den Optionen aufrufen. Ist alles eingestellt startet das Kompilieren über den Knopf „Compute“. Ist der Prozess durchgelaufen, kann man sich eine Vorschau von den ermittelten Werten mittels angefertigter Plots anschauen (siehe Abbildung 6.6).

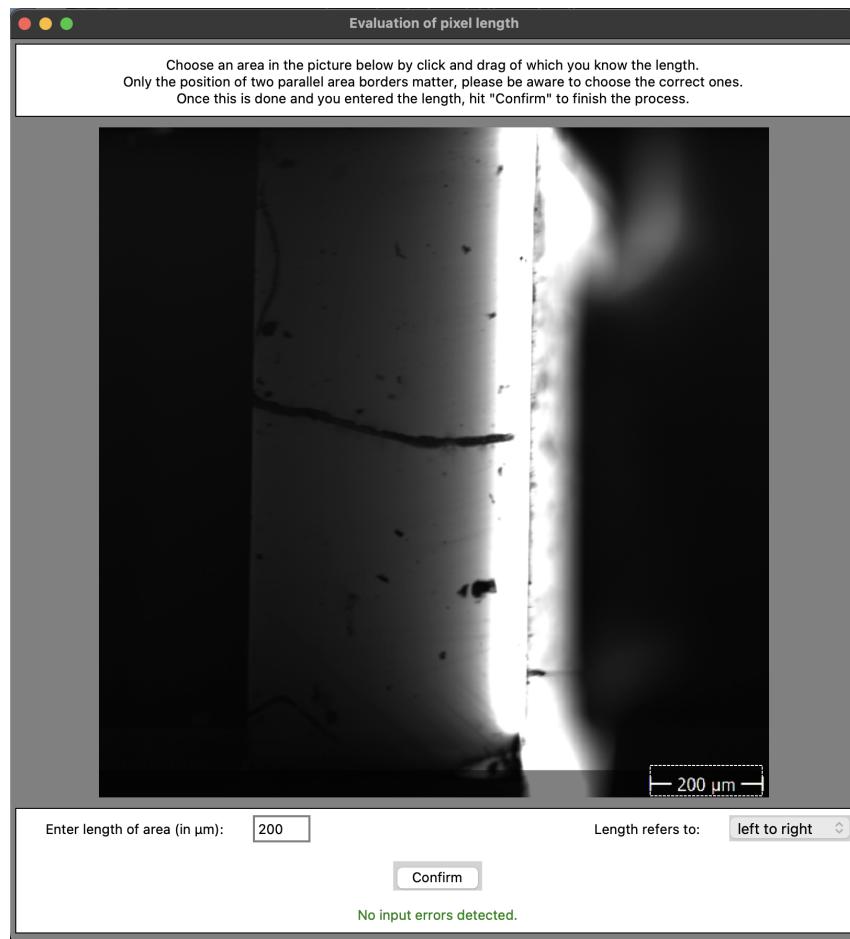
Fenster zum Bestimmen des Maßstabs

Abbildung 6.2: Fenster zum Bestimmen der Länge eines Pixels

Dieses Fenster zeigt das Bild, das bei maximaler Spannung aufgenommen wurde. Durch „click and drag“ kann man mit dem Cursor einen Bereich auswählen, dessen Länge man kennt, diese in das entsprechende Feld eintragen und mittels „Confirm“ bestätigen.

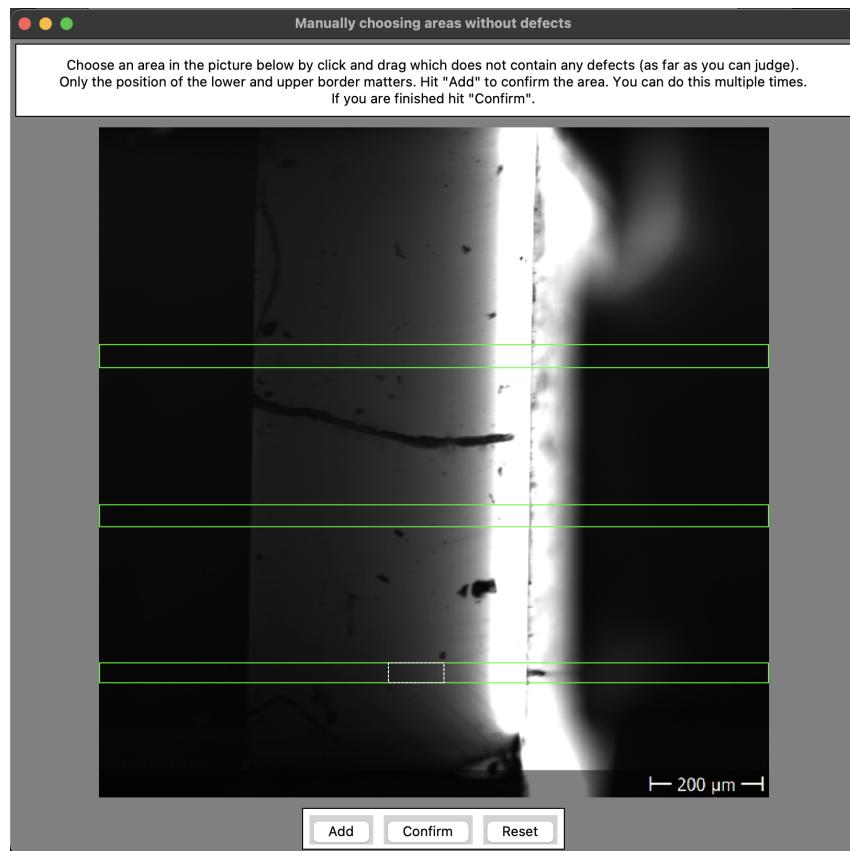
Fenster zum manuellen Auswählen der Zeilen

Abbildung 6.3: Fenster zum manuellen Auswählen der Zeilen.

Dieses Fenster zeigt das Bild, das bei maximaler Spannung aufgenommen wurde. Durch „click and drag“ kann man mit dem Cursor einen Bereich auswählen, der keine Defekte enthält (soweit das Auge das beurteilen kann). Durch „Add“ werden die obere, sowie untere y-Koordinate des Rechtecks ausgelesen und alle Zeilen dazwischen gemerkt und am Ende (mittels „Compute“ im Hauptfenster) analysiert. Diese werden zur Erinnerung im Bild grün umrandet angezeigt. Natürlich können mit dieser Methode mehrere Bereiche ausgewählt werden. Mittels „Reset“ kann man die Bereiche wieder entfernen. „Confirm“ beendet den Prozess und schließt das Fenster.

Fenster zum automatischen Entfernen von Zeilen mit Defekten

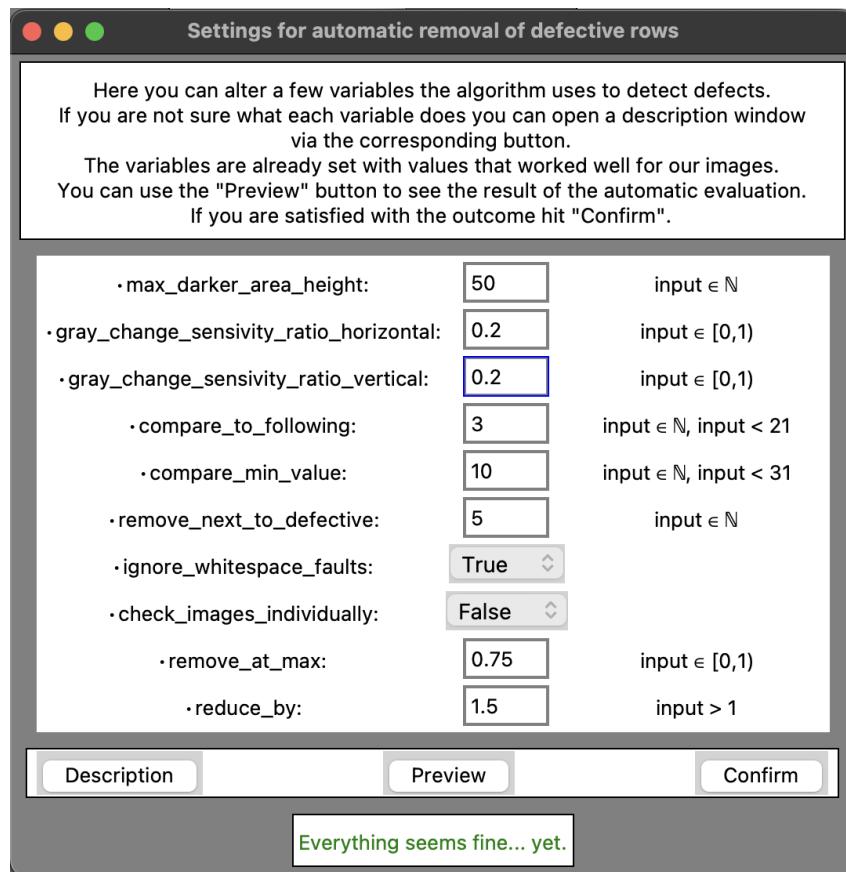


Abbildung 6.4: Fenster zum automatischen Entfernen der Zeilen mit Defekten.

Dieses Fenster ruft die in Abschnitt 6.2 angesprochenen Variablen zur Beeinflussung der Funktionsweise und Sensibilität des Algorithmus auf, welcher die Zeilen mit Defekten rausfiltern soll. Auch im Programm ist eine Erklärung zu den Variablen unter „Description“ aufzurufen. „Preview“ führt den Algorithmus aus und zeigt dem Benutzer welche Zeilen rausgefiltert werden (siehe Abbildung 6.5).

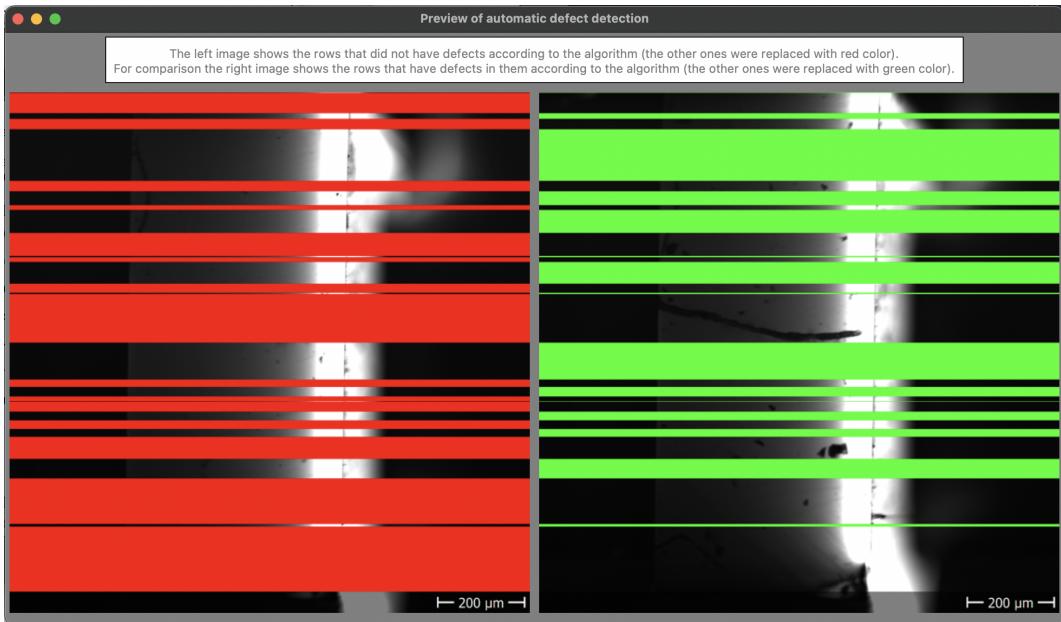


Abbildung 6.5: Vorschau der automatisch ausgewählten Zeilen. **Links:** Rote Zeilen sind die, die laut Algorithmus einen Defekt beinhalten. Alle anderen Zeilen werden später ausgewertet, solange keine Variablen verändert werden. **Rechts:** Gleiches Bild. Diesmal sind jedoch die Zeilen die einen Defekt beinhalten normal und alle anderen grün dargestellt.

Vorschau der ermittelten Werte

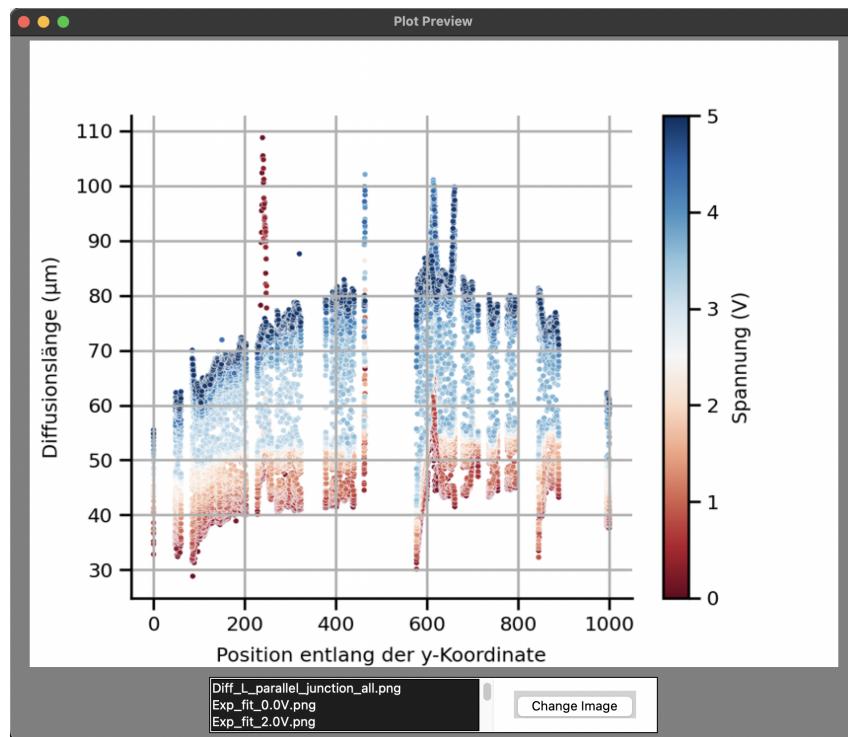


Abbildung 6.6: Vorschau der generierten Abbildungen.

Beim Kompilieren (mittels „Compute“ im Hauptfenster) werden am Ende drei verschiedenenartige Abbildungen erstellt:

- Grauwert in Abhängigkeit der x-Koordinate mit exponentiellem Fit für einige Spannungswerte (Abbildung 6.7a).
- Abhängigkeit der Diffusionslänge von der y-Koordinate für jeden Spannungswert (Abbildung 6.7b).
- Abhängigkeit der Diffusionslänge von der Spannung (Abbildung 6.7c).

Im Vorschaufenster (Abbildung 6.6) kann man die einzelnen Abbildungen auswählen und mittels „Change Image“ zwischen ihnen wechseln.

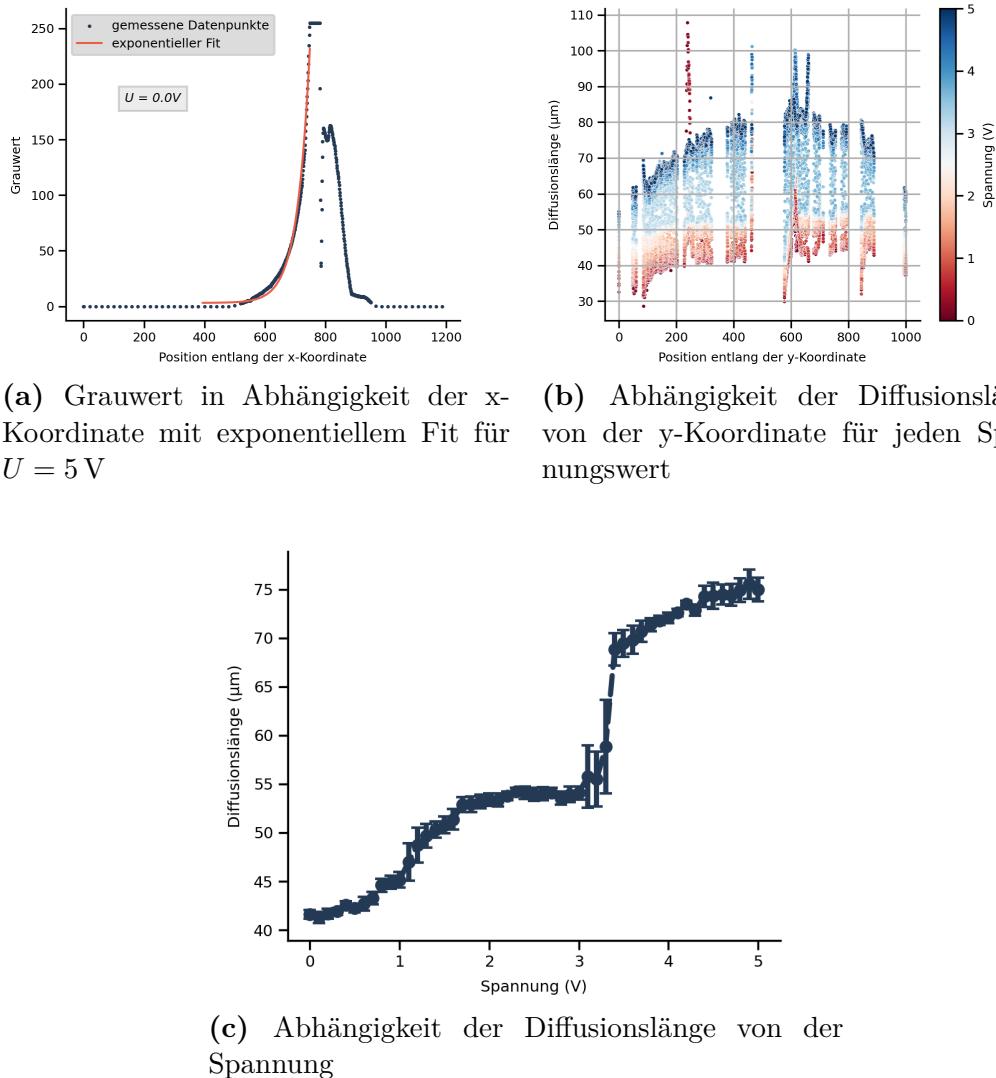


Abbildung 6.7: Vom Programm erstelle Abbildungen. Diese dienen nur als Demonstration des Programms und haben keinen Einfluss auf unsere physikalische Fragestellung.

6.6 Zugriff auf die berechneten Rohdaten

Die berechneten Rohdaten werden vor dem Plotten als [.pkl-Datei](#) im Ordner: „Pickle_data“ oder in komprimierter Form als .txt-Datei im Ordner: „Temporary_txt_Files“ gespeichert.

Die Abbildungen werden im Ordner: „Temporary_Plots“ als .png-Datei gespeichert.

Falls die Plots nicht den optischen Ansprüchen entsprechen, kann man in der Python-Datei: „pa_plot.py“ die Parameter für das Aussehen des Plots anpassen. Für das Erzeugen des Plots muss man die Werte nicht nochmal erneut berechnen, da die Funktionen auf die .pkl-Datei zugreift. Es reicht die entsprechende Funktion in der Datei aufzurufen und den Pfad zu der entsprechenden .pkl-Datei bereitzustellen.

6.7 Verhalten bei Kompilierfehlern

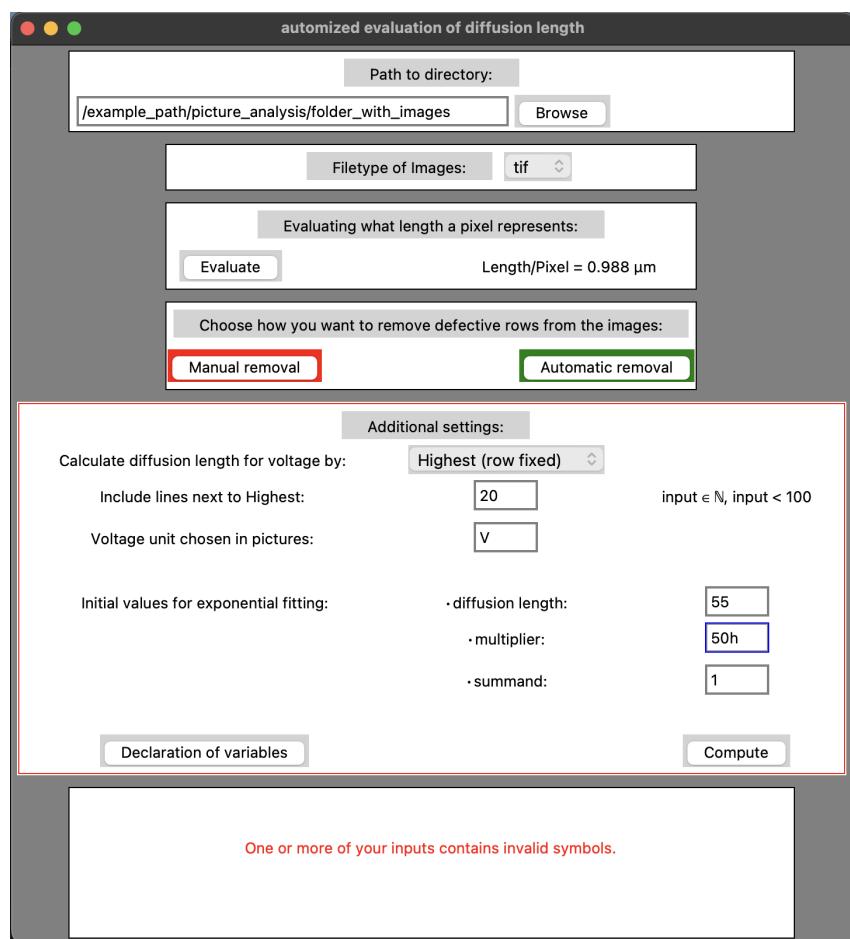


Abbildung 6.8: Veränderung des Hauptfensters bei falschem Benutzereintrag

Natürlich ist das Programm aufgrund der begrenzten Arbeitszeit nicht vollkommen ausgereift und kann eventuell beim Kompilieren scheitern. Es wurde möglichst sichergestellt, dass der Benutzer selbst das nicht durch falsche Eingaben verursachen kann (siehe Abbildung 6.8). Jedoch ist auch dies nicht auszuschließen. Vor allem das Ausreizen der Optionsgrenzen, sowie das nachträgliche Ändern des Bildpfades, wurde nicht ausführlich getestet. Bei einem Kompilierfehler empfiehlt es sich als Erstes diese Dinge zu vermeiden. Wenn dieser weiterhin besteht muss der Fehler analysiert und gegebenenfalls Ausbesserungen am Code vorgenommen werden.

6.8 Auswertung der neuen Messergebnisse

Es wurden für 50 äquidistante Spannungen zwischen 0 V und 5 V EBIC-Bilder des pn-Übergangs aufgenommen. Die ermittelten Diffusionslängen sind in Abbildung 6.9 dargestellt. Ausgehend vom Kurzschlussfall fallen die Diffusionslängen zunächst und erreichen ein Minimum bei 300 mV. Die Kurve steigt dann an und flacht für größere Spannungen ab.

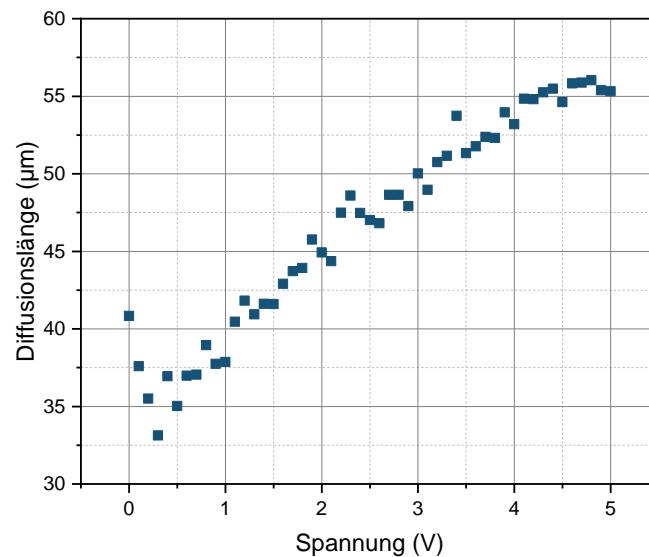


Abbildung 6.9: Diffusionslänge in Abhängigkeit der angelegten Spannung nach Automatisierung.

Im folgenden wird untersucht, inwieweit die offenen Fragen aus Abschnitt 5 geklärt werden können.

1. Für den Bereich **kleiner Spannungen** (zwischen 0 V und 1 V) kann die Vermutung, es handele sich beim ersten Datenpunkt um einen Ausreißer, widerlegt werden.
2. Im Bereich **mittlerer Spannungen** (1 V bis 2 V) wird keine Unstetigkeit beobachtet, die Datenpunkte beschreiben einen kontinuierlichen Verlauf.
3. Für **hohe Spannungen** (ab 2 V) flacht die Kurve stetig ab. Ab ca. 4,6 V steigen die Diffusionslängen nicht weiter an, eine Sättigung kann somit nicht ausgeschlossen werden.

Der Verlauf der Messpunkte entspricht etwa einer Wurzelfunktion. Nach Gleichung 2.2 hängt die Diffusionslänge von der Wurzel der Lebensdauer und der Diffusionskonstante ab. Der Anstieg von einer/ beiden dieser Größen könnte die Ursache des beobachteten Effekts.

Möglicherweise erhöht sich die Lebensdauer der Ladungsträger aufgrund von Defekten am pn-Übergang. Es könnte ein Tunnelkontakt entstehen, durch den sich die Diffusionslänge erhöht.

Eine andere Möglichkeit wäre, dass eine Änderung der Spannung die Eindringtiefe des Elektronenstrahls in die Probe verändert. Würde der Elektronenstrahl tiefer eindringen, könnte Rekombination an der Oberfläche reduziert sein, wodurch sich die Diffusionslänge erhöht. Inwiefern eine Biasspannung an der Probe jedoch die Eindringtiefe des Strahls ändert, ist nicht bekannt.

7 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Programm zur automatischen Bestimmung von Diffusionslängen entwickelt. Es wurde erfolgreich genutzt, um Unsicherheiten bei der Abhängigkeit der Diffusionslänge von der Sperrspannung zu klären. Die Ursache dieser Abhängigkeit konnte nicht geklärt werden.

Eine weitere Verringerung der Schrittweite für die Spannungen wäre nicht sinnvoll, da die Kurve nun qualitativ gut erfasst werden kann. Im nächsten Schritt wäre es sinnvoll, die Probe mit anderen Messmethoden zu untersuchen. Insbesondere die Aufnahme einer Strom-Spannungs-Kennlinie im Dunkeln und unter Beleuchtung würde Aufschluss über einige grundlegende Eigenschaften der Diode liefern.

Das Programm steht dem Praktikum ab sofort zur Verfügung. Es kann unter anderem über den nebenstehenden QR-Code von [GitHub](#) bezogen werden. In Zukunft könnte z.B. noch untersucht werden, welchen Einfluss die Beschleunigungsspannung des Elektronenstrahls auf die Diffusionslänge hat.



Literatur

- [1] Versuch M07: Wechselwirkung von Elektronen und Materie. URL: http://positron.physik.uni-halle.de/F-Praktikum/PDF/M07_REM_EBIC_2021_09_27.pdf.
- [2] Thomas Fauster u. a. Oberflächenphysik - Grundlagen und Methoden. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2013. ISBN: 9783486856200. DOI: doi:10.1524/9783486856200. URL: <https://doi.org/10.1524/9783486856200>.