

**Protokoll:**  
**pn-Übergang**  
(korrigierte Version)

Versuchstag: 12.11.2008

Kathrin Ender, Michael Walz

Gruppe 101

## Inhaltsverzeichnis

<b>A Grundlagen</b>	<b>2</b>
1 Halbleiter und das Bändermodell	2
2 Dotierung	2
3 pn-Übergang und Dioden	3
3.1 Diode in Flussrichtung . . . . .	3
3.2 Diode in Sperrichtung . . . . .	3
3.3 schematischer Bandverlauf und Fermi-niveau . . . . .	4
4 Kapazität eines symmetrischen pn-Übergangs	4
<b>B Experiment</b>	<b>5</b>
5 Zur Auswertung	5
6 Strom-Spannungskennlinien	5
7 Temperaturabhängigkeit der Kennlinien	7
8 Spannungsstabilisierung	9
8.1 Diodenschaltung . . . . .	9
8.2 Transistorschaltung . . . . .	10
9 Kapazität des Se-Gleichrichters	12
10 Theoretischer Aufbau einer Si-Diode	14
<b>C Verbesserungen</b>	<b>15</b>
11 Kapazität des Se-Gleichrichters	15
12 Strom-Spannungskennlinien	15
13 Theoretischer Aufbau einer Si-Diode	16

## Teil A

# Grundlagen

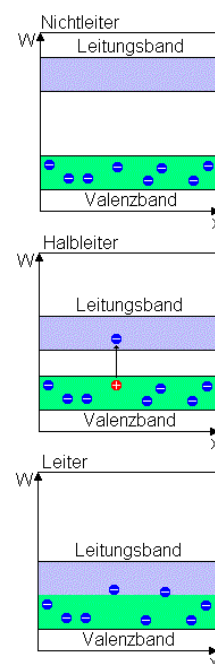
Ziel dieses Versuches ist es, den pn-Übergang kennenzulernen. Dazu sollen an verschiedenen Dioden der Strom als Funktion der Spannung gemessen und mit den theoretischen Erwartungen verglichen werden. Ebenso wird die Dicke der Raumladungszone, die Dotierkonzentration und die Diffusionsspannung bestimmt.

## 1 Halbleiter und das Bändermodell

Um die Leitfähigkeit von Halbleitern erklären zu können muss man auf das sogenannte Bändermodell zurückgreifen. Betrachtet man nur ein einzelnes Atom, so kann diesem quantenmechanisch ein Energiespektrum mit diskreten Niveaus zugeordnet werden. Halbleiter sind jedoch Kristalle, bestehen also aus vielen in einer periodischen Struktur angeordneten Atomen. Durch die Wechselwirkung zwischen diesen Atomen werden die diskreten Energieniveaus der einzelnen Atome aufgespalten. Dadurch liegen die diskreten Energieniveaus so nah beieinander, dass sie zu einem kontinuierlichen Energieband „verschmieren“.

Es gibt das sogenannte Valenzband, welches bei  $T = 0\text{ K}$  das höchste voll besetzte ist und das Leitungsband, welches das nächste drüber liegende ist. Im Gegensatz zu Leitern gibt es bei Halbleiter und Isolatoren eine Energielücke zwischen Valenzband und Leitungsband. Bei Isolatoren ist diese Lücke so groß, dass es die Elektronen aus dem Valenzband nicht ins Leitungsband angeregt werden können. Und da volle und leere Bänder beide nicht zum Ladungstransport beitragen leiten solche Materialien nicht.

Die Energielücke bei Halbleitern liegt bei etwa  $0 < E_g < 4\text{ eV}$  und die Elektronen können durch die Absorption von Photonen in das Leitungsband angeregt werden, womit das Material leitend wird. Im Valenzband bleibt dann ein sogenanntes Loch zurück. Im Prinzip handelt es sich dabei um ein Quasiteilchen, das man betrachtet, da sich die Bewegung dieses einen Loches einfacher beschreiben lässt als die der vielen Elektronen drumherum. Das Loch hat im Vergleich zum Elektron entgegengesetzten Spin, Wellenvektor und Ladung.



Quelle:  
[de.wikipedia.org](https://de.wikipedia.org)  
 Artikel:  
 Bändermodell

## 2 Dotierung

Um die Ladungsträgerkonzentration bzw. die Leitfähigkeit im Halbleiter zu erhöhen können Fremdatome in den Halbleiterkristall eingebracht werden. Dieses gezielte Einbringen von Fremdatomen nennt man Dotierung. Man unterscheidet zwei Arten von Dotierung, abhängig davon welche Ladungsträgerzahl erhöht wird. Es gibt zum einen die p-Dotierung, bei welcher die Anzahl der positiven freien Ladungsträger im Halbleiterkristall erhöht wird und zum anderen die n-Dotierung, die die Zahl der negativen freien Ladungsträger erhöht. Für die n-Dotierung braucht man ein Fremdatom mit einem nur schwach gebundenen Elektron. Da das Elektron nur schwach gebunden ist, kann es leicht aus dem Valenzband in das Leitungsband

angeregt werden. Das Energieniveau des sogenannten Donators<sup>1</sup> liegt kurz unter dem des Leitungsbandes. Bei der p-Dotierung fungieren Fremdatome als Akzeptoren, das heißt sie nehmen Elektronen auf. Das Energieniveau der Akzeptoren liegt knapp über dem Valenzband, so dass Elektronen aus diesem leicht in diesen Zustand übergehen können, wobei ein Loch im Valenzband zurück bleibt, was die Leitfähigkeit des Halbleiters erhöht. Natürlich kann jeweils nur eine Dotierung vorgenommen werden, da es andernfalls zu einer Rekombination von Löchern und Elektronen käme, anstatt zu der gewünschten Erhöhung der Leitfähigkeit.

### 3 pn-Übergang und Dioden

Ein wichtiges Halbleiterbauelement sind Dioden. Eine Diode zeichnet sich dadurch aus, dass sie je nach Richtung der angelegten Spannung leitet oder sperrt. Eine Möglichkeit eine Diode zu realisieren ist einen p-dotierten und einen n-dotierten Halbleiter in Kontakt zu bringen. Am sogenannte pn-Übergang bildet sich eine Ladungsträger freie Zone aus, da an der Grenzschicht die freien Elektronen aus dem n-dotierten Halbleiter mit den Löchern des p-dotieren rekombinieren. Durch den Übergang der freien Elektronen in den p-dotierten Halbleiter, ist dieser an der Grenzschicht negativ geladen, während der n-dotierte positiv geladen ist. Das sich daraufhin ausbildende elektrische Feld verhindert, dass weitere Elektronen mit den Löchern rekombinieren, da diese die Potentialstufe nicht überwinden können.

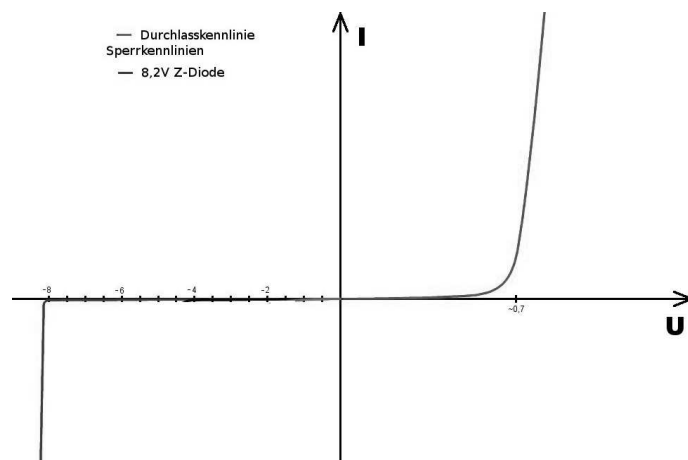
#### 3.1 Diode in Flussrichtung

Wird die Diode in Flussrichtung angeschlossen, das heißt der Minuspol muss am n-dotierten Halbleiter angelegt werden, so wird das elektrische Feld zwischen den Halbleitern geschwächt, bis schließlich ein Stromfluss einsetzt.

#### 3.2 Diode in Sperrrichtung

Legt man an eine Diode eine Spannung so an, dass der Minuspol am p-dotierten Halbleiter anliegt. So wird das elektrische Feld, das sich zwischen den beiden Halbleitern ausgebildet hat noch verstärkt. Dies ist die Sperrrichtung der Diode. Durch Erhöhen der Spannung in Sperrrichtung wird zwar die Potentialstufe höher, gleichzeitig wird sie allerdings auch dünner, so dass die Elektronen ab einer gewissen Spannung durch die Barriere hindurchtunneln können und somit ein Stromfluss entsteht.

Die meisten Dioden werden thermisch zerstört, wenn es zu einem Durchschlag kommt. Die Zenerdiode hingegen lässt sich auch in Sperrrichtung und über der Durchschlagsspannung über längere Zeit betreiben. Die charakteristische Strom-Spannungskennlinie einer Zenerdiode ist nebenstehend abgebildet.



<sup>1</sup>Donator: von lat. donare=geben, da es ein Elektron abgibt

### 3.3 schematischer Bandverlauf und Fermiiveau

Beim unbelasteten pn-Übergang bildet sich wie beschrieben eine raumladungsfreie Zone und ein elektrisches Feld aus. Dies entspricht einer Potentialstufe. Da der pn-Übergang sich im thermodynamischen Gleichgewicht befindet, ist das Fermiiveau konstant und für Elektronen und Löcher gleich. Wird der pn-Übergang nun belastet, so verändert sich die Größe der raumladungsfreien Zone und damit die Höhe der Potentialstufe. Wie auf der Skizze im Anhang gut zu erkennen ist wird die Potentialstufe bei Anlegen einer Spannung in Durchlassrichtung niedriger, während eine Spannung in Sperrrichtung sie erhöht. Außerdem spaltet sich das Fermiiveau in zwei sogenannte Quasiferminiveaus auf. Elektronen und Löcher haben nun ihre eigenen Niveaus. Für eine Spannung in Durchlassrichtung liegt das Fermiiveau der Elektronen nah am Leitungsband und das der Löcher nah am Valenzband. Während bei einer Spannung in Sperrrichtung das Fermiiveau der Löcher über dem der Elektronen liegt, womit die jeweiligen Niveaus weiter vom Valenzband bzw Leitungsband entfernt liegen.

## 4 Kapazität eines symmetrischen pn-Übergangs

Nimmt man den pn-Übergang als symmetrisch an, so erhält man laut Formel (34) aus der Vorbereitungsmappe, dass gilt:

$$C = \frac{B}{\sqrt{U_{\text{diff}} + U_s}}$$

Dabei bezeichnet  $U_{\text{diff}}$  die im Halbleiter entstehenden Potentialdifferenz,  $U_s$  die in Sperrrichtung angelegte Sperrspannung und  $B(N, \varepsilon)$  eine von der Ladungsträgerdichte  $N$  und der Fermienergie  $\varepsilon$  abhängige Funktion. Diese Funktion  $B$  soll im Folgenden bestimmt werden:

Für die Kapazität gilt allgemein:

$$C = \frac{dQ}{dU} = \frac{d}{dU} \int_{\mathbb{R}^3} \rho(\vec{x}) d\vec{x} = A \cdot \frac{d}{dU} \int_{-d}^{+d} \rho(x) dx$$

Dabei bezeichnet  $A$  die Fläche und  $d$  die halbe Dicke der Sperrfläche. Für eine symmetrischen Übergang erhalten wir gemäß der Vorbereitungsmappe:

$$d = \sqrt{\frac{\varepsilon (U_{\text{diff}} - U)}{e \cdot N}}$$

Für die Ladungsdichte  $\rho(x)$  erhält man:

$$\rho(x) = \begin{cases} eN = \frac{\varepsilon (U_{\text{diff}} - U)}{d^2} & x > 0 \\ -eN = -\frac{\varepsilon (U_{\text{diff}} - U)}{d^2} & x < 0 \end{cases}$$

Berechnet man das Integral, differenziert nach  $U$  und beachtet  $U = -U_s$ , so erhält man:

$$C = -\frac{2\varepsilon A}{d} = \frac{-2A\sqrt{eN\varepsilon}}{\sqrt{U_{\text{diff}} + U_s}} \Rightarrow B = -2A\sqrt{eN\varepsilon}$$

## Teil B

# Experiment

## 5 Zur Auswertung

Alle Messwerte befinden sich im handgeschrieben angehängten Versuchsprotokoll. Diese Werte wurden am Computer abgetippt und dem Programm GNUPLOT<sup>2</sup> zur linearen Regression übergeben und die Werte für Steigung, Y-Achsenabschnitt und den statistischen Fehler der beiden von dort übernommen. GNUPLOT nutzt zur linearen Regression die Formeln 16–18 aus dem Fehlerrechnungsskript<sup>3</sup> zum Praktikum.

Die meisten Messwerte mussten aufgrund der Ablesekalen (oder aus sonstigen Gründen) noch umgerechnet werden. Aufgrund des massiven Rechenaufwandes erledigten wir dies direkt am Computer entweder mit GNUPLOT oder mit einer Tabellenkalkulation. Unter GNUPLOT geschah dies mittels der Option „using“<sup>4</sup> und zwar sowohl bei der Regression (über „fit“) wie auch beim Erstellen der Graphen (über „plot“).

Für die Fehlerfortpflanzung von statistischen Fehlern wird im Allgemeinen das Gaußsche Fehlerfortpflanzungsgesetz (Formel 4 im Fehlerrechnungsskript) benutzt. Für systematische Fehler muss, da die statistische Unabhängigkeit dieser Messabweichungen nicht gegeben ist, eine Größtfehlerabschätzung nach Formel 5 vorgenommen werden.

## 6 Strom-Spannungskennlinien

Es sollen die Strom-Spannungskennlinien eines Se-Gleichrichters, einer Ge-Diode und einer Si-Diode untersucht werden. Als Spannungsquelle wird die LabView-PC-Karte verwendet. Zum Schutz der Dioden schaltet man einen Vorwiderstand von  $220\Omega$  zwischen Spannungsquelle und Diode. Die Ergebnisse werden linear und logarithmisch aufgetragen und mit der theoretischen Formel verglichen.

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

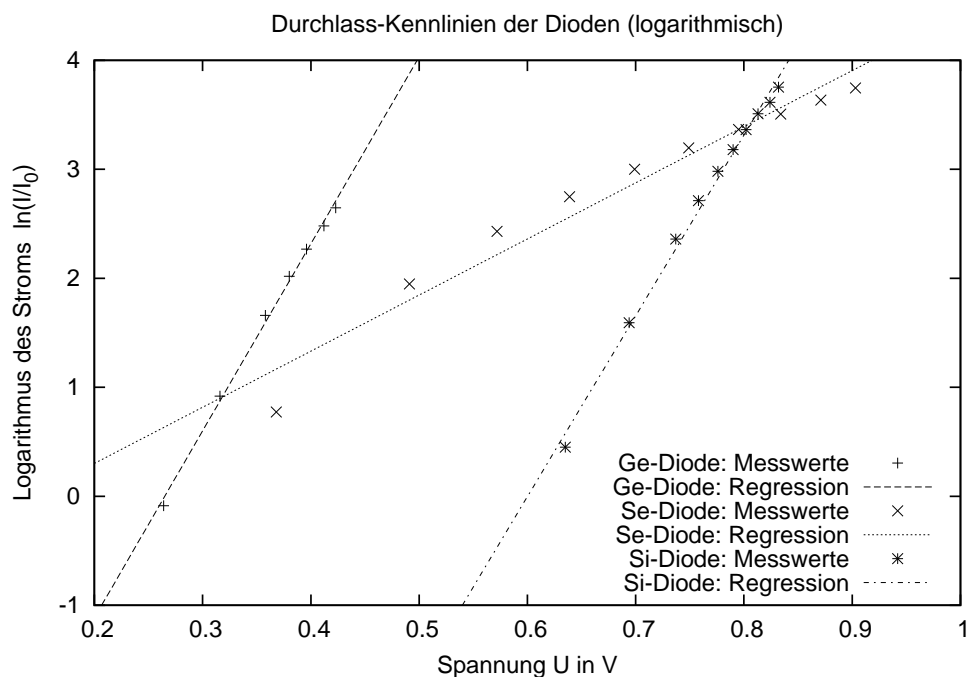
Da ein exponentieller Zusammenhang vorliegt, sollte in der logarithmischen Auftragung eine Gerade zu erkennen sein.

Wir maßen die Durchlasskennlinie spannungsrichtig, während wir bei den Sperrkennlinien auf eine stromrichtige Messung Wert legten. Trägt man die Durchlass-Kennlinie logarithmisch auf, so erkennt man den oben beschriebenen exponentiellen Zusammenhang. Im folgenden Schaubild wurde  $I_0 = 1 \text{ mA}$  gewählt. Es könnte aber auch jeder andere Wert gewählt werden, da dadurch nur der Y-Achsenabschnitt verändert werden würde:

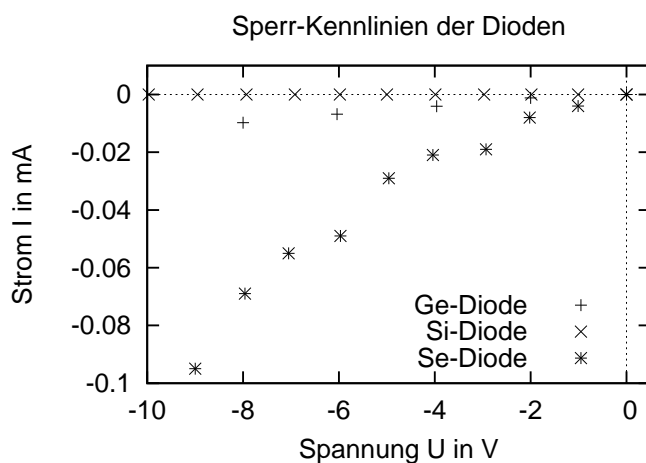
<sup>2</sup><http://www.gnuplot.info/>

<sup>3</sup><http://www-ekp.physik.uni-karlsruhe.de/~simonis/praktikum/allgemeines/script-Fehleranalyse.pdf>

<sup>4</sup><http://www.gnuplot.info/docs/node133.html>



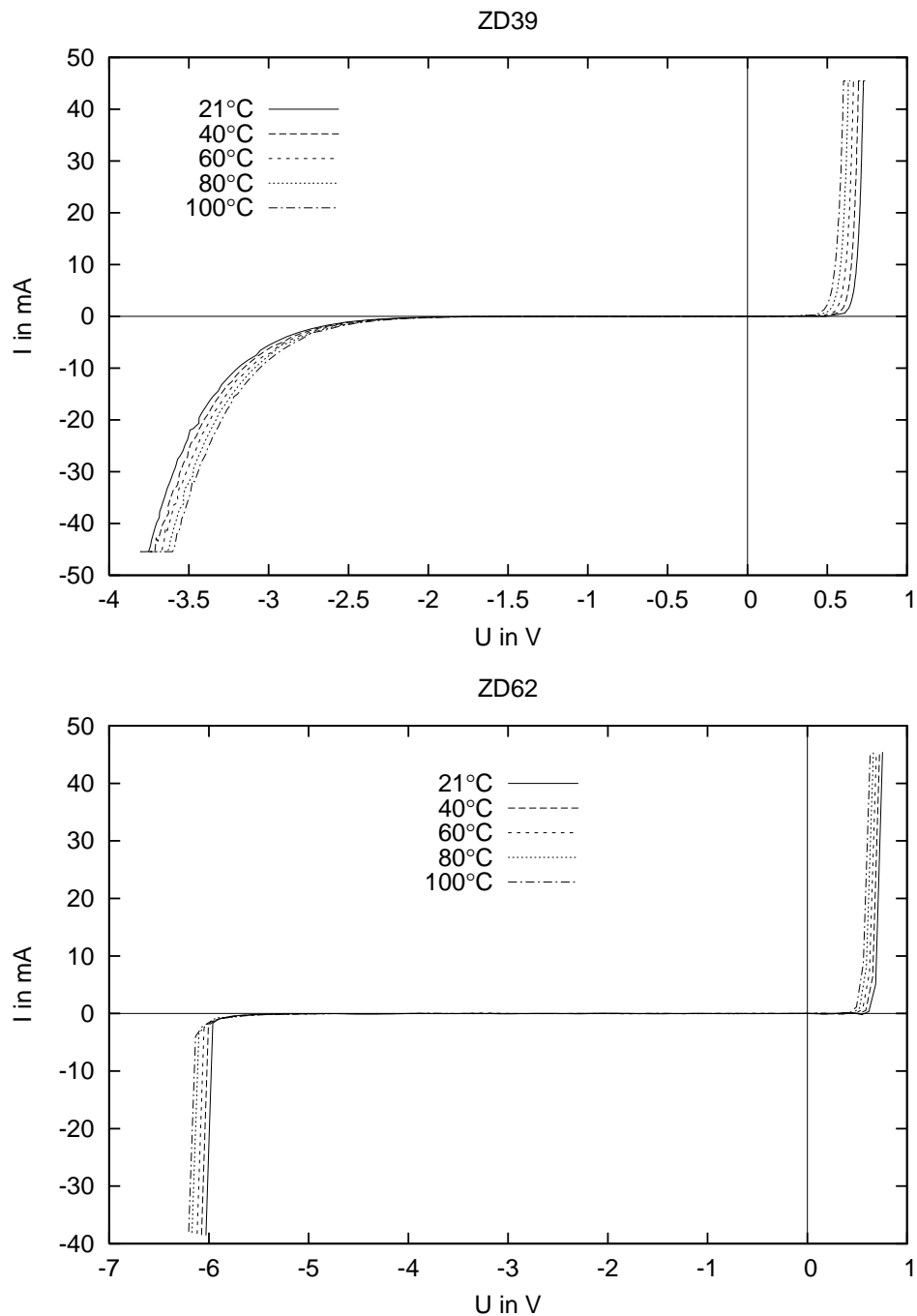
Die Steigung entspricht der Fähigkeit der Diode, bei positive Spannung möglichst schnell komplett durchzuschalten. Die Se-Diode ist hier im Vergleich zur Ge- und Si-Diode etwas langsamer, weswegen die Se-Diode nur noch von historisches Bedeutung ist. Die Si-Diode grenzt sich von der Ge-Diode noch dadurch ab, dass sie mit höheren Strömen belastet werden kann, während man für die Ge-Diode auf einen Maximalstrom von 15 mA achten muss.

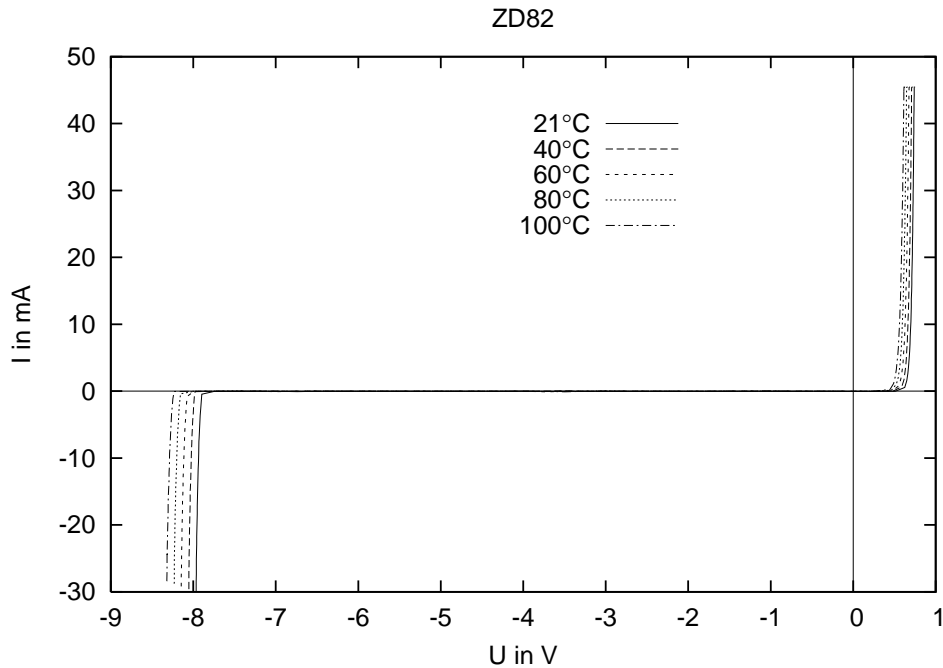


Einen weiteren Vorteil der Si-Diode erkennt man, wenn man die Sperr-Kennlinien der Dioden untersucht. Während wir bei der Ge- und Se-Diode Sperrströme im Bereich von  $10^{-5}$ – $10^{-4}$  A maßen, konnten wir bei der Si-Diode im  $\mu\text{A}$ -Bereich des Messgerätes keinen Sperrstrom feststellen. Die Si-Diode eignet sich also auch bei extrem empfindlichen Schaltungen als Sperr-Diode.

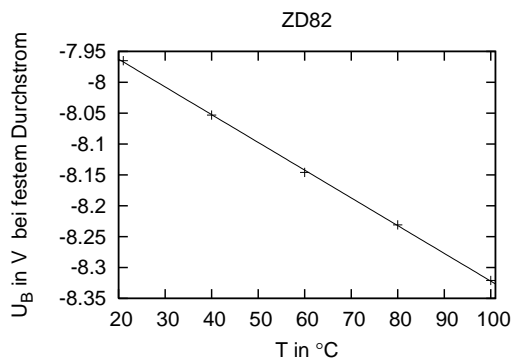
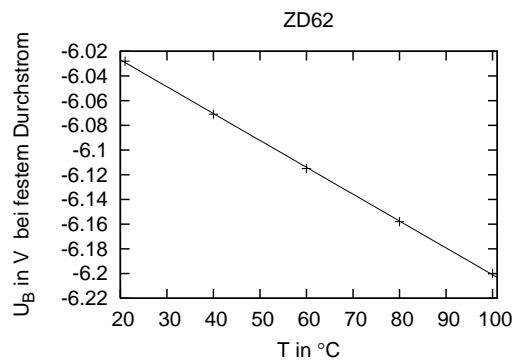
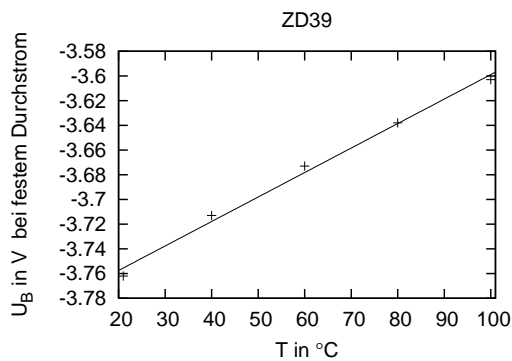
## 7 Temperaturabhängigkeit der Kennlinien

Es wird die Temperaturabhängigkeit der Kennlinien von drei Zenerdioden untersucht. Dazu befinden sich die Dioden in einem beheizbaren Kupferblock. Gemessen wird für Raumtemperatur, 40°C, 60°C, 80°C und 100°C. Es ergeben sich die folgenden Kennlinien:





Bei allen drei Dioden steigt der Stromfluss mit höherer Temperatur schon bei niedriger Spannung an. Die Elektronen haben bei hoher Temperatur mehr kinetische Energie und können somit die Potentialdifferenz am pn-Übergang früher überwinden. In Sperrrichtung zeigen die Dioden jedoch unterschiedliche Verhalten. So fällt auf, dass bei ZD82 und ZD62 die Durchbruchspannung mit steigender Temperatur sinkt, während sie bei ZD39 mit steigender Temperatur steigt. Um diese Temperaturabhängigkeit der Durchbruchspannung besser erkennen zu können, tragen wir die Durchbruchspannung in Abhängigkeit von der Temperatur bei konstanter Durchbruchstromstärke auf.



Das unterschiedliche Temperaturverhalten lässt sich durch zwei Effekte erklären. Der eine Effekt ist das Tunneln. Durch eine Erhöhung der Sperrspannung wird die Potentialdifferenz zwar größer, gleichzeitig wird die Tunnelbarriere jedoch dünner, so dass die Elektronen hindurch tunneln können.

Erhöht man die Temperatur, so nimmt die Energielücke bei den meisten Halbleitern ab, so dass die Durchbruchspannung durch den Tunneleffekt mit steigender Temperatur sinkt.

Außerdem spielt die Stoßionisation eine Rolle. Werden Minoritätsladungen in der Verarmungszone beschleunigt, so können diese durch Stöße Elektronen-Loch-Paare ionisieren, welche dann ihrerseits weiter ionisieren. Dieser Effekt ist von der mittleren freien Weglänge abhängig. Diese sinkt mit steigender Temperatur, was zur Folge hat, dass die Durchbruchspannung mit steigender Temperatur zunimmt.

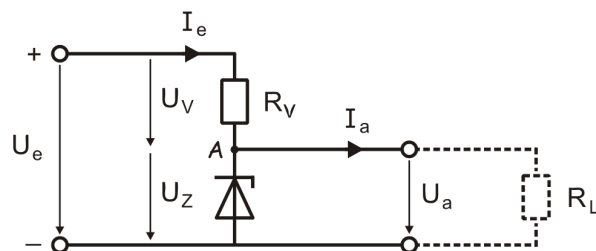
Je nach Aufbau der Dioden überwiegt einer der Effekte. Bei schwacher Dotierung überwiegt der Tunneleffekt (wie bei ZD62 und ZD82), während bei starker Dotierung der Effekt der Stoßionisation überwiegt (ZD39).

## 8 Spannungsstabilisierung

### 8.1 Diodenschaltung

Nun wird die Zenerdiode zur Spannungsstabilisierung verwendet und anhand 10 unterschiedlicher Lastwiderstände im Bereich von 0 V bis 15 V untersucht. Dabei wird auch untersucht, wie die Ausgangsspannung  $U_{\text{out}}$  bei fester Eingangsspannung  $U_{\text{in}} = 10 \text{ V}$  vom Lastwiderstand  $R_L$  abhängt.

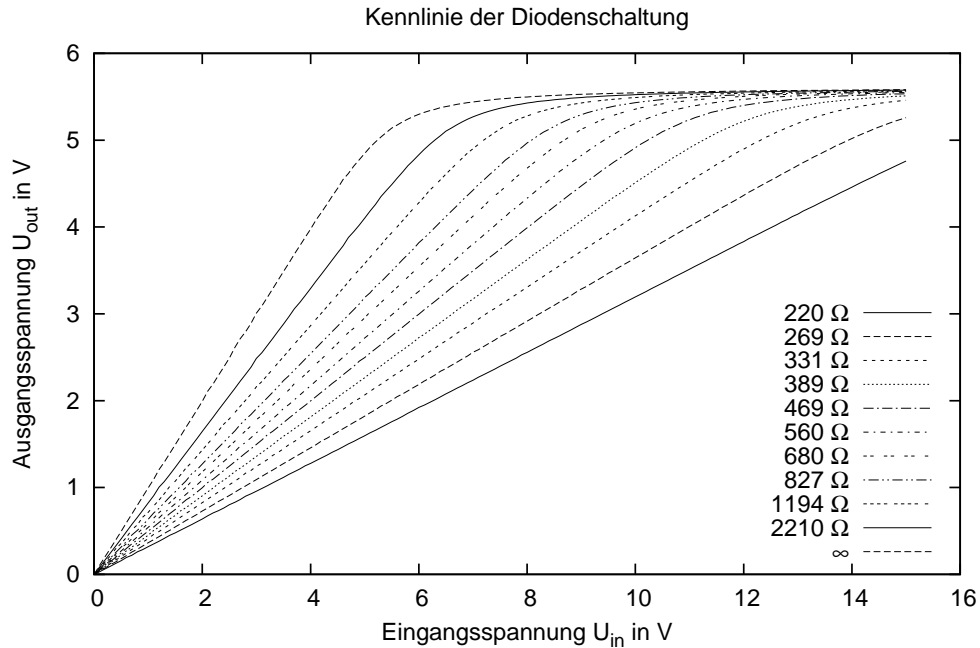
Dazu wird zuerst eine Zenerdiode in Durchschlagrichtung verwendet, da hier der Spannungsabfall an ihr nahezu konstant ist. Damit ist die Spannung an  $R_L$  so lange konstant, wie der Widerstand nicht zu klein – die Last also nicht zu groß – wird.



Durch die Zenerdiode werden nämlich nur die Spannungen, die größer als die Durchbruchspannung  $U_Z$  sind, auf  $U_Z$  abgesenkt<sup>5</sup>. Ist der Widerstand  $R_L$  aber zu klein, ist auch die Spannung an der Zenerdiode zu klein, sodass diese überhaupt nicht durchschlägt und damit auch nicht Spannungsregulierend arbeitet.

Gemäß der Aufgabe maßen wir mit LabView für alle 10 vorhandenen Widerstände die Kennlinien  $U_{\text{out}}(U_{\text{in}})$ . Die Widerstände vermaßen wir zuvor mit einem Multimeter. Zusätzlich vermaßen wir die Schaltung auch ohne angeschlossenen Widerstand; formal also mit  $R = \infty$ . Aus den gemessenen Daten erstellen wir folgendes Schaubild:

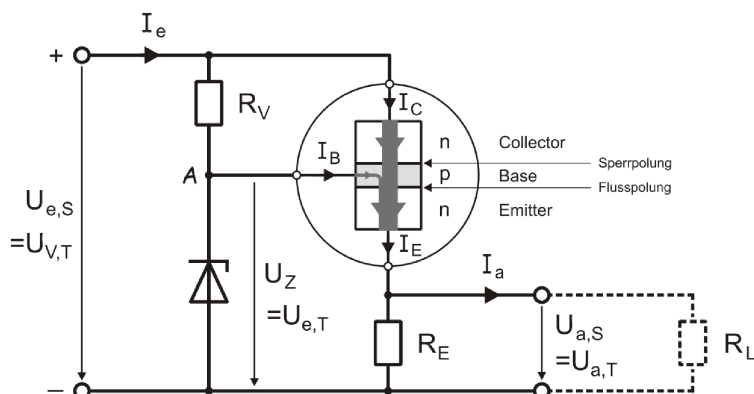
<sup>5</sup>die restliche Spannung fällt dann an  $R_V$  ab



Es ist sehr gut zu sehen, dass die Ausgangsspannung bei gegen Eingangsspannung immer auch noch vom Lastwiderstand abhängt. Erst bei sehr großen Eingangsspannungen ist eine Stabilisierung zu erkennen. Bei  $R = 220 \Omega$  vermutlich erst bei ca. 20 V. Für kleinere Widerstände wird die Ausgangsspannung ab ca. 6 V von der Eingangsspannung unabhängig.

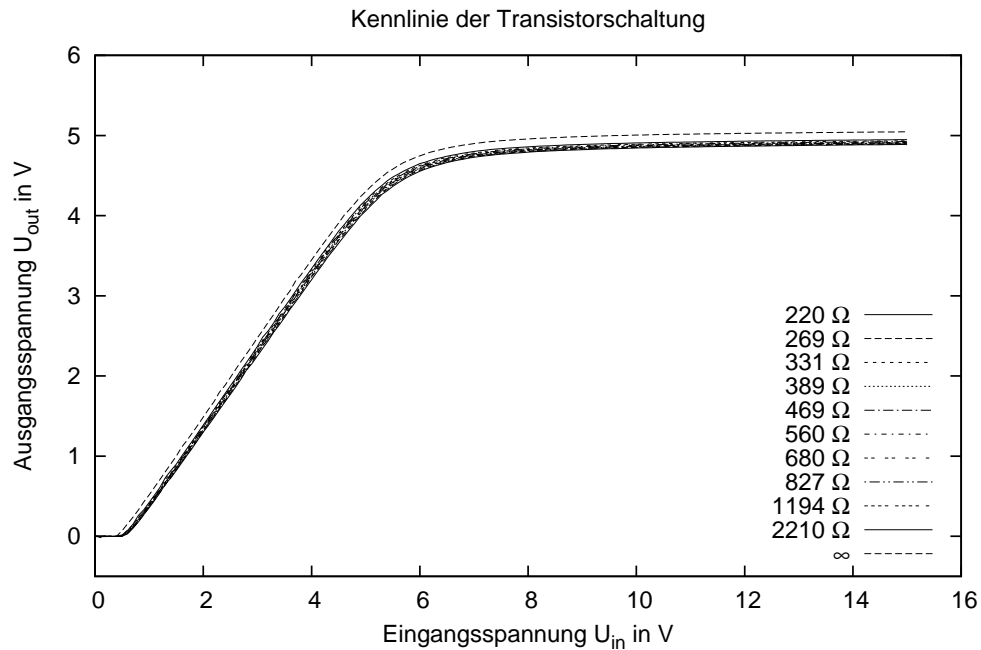
## 8.2 Transistorschaltung

Im zweiten Teil soll die Stabilisierung mit Hilfe eines Transistors verbessert werden. In dieser Schaltung ist der Spannungsteiler aus Widerstand  $R_V$  und Zenerdiode nahezu unabhängig vom Lastwiderstand  $R_L$ , sodass die Zenerdiode immer im Durchschlagbetrieb genutzt werden kann.

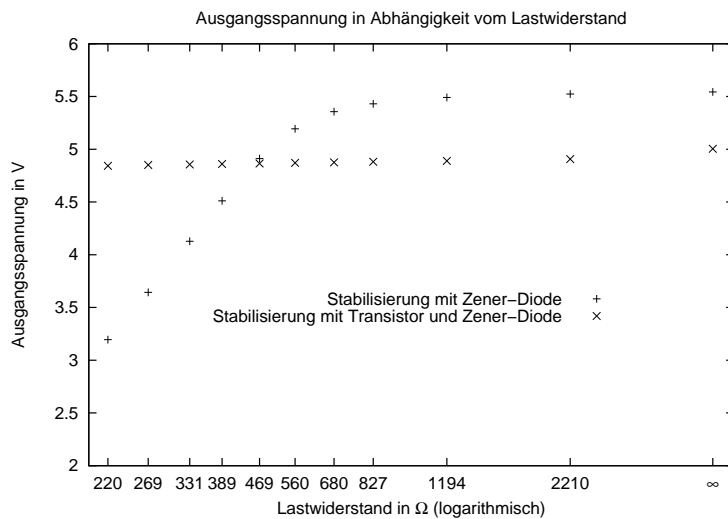


Wegen des hohen Verstärkungsfaktor des Transistor gilt:  $I_B \ll I_C \approx I_E$ . Der Strom der durch  $R_E$  und  $R_L$  fließt, wird praktisch komplett über den Kollektor des Transistors bezogen. Damit ist die Spannung am Emitter des Transistor unabhängig vom Lastwiderstand immer gleich der Gesamtspannung abzüglich der doppelten Diodespannung, da am Transistor zweimal die Diodespannung abfällt.

Wir vermaßen diese Schaltung ebenso mit LabView für alle 11 Widerstände und erstellen daraus folgendes Schaubild:



Im Gegensatz zur Diodeschaltung hängt die Ausgangsspannung im gesamten Bereich praktisch überhaupt nicht vom Lastwiderstand ab. Diese Stabilisierung ist hier extrem gut. Unabhängig von der Eingangsspannung wird die Ausgangsspannung auch erst bei ca. 6 V, allerdings bereits für alle Lastwiderstände und nicht nur für die hochohmigen.



Wie in der Aufgabe verlangt, stellen wir noch die Ausgangsspannung für eine feste Eingangsspannung (hier 10 V) in Abhängigkeit vom Lastwiderstand dar. Man erkennt hier nochmals die oben bereits festgestellte Tatsache, dass die Stabilisierung mit Transistor deutlich besser funktioniert als nur mit Diode.

## 9 Kapazität des Se-Gleichrichters

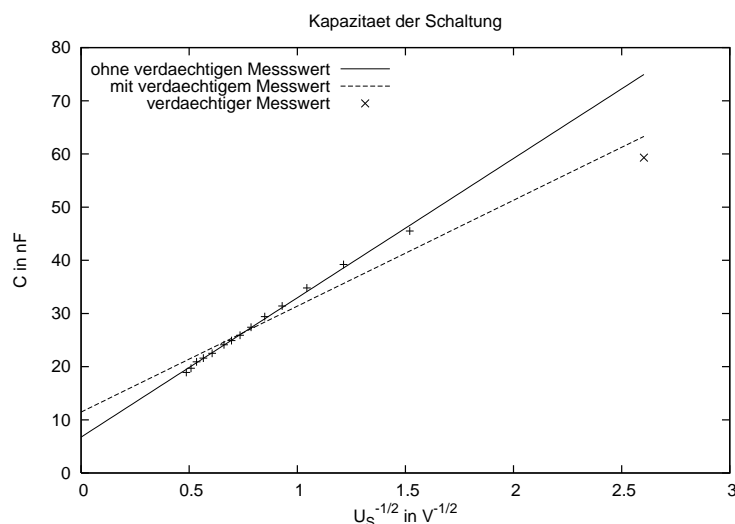
Mit Hilfe von einer Brückenschaltung (Schaltskizze siehe Aufgabenblatt) soll die Kapazität des Se-Gleichrichters bestimmt werden. Die Brückenschaltung besteht aus zwei Stromteilern, zwischen denen eine Brücke geschaltet ist. Der eine Stromteiler besteht aus zwei gleich großen Ohmschen Widerständen. Der andere Stromteiler besteht aus einer regelbaren Kapazität, dem Selengleichrichter und zwei weiteren Kondensatoren. Es fließt genau dann kein Strom durch die Brücke, wenn die Stromteiler im gleichen Verhältnis teilen. Da die Ohmschen Widerstände und die zwei zusätzlichen Kondensatoren gleich groß sind, muss die Kapazität des Selengleichrichters gleich der eingestellten Kapazität sein, falls keine Spannung über dem Brückenwiderstand abfällt. An dem Selengleichrichter ist zusätzliche noch eine Gleichspannung angelegt. Der Vorwiderstand zwischen Sperrspannungsquelle und Se-Gleichrichter ist hochohmig gewählt um den Stromfluss durch die Diode zu minimieren, da sonst thermische Effekte auftreten.

Es ist allerdings zu beachten, dass die so bestimmten Kapazitäten nur in der idealisierten Theorie auch wirklich der Kapazität der Diode entsprechen. Was nämlich in der Überlegen nicht bedacht wurde ist die Kapazität der gesamten Schaltung (Kabel, usw). Um die gemessene Gesamtkapazität korrigieren zu können tragen wir  $C$  gegen  $1/\sqrt{U_S}$  auf.

$$C_{\text{ges}} = C_{\text{Schaltung}} + \underbrace{\frac{B}{\sqrt{U_{\text{diff}} + U_S}}}_{=C_{\text{Diode}}}$$

Der y-Achsenabschnitt der Regression liefert die Kapazität der Schaltung.

Leider funktionierte bei uns der Versuch nicht wie erwartet. Bei uns stellte sich unabhängig von der Eingangsspannung immer eine konstante Sperrspannung über dem Gleichrichter ein. Auch zusammen mit dem Betreuer konnten wir jedoch keinen Fehler im Aufbau feststellen. Es könnte zum Beispiel eines der Bauelemente kaputt gewesen sein. Die in der Auswertung verwendeten Messwerte stammen zwar nicht von uns, wurden jedoch am gleichen Versuch aufgenommen.



Die Regression wurde mit Gnuplot durchgeführt. Zunächst führten wir die Regression über alle Messpunkte aus. Diese Regression liefert als Kapazität der Schaltung

$$C_{\text{Schaltung}} = (11,5 \pm 1,2) \text{ nF}$$

Der Fehler ist mit 10% allerdings relativ hoch.

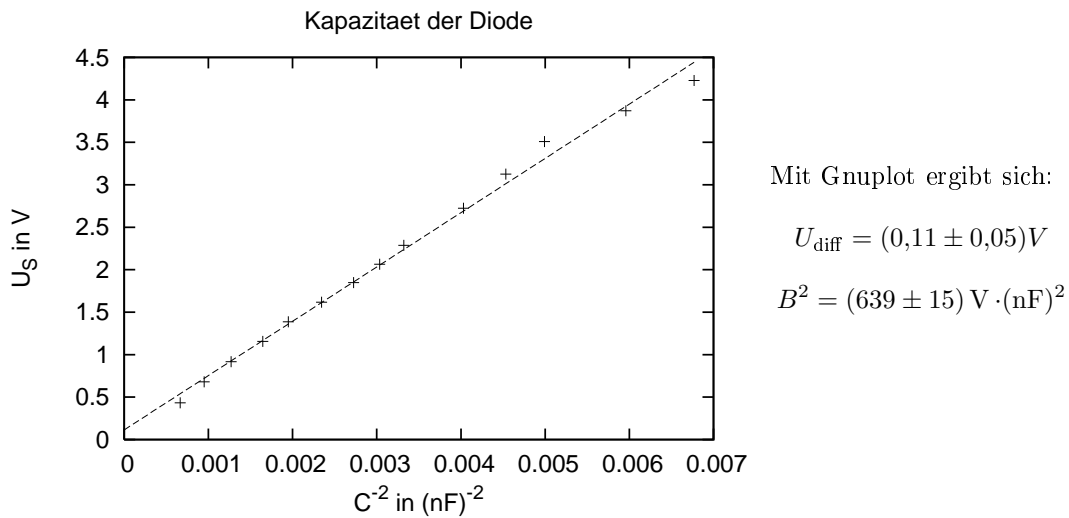
Betrachtet man nun noch die Lage der Regressionsgerade im Verhältnis zu den Messpunkten, so fällt auf, dass besonders ein Messwert von einer „schönen“ Regressionsgeraden abweicht. Wir vermuten, dass es sich dabei um einen Messfehler handelt. Ohne diesen verdaächtigen Messwert erhält man als Kapazität der Schaltung:

$$C_{\text{Schaltung}} = (6,7 \pm 0,4) \text{ nF}$$

Dies entspricht einem relativen Fehler von 5,7%. Im folgenden wird mit dem zweiten Wert für die Kapazität der Schaltung weitergerechnet.

Indem man die Schaltungskapazität von den gemessenen Kapazitäten abzieht erhält man die Diodenkapazität. Aus den in Abhängigkeit von der Sperrspannung bekannten Diodenkapazitäten können unter Annahme eines symmetrischen pn-Überganges die Diffusionsspannung  $U_{\text{diff}}$  und die Dotierkonzentration  $N$  bestimmt werden. Wählt man die Auftragung  $U_S$  über  $C^{-2}$ , so kann  $N$  aus der Steigung der Regressionsgeraden und  $U_{\text{diff}}$  aus dem y-Achsenabschnitt bestimmt werden. Dies lässt sich einfach in der in den theoretischen Grundlagen erläuterten Formel erkennen:

$$U_S = 4A^2 \cdot eN\varepsilon \cdot \frac{1}{C^2} - U_{\text{diff}}$$



$$N = \frac{B^2}{4eA^2\varepsilon_{HL}\varepsilon} \quad \text{mit} \quad A = 130 \text{ mm}^2 \quad \varepsilon_{HL} = 6,6 \quad \varepsilon = 8,854 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}} \quad e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$\Rightarrow N = (1,01 \pm 0,12) \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

Der statistische Fehler bei der Bestimmung der Dotierkonzentration beträgt etwa 11,6%. Diesen Fehler erhält man, wenn man bedenkt, dass  $B^2$  zum einen aus der Regression einen statistischen Fehler hat und zum anderen für die Regression die korrigierten Kapazitäten verwendet wurden, die ebenfalls Fehlerbehaftet sind. Der relative Fehler der korrigierten Kapazitäten zählt doppelt, da die Kapazität quadratisch aufgetragen wird.

$$\frac{\sigma_N}{N} = \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\sigma_{C_{\text{Sch}}}}{C_{\text{Sch}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{B^2}}{B^2}\right)^2} = \sqrt{4 \cdot 0,057^2 + 0,023^2} = 11,6\%$$

Um die Dotierkonzentration zu bestimmen scheint das Vorgehen des Versuches angemessen zu sein, da der Fehler im Rahmen liegt. Der Versuch scheint allerdings ungeeignet für die Bestimmung der Diffusionsspannung. Diese wird aus dem y-Achsenabschnitt der Regression gewonnen. Liegt dieser sehr nah bei Null so ist er immer mit einem großen relativen Fehler behaftet. Da die Diffusionsspannung im Verhältnis zur Sperrspannung klein ist, beträgt der relative Fehler allein aus der zweiten Regression 47%! Es kann also eigentlich nur die qualitative Aussage gemacht werden, dass die Diffusionsspannung klein ist. Wie „klein“ genau kann mit diesem Versuch nicht bestimmt werden.

Systematische Fehler können quantitativ nicht betrachtet werden, da uns Fehlerangaben der Instrumente fehlen. Wir wissen zum Beispiel nicht wie genau die tatsächliche Kapazität der Kapazitätsdekade der von uns eingestellten entspricht, oder wie genau die Flächenangabe beim Se-Gleichrichter ist. Was außerdem noch zu einem systematischen Fehler führen könnte, ist die Art wie im Versuch der minimale Stromfluss bestimmt wird. Durch Justieren der Kapazitätsdekade und des ohmschen Widerstandes in der Schaltung, soll die Amplitude minimiert werden, ganz verschwindet sie jedoch nicht. Und auch ohne angelegte Wechselspannung war schon eine sich zeitlich schnell verändernde Amplitude zu erkennen, die in der Größenordnung lag auf die wir sie nachher im Versuch minimiert haben.

## 10 Theoretischer Aufbau eine Si-Diode

Möchte man bestimmte Eigenschaften einer Diode erhalten, so kann man folgende Anhaltspunkte betrachten:

- Die Sperrschichtkapazität hängt gemäß Abschnitt 4 linear von der Querschnittsfläche  $A$  und wurzelförmig von der Ladungsträgerdichte  $N$  ab. Für eine große Kapazität benötigt man also eine möglichst hohe Querschnittsfläche. Zusätzlich kann man durch starke Dotierung die Ladungsträgerdichte erhöhen. Für eine kleine Kapazität müsste man beide Größen möglichst minimieren.

## Teil C

# Verbesserungen

## 11 Kapazität des Se-Gleichrichters

Bei der Herleitung der Formel für die Kapazität eines symmetrischen pn-Überganges, sind wir in der Vorbereitung davon ausgegangen, dass die Ladung des gesamten pn-Übergang betrachtet werden muss. Korrekterweise darf jedoch nur die Ladung einer Verarmungszone betrachtet werden. Die Kapazität lässt sich bestimmen aus:

$$C = \frac{Q}{U_{\text{Kondensator}}} \quad Q = \text{Ladung einer Verarmungszone}; \quad U_{\text{Kondensator}} = U_d + |U_S|$$

$$Q = \int_0^d \rho \cdot d^3x = eN \cdot A \cdot d \quad \text{mit} \quad d = \sqrt{\frac{\epsilon(U_{\text{diff}} + |U_S|)}{e \cdot N}}$$

$$\Rightarrow C = \frac{A \cdot \sqrt{eN\epsilon}}{\sqrt{U_{\text{diff}} + |U_S|}}$$

Wegen des Formelfehlers muss die von uns berechnete Dotierkonzentration  $N$  korrigiert werden.  $N$  erhält man aus der Steigung der linearen Regression:

$$U_S = A^2 \cdot eN\epsilon \cdot \frac{1}{C^2} - U_{\text{diff}}$$

Die Regression wurde in der Auswertung bereits durchgeführt. Der dort berechnete Wert für die Dotierkonzentration muss lediglich um den Faktor 4 korrigiert werden.

$$N = (4,04 \pm 0,5) \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{cm}^3}$$

## 12 Strom-Spannungskennlinien

Im Versuch bestimmten wir den Verlauf der Strom-Spannungskennlinie einer Ge-, einer Se- und einer Si-Diode. Für eine ideale Diode erwartet man folgende Abhängigkeit:

$$I(U) = I_S \left[ \exp\left(\frac{eU}{k_B T}\right) - 1 \right] \quad \Leftrightarrow \quad \ln\left(\frac{I}{I_S} + 1\right) = \frac{e}{k_B T} \cdot U$$

Ist der Strom  $I$  groß gegen den Sperrstrom  $I_S$ , so ist ein annähernd linearer Verlauf der Kennlinie zu erwarten, wenn die Stromstärke logarithmisch über der Spannung aufgetragen wird.

In der Theorie erwartet man für alle Diode die gleiche Steigung  $m$ .

$$m = \frac{e}{k_B T} \approx 38,7 \frac{1}{\text{V}} \quad \text{bei } T = 300\text{K}$$

Wir erhielten die folgenden Steigungen, die den jeweils angegebenen Temperaturen entsprechen.

Diode	Steigung	entsprechende Temperatur
Ge-Diode	$17,2 \frac{1}{\text{V}}$	676K
Se-Diode	$5,2 \frac{1}{\text{V}}$	2255K
Si-Diode	$16,6 \frac{1}{\text{V}}$	700K

Der qualitative Verlauf der Strom-Spannungskennlinie wird durch die obige Formel zwar beschrieben, wie vor allem die geringen Fehler der Steigung der Regressionsgeraden zeigen (2%-7%). Es ist jedoch auch deutlich zu erkennen, dass die unterschiedlichen Dioden sehr unterschiedliche Steigungen aufweisen. Es scheint materialabhängige oder bauart bedingte Effekte zu geben, die den Kennlinien Verlauf beeinflussen.

### 13 Theoretischer Aufbau einer Si-Diode

Wie eine möglichst hohe bzw. niedrige Sperrkapazität erreicht werden kann, wurde bereits in der Auswertung erklärt.

Um eine möglichst große Durchbruchspannung in Sperrrichtung zu erreichen, muss man die beiden Effekte, die zum Durchbruch führen genauer betrachten. Sowohl die Stoßionisation als auch das Tunneln hängen von der Dotierkonzentration ab. Bei einer hohen Dotierkonzentration nimmt die mittlere freie Weglänge ab, so dass die Stoßionisation nicht von Bedeutung ist. Gleichzeitig wird das Tunneln jedoch wahrscheinlicher, da die Verarmungszone sehr dünn ist, so dass die Elektronen bei einer relativ geringen Sperrspannung hindurch tunneln können. Ist die Dotierkonzentration sehr gering, so spielt das Tunneln zwar fast keine Rolle, dafür ist aber die mittlere freie Weglänge groß. Dies führt wiederum zu einer niedrigen Durchbruchspannung, da die Stoßionisation schon bei niedrigen Spannungen auftritt. Um eine große Durchbruchspannung zu erzielen, muss also eine Dotierkonzentration gewählt, die weder zu groß noch zu niedrig ist.