

Versuchsprotokoll:

pn-Übergang

Christian Buntin, Jingfan Ye

Gruppe 30

Karlsruhe, 14. November 2011

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	2
1.1	Bändermodell	2
1.2	Dotierung	2
1.3	p-n-Übergang	2
1.4	Halbleiterdiode	4
2	Diodenkennlinien	4
3	Kennlinien von Zenerdioden bei verschiedenen Temperaturen	5
4	Zenerdioden als Spannungsstabilisatoren	8
4.1	Einfache Schaltung	8
4.2	Transistorschaltung	10
5	Kapazität eines Se-Gleichrichters	12
6	Abschließende Fragen	14

1 Einleitung

1.1 Bändermodell

Als **Metalle** bezeichnet man generell alle Elemente des Periodensystems, welche sich links bzw. unterhalb der gedachten Linie Bor–Astat befinden. Sie haben alle gemeinsam, dass die Atome durch eine metallischen Bindung zusammengehalten werden, welche zur Eigenschaft hat, dass sich die Valenzelektronen im Metall frei bewegen können (Elektronengas).

Neben Metallen gibt es noch die sogenannten **Halbleiter**, welche Eigenschaften von Leitern und Nichtleitern in sich vereinen. Deren Eigenschaften und Unterschiede gegenüber Metallen lassen sich über das **Bändermodell** beschreiben.

Die Elektronen eines Atoms können nur diskrete Energiewerte annehmen. In einem Kristall mit vielen Atomen wechselwirken diese allerdings, was zur Folge hat, dass für den Kristall ganze Energiebereiche erlaubt sind, die sogenannten *Bänder*. Mehrere dieser Bänder können sowohl überlappen, aber auch durch verbotene Bereiche voneinander getrennt sein. Das höchstgelegene, von Elektronen besetzte Band wird als *Valenzband*, das nächste darüber liegende als *Leitungsband* bezeichnet.

In Metallen überlagern sich Valenz- und Leitungsband, sodass sich die Elektronen des Valenzbandes auch frei im Leitungsband bewegen können, weshalb Metalle sehr gut leiten. In einem Halbleiter dagegen befindet sich zwischen dem Valenz- und dem Leitungsband eine Bandlücke, in dem sich keine Elektronen aufhalten dürfen. In einem Isolator ist diese Bandlücke so groß, dass sich die Elektronen nicht frei bewegen können. In einem Halbleiter dagegen ist sie klein genug, sodass durch thermische Energie oder Photonen Elektronen angeregt werden können und ins Leitungsband übergehen. Unter bestimmten Bedingungen werden Halbleiter somit leitend.

1.2 Dotierung

Um einen Schritt näher zur Diode zu kommen, wird das hochreine Silizium **dotiert**, es wird gezielt mit bestimmten Atomen verunreinigt. Dabei ergeben sich 2 sinnvolle Möglichkeiten:

- a) Es kann mit 5-wertigen Atomen, wie beispielsweise Phosphor, dotiert werden. Dabei nehmen die Phosphoratome die Gitterplätze des Siliziums ein. Da Phosphor zwar 5 Valenzelektronen, aber nur 4 Bindungspartner hat, liegt an dieser Stelle ein Elektron vor, was sich frei im Halbleiter bewegen kann. Da dieser Halbleiter nun freie negative Ladungsträger hat und diese abgeben kann, wird er als *n-Halbleiter* oder auch als **Donator** bezeichnet.
- b) Wenn mit 3-wertigen Atomen wie Aluminium dotiert wird, fehlt zur Bindung des vierten umgebenden Siliziumatoms ein Elektron. Es liegen daher positive Ladungsträger in Form von Löchern vor, die sich frei bewegen können. Dabei werden sie von Elektronen anderer Bindungen gefüllt, sodass die Löcher quasi wandern. Daher bezeichnet man diesen Halbleiter als *p-Halbleiter* oder auch als **Akzeptor**.

Diese Dotierung von Halbleitern erzeugt ein weiteres Leitungsband in der Bandlücke, weshalb Elektronen vom Valenzband nun leichter in das Leitungsband wechseln können.

1.3 p-n-Übergang

Wenn man nun beide Halbleitertypen zusammenbringt, so bildet sich zwischen ihnen eine ladungsträgerfreie Grenzschicht, da die Elektronen des n-Halbleiters dort die Löcher des p-Halbleiters füllen, bis keine Elektronen mehr die Grenzschicht passieren können. Ein solches Bauteil wird **p-n-Übergang** genannt und ist in Abbildung 1 auf der nächsten Seite dargestellt.

Wenn man an diesem nun eine Spannung mit positivem Pol am n-Halbleiter und negativem Pol am p-Halbleiter anlegt, so werden die verbleibenden Ladungsträger aus den Halbleitern gesogen, die Grenzschicht wird breiter und leitet somit nicht. Wenn allerdings eine Spannung mit umgekehrter Polung angeschlossen wird, so liegen im n-Halbleiter immer mehr Elektronen vor, wobei die aus dem p-Halbleiter alle abgesogen werden. Dadurch wird die Grenzschicht immer kleiner, sodass das Bauteil leitend wird. Dieses Bauteil wird auch als **Diode** bezeichnet und leitet Strom nur in eine Richtung.

Wenn an der Diode in Sperrrichtung allerdings die Spannung weiter erhöht wird, so kann das elektrische Feld in der Diode so groß werden, dass es den Elektronen möglich wird, die Sperrschicht zu überwinden. Die Spannung, ab der dies auftritt, wird als **Durchbruchspannung** bezeichnet. Dies ist bei den meisten Dioden nicht gewünscht, da durch die hohe Verlustleistung das Bauteil zerstört werden kann.

Die Elektronen, welche die Grenzschicht überwinden, stoßen mit weiteren Elektronen, die daraufhin auch genügend Energie zum Überwinden der Grenzschicht besitzen. Somit kommt es kettenreaktionsartig zu einer Lawine von Elektronen, die die Grenzschicht überwinden, weshalb man hier von einem **Lawinendurchbruch** spricht.

Neben diesem Phänomen, welches als **Stoßionisation** bezeichnet wird, können Ladungsträger auch durch den quantenmechanischen **Tunneleffekt** in Sperrrichtung fließen. Bei hoch angelegter Sperrspannung verschieben sich die Bänder der beiden Halbleiter so stark, dass die Barriere zur Überwindung dieser Sperrzone immer kleiner wird. Die Ladungsträger fangen an, diese Sperrschicht zu durchtunneln, und die Wahrscheinlichkeit des Tunnelns steigt exponentiell mit der angelegten Sperrspannung an.

Es gibt Dioden, bei denen dieser Effekt ausdrücklich gewollt ist. Bei diesen sogenannten **Zener-Dioden** ist die Grenzschicht aufgrund einer speziellen Dotierung so gering, dass die Diode ab einer gewissen Spannung in Sperrrichtung dennoch leitend wird, ohne zerstört zu werden. Diese Spannung wird dann *Zenerspannung* U_Z genannt.

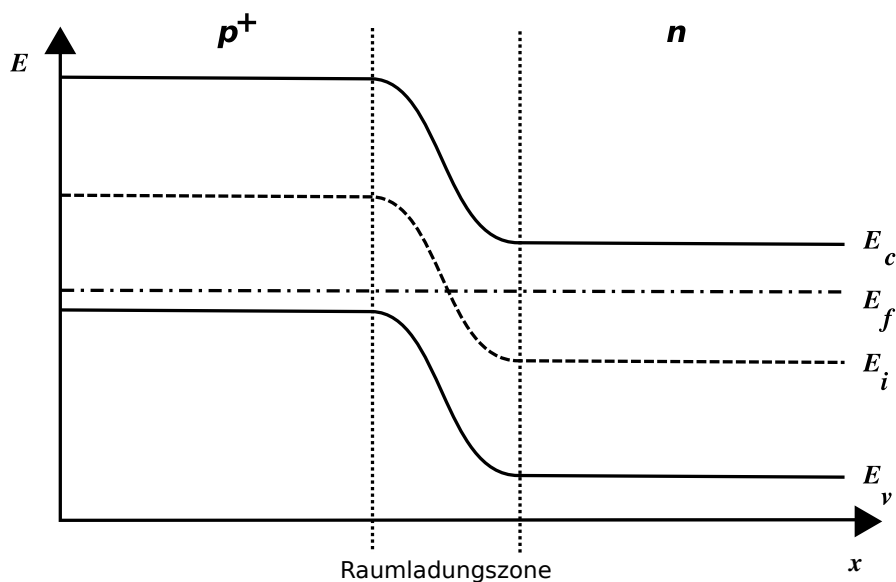


Abbildung 1: Bändermodell eines p-n-Übergangs. E_c entspricht dem Leitungsband, E_f dem Fermi-Niveau, E_i dem intrinsischen Fermi-Niveau des undotierten Halbleiters und E_v dem Valenzband.

(aus http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Pn_junction_equilibrium.svg)

1.4 Halbleiterdiode

Für Halbleiterbauelemente wird in der Regel ein hochreiner Halbleiter wie Silizium benötigt, da Verunreinigungen starke Veränderungen der Leitfähigkeit hervorrufen können. Silizium besitzt 4 Valenzelektronen, welche im hochreinen Kristall alle gebunden sind. Daher liegen keine frei beweglichen Elektronen vor, somit leitet Silizium nicht (bei 0 K).

Allerdings kann es durch noch vorhandene Verunreinigungen zu frei beweglichen Elektronen kommen. Als Verunreinigungen werden aufgebrochene Bindungen mittels thermischer Energie und Bindungsinhomogenitäten an der Oberfläche, wo die Atome nur drei Bindungspartner haben, bezeichnet. Diesen Effekt, dass reine Halbleiter doch noch eine geringe Leitfähigkeit besitzen, nennt man **Eigenleitfähigkeit**.

2 Diodenkennlinien

Die Strom-Spannungskennlinie dreier Dioden, einem Se-Gleichrichter, einer Ge- sowie einer Si-Diode wurde gemessen. Dabei wurde die Diode mit einem Vorwiderstand von $220\ \Omega$ in Reihe an eine Spannungsquelle angeschlossen und die Spannung an der Diode sowie der Strom mit jeweils einem Multimeter für verschiedene angelegte Spannungen punktweise spannungsrichtig gemessen. Für jede Messung wurde die Spannung an der Spannungsquelle um 1 V verändert. Dabei wurde darauf geachtet, dass der Maximalstrom in Durchlassrichtung $I_{\max}^{\text{Durchlass}}$ sowie die Maximalspannung in Sperrrichtung U_{\max}^{Sperr} für die jeweiligen Dioden nicht überschritten wurden.

Die gemessenen Kennlinien sind in Abbildung 2 und mit logarithmischer Darstellung des Durchlassbereichs in Abbildung 3 auf der nächsten Seite dargestellt.

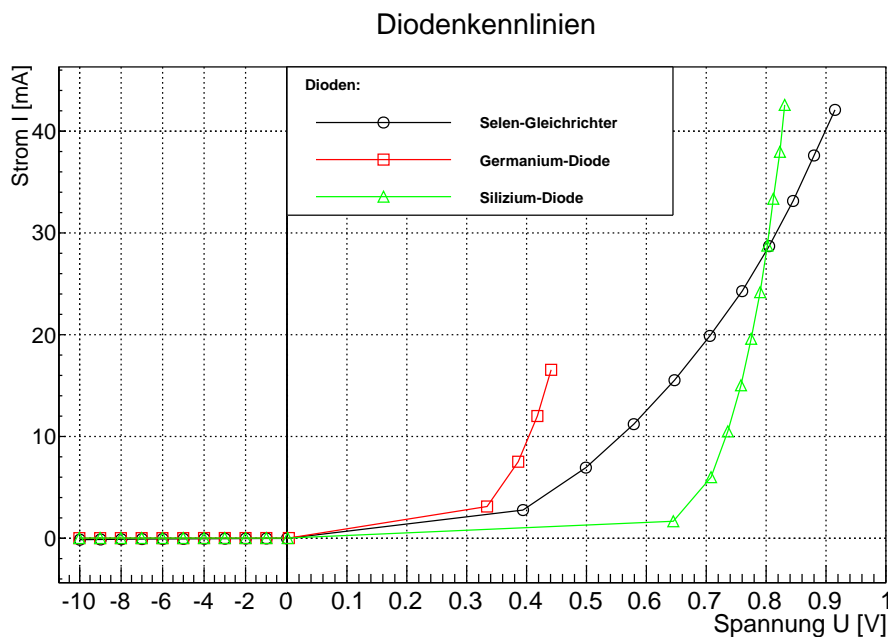


Abbildung 2: Kennlinien verschiedener Dioden, punktweise Messung

Für das Strom-Spannungsverhältnis wurde folgende Abhängigkeit erwartet:

$$I = I_S \left(e^{\frac{eU}{k_B T}} - 1 \right) \quad I = \text{Sättigungsstrom} \quad (2.1)$$

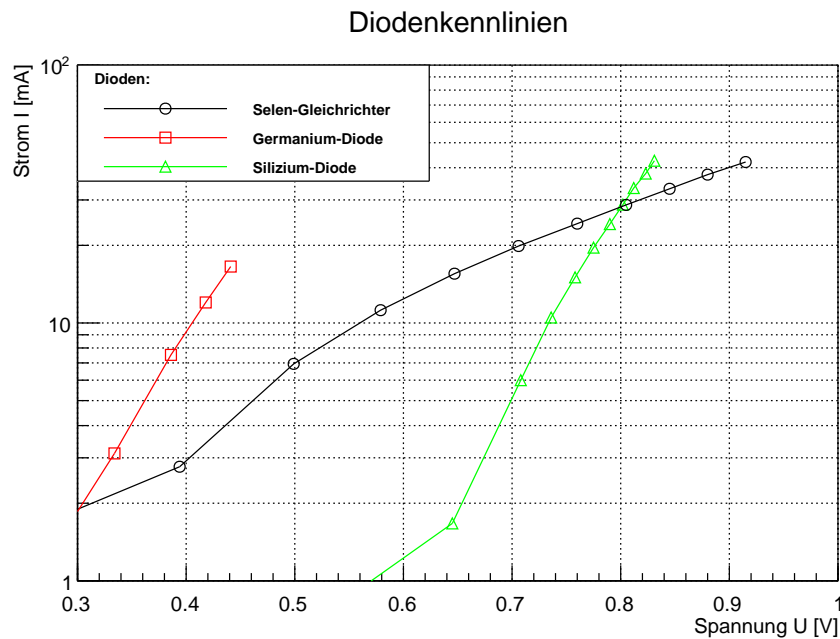


Abbildung 3: Kennlinien verschiedener Dioden, punktweise Messung und logarithmische Skalierung

Dies entspricht in logarithmischer Auftragung einer Geraden. Dies erfüllt der Se-Gleichrichter, wie in Abbildung 3 zu erkennen ist, am wenigsten. Die Kennlinien der Ge- und Si-Dioden haben in der logarithmischen Darstellung dagegen einen annähernd geraden Verlauf, wobei die Si-Diode noch höhere Ströme zulässt als die Ge-Diode.

3 Kennlinien von Zenerdioden bei verschiedenen Temperaturen

Im Gegensatz zu „normalen“ Dioden, die bei zu hoch angelegter Spannung in Sperrichtung und Erreichen des Durchbruchstromes kaputt gehen, können Zenerdioden unter diesen Umständen betrieben werden. In diesem Versuch soll die Kennlinie dreier Zenerdioden (ZD 39, ZD62, ZD82) gemessen werden. Dabei soll vor allem auf das Verhalten des Durchbruchstroms eingegangen werden. Da ihre Ursachen – das Tunneln und die Stoßionisation – stark von der Temperatur abhängen, werden die Kennlinien bei verschiedenen Temperaturen aufgenommen.

Bei der Messung dient zum Schutz der Diode wieder ein Vorwiderstand von 220Ω . Diesmal werden aber die Spannung sowie der Strom durch die Diode von einem vorgefertigten LabView-Programm direkt erfasst und gespeichert. Dieser misst diese Wertepaare in gleichen Spannungsabständen zwischen den zuvor eingetragenen Minimums- und Maximumswerte der angelegten Spannung in 201 Schritten und Zeitabständen von 20 ms. Da zum Schutz der Dioden der Strom 50 mA nicht überschreiten sollte, wurden bei jeder der drei Zenerdioden zuerst für kleine Minimal- und Maximalwerte der angelegten Spannung die Maximalströme gemessen und die Spannung anschließend so erhöht, bis die Stromstärke ihren erlaubten maximalen Wert fast erreicht. Im jeweiligen selben Spannungsintervall wurden dann auch die Messungen bei anderen Temperaturen durchgeführt. Die gemessenen Kennlinien sind in Abbildungen 4 bis 6 zu sehen.

Temperaturabhängigkeit

Um die Temperaturabhängigkeit des Durchbruchverhaltens der Zenerdioden zu ermitteln, wurden die Durchbruchspannungen für den festen Durchbruchstrom von 20 mA bei verschiedenen Tem-

Kennlinien der ZD39-Zenerdiode

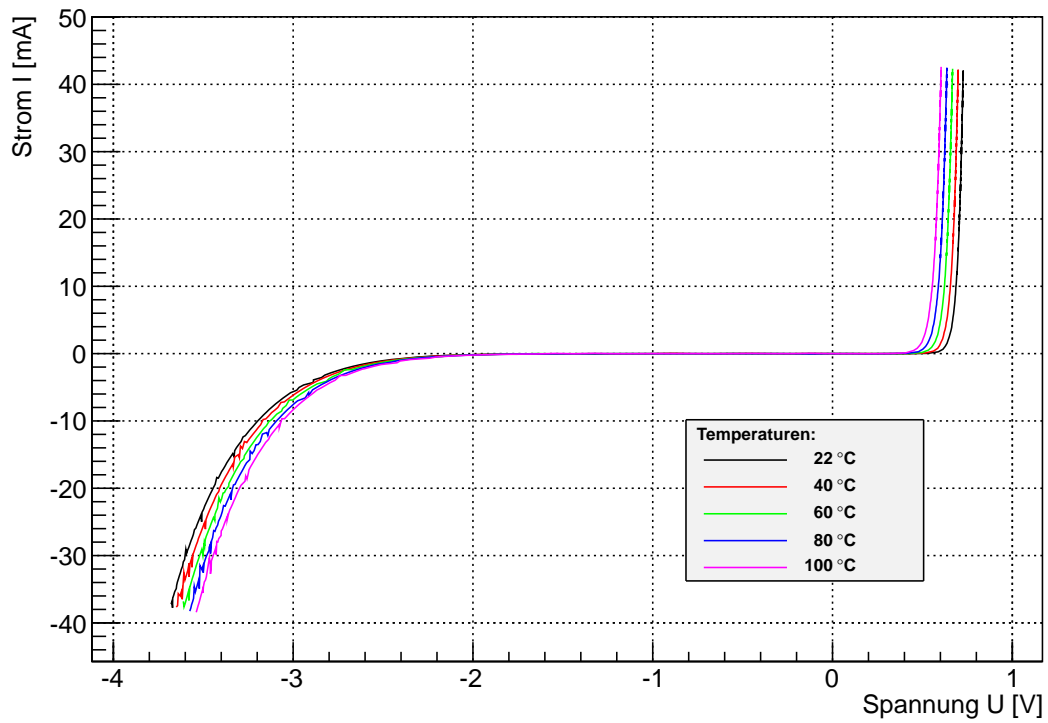


Abbildung 4: Temperaturabhängige Kennlinien der Zenerdiode ZD39

Kennlinien der ZD62-Zenerdiode

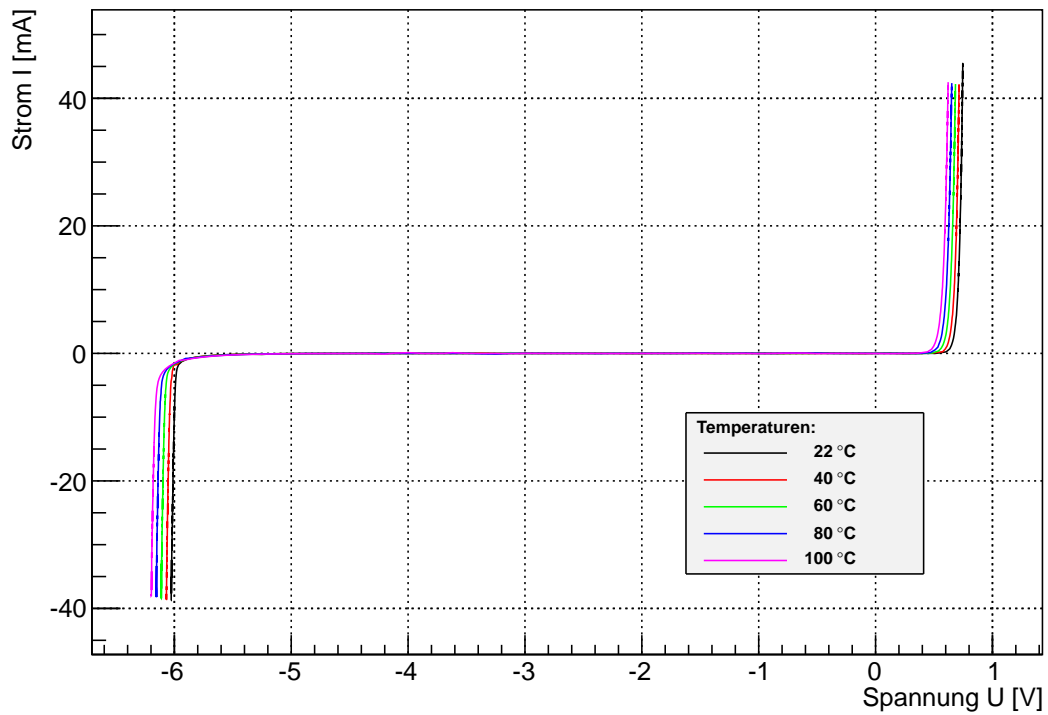


Abbildung 5: Temperaturabhängige Kennlinien der Zenerdiode ZD62

Kennlinien der ZD82-Zenerdiode

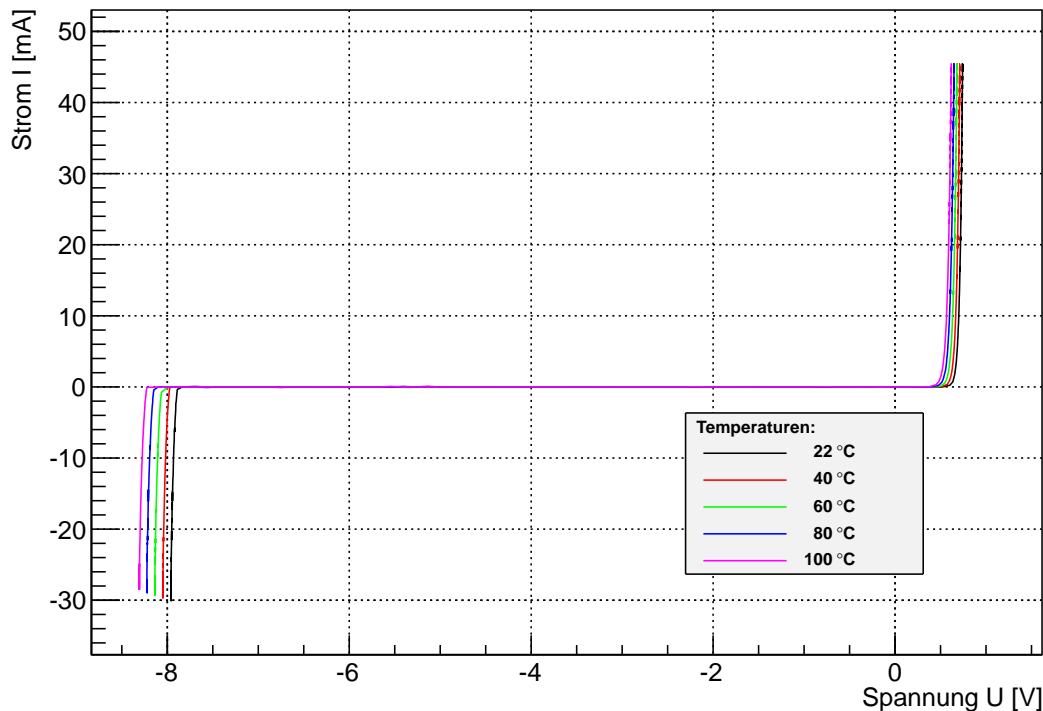


Abbildung 6: Temperaturabhängige Kennlinien der Zenerdiode ZD82

peraturen für die drei Zenerdioden ermittelt und aufgetragen (Abbildung 7 auf der nächsten Seite). Um die exakte Durchbruchsspannung zu bestimmen, wurden die beiden benachbarten Messpunkte ermittelt, deren Ströme knapp unter und knapp über den gewünschten 20 mA liegen. Anschließend wurde eine lineare Regression zwischen diesen Messpunkten ausgeführt und der Wert für die Durchbruchsspannung genommen, dessen Durchbruchstrom nach dieser Regression genau 20 mA entspräche. Eine lineare Regression ist hier gerechtfertigt, da zum einen erwartet wird, dass die Strom-Spannungskennlinie monoton ist, und zum anderen diese Regression in einem sehr kleinen Bereich um die exakten Messwerte erfolgt, da die Messintervalle bei 201 Messpunkten sehr klein sind.

Es gibt bekanntlich zwei Effekte für den Durchbruchstrom, den Tunneleffekt und die Stoßionisation. Das Tunneln der Ladungsträger wird umso wahrscheinlicher, je höher die Temperatur ist, da ihre thermische Energie ansteigt und eine kleinere Energiebarriere überwunden werden muss. Die erforderliche anzulegende Durchbruchsspannung wird also kleiner mit steigender Temperatur. Dagegen stört die höhere Temperatur die Stoßionisation, da sie umso effizienter wird, je größer die mittlere freie Weglänge ist, auf der die Ladungsträger beschleunigt werden können. Die erforderliche Durchbruchsspannung sinkt bei steigender Temperatur.

Wie man in Abbildung 7 auf der nächsten Seite sieht, steigt die Durchbruchsspannung bei konstantem Strom und bei steigender Temperatur für die Diode ZD39, wohingegen die Spannung bei den anderen beiden Dioden ZD62 und ZD82 fällt. Daraus kann man schließen, dass der Hauptbeitrag zum Durchbruchstrom bei der Zenerdiode ZD39 die Stoßionisation ist, da sie bei höheren Temperaturen schlechter leitet. Bei den anderen Dioden ZD62 und ZD82 hingegen überwiegt der Tunnelbeitrag, die Diode leitet besser bei niedrigeren Temperaturen.

Dies äußert sich auch in den Temperaturkoeffizienten: Durch ermitteln der Regressionsgerade erhalten wir mit deren Steigung eben diesen Koeffizienten. Für die Zenerdiode ZD39 erhalten wir hierfür

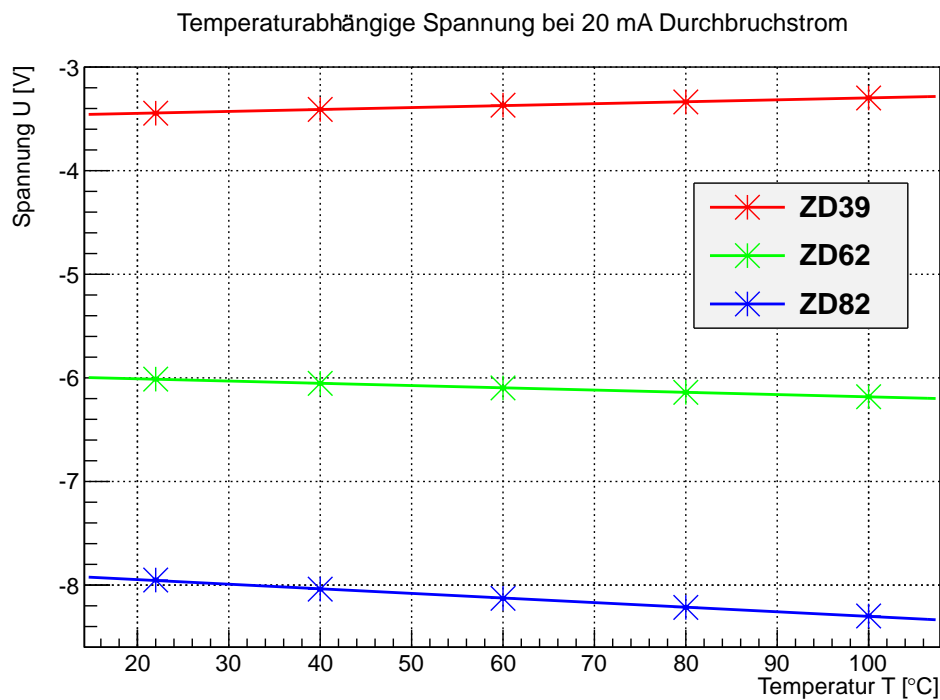


Abbildung 7: Temperaturabhängigkeit der Durchbruchspannung beim Durchbruchstrom von 20 mA bei Zenerdioden

einen Wert von $1,87 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$, für die ZD62-Diode $-2,18 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$ und für die ZD82-Diode $-4,44 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$.

Für die Fehlerbetrachtung nehmen wir an, dass wir die Durchbruchspannung auf 10 mV genau bestimmen konnten. Damit erhalten wir aus der Regression als Fehler für jeden dieser Werte $0,17 \frac{\text{mV}}{\text{K}}$.

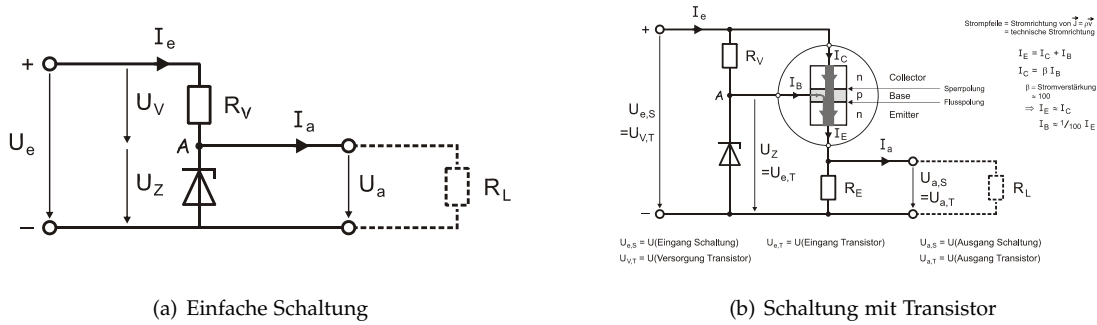
4 Zenerdioden als Spannungsstabilisatoren

Die Zenerdiode eignet sich sehr gut als Spannungsstabilisator, wenn man sie in Sperrrichtung in einen Stromkreis schließt. Wie man an ihrer Kennlinie sehen kann, steigt der Durchbruchstrom nach Erreichen der Durchbruchspannung rasant an. Die Spannung, die an ihr also abfällt, ist also nahezu konstant für einen großen Stromintervall. In diesem Versuch soll die Funktion der Zenerdioden als Spannungsstabilisator anhand von zwei Schaltkreisen getestet werden. Die Schaltpläne beider Schaltungen sind in Abbildung 8 auf der nächsten Seite zu sehen.

4.1 Einfache Schaltung

Die einfache Spannungsstabilisierung mit der Zenerdiode ist in Abbildung 8(a) auf der nächsten Seite aufgezeichnet. Der Vorwiderstand R_V dient nur dem Schutz der Diode. Der Lastwiderstand R_L wird parallel zur Zenerdiode geschaltet, die in Sperrrichtung eingebaut ist.

Solange die Ausgangsspannung U_a unter der Durchbruchspannung der Zenerdiode bleibt, ist ihr Widerstand sehr groß. Fast der gesamte Strom wird durch die Last fließen. Sobald aber die Durchbruchspannung erreicht wird, fällt der Widerstand der Zenerdiode schlagartig. Nun hängt der Stromfluss davon ab, wie groß der Lastwiderstand im Verhältnis zum Diodenwiderstand ist. Dabei teilt sich der Strom auf: Durch die Diode fließt der Großteil des Stromes, wobei der Stromfluss durch sie nahezu unabhängig von der angelegten Spannung ist. Daher fällt bei beliebigem Stromfluss und beliebig



(a) Einfache Schaltung

(b) Schaltung mit Transistor

Abbildung 8: Schaltpläne der zwei Stabilisierungsschaltkreise mit Zenerdioden
(Quelle: Vorbereitungsmappe)

angelegter Eingangsspannung hier immer die Durchbruchspannung ab. Der Rest der Eingangsspannung wird vom Vorwiderstand aufgefangen. Da der Lastwiderstand R_L parallel zur Diode geschaltet ist, fällt an ihr dieselbe Spannung ab. Deswegen bleibt nach Erreichen der Durchbruchspannung an der Ausgangsspannung diese nahezu konstant, solange der Lastwiderstand groß genug ist.

Die Ausgangsspannung wurde in Abhängigkeit der Eingangsspannung und verschiedenen Lastwiderständen mithilfe des vorgefertigten LabView-Programms gemessen. Die Zenerdiode blieb immer dieselbe.

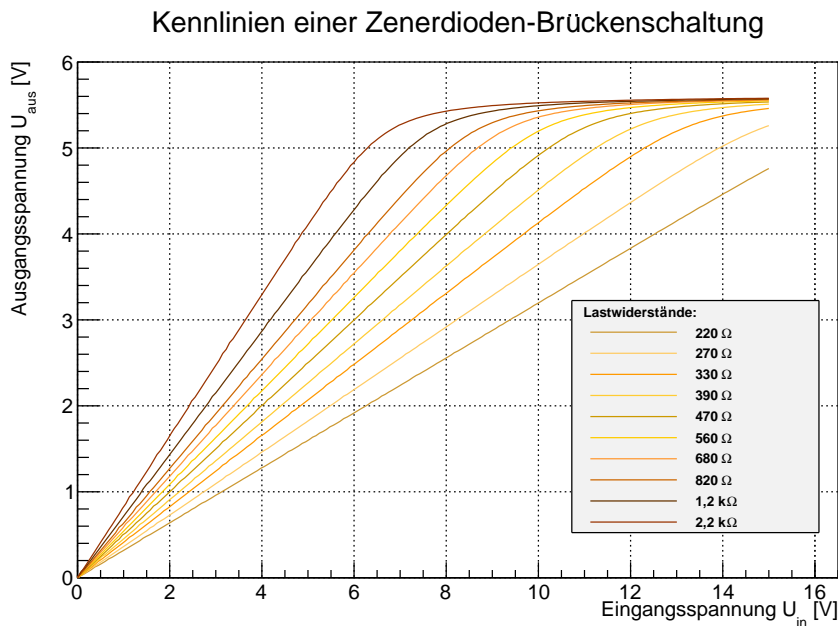


Abbildung 9: Kennlinien einer Zenerdioden-Brückenschaltung

In Abbildung 9 sind die Kennlinien mit verschiedenen Lastwiderständen zu sehen. Diese steigt zu Beginn linear an. Dies liegt daran, dass bei kleinen Spannungen die Zenerdiode wie eine normale Diode in Sperrrichtung wirkt und einen sehr hohen Widerstand aufweist. Damit ist sie vernachlässigbar. Stattdessen fließt der Strom durch die beiden Widerstände R_V und R_L , bei denen eine lineare Kennlinie erwartet wird.

Die Steigungen der Geraden ist verschieden für unterschiedliche Lastwiderstände. Dies rührt daher, dass das Verhältnis der Spannungen, die an den Widerständen R_V und R_L abfällt, dem Verhältnis ihrer Widerstandswerte entspricht. Je höher der Lastwiderstand, desto größer ist der Anteil an der

Eingangsspannung, die an ihm abfällt und hier als auch Ausgangsspannung abgegriffen wird. Deswegen wird mit dem größten Lastwiderstand auch am schnellsten die Sättigung erreicht. Bei dieser Spannung kommt es zum Durchbruch in der Zenerdiode und plötzlich fließt ein Großteil des Stromes durch sie ab. Wie oben beschrieben führt dies zu einer Stabilisierung der Ausgangsspannung. Bei kleineren Widerständen hingegen fällt ein kleinerer Teil der Spannung am Lastwiderstand bzw. Diode ab und folglich muss die Eingangsspannung höher sein, um die Ausgangsspannung auf die Durchbruchspannung der Diode zu erhöhen. Es ist bemerkenswert, wie ähnlich in der Auftragung die jeweils linearen Kurven abflachen und anschließend nahezu konstant bleiben. Diese entsprechen etwa einer gedrehten Kennlinie der Zenerdiode beim Durchbruch.

4.2 Transistorschaltung

Wie man bei den Kennlinien der oberen Schaltung sehen konnte, eignet sie sich nicht gut für die Spannungsstabilisierung bei kleinen Spannungen und gleichen Widerständen. Dafür kann eine verbesserte Schaltung verwendet werden, wie sie in Abbildung 8(b) auf der vorherigen Seite gezeigt ist.

Ein Transistor ist in Kollektorschaltung zusätzlich vor dem Lastwiderstand geschaltet. Der Eingangsstrom führt sowohl zum Vorwiderstand als auch zum Kollektoranschluss des Transistors. Vom Vorwiderstand aus führt eine Verbindung zur Basis des Transistors und über eine in Sperrrichtung geschaltete Zenerdiode zur Masse. Bei Erreichen der Durchbruchspannung fließt der Hauptteil des Stromes vom Vorwiderstand über die Diode. Nur ein kleiner Teil des Stromes fließt zur Basis, wo er durch den Kollektorstrom um das $\beta \approx 100$ -fache vergrößert wird und zur Last fließt. Ändert sich der Lastwiderstand, so beeinflusst er den Basisstrom nur um das $\frac{1}{\beta}$ -fache, wie er ihn ohne Transistor wie in der einfachen Schaltung beeinflussen würde, da der meiste Strom sowieso aus dem Kollektorstrom stammt. Der Strom I_Z und damit die Spannung U_Z an der Zenerdiode ändert sich dadurch kaum. Da diese Spannung direkt mit der Spannung am Lastwiderstand über den konstanten Spannungsabfall am Transistor von $U_{BE} \approx 0,7 \text{ V}$ verbunden ist, bleibt die Spannung am Lastwiderstand daher auch stabil als $U_A = U_Z - U_{BE}$.

Der gleiche Versuch wie oben mit dem einfachen Spannungstabilisator wurde nochmals mit der Transistorschaltung durchgeführt. Die Messdaten sind in Abbildung 10 auf der nächsten Seite aufgetragen.

Dadurch, dass sich alle Kennlinien nahezu überlappen, ist ersichtlich, dass der Lastwiderstand nur einen sehr kleinen Einfluss auf das Spannungsverhalten am Ausgang hat. Ein typisches Merkmal dieser Schaltung ist der kleine flache Bereich bei sehr kleinen Spannungen, wo kein Strom fließt. Dies ist auf die nötige Spannung am Transistor zurückzuführen, damit durch ihn Strom fließen kann. Die Unabhängigkeit vom Lastwiderstand ist darauf zurückzuführen, dass die Spannung vor der Last nur am Transistor abfällt, welcher bis zum Erreichen des Zenerdurchbruchs konstant und unabhängig vom Widerstand ist. Dadurch steigt die Ausgangsspannung in diesem Bereich für alle Lastwiderstände auch konstant an. Bei Erreichen der Durchbruchspannung an der Diode bleibt die Spannung wie oben beschrieben an der Diode konstant. Die gekoppelte Ausgangsspannung erreicht ihre Sättigung und bleibt damit auch konstant.

Im Vergleich in Abbildung 11 auf der nächsten Seite erzielt die zweite Schaltung eindeutig ein besseres Ergebnis. Vergleicht man die Ausgangsspannungen beider Schaltungen bei der Eingangsspannung von 10 V mit verschiedenen Widerständen, so fällt auf, dass die zweite Transistorschaltung eine wesentlich konstantere Ausgangsspannung liefert.

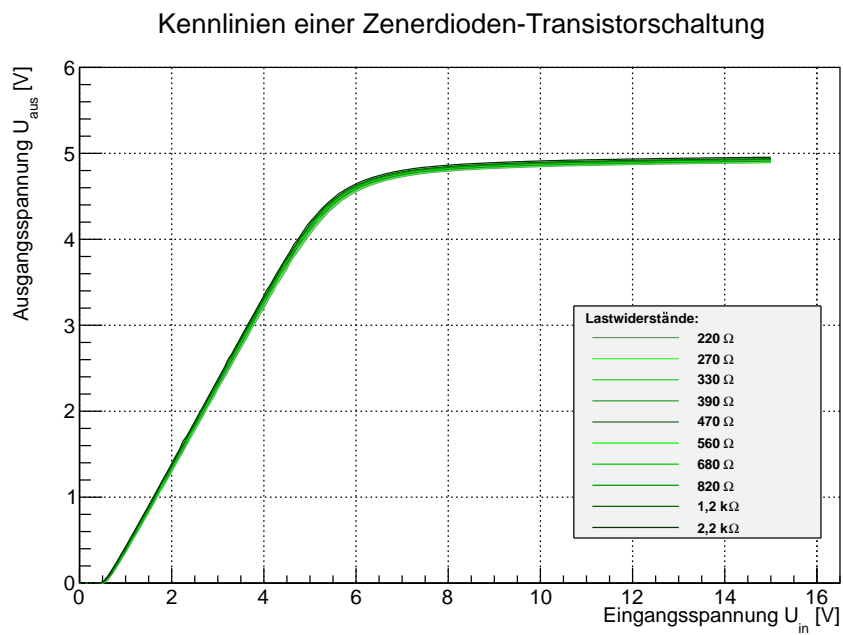


Abbildung 10: Kennlinien einer Zenerdioden-Transistorschaltung

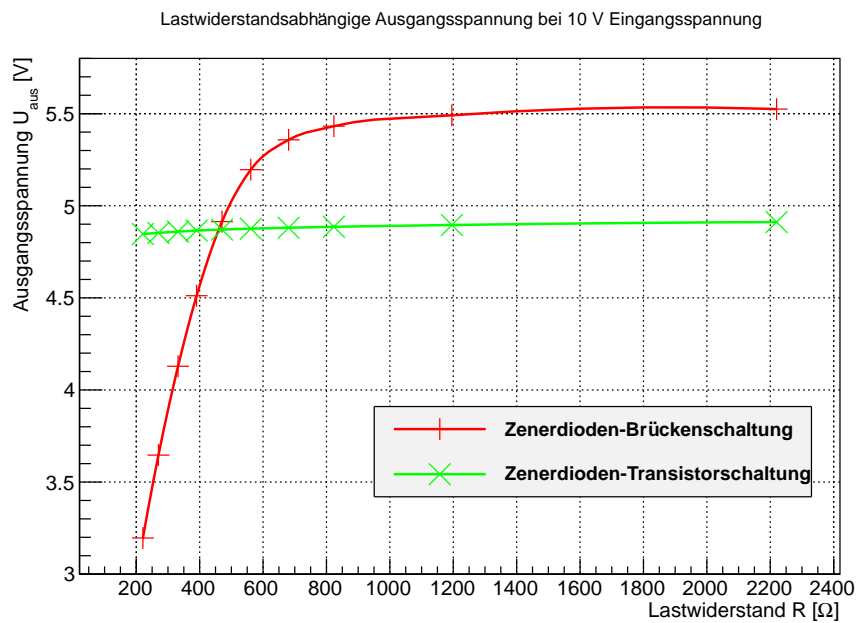


Abbildung 11: Vergleich der Stabilisierungsschaltungen

5 Kapazität eines Se-Gleichrichters

Zur Messung der Sperrschichtkapazität eines Se-Gleichrichters wird eine Brückenschaltung wie in Abbildung 12 auf der nächsten Seite verwendet. An diese wird eine Wechselspannung angelegt. Ein Zweig der Brückenschaltung führt über zwei identische Widerstände, der andere Zweig führt über verstellbare Kapazitäten und Potentiometer sowie über den Se-Gleichrichter. Da die Kapazität bei einer festen Sperrspannung bestimmt werden soll, wird diese, zum Schutz vor zu hohem Stromfluss, über einen hohen Vorwiderstand direkt am Gleichrichter angelegt.

Wenn nun in der Brückenschaltung das Verhältnis der komplexen Widerstände zwischen oberem und unterem Teil jedes Zweiges identisch ist, so ist die Potentialdifferenz zwischen deren Mitten gleich Null. Daher werden die verstellbaren Kapazitäten und Potentiometer solange verändert, bis die Potentialdifferenz zwischen den Mitten der beiden Zweige ein Minimum erreicht. In diesem Fall ist das Verhältnis in beiden Zweigen 1:1 und die eingestellte Kapazität entspricht der gesamten Kapazität des unteren Teils des Zweiges inklusive der Sperrschichtkapazität des Se-Gleichrichters.

Die Größe der Sperrschichtkapazität lässt sich mit Hilfe der Schottky-Näherung berechnen. Diese geht von konstanten Raumladungsdichten ohne Fermi-Aufweichung aus, vernachlässigt den Beitrag von freien Ladungsträgern gegenüber dem Potential und nimmt eine vollständige Ionisierung der Donatoren und Akzeptoren an. Mit dieser Vereinfachung erhält man für die Differenz der Randpotentiale U_{diff} nach der Vorbereitungshilfe mit der Elementarladung e , der Dielektrizitätskonstanten $\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}$, den Dotierkonzentrationen N_A und N_D der Donatoren und Akzeptoren sowie den Dicken d_n und d_p der jeweiligen Schicht einen Zusammenhang von:

$$U_{\text{diff}} = \frac{eN_D}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}d_n^2 + \frac{eN_A}{2\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}d_p^2 \quad (5.1)$$

Bei Annahme eines symmetrischen pn-Übergangs vereinfacht sich diese Gleichung mit $N_D = N_A$ und $d_n = d_p = d$ zu:

$$U_{\text{diff}} = \frac{eN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}d^2 \quad (5.2)$$

Beim Anlegen einer äußeren Spannung U fällt diese noch zusätzlich zur Potentialdifferenz U_{diff} am pn-Übergang ab. Durch Umformen erhält man für den Kehrwert der Schichtdicke d :

$$U_{\text{diff}} - U = \frac{eN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}d^2 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{1}{d} = \sqrt{\frac{eN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{\text{diff}} - U}} \quad (5.3)$$

Mit der bekannten Gleichung $C = \varepsilon_0\varepsilon_r \frac{A}{d}$ für die Kapazität eines Kondensators erhält man diese hier für eine in Sperrrichtung angelegte, also negative, äußere Spannung U_{Sperr} zu

$$C = \varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}} \frac{A}{d} = \varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}} A \sqrt{\frac{eN_D}{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{\text{diff}} - U}} = A \sqrt{\varepsilon_0\varepsilon_{\text{HL}}eN_D} \cdot \frac{1}{\sqrt{U_{\text{diff}} + |U_{\text{Sperr}}|}} \quad (5.4)$$

Damit ist also die Kapazität eines p-n-Überganges durch die Gleichung

$$C = \frac{B}{\sqrt{U_{\text{diff}} + |U_{\text{Sperr}}|}} \quad \text{mit } B = A \cdot \sqrt{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon_{\text{HL}} \cdot e \cdot N_D} \quad (5.5)$$

gegeben.

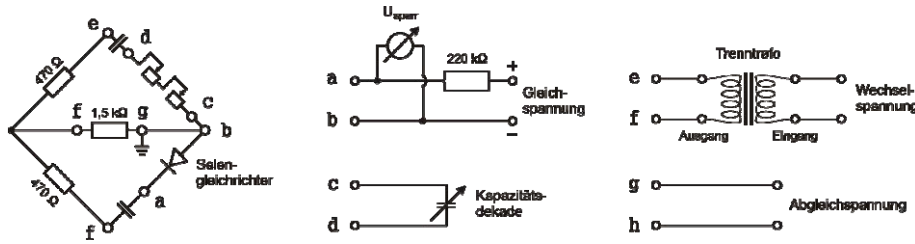


Abbildung 12: Aufbau der Brückenschaltung zur Bestimmung der Kapazität des Se-Gleichrichters
Quelle: Vorbereitungsmappe

Auswertung

Da die Kapazitäten nur auf 0,1 nF eingestellt werden konnten, haben wir dies als Fehler für die gemessene Kapazität angenommen. Für die gemessene Sperrspannung haben wir einen Fehler von 0,01 V angenommen.

Da die gemessene Kapazität C_{Gesamt} aus der Kapazität $C_{Schaltung}$ der Schaltung und der Kapazität C des p-n-Übergangs zusammengesetzt ist, wurde durch Auftragung von C_{Gesamt} gegen $\frac{1}{\sqrt{U_{Sperr}}}$ die Kapazität der Schaltung ermittelt. Diese entspricht dem y-Achsenabschnitt in Abbildung 13, welcher durch lineare Regression zu $C_{Schaltung} = (5,06 \pm 0,18)$ nF bestimmt wurde.

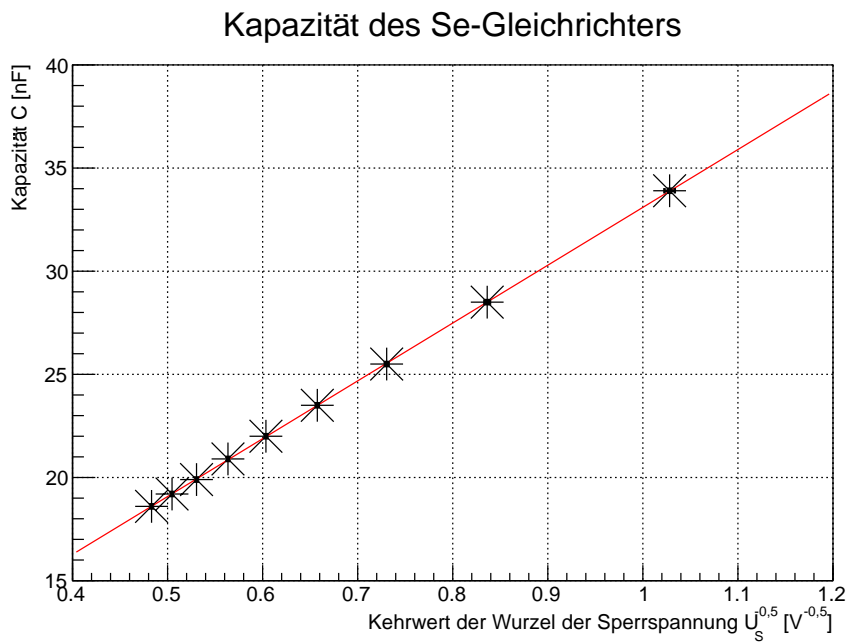


Abbildung 13: Bestimmung der Kapazität der Messschaltung

Die gemessenen Kapazitäten wurden um diese Schaltungskapazität korrigiert und der Fehler entsprechend fortgepflanzt. Zur Bestimmung der weiteren Parameter wurde nun $\frac{1}{C^2}$ über U_{Sperr} in Abbildung 14 auf der nächsten Seite aufgetragen und die Regressionsgerade bestimmt. Mit der Geradengleichung $y = a \cdot x + b$ folgt für diese Regressionsgerade: $a = \frac{1}{B^2} = (1217,57 \pm 7,0) \cdot 10^{-06} \frac{1}{nF^2V}$ und $b = \frac{U_{diff}}{B^2} = (121,6 \pm 9,2) \cdot 10^{-6} \frac{1}{nF^2}$.

Damit ist U_{diff} mit Fehler, aufgrund der Korrelation zwischen a und b durch Größtfehlerabschätzung, durch $U_{diff} = \frac{b}{a} = 99,7 \pm 8,2$ mV gegeben.

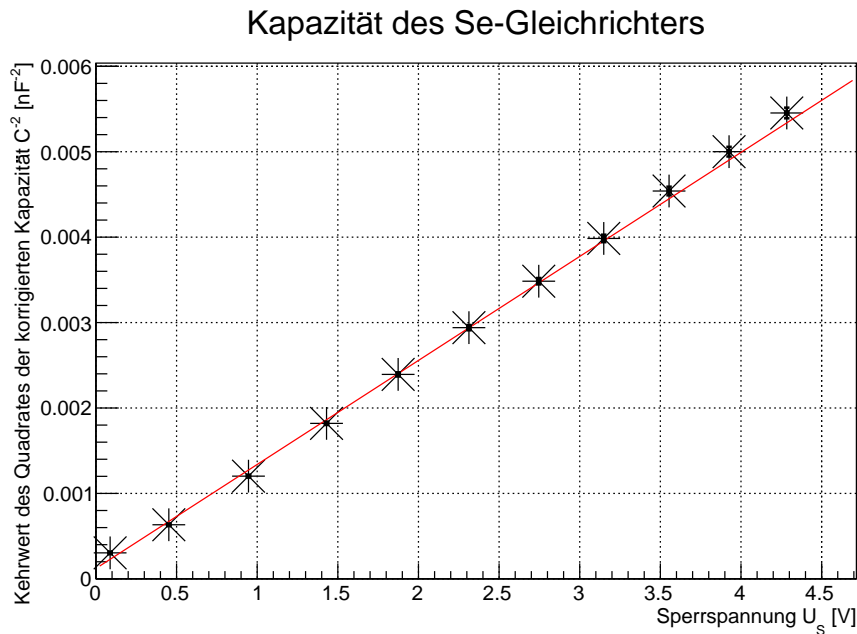


Abbildung 14: Bestimmung der Diffusionsspannung und der Dotierkonzentration

Für die Dotierkonzentration erhält man über Gleichung (5.5) auf Seite 12 mit dem Zusammenhang $B^2 = \frac{1}{a} = A^2 \epsilon_0 \cdot \epsilon_{\text{HL}} e N_D$ einen Wert von $N_D = (4,594 \pm 0,026) \cdot 10^{10} \frac{1}{\text{m}^3}$.

Diese Kapazität der Sperrschicht ist normalerweise störend für eine elektrische Schaltung, da diese die Schaltzeiten nach unten beschränkt. Da diese Kapazität aber von der Dicke der Sperrschicht und damit auch von der Spannung abhängt, wird diese in Form von Kapazitätsdioden als verstellbare Kapazität genutzt, zum Beispiel zur Abstimmung von Schwingkreisen zur Frequenzwahl in Funkempfängern wie Radio oder Fernseher.

6 Abschließende Fragen

Für den Durchbruch in Sperrrichtung in einer Diode sind zwei Effekte verantwortlich. Zum einen kommt das Tunneln zum Tragen, welches mit zunehmender Dotierung und damit kleinerer Raumladungszone immer wahrscheinlicher wird. Das heißt, dass bei niedriger Dotierung und damit kleiner Tunnelwahrscheinlichkeit die Durchbruchspannung durch Tunneln steigt. Zum anderen trägt aber auch die Stoßionisation zum Durchbruchstrom bei, und diese wird umso dominanter, je größer die mittlere freie Weglänge der Ladungsträger ist, da diese dann mehr Energie aufnehmen können. Um eine möglichst große Durchbruchspannung zu erreichen, muss die Energieaufnahme der Ladungsträger unterdrückt werden, ihre mittlere freie Weglänge also verringert werden. Dies lässt sich aber am besten mit einer hohen Dotierungskonzentration erreichen, was jedoch im Widerspruch zur Forderung beim Tunneleffekt stand. Somit muss man zum Erreichen einer möglichst hohen Durchbruchspannung einen Mittelweg wählen, bei der sich keine der beiden Effekte frühzeitig entfalten.

Zum Erreichen einer hohen Sperrschichtkapazität sollte wie beim Plattenkondensator eine hohe Querschnittsfläche erzeugt werden. Hinzu kann man die Dotierung sehr hoch wählen, um die Dicke der Sperrschicht zu minimieren und ebenso die Anzahl der getrennten Ladungsträger zu erhöhen. Eine niedrige Sperrschichtkapazität erzielt man mit genau den umgekehrten Maßnahmen wie eben beschrieben.