



SS/WS 2010.../.....

Praktikum: (P1/P2) (~~Mo/Di/Mi/Do~~) Gruppe-Nr: 12...

Name: Abichs..... Vorname: Tobias.....

Name: Hogg..... Vorname: Philipp.....

Versuch: Widerstandskennlinien..... (mit/ohne) Fehlerrechnung

Betreuer: Heindl, Stefan..... Durchgeführt am: 27.05.10.....

Abgabe am: 08.06.2010.....

Rückgabe am:	Begründung:
--------------------	-------------------

2. Abgabe am:

Ergebnis: <u>(+)</u> / 0 / -)	Fehlerrechnung: ja / <u>nein</u>
Datum: <u>17.06.10</u>	Handzeichen: <u>C.B.</u>
Bemerkungen: <u>- sehr gutes Protokoll</u> <u>- kleine Verbesserungen möglich</u> <u>- Messprotokoll ordentlicher</u>	



Der elektrische Widerstand (die Eigenschaft, engl.: *resistance*, das Bauteil, *resistor*) hängt von vielen physikalischen Größen ab. Je nach der speziell „gezüchteten“ hauptsächlich Abhängigkeit trägt er dann einen besonderen Namen: NTC- bzw. PTC-Widerstand (Temperaturabhängigkeit, negative/positive temperature coefficient), VDR-Widerstand (Spannungsabhängigkeit, voltage dependent resistance, Varistor), LDR-Widerstand (Lichtempfindlichkeit, light dependent resistance, Photowiderstand), SDR-Widerstand (Zugabhängigkeit, strain dependent resistance, Dehnungsmessstreifen), Feldplatte (Magnetfeldabhängigkeit). Auch die Bauform eines Widerstandes ist wichtig, denn sie beeinflusst die unvermeidlichen Größen, Induktivität und Kapazität, und damit das Verhalten bei Wechselstrom mit signifikanten Effekten bei hohen Frequenzen.

Bei diesem Versuch geht es hauptsächlich um die Temperaturabhängigkeit, $R = U/I$ als Funktion von T , und um die Spannungsabhängigkeit, $R = U/I$ und $r = dU/dI$ (differentieller Widerstand) als Funktion von U . Im Vordergrund stehen dabei die Phänomene und die Messmethoden. Erklärungen für die Effekte müssen sich auf einfache Modellvorstellungen beschränken. Der Versuch sollte aber auch Anlass sein, sich über technische Anwendungsmöglichkeiten Gedanken zu machen.

Aufgaben:

1. Messen Sie mit Hilfe der Wheatstoneschen Brückenschaltung des Experimentiergeräts die $R(T)$ -Abhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes im Bereich von Zimmertemperatur bis 200° Celsius.

Achtung: Höhere Temperatur zerstört den Halbleiterwiderstand! Überzeugen Sie sich davon, dass wegen der Erwärmung des Halbleiterwiderstandes durch den Messstrom dieser jeweils nur kurzzeitig eingeschaltet (Taster am Gerät) und nicht größer als nötig gewählt werden darf (Empfindlichkeitsregler am Gerät). Als Brückeninstrument dient das Verstärker-Multimeter im empfindlichsten Bereich. Bestimmen Sie aus einer geeigneten Auftragung der Ergebnisse die Koeffizienten a und b von $R = a \cdot e^{b/T}$. Überlegen Sie sich, wie man Heißeiter (NTC-Widerstände) zur Temperaturmessung, zur Füllstandsanzeige und zur Strombegrenzung verwenden kann.

2.1 Messen Sie oszillographisch die $I(U)$ -Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstandes bei Zimmertemperatur. Benutzen Sie dazu die Halbwellenschaltung des Experimentiergeräts. Der maximal erreichbare Strom von 50mA ist zulässig. Stellen Sie fest, ob die Erwärmung des Widerstandes durch den Messstrom einen beobachtbaren Effekt bewirkt. Das Oszillographenbild soll für das Protokoll auf die im Versuchsraum ausliegenden Formblätter übertragen werden. Kontrollieren Sie und justieren Sie nötigenfalls die Eichung der Oszillographenempfindlichkeit in beiden Richtungen mit Hilfe von möglichst genau zu messenden Wechselspannungen aus dem Experimentiergerät.

2.2 Vergleichen Sie den mit dem Ohmmeter zu messenden Kaltwiderstand einer üblichen 60W-Glühbirne (Wolfram-Glühwendel) mit dem aus ihren Nenndaten zu ermittelnden Betriebswiderstand..

Achtung: Aus Sicherheitsgründen darf die Glühbirne mit ihren Messleitungen nicht an Netzspannung angeschlossen werden.

Frage: Warum schadet der stark überhöhte Einschaltstrom einer Glühbirne nicht?

2.3 Vergleichen Sie den mit dem Ohmmeter zu messenden Kaltwiderstand einer 50 W-Kohlefadenlampe mit dem aus ihren Nenndaten zu ermittelnden Betriebswiderstand. *Achtung: Aus Sicherheitsgründen darf die Kohlefadenlampe mit ihren Messleitungen nicht an Netzspannung angeschlossen werden. Eine weitere gleiche Kohlefadenlampe mit Fassung und Netzanschlusskabel ist für die Beobachtung im Betriebszustand vorhanden.*

Frage: Warum sind Kohlefadenlampen bei gleicher elektrischer Leistung dunkler als Glühlampen mit Wolframwendel?

3. Messen Sie bei Zimmertemperatur oszillographisch die $I(U)$ -Abhängigkeit (Kennlinien)

3.1 einer Siliziumdiode (SID) in Durchlass- und in Sperrrichtung.

3.2 einer Zenerdiode (ZED) in Durchlass- und in Sperr(=Zener)richtung.

3.3 einer Germaniumdiode (GED) in Durchlass- und in Sperrrichtung.

3.4 eines Varistors (VDR) in beiden Richtungen.

Benutzen Sie dazu die Halbwellenschaltung des Experimentiergeräts. Die zulässigen Grenzwerte der Elemente können damit in keinem Fall überschritten werden. Überlegen Sie sich, warum Halbwellen und nicht symmetrische Wechselspannungen benutzt werden. Blasen Sie die Bauelemente mit warmer Luft an und beobachten Sie qualitativ den Einfluß der Temperatur. Überlegen Sie sich,

- wie der Arbeitswiderstand (Lastwiderstand) einer Diodengleichrichterschaltung gewählt werden muß,
- wie eine Spannungsstabilisierung mit Zenerdiode zu schalten und zu dimensionieren wäre,
- wie ein Varistor als Schutz gegen induzierte Spannungen an geschalteten Induktivitäten zu verwenden ist.

4. Wiederholen Sie die Messung der I(U)-Abhängigkeit des Varistors, jetzt aber durch punktweises Strom- und Spannungsmessen.

Benutzen Sie die dafür vorgesehene Schaltung des Experimentiergeräts. Überlegen Sie sich den Einfluß der endlichen Instrumenteninnenwiderstände und verwenden Sie die Instrumente zweckmäßig. Bestimmen Sie aus einer geeigneten Auftragung die Koeffizienten b und c von $U = c \cdot I^b$. Diskutieren Sie die Vor- und Nachteile der Meßverfahren bei den Aufgaben 3.4 und 4.

5.1 Messen Sie die I(U)-Abhängigkeit einer Tunnel diode nur in Vorwärtsrichtung durch punktweise Strom- und Spannungsmessungen. Verwenden Sie unbedingt die speziell dafür am Experimentiergerät vorgesehene Spannungsteiler-Schaltung. Der Strom soll $200\mu\text{A}$ (das sind nur $0,2\text{ mA}$!) nicht übersteigen. Grobe Daten der Tunnel diode (TUD) sind: Höckerspannung $0,05\text{V}$, Höckerstrom $100\mu\text{A}$, Talspannung $0,3\text{V}$, Talstrom $10\mu\text{A}$. Benutzen Sie zur Strommessung den $300\mu\text{A}$ -Bereich (Innenwiderstand etwa 600Ω) des Multizet-Instruments. Tragen Sie über der Spannung U den Strom I , den Widerstand R und den differentiellen Widerstand dU/dI auf.

5.2 Beobachten Sie das dann deutlich auftretende eigenartige Sprungverhalten des Stromes, wenn Sie das Strommessinstrument vom $300\mu\text{A}$ - auf den $100\mu\text{A}$ -Bereich (Innenwiderstand etwa 1700Ω) umschalten und noch einmal die Spannung von Null an steigern. Zeichnen Sie zur Deutung Arbeitsgeraden, das heißt $I = (U_0 - U) / R$, für beide R -Fälle (beide Strommessbereiche) und für verschiedene Betriebsspannungen in das $I(U)$ -Diagramm ein, und achten Sie auf die Schnittpunkte mit der Tunnel diodenkennlinie. Jetzt verstehen Sie auch, warum der Spannungsteiler recht niederohmig und die beim Versuch benutzte Tunnel diode recht hochohmig gewählt wurden.

5.3 Fügen Sie in den Schaltkreis mit der Diode eine Spule so ein, dass beim 'Springen' Spannungsüberhöhung erfolgen wird. Beobachten Sie die Spannung an der Tunnel diode oszillographisch ohne sonstige angeschlossene Messinstrumente, während Sie die Spannung U_0 am Spannungsteiler erhöhen. Versuchen Sie das Zustandekommen der oberhalb der Höckerspannung beobachteten Schwingungen zu erklären.

Achtung: Die vorgesehene Tunnel diode (RCA BD3) ist teuer, kaum noch zu beschaffen und nur noch in wenigen Exemplaren vorhanden. **Deshalb bitte mit großer Vorsicht verwenden.**

Stichworte:

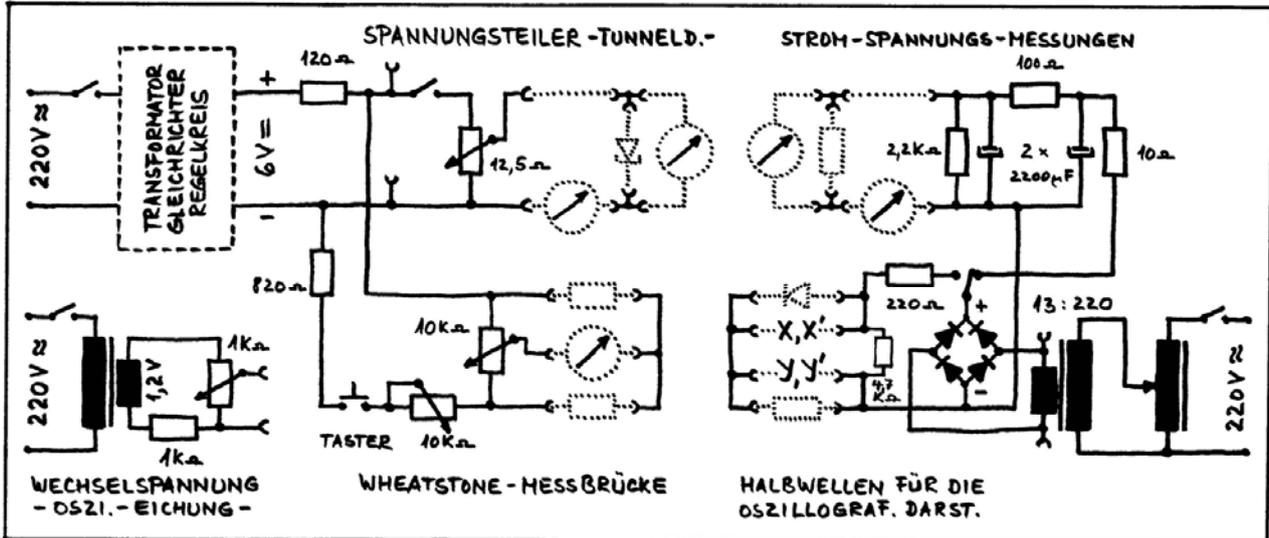
Metalle, Halbleiter, Bändermodell, Eigenleitung, Dotierung, Donator, Akzeptor, p-n-Übergang, Diode, Durchbruchspannung, Lawinendurchbruch, Zenerdiode, Tunneleffekt, Tunnel diode.

Zubehör:

Experimentiergerät mit allen benötigten Hilfsschaltungen,
Mikroampere-Multizet (Vielfachmeßinstrument ohne Verstärker, nur Gleichstrom und -spannung, $50\text{k}\Omega / \text{V}$),
Verstärker-Multimeter ($\text{V} / \text{A} / \Omega$, Eingangswiderstand $10\text{M}\Omega$ in allen Spannungsmessbereichen),
Zweikanal-Oszilloskop (umschaltbar auf X/Y-Betrieb oder Betrieb mit Zeitbasis),
Eisen-Konstantan-Thermoelement und Messgerät Metratherm dazu,
Halbleiterwiderstand ($R_{20\text{C}} \approx 200\Omega$) in Ofeneinsatz und zugehöriger elektrisch beheizter Rohrofen,
Regeltrafo dazu (mit Spannungsbegrenzungsanschlag),
Warmluftgebläse,
 220V - 60W -Glühbirne (Wolfram) und 220V - 50W -Kohlefadenlampe mit festen Meßleitungen,
 220V - 50W -Kohlefadenlampe mit Fassung und Fuß sowie Netzanschlußkabel,
Bauelemente als Steckeinheiten:

Widerstände 10, 50, 100, 560, 1000, 5100 Ω , je 1% Toleranz,
 Induktivitäten 50 und 330 μ H, je 2% Toleranz,
 Siliziumdiode SID, Germaniumdiode GED, Zenerdiode (Z-Diode 5,6V) ZED, Tunneldiode TUD, Varistor
 VDR, Edelmetallwiderstand PT, Kaltleiter PTC, Heißleiter NTC, Lumineszenzdiode LED, Photodiode LSD

Schaltskizze des Experimentiergeräts:



Literatur:

Gerthsen: *Physik*
 Bergmann, Schäfer: *Experimentalphysik*, Bd.2
 Frank, Snejdar: *Halbleiterbauelemente*, Bd.2
 Pohl: *Elektrizitätslehre*
 Texas Instruments: *TTL-Kochbuch*
 Böger, Kähler, Weigt: *Bauelemente der Elektronik und ihre Grundsaltungen*
 Puetz: *Einführung in die Elektronik*
 RCA-Broschüre: *Tunneldioden*
 Unger, Schultz: *Elektronische Bauelemente und Netzwerke*, Bd.1
 Teichmann: *Halbleiter*
 Kittel: *Einführung in die Festkörperphysik*
 Feynman: *Lectures on Physics*, Bd.3
 Müller: *Grundlagen der Halbleiterelektronik*
 Tietze, Schenk: *Halbleiterschaltungstechnik*

Praktikumsvorbereitung:

Widerstandskennlinien

- Versuche P2-51, 52 -

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung in die Versuchsgrundlagen	2
Vorwort.....	2
Der passive Widerstand	2
Leiter, Halbleiter und Nichtleiter	3
Das Bändermodell	4
Die Dotierung von Halbleitern.....	5
2. Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands	6
Einleitung: Wheatstone'sche Brückenschaltung	6
Messung der Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands	6
3. Widerstände von Edelmetallen und Glühwendeln	7
Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands	7
Kalt- und Betriebswiderstand einer 60W-Wolfram-Glühbirne	7
Kalt- und Betriebswiderstand einer 50W-Kohlefadenlampe	8
4. Widerstände unterschiedlicher Halbleiter	8
Einleitung: Die Halbleiterdiode	8
Einleitung: Die Zenerdiode	9
Einleitung: Der Varistor	10
Messung der I(U)-Abhängigkeit unterschiedlicher Halbleiter.....	11
Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Varistors	12
5. Die Tunneldiode.....	12
Einleitung: Die Tunneldiode.....	12
Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit einer Tunneldiode.....	13
Sprungverhalten des Diodenstroms	13
Anwendungsbeispiel: Hochfrequenzoszillator.....	13



1 Einleitung in die Versuchsgrundlagen

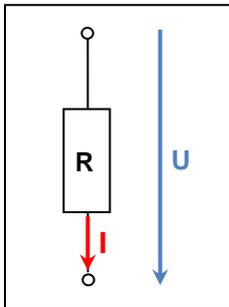
1.1 Vorwort

Die heutigen Versuche sollen vorrangig als eine Einführung in die Vielzahl unterschiedlicher Widerstandstypen, deren Abhängigkeit in Bezug auf Größen wie Arbeitstemperatur oder der angelegten Spannung sowie den technischen Anwendungsmöglichkeiten dieser elektrischen Bauelementen verstanden werden.

Eine zentrale Rolle wird dabei vor allem durch das Aufzeigen der unterschiedlichen messtechnischen Verfahren zur Bestimmung der jeweiligen Widerstandskennlinien eingenommen. Zunächst wollen wir aber auch an dieser Stelle wieder mit einigen ausführlichen Begriffserklärungen beginnen, die für das Thema Widerstandskennlinien von außerordentlicher Bedeutung sein werden.

1.2 Der passive Widerstand

Der passive Widerstand ist ein nicht verstärkendes elektrisches Bauelement (bzw. dessen Kenngröße), das seine Hauptanwendung in elektrischen Schaltungen zur Einstellung der elektrischen Spannung U bei gegebenem elektrischem Strom I oder umgekehrt, sowie zur Umwandlung von elektrischer Energie in Wärme findet. Ergibt sich zwischen der angelegten Spannung U und dem fließenden Strom I ein linearer Zusammenhang, so spricht man von einem linearen Widerstand.



Die mathematische Beschreibung folgt hier aus dem Ohm'schen Gesetz:

$$R = \frac{U}{I} = \text{const.}$$

Formel 1.2.1

Dieses Gesetz wird durch die uns schon bekannten ohm'schen Widerstände in Form von Festkörper- oder Drahtwiderständen näherungsweise gut erfüllt.

Für einen durchflossenen geraden Leiter der Länge L und dem Querschnitt A gilt weiter:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A}$$

Formel 1.2.2

Mit dem vor allem material- und temperaturabhängigen spezifischen Widerstand ρ . Im Laufe der folgenden Versuche wollen wir den oben eingeführten Widerstandsbegriff auch auf nicht lineare Widerstände übertragen. Da der Widerstand grundlegend über die Steigung der Kurve im Spannungs-Strom-Diagramm definiert wird, geht der spannungs- und stromunabhängige lineare Widerstand für "krumme" Kurven über in einen differentiellen Widerstand r , der dementsprechend abhängig vom jeweiligen Strom-Spannungswert ist.

Mathematisch drücken wir diesen Zusammenhang durch das folgende Differential aus:

$$r(U, I) = \frac{dU}{dI} \neq \text{const.}$$

Formel 1.2.3

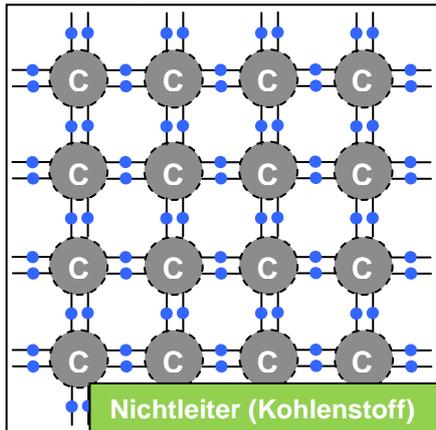
Solch ein nichtlineares Widerstandsverhalten zeigen zum Beispiel die Halbleiterdioden oder auch die spannungsabhängigen Widerstände (VDR) auf.

Neben der Strom- und Spannungsabhängigkeit kann der Widerstandswert bei gewissen Widerstandstypen aber auch durch andere Größen wie der Temperatur (NTC, PTC), dem Lichteinfall (LDR), dem äußeren Magnetfeld (Feldplatte) aber auch zum Beispiel von der an einem Material anliegenden mechanischen Spannung (SDR) beeinflusst werden. Auf einen Teil dieser Widerstands- und Halbleitertypen und besonders auf deren Widerstandsverhalten unter äußeren Einflüssen werden wir im Laufe dieses Versuches noch gesondert eingehen.

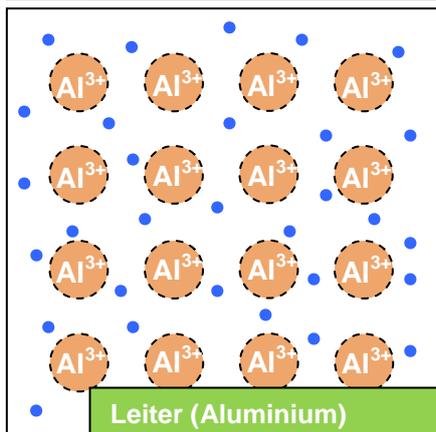
1.3 Leiter, Halbleiter und Nichtleiter

Entscheidend für das elektrische Verhalten eines Materials ist vorrangig die Frage, ob wir das Material der Klasse der Leiter, der Halbleiter oder der Nichtleiter zuordnen können. An dieser Stelle wollen wir zunächst eine kurze Begriffserklärung der drei Begriffe anfügen. Eine genauere Beschreibung wird uns anschließend die Betrachtung im sogenannten Bändermodell liefern.

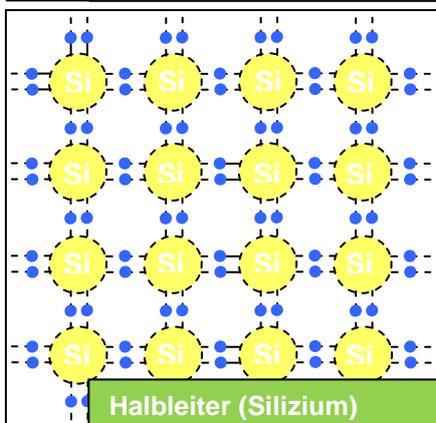
Die Klasse der Nichtleiter, oder auch Isolatoren genannt, zeichnet sich durch ihre fast vernachlässigbare elektrische Leitfähigkeit aus, die vor allem durch den chemischen Aufbau,



d.h. durch den festen Verbund zwischen Atomrumpf und den Valenzelektronen erklärt werden kann (Ionenbindung, kovalente Bindung). Als Resultat hieraus ergibt sich demzufolge eine nur geringe Dichte an freien Ladungsträgern und somit keine Möglichkeit größere Mengen an Strom zu transportieren. Oftmals kommt es erst bei großen Temperaturen oder großen Feldstärken zu einer nennenswerten Leitfähigkeit. Beispiele für Isolatoren sind beispielsweise Keramiken, Gläser oder Kohlenstoff mit seinen jeweiligen Konfigurationen (ohne Graphit).



Ganz anders verhält sich hingegen die Stoffklasse der Leiter, der vor allem die Metalle in besonderem Maße angehören. Im Gegensatz zu den Isolatoren gehen hier die Valenzelektronen keine direkte feste Bindung mit ihrem dazugehörigen Atomrumpf ein, sondern verteilen sich auf eine größere Anzahl von Nachbaratomen (metallische Bindung). Modellhaft stellt man sich einen Leiter deshalb aus den in einem Elektronengas befindlichen Atomrümpfen vor. Innerhalb dieses Elektronengases sind die Elektronen frei und insbesondere leicht beweglich, was wiederum eine besonders hohe elektrische, aber auch thermische Leitfähigkeit zur Folge hat.



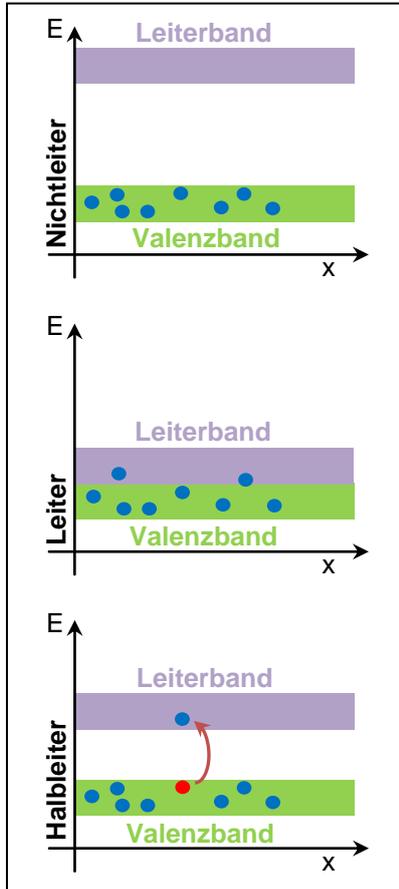
Eine besondere Art der Leitung, auf die an dieser Stelle aber nicht näher eingegangen wird, kann zudem bei gewissen Materialien (auch Keramiken!) unter extrem geringen Temperaturen nahe dem absoluten Temperaturnullpunkt auftreten, die sogenannte Supraleitung.

Die kleine Gruppe der Halbleiter hingegen zeichnet sich dadurch aus, dass sie weder gute Leiter wie die Metalle, noch gute Isolatoren wie die Polymere sind. Ihre Eigenschaften lassen sich nicht nur aufgrund der chemischen Bindung und Zusammensetzung verstehen, sondern werden ganz entscheidend von gezielt eingebrachten Punktdefekten (Dotierung) bestimmt.

Im Allgemeinen unterscheidet man zwischen zwei wichtigen Klassen der Halbleiter. Die Grenze zwischen den Metallen und Nichtmetallen bildet die 4. Hauptgruppe. Die Elemente Silizium, Germanium und Zinn bilden die so genannten Elementhalbleiter. Sie sind die wichtigsten und meist verbreiteten Halbleiter und werden vorrangig in der Mikroelektrotechnik eingesetzt. Die Kombination zwischen jeweils einem zur vierten Hauptgruppe rechts und links benachbartem Element bezeichnet man als Verbindungshalbleiter. Als wichtigste Vertreter der Verbindungshalbleiter seien das Galliumarsenid und Indiumphosphid genannt.

1.4 Das Bändermodell

Im vorausgegangenen Kapitel haben wir hauptsächlich versucht die drei Leiterklassen durch ihre jeweiligen Bindungstypen zu charakterisieren. Dies mag zur Beschreibung vieler auftretender Phänomene sicherlich ausreichend sein, kann aber unter Umständen für den Betrachter nicht vollständig zufriedenstellend erscheinen. In diesen Fällen behilft man sich dann mit einem Modell aus der Quantenmechanik, dem Bändermodell. Laut den Gesetzen der Quantenmechanik kann sich ein Elektron immer nur auf ganz gewissen Energieniveaus befinden, welche jedoch bei Festkörpern im Kristallverbund aufgrund der Wechselwirkung der Atome so dicht beieinander liegen, dass die einzelnen Energiestufen im Energie-über-Ort-Diagramm zu ausgedehnten Bändern zusammengefasst werden können. Für die Erklärung elektrischer Eigenschaften von Festkörpern ist es ausreichend das Valenzband und das Leiterband, zu betrachten. Innerhalb des Valenzbandes sind die Elektronen in einem festen Verbund mit dem Atomrumpf, im Leiterband sind sie hingegen mehr oder weniger frei beweglich.



Betrachten wir nun wieder den Fall des Nichtleiters, so können wir direkt ausmachen, dass sich hier im Leiterband keine Elektronen aufhalten. Der Abstand zwischen Valenzband und Leiterband ist so groß, dass ein Übergang durch zum Beispiel thermische Aktivität im Material (Stoßprozess) nur mit einem großen Energieaufwand von in der Regel über 3eV möglich ist. Der spezifische Widerstand ist dementsprechend besonders groß.

Bei einem Leiter hingegen überlappen sich die beiden Bänder wodurch ein Überwechseln des Elektrons vom Valenzband in das Leiterband für beliebig kleine Energiezufuhren, beispielsweise in Form eines elektrischen Feldes, möglich ist. Der Leiter weist somit wie schon erwähnt einen entsprechend geringeren spezifischen Widerstand auf und führt damit zu einem großen Stromfluss. Anders als beim Isolator führt eine Temperaturerhöhung hier im Allgemeinen zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit, da die zunehmende Streuung der Elektronen zu einer Abnahme der mittleren Elektronengeschwindigkeit, die wiederum proportional zur Stromdichte j ist, führt.

Bei einem Halbleiter hingegen überlappen sich die beiden Bänder nur teilweise, so dass ein Übergang durch zum Beispiel thermische Aktivität im Material (Stoßprozess) nur mit einem großen Energieaufwand von in der Regel über 3eV möglich ist. Der spezifische Widerstand ist dementsprechend besonders groß.

ist. Der Leiter weist somit wie schon erwähnt einen entsprechend geringeren spezifischen Widerstand auf und führt damit zu einem großen Stromfluss. Anders als beim Isolator führt eine Temperaturerhöhung hier im Allgemeinen zu einer Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit, da die zunehmende Streuung der Elektronen zu einer Abnahme der mittleren Elektronengeschwindigkeit, die wiederum proportional zur Stromdichte j ist, führt.

Dabei gilt für die Stromstärke I ausgehend von der Stromdichte j der Zusammenhang:

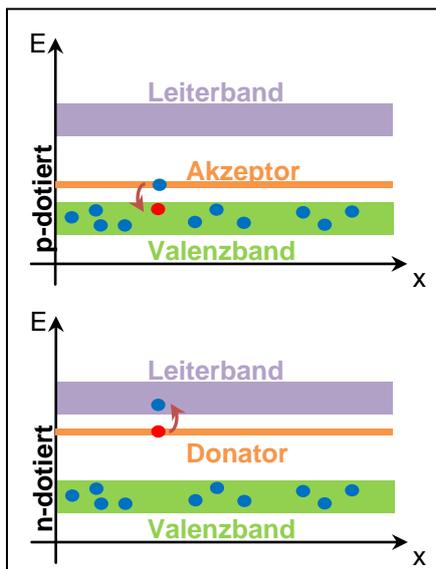
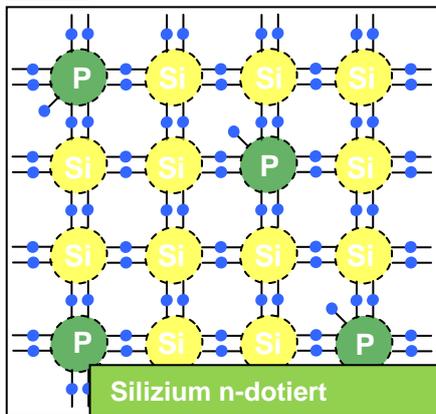
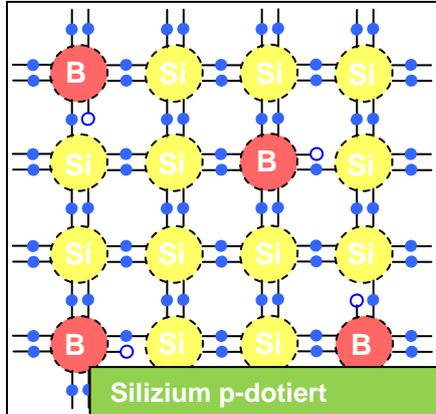
$$I = \int_{\vec{A}} \vec{j} \cdot d\vec{A} \quad \text{mit: } \vec{j} = N_e \cdot e \cdot \langle \vec{v} \rangle$$

Formel 1.4.1

Als interessantester Fall, den wir im Grunde genommen nur mit Hilfe des Bändermodells vernünftig beschreiben können, bleibt an dieser Stelle nun der Fall des Halbleiters übrig. Ähnlich wie beim Nichtleiter befindet sich auch hier zwischen Valenzband und Leiterband eine Bandlücke innerhalb derer sich ein Elektron nicht aufhalten kann. Der große Unterschied im Vergleich zum Nichtleiter liegt jedoch darin, dass die Bandlücke hier etwas schmaler ausfällt, so dass bereits die durch Raumtemperatur auftretenden thermischen Aktivitäten ausreichend sind, um einzelne Elektronen auf das Leiterband zu heben. Im Valenzband bleibt damit eine positiv geladene Defektstelle (Defektelektron) übrig, die durch Positionswechsel mit den Valenzelektronen ebenfalls quasibeweglich ist. Damit weist der Halbleiter im reinen Zustand eine geringe Leitfähigkeit (Eigenleitung) auf, die durch eine Temperaturerhöhung noch weiter gesteigert werden kann.

1.5 Die Dotierung von Halbleitern

Die oben beschriebenen Effekte der Eigenleitung von Halbleitern fallen in aller Regel nur unzufrieden stellend schwach aus, weshalb in der Praxis durch gewisse Behandlungen des reinen Halbleiters versucht wird die Energiedifferenz zwischen Valenzband und Leiterband



ionisierte Störstelle (aber kein Loch). Im Halbleiter herrscht so ein Überschuss an Elektronen.

Je nach Verwendungsart des dotierten Materials unterscheidet man verschiedene Dotierungsgrade, die das Verhältnis zwischen Gitteratomen und Donatoren bzw. Akzeptoren wiedergeben. Als grobe Näherung kann von einem Dotierungsgrad von je einem Fremdatom auf 10^4 bis 10^{10} Gitteratome ausgegangen werden.

künstlich zu verringern. Bei der technischen Umsetzung wird hierzu die sogenannte Dotierung herangezogen. Im Folgenden wollen wir die Erklärung anhand eines Siliziumgitters durchführen.

Bei der p-Dotierung werden in das Atomgitter des Siliziums so genannte Akzeptoren, d.h. Elemente mit lediglich drei freien Valenzelektronen, eingebracht. Häufig verwendete Elemente sind hierbei Aluminium oder Bor. Um den ursprünglichen Bindungszustand wieder zu realisieren fehlt es nun allerdings an einem weiteren Valenzelektron. Diese Fehlstelle bezeichnet man für gewöhnlich als Loch oder Defektelektron.

Ähnlich verhält es sich auch bei der n-Dotierung. Hier werden in das Siliziumgitter so genannte Donatoren, d.h. Elemente mit einem zusätzlichen Valenzelektron also insgesamt fünf bindungsfähigen Außenelektronen eingebracht. Hierbei kommen in aller Regel Phosphor und Arsen in Frage. Da die umliegenden Siliziumatome lediglich in der Lage sind vier Phosphorelektronen in die Bindung mit ein zu schließen, steht das fünfte Phosphorelektron jeweils als quasi-freibewegliches Elektron in dieser Konstellation zur Verfügung.

Im Bändermodell können die Donatoren bzw. die Akzeptoren als eigenständiges Zwischenband zwischen dem Valenz- und dem Leiterband aufgefasst werden. Das Akzeptorenband bei einem p-dotierten Halbleiter ist dabei direkt oberhalb des Valenzbandes positioniert und besitzt im Vergleich zum Leiterband damit auch eine geringere Übertrittsarbeit (ungesättigte Bindung). Ein Valenzbandelektron benötigt damit nur eine sehr kleine Energie, um dieses Energieniveau zu besetzen und die Störstelle negativ zu ionisieren. Im Valenzband bleibt damit ein Loch übrig. Die Elektronendichte im Leiterband bleibt unverändert. Im Halbleiter entsteht ein Überschuss an quasi-freibeweglichen Löchern.

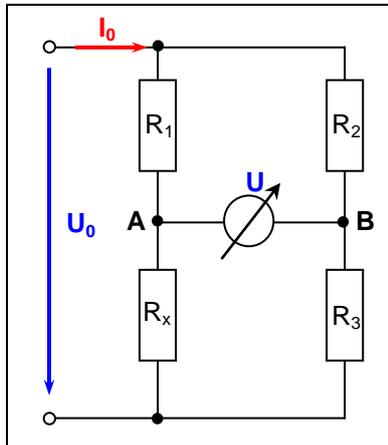
Im n-dotierten Fall bildet sich in der Nähe des Leiterbandes ein Donatorenband aus. Entsprechend reicht eine sehr geringe Energiezufuhr aus, um diese Störstelle zu ionisieren. Das Störatom gibt sein überschüssiges Valenzelektron in das Leiterband ab. Es entsteht also ein freibewegliches Elektron im Leiterband und eine ortsfeste

2 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes

2.1 Einleitung: Wheatstone'sche Brückenschaltung

Zur Bestimmung eines unbekannten Widerstandes R_x wird in der Praxis häufig die Brückenschaltung nach Wheatstone herangezogen.

Diese besteht aus zwei zueinander parallel geschalteten Spannungsteilern, die über die so genannte Brücke verbunden werden (siehe Skizze). In der Wheatstonebrücke wird ein hochohmiges Voltmeter eingesetzt, welches die Potentialdifferenz zwischen den Punkt A und B misst. Liegt am Punkt A und B das jeweils selbe Potential an, so nennt man die Schaltung abgeglichen, das Voltmeter verzeichnet keinen Ausschlag.



Für diesen Fall gilt die folgende Abgleichsbedingung:

$$\frac{R_1}{R_x} = \frac{R_2}{R_3}$$

Formel 2.1.1

Zur Bestimmung des unbekannten Widerstandes R_x muss das Verhältnis zwischen den Widerständen R_2 und R_3 so verändert werden, dass das Voltmeter keine Potentialdifferenz anzeigt. Über die bekannten Widerstände kann dann der gesuchte Widerstand R_x aus der Abgleichsbedingung bestimmt werden. Der große Vorteil dieser Schaltung ist offensichtlich, dass der Innenwiderstand R_i des eingesetzten Spannungsmessgerätes aufgrund der Tatsache, dass an der Brücke keine Spannung anliegt, unberücksichtigt bleiben kann.

Anstelle der Spannung zwischen der Brücke kann auch mittels eines Amperemeters der Ausgleichsstrom in der Brücke bestimmt werden. Ist dieser Null, so ist die Abgleichsbedingung ebenfalls erfüllt.

2.2 Messung der Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes

Im Versuch bringen wir anstelle des Widerstandes R_x den Halbleiterwiderstand in die Brückenschaltung ein und messen den jeweiligen Widerstandswert des Halbleiters bei Temperaturen zwischen Raumtemperatur und 200°C . Die Erwärmung des Halbleiterelements wird hierbei über einen elektrisch beheizten Rohrofen gewährleistet.

Bei der Messung des Widerstandes ist darauf zu achten, dass der Messstrom I_0 der Brückenschaltung nur kurz zugeschaltet wird und dessen Größe zudem möglichst gering gehalten wird, um Einflüsse durch Erwärmungen durch den Stromfluss möglichst gering zu halten.

Für die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes erwartet man den Zusammenhang:

$$R(T) = a \cdot e^{\frac{1}{T}b}$$

Formel 2.2.1

Logarithmieren auf beiden Seiten liefert dann weiter:

$$\ln R(T) = b \cdot \frac{1}{T} + \ln a$$

Formel 2.2.2

Tragen wir die erhaltenen Messwerte entsprechend der *Formel 2.2.2* auf, so können die gesuchten Koeffizienten a und b aus der Steigung und dem y-Achsenabschnitt des auftretenden linearen Zusammenhangs bestimmt werden.

Als Teil der Auswertung überlegen wir uns zudem, wie man einen Heißleiter (NTC) zur Temperaturmessung, zur Füllstandsanzeige und zur Strombegrenzung verwenden kann.

3 Widerstände von Edelmetallen und Glühwendeln

3.1 Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstandes

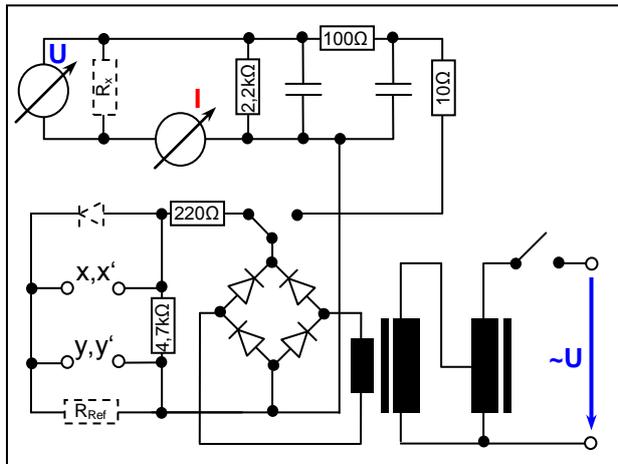
Zunächst bestimmen wir nun oszillographisch bei Raumtemperatur die Strom-über-Spannungskurve eines Edelmetallwiderstandes und daraus wiederum den Verlauf des Widerstandswertes R.

Entsprechend der einleitenden Bemerkungen erwarten wir einen Zusammenhang gemäß:

$$I = \frac{1}{R} \cdot U$$

Formel 3.1.1

Wie schon geschildert wollen wir hier nicht einzelne Messwerte aus Strom- und Spannungswert bestimmen, sondern setzen an dieser Stelle eine oszillographische Messmethode über eine Halbwellenspannung ein. Dabei verwenden wir die Schaltung entsprechend der nebenstehenden Schaltskizze und stellen den Zweipositionenschalter hinter der Gleichrichterschaltung auf die linke Stellung, so dass im Weiteren die untere Schaltung verwendet wird.



Zur Auswertung des Versuches übernehmen wir die am Oszilloskop dargestellte Kurve durch geeignete Mittel und untersuchen auch an dieser Stelle wieder phänomenologisch das Temperaturverhalten dieses einfachen ohm'schen Widerstandes. Aufgrund der steigenden Eigenschwingungen der Metallatome erwarten wir mit steigender Temperatur entsprechend ein Abflachen der Kurve, d.h. einen Anstieg des Widerstandes bei Erhöhen der Umgebungstemperatur bzw. der durch den Strom verursachten Erwärmung.

~U

der durch den Strom verursachten Erwärmung.

3.2 Kalt- und Betriebswiderstand einer 60W-Wolfram-Glühbirne

Im nächsten Schritt wollen wir nun nochmals explizit das Temperaturverhalten eines ohm'schen Widerstandes anhand eines in einer Glühbirne verarbeiteten Wolframdrahtes untersuchen. Hierzu messen wir zunächst den Kaltwiderstand R_K , d.h. den Widerstand ohne angelegte Spannung U, mittels eines einfachen Ohmmeters und vergleichen diesen Wert mit dem aus den Kenndaten berechneten Betriebswiderstand R_B der Glühbirne.

Ausgehend von Betriebsspannung und Betriebsleistung ergibt sich so:

$$P = U \cdot I = \frac{U}{R_B} \cdot U \Leftrightarrow R_B = \frac{U^2}{P} \Rightarrow R_B = \frac{(220V)^2}{60W} \approx 807\Omega$$

Formel 3.2.1

Wie schon oben erwähnt erwarten wir für Metalle einen ansteigenden Widerstandswert mit steigender Temperatur. Im Versuch sollte der Kaltwiderstand R_K im Vergleich zum Betriebswiderstand R_B also deutlich geringer ausfallen. Dieses kaltleitende Verhalten von Metallen führt gerade bei Glühwendeln zu einer Art Selbstregulierung des Stromes, was bei stark überhöhten Einschaltströmen ein Durchbrennen der Glühwendel durch Anpassung des Widerstandes verhindern kann.

3.3 Kalt- und Betriebswiderstand einer 50W-Kohlefadenlampe

Als Abschluss dieses Versuchsteils wollen wir nun selbigen Versuch nochmals für eine Kohlefadenlampe durchführen.

Auch hier soll zunächst der Kaltwiderstand R_K wieder über ein Ohmmeter gemessen und mit dem berechneten Wert des Betriebswiderstandes verglichen werden.

Ausgehend von Betriebsspannung und Betriebsleistung ergibt sich auch hier:

$$P = U \cdot I = \frac{U}{R_B} \cdot U \Leftrightarrow R_B = \frac{U^2}{P} \Rightarrow R_B = \frac{(220V)^2}{50W} = \underline{968\Omega}$$

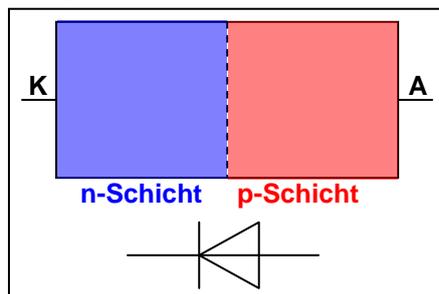
Formel 3.2.1

Im Vergleich zum Wolfram können wir Kohlenfaden als Heißleiter identifizieren. Das bedeutet, dass dieses Mal der Kaltwiderstand R_K deutlich größer sein wird als der berechnete Betriebswiderstand R_B . Diese Eigenschaft ist damit eine Erklärung, warum eine Kohlefadenlampe ihr Helligkeitsmaximum erst nach einer gewissen Anlaufzeit erreichen kann. Trotz gleicher elektrischer Leistung erscheint dem menschlichen Auge die Helligkeit im Vergleich zur Wolfram-Glühbirne deutlich geringer. Ursache hierfür ist wiederum, dass die Kohlefadenlampe ihr spektrales Maximum eher in Richtung des infraroten Bereichs verschoben hat, der Anteil am sichtbaren Licht also geringer ist als bei der Wolframlampe.

4 Widerstände unterschiedlicher Halbleiter

4.1 Einleitung: Die Halbleiterdiode

Bringen wir, wie weiter oben vorgestellt, einen p-dotierten mit einem gleichstark n-dotierten

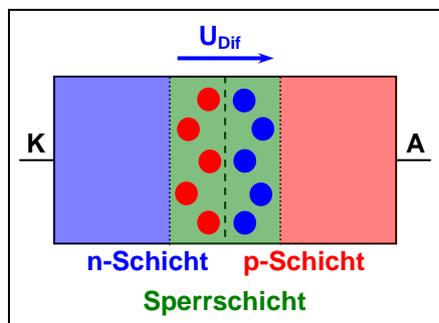


Halbleiter zusammen, so erhalten wir daraus das einfachste Mehrschicht-Halbleiterbauelement, die gewöhnliche Halbleiterdiode. Nebstehende Skizze veranschaulicht die entsprechende Schichtfolge zusammen mit dem dazugehörigen Schaltsymbol dieses Bauteiles.

Beide Schichten werden durch eine Grenzschicht, die oft auch pn-Übergang genannt wird, voneinander getrennt.

Hauptaufgabe eines solchen Bauteiles besteht in der Gleichrichtung von Strömen. Das heißt, dass je nach Po-

lung der Diode der Stromfluss einmal nahezu ungehindert passieren kann, bei entsprechend umgekehrter Polung dagegen fast vollständig unterbunden wird. Im Folgenden sollen nun beide Fälle bzw. deren Ursache etwas näher untersucht werden. Beginnen wir unsere Betrachtung hierzu zunächst mit der Diode im spannungslosen Fall.

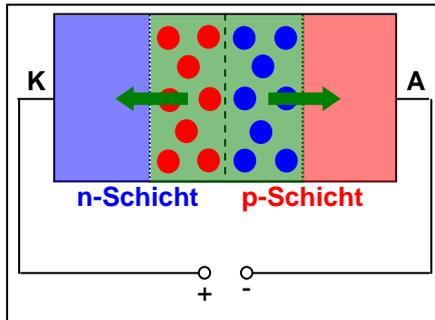


Erfolgt keine Kraftwirkung durch eine äußere Spannung U , so wandern die in der n-Schicht befindlichen zusätzlichen negativ geladenen Ladungsträgern als Ursache des Konzentrationsunterschiedes von Elektronen und Defektelektronen über die Grenzschicht hinweg und neutralisieren sich dort mit einem kleinen Teil der Defektelektronen. Dieser Prozess geschieht vorrangig in der Nähe der Grenzschicht, wodurch sich beidseitig eine schmale Raumladungszone, die so genannte Sperrschicht ausbildet. Die verlorenen Elektronen führen als Folge der ein-

gebrachten Donatoren in der zur n-Schicht benachbarten Sperrschichtseite zu einem Elektronenmangel, auf der gegenüberliegenden Seite entsprechend wegen der eingebrachten Akzeptoren zu einem Elektronenüberschuss. Zwischen diesen beiden durch die Grenzschicht voneinander getrennten Schichten wirkt nun ein starkes elektrisches Feld E , das ein weiteres Wandern der Elektronen aus der n-Schicht unterbindet und auch ein

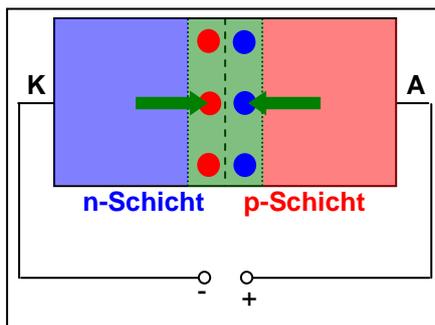
Ausweiten der Sperrschicht damit vorerst verhindert. Die im elektrischen Feld gespeicherte Energie ist in diesem Fall genau so groß wie die kinetische Energie der noch übriggebliebenen freien Ladungsträger.

Ursache für die Ausprägung des elektrischen Feldes E ist eine interne Spannung, die Schwell- oder Diffusionsspannung U_{Dif} deren Größe entsprechend der Erklärung vorrangig von der Ladungszahl in der Sperrschicht abhängig ist und damit wiederum auch von der Leitfähigkeit des verwendeten Halbleitermaterials sowie von der Temperatur und den damit verbundenen thermischen Schwingungen. Für das häufig verwendete Silizium ergibt sich bei Raumtemperatur so beispielsweise ein Wert von ca. 0,7V, für Germanium hingegen ca. 0,3V.



Schließen wir die Diode nun mit ihrer Anode an den negativen Pol und die Kathode dementsprechend an den positiven Pol einer Spannungsquelle, so werden die freien Ladungsträger der n-Schicht vom positiven Pol der Spannungsquelle abgesaugt, die Defektelektronen analog durch nachfließende Elektronen aus der Spannungsquelle besetzt. Diese Neutralisierungsvorgänge führen damit zu einer Ausweitung der Sperrschicht und somit auch zu einer Verstärkung des elektrischen Feldes E . In aller Regel ist es nur noch einer begrenzten Anzahl von

einigen wenigen Elektronen möglich diese Sperrschicht aufgrund ihrer kinetischen Energie zu durchqueren. Der Stromfluss wird damit fast vollständig unterbunden.

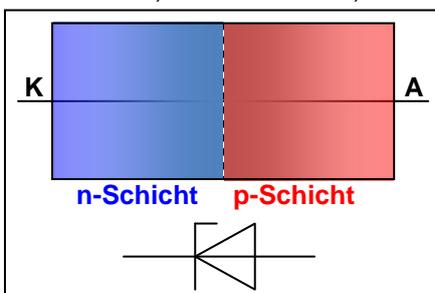


Wird die Polarität der Diode nun umgedreht, so werden die freien Defektelektronen in der p-Schicht hin zur Sperrschicht verschoben in der sie sich vorerst ansammeln. Auf der gegenüberliegenden Seite passiert dasselbe mit den freien Elektronen. Zwischen den beiden von Ladungsträgern überschwemmten Bereichen baut sich nun allmählich ein zum ursprünglichen elektrischen Feld E entgegengesetztes gepoltes Gegenfeld E' auf, welches die Sperrschicht nach und nach abbaut. Der Prozess findet seine Vollendung bei einer angelegten äußeren Spannung U , die dieselbe Größe wie die Diffusionsspannung U_{Dif} aufweist. In diesem Fall kompensieren sich beide elektrischen Felder vollständig, die Grenzschicht kann gänzlich abgebaut werden und ein Stromfluss ist demzufolge nahezu ungehindert möglich. Durch unterschiedliche Halbleitermaterialien oder Arbeitstemperaturen kann diese Schwellspannung in weitem Maße beeinflusst werden.

Der Prozess findet seine Vollendung bei einer angelegten äußeren Spannung U , die dieselbe Größe wie die Diffusionsspannung U_{Dif} aufweist. In diesem Fall kompensieren sich beide elektrischen Felder vollständig, die Grenzschicht kann gänzlich abgebaut werden und ein Stromfluss ist demzufolge nahezu ungehindert möglich. Durch unterschiedliche Halbleitermaterialien oder Arbeitstemperaturen kann diese Schwellspannung in weitem Maße beeinflusst werden.

4.2 Einleitung: Die Zenerdiode

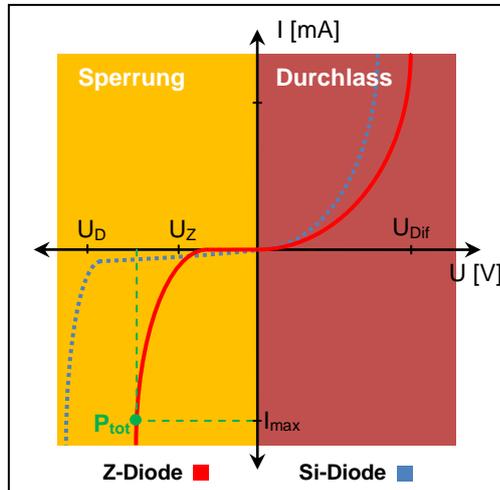
Neben den gewöhnlichen Halbleiterdioden finden in der Praxis häufig auch die sogenannten Zenerdiode, kurz Z-Diode, ihre Anwendung. Vom Aufbau her unterscheiden sie sich nur



durch einen deutlich höheren Dotierungsgrad sowie einem speziellen Dotierungsverlauf in der Nähe des pn-Übergangs, was jeweils eine dünne Sperrschicht zur Folge hat.

Schließen wir die Z-Diode entsprechend den obigen Erläuterungen in Durchlassrichtung an eine Spannungsquelle an, so verhält sie sich wie eine gewöhnliche Siliziumhalbleiterdiode. Ihre Besonderheit zeigt die Z-Diode erst bei Betrieb in Sperrrichtung. Schließen wir die Zenerdiode nun also mit ihrer Anode an den negativen Pol und die Kathode dementsprechend an den positiven Pol einer Spannungsquelle an, so führt dies auch hier vorerst zu einer Aus-

weitung der Sperrschicht und damit auch zu einem Anstieg der elektrischen Feldstärke E . Die Zener-Diode sperrt. Wegen des höheren Dotierungsgrades erreicht die aufgebaute Feldstärke E jedoch ab einem gewissen Grad der angelegten Spannung (Zenerspannung U_Z) einen Wert, bei dem das elektrische Feld in der Lage ist Elektronen aus dem Kristallverbund herauszulösen (Feldemission). Diesen Effekt bezeichnet man entsprechend seines Entdeckers Clarence Melvin Zener, als den Zenereffekt.



Wird die äußere Spannung weiter erhöht, so können die zur Verfügung stehenden freien Ladungsträger in Folge des bestehenden elektrischen Feldes so stark beschleunigt werden, dass sie durch Stoßprozesse mit anderen Atomen in der Lage sind weitere Elektronen aus ihrem Gitterverbund zu lösen, die ebenfalls beschleunigt werden und damit die nur dünne Grenzschicht überschwemmen. Sinngemäß bezeichnen wir dieses verstärkende Verhalten als den sogenannten Lawineneffekt.

Bei geringen Spannungen wird das Verhalten in Sperrichtung also vorrangig durch den Zenereffekt bestimmt, bei hohen Spannungen hingegen wird der Einfluss des Zenereffekt gegenüber dem Einfluss

des Lawineneffekt mehr oder weniger vernachlässigbar. Das verstärkende Verhalten des Lawineneffekts findet prinzipiell so lange statt, bis die Diode durch Eigenerwärmung bzw. durch Erreichen der Verlustleistung P_{tot} zerstört wird, was in der Praxis durch eine Reihenschaltung mit einem strombegrenzenden Widerstand unterbunden wird.

Als Ursache von Tunneleffekt und/oder Lawineneffekt geht also die sperrende Wirkung der Grenzschicht verloren, die Diode wird niederohmig und damit stromdurchlässig. Wird die Spannung wieder auf einen Wert unterhalb der Durchbruchspannung gesenkt, so wird das Freisetzen von Ladungsträgern schlagartig unterbrochen und noch vorhandene freie Ladungsträger wieder in ihre ursprünglichen Gitterplätze gezwungen. Damit hat sich die Sperrschicht wieder regeneriert und die Z-Diode ist wieder hochohmig.

Interessant ist in dieser Hinsicht auch die Temperaturabhängigkeit beider Effekte:

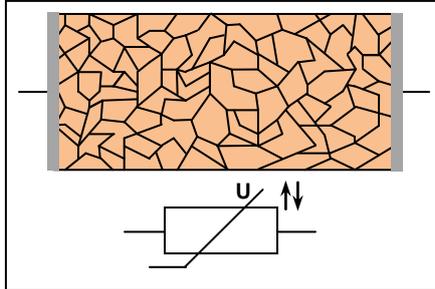
- **Tunneleffekt:** Der Tunneleffekt besitzt einen negativen Temperaturkoeffizient, d.h. mit steigender Temperatur fällt die Kurve schneller ab.
- **Lawineneffekt:** Der Lawineneffekt weist hingegen einen positiven Temperaturkoeffizienten auf. Damit fällt die Kurve bei steigender Temperatur langsamer ab. Grund hierfür sind die entstehenden thermischen Unruhen.
- **Beide Effekte:** Treten beide Effekte in gleichem Maße auf, was ungefähr im Bereich zwischen 5V und 6V der Fall ist, so heben sich die beiden Temperatureffekte unter Umständen auf.

Wie wir im obenstehenden Diagramm sehen können tritt der Zener-Effekt prinzipiell auch bei einer gewöhnlichen Halbleiterdioden auf. Dort beginnt das Durchbrechen mit Erreichen der Durchbruchspannung U_D . In der Regel führt der Zener-Durchbruch hier allerdings zu einer Zerstörung des eingearbeiteten dünnen Stromleitkanals und ist damit unerwünscht.

4.3 Einleitung: Der Varistor

Als weiteres wichtiges Halbleiterbauelement wollen wir an dieser Stelle noch den spannungsabhängigen Widerstand, den Varistor oder auch VDR-Widerstand genannt, etwas genauer beleuchten. Anders als die bisher kennengelernten Halbleiterbauelemente besteht er nicht aus einer streng vorgegebenen und gleichmäßigen Schichtfolge, sondern aus einer Viel-

zahl von kleinen aber unterschiedlich ausgerichteten Halbleiterkristallen. Die einzelnen Körner wirken im Folgenden wie kleine Halbleiterzonen mit unterschiedlicher Leitfähigkeit und bilden zwischen sich, entsprechend wie bei Halbleiterdioden, Sperrschichten aus, wobei die Polung jeweils völlig willkürlich verteilt ist.

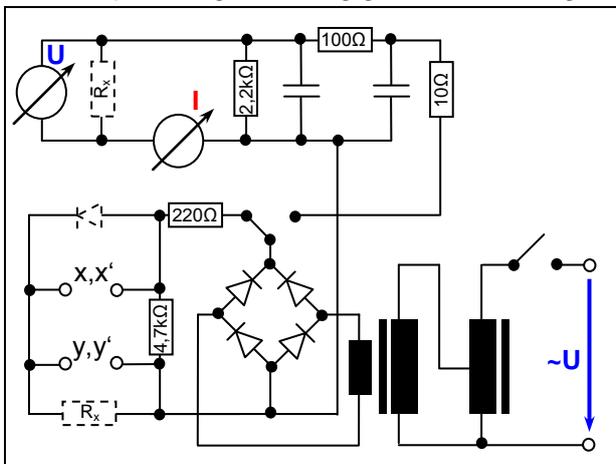


Bei Anlegen einer äußeren Spannung U baut sich ähnlich wie bei der Halbleiterdiode als Ursache des entstehenden elektrischen Feldes ein gewisser Anteil der Sperrschichten ab. Je größer die angelegte Spannung U ist, desto größer ist auch das elektrische Feld und umso mehr Sperrschichten werden abgebaut. Der Varistor verbessert seine Leitfähigkeit bzw. Verringert seinen Eigenwiderstand also mit Erhöhung der angelegten Spannung U .

Hergestellt werden die benötigten polykristallinen Halbleiterwerkstoffe durch ein Hochtemperatur-Pulverpressverfahren, dem sogenannten Sintern. Dabei nutzt man aus, dass einzelne Körner des Ausgangspulvers bereits bei einer Temperatur, die in der Größenordnung von einem Drittel der Schmelztemperatur des verwendeten Materials liegt, zu einem festen Verbund "verschmelzen" können. Je nach Temperatur und Sinterzeit kann so die Korngröße und damit die grundlegenden Eigenschaften des Endproduktes maßgeblich beeinflusst werden. Anfänglich bestanden diese Bauteile vorrangig aus Siliziumkarbid, das aber wegen seines ungünstigeren Verhaltens heute größtenteils durch Zinkoxid ersetzt wurde. Die Kontaktflächen an den beiden Enden werden mit aufgedampften Silber oder Aluminium versehen.

4.4 Messung der $I(U)$ -Abhängigkeit unterschiedlicher Halbleiter

Mit der bereits weiter oben eingesetzten Halbwellenspannungsschaltung sollen nun auch die Strom-Spannungs-Abhängigkeiten der vorgestellten Halbleiter oszillographisch ermittelt und anschließend ausgewertet werden. Die Verwendung von Halbwellenspannung anstelle einer symmetrischen Wechselspannung ist daher sinnvoll, da sich nur so Durchlass- und Sperrbereich separat voneinander untersuchen lassen.



Neben der Siliziumhalbleiterdiode soll als direkter Vergleich zudem auch die Kennlinie einer Germaniumdiode aufgenommen werden. Für beide Dioden erwarten wir einen ähnlichen Verlauf wie er im Diagramm weiter oben bereits angedeutet wurde. Dabei sollte bei Betrieb in Sperrichtung bei beiden Dioden nur ein äußerst

geringer Sperrstrom zu beobachten sein, wobei der gemessene Strom für die Germaniumdiode einige Größenordnungen größer ausfallen sollte als bei der Siliziumdiode. In Durchlassrichtung sollte sich hingegen erst bei Erreichen der jeweiligen Diffusionsspannungen U_{Dir} ein nennenswerter Stromwert einstellen.

Für die Zenerdiode erwarten wir, wie in der Einleitung beschrieben, im Durchlassbereich keinen bedeutsamen Unterschied im Vergleich zum Verhalten der gewöhnlichen Siliziumdiode. Im Sperrbetrieb hingegen sollte auch hier zunächst bis zum Erreichen der Zener-Spannung U_z ein nur minimaler Sperrstrom zu beobachten sein, der schließlich mit Einsetzen des Zener-Effektes schlagartig ansteigt. Man vergleicht auch hier wieder die oben angefügte Kennlinie der Zenerdiode.

Zu guter Letzt wird zudem die $I(U)$ -Abhängigkeit des Varistors in analoger Weise untersucht. Hier sollte sich für beide Stromrichtungen die gleiche Kennlinie ergeben, die mit steigendem Spannungswert ihre Steigung vergrößern und den Widerstand gleichzeitig verringern sollte.

Zur Untersuchung des Temperaturverhaltens der jeweiligen Halbleiter sollen die Bauteile außerdem mit warmer Luft angeblasen werden und dabei phänomenologisch der Einfluss der Temperatur beobachtet werden.

4.5 Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Varistors

Schalten wir den Zweipositionenschalter in obiger Schaltung auf die rechte Stellung, so können wir durch Einsetzen des Varistors an die vorgesehene Stelle die Strom-Spannungs-Abhängigkeit auch durch punktweises Messen von Strom und Spannung bestimmen.

Für den Zusammenhang zwischen Strom I und der Spannung U erwarten wir:

$$U(I) = c \cdot I^b$$

Formel 4.5.1

Zur Bestimmung der Koeffizienten b und c erfolgt eine Auftragung der Messpunkte gemäß:

$$\ln U(I) = b \cdot \ln I + \ln c$$

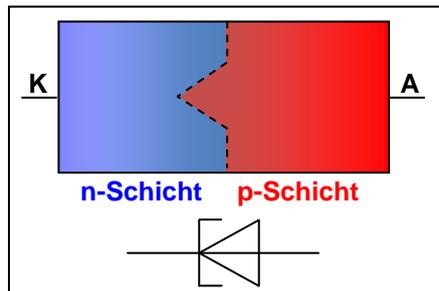
Formel 4.5.2

Bei einer entsprechend großen Anzahl an Messpunkten erwarten wir uns mit dieser Messmethode im Vergleich zur oszillographischen Methode ein deutlich genaueres Ergebnis. Nachteilig sind allerdings der zu erwartende erhöhte Zeitaufwand und das nicht direkt sichtbare Ergebnis der Messung.

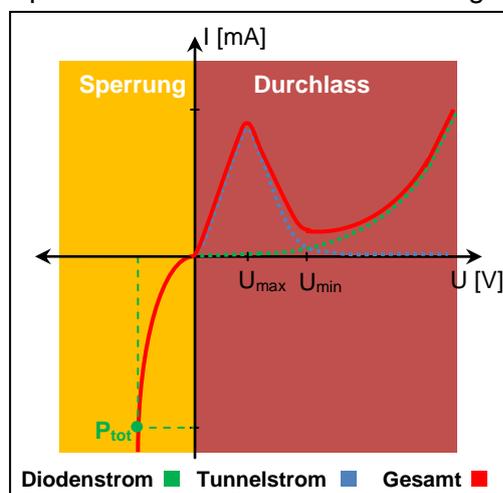
5 Die Tunneldiode

5.1 Einleitung: Die Tunneldiode

Als letzten Halbleiter wollen wir nun abschließend noch die Tunneldiode etwas genauer kennenlernen. Herstellungstechnisch werden sie oft aus Germanium- oder Galliumarsenidhalbleitern hergestellt, wobei sie im Vergleich zur Zenerdiode eine nochmals stark erhöhte Störstellenkonzentration einen sehr steilen Dotierungsverlauf im Übergangsbereich, sowie einen besonderen geometrischen Aufbau im Bereich der Sperrschicht aufweisen kann. Damit verbunden, bildet sich um den pn-Übergang eine nur äußerst dünne Sperrschicht in der Größenordnung von 10nm aus. Energetisch betrachtet ergibt sich daraus eine Annäherung von Valenz- und Leiterband bis auf einen nur geringen Abstand. Bereits bei kleinen Spannungen U an der Diode setzt infolge der Feldstärke ein quantenmechanisches Tunneln einzelner Elektronen durch die verbotene Zone ein. Die Sperrschicht wird in beide Richtungen durchlässig. Für negative Spannungen U ergibt sich wegen des hohen Dotierungsgrades ein sofortiger Eintritt des Zener-Effekts.

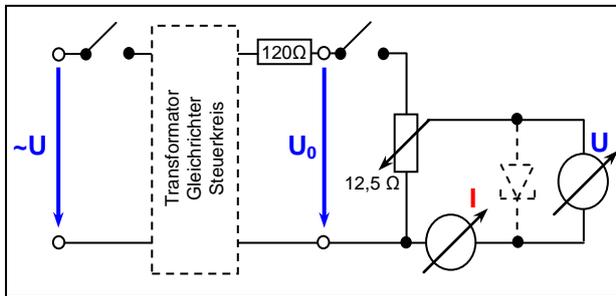


Bei positivem Anstieg der Spannung U wird der Abstand von Valenz- und Leiterband durch die Potentialverschiebung wieder abgebaut, als Folge dessen der Tunnelstrom wieder abfällt. Mit weiter wachsender Spannung U setzt der normale Diodenstrom ein. Die Addition von Dioden- und Tunnelstrom ergibt schließlich die charakteristische Kennlinie einer Tunneldiode, wie sie im nebenstehenden Diagramm dargestellt wird. Besonderheit im Vergleich zu anderen Diodentypen ist dabei der negative differentielle Widerstand zwischen U_{\max} und U_{\min} . Damit werden Tunneldioden in der Praxis beispielsweise als Verstärker oder als Hochfrequenzoszillatoren eingesetzt.



5.2 Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit einer Tunneldiode

Zunächst wollen wir auch für die Tunneldiode die Strom-Spannungs-Abhängigkeit experimentell ermitteln. Hierzu bestimmen wir mittels der nebenstehenden Spannungsteilerschaltung punktweise Strom und Spannung über der Tunneldiode.



Es ist wichtig, dass die Tunneldiode nicht durch einen allzu großen Strom I zerstört wird. Aus diesem Grund soll der Strom I einen Wert von $0,2\text{mA}$ nicht überschreiten. Wegen dem gefährlich schnell ansteigenden Strom I bei Polarität in Sperrrichtung, verzichten wir zudem auch auf die Messung im dritten Kennlinienquadrat. Anhand der gemessenen Wertepaare soll nun zunächst die Strom-über-Spannung-Kennlinie aufgezeichnet werden. Weiterhin berechnen wir mittels des Ohm'schen Gesetzes nach *Formel 1.2.1* die punktuellen ohm'schen Widerstandswerte und tragen diese ebenfalls über der Spannung auf.

Zu Letzt soll dann auch der differentielle Widerstandswert bestimmt werden. Hierfür gilt:

$$r(U) = \frac{dU}{dI} \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_i - U_j}{I_i - I_j} \quad i > j$$

Formel 5.2.1

5.3 Sprungverhalten des Diodenstromes

Die selbige Messung wie oben soll nun nochmals mit einem empfindlicheren Messbereich des Ampèremeters wiederholt werden. In das erhaltene Diagramm sollen dann auch die Arbeitsgeraden der Schaltung für den hier wirkenden als auch für den obigen Innenwiderstand R des Messgerätes eingezeichnet werden.

Für die Arbeitsgerade gilt hierbei der einfache Zusammenhang:

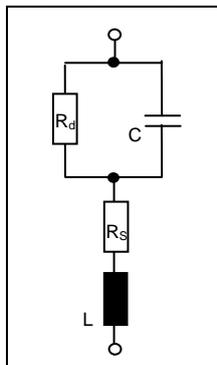
$$I(U) = \frac{U_0 - U}{R}$$

Formel 5.2.2

Dabei sollte beobachtet werden können, dass der Diodenstrom I zwischen gewissen Stromwerten hin und her springen kann, die durch die Schnittpunkte zwischen Diodenkennlinie und Arbeitsgerade gegeben werden. Dieser Effekt ist eine direkte Folge aus dem negativen differentiellen Widerstand im betreffenden Bereich der Kennlinie.

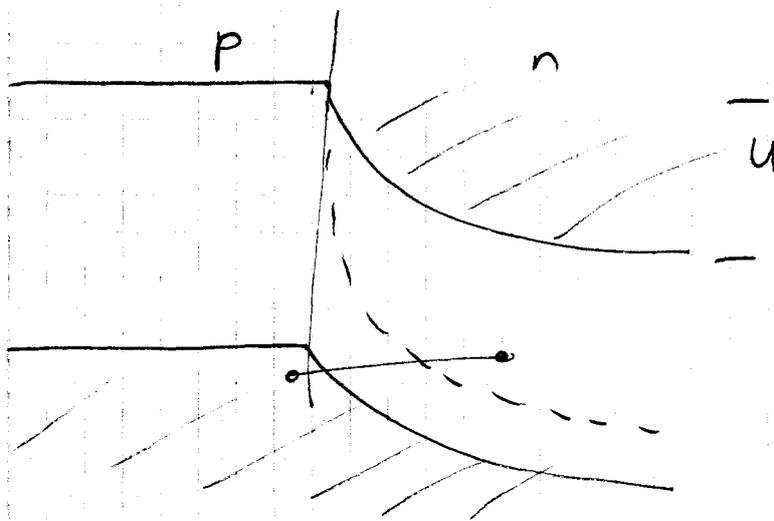
5.4 Anwendungsbeispiel: Hochfrequenzoszillator

Abschließend wollen wir uns nun dieses Stromspringen ausnützen um einen Hochfrequenzoszillator zu konstruieren. Hierzu schalten wir in Reihe zur Tunneldiode eine Induktivität in die Spannungsteilerschaltung mit ein. Erhöhen wir ausgehend von dieser erweiterten Schaltung die Spannung U_0 , so sollte bei Überschreiten der Spannung U_{max} ein oszillierendes Verhalten der Schaltung beobachtet werden können. Die sich einstellende hochfrequente Schwingung soll auch hier durch Anschluss eines Oszilloskops sichtbar gemacht werden.



Erklären können wir uns die eintretende Oszillation, wenn wir das Kleinsignalersatzschaltbild der Tunneldiode betrachten, d.h. diejenige Ersatzschaltung die in kleinem Abstand vom Arbeitspunkt angenommen werden darf (siehe Skizze). Wir sehen darin bereits die Schaltung des LC-Schwingkreises enthalten, wobei sich die Größen der Koeffizienten je nach Lage des Arbeitspunktes verändern. Durch Variation der äußeren

Spannung sollten sich so auch die drei Schwingungsfälle des Oszillators realisieren lassen.



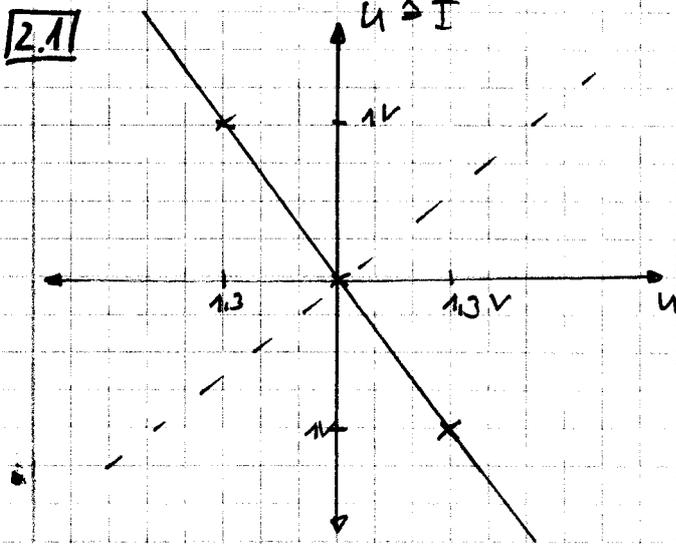
[1] $R = 100 \Omega$

$T [^{\circ}\text{C}]$	$R_{\text{pot}} [\text{k}\Omega]$	T	R_{pot}
23,7	6,51	115	2,38
25	6,46	120	2,25
30	6,19	130	2,01
35	5,9	140	1,82
40	5,62	150	1,61
46	5,2	160	1,47
50	5,03	170	1,33
55	4,72	180	1,22
60	4,43	190	1,11
65	4,26	200	1,02
70	4,06	210	0,94
75	3,82	220	0,88
80	3,6	230	0,82
85	3,36	240	0,78
80	3,19		
95	2,98		
100	2,8		
105	2,65		
110	2,52		

10er-Schritte wegen Erwärmung durch Strom

⊗ Thermoelement kühlt schneller ab als NTC

S. [Signature]



Referenzwiderstand $R = 100 \Omega$
 \hookrightarrow Stromberechnung

$R_{theo} = 0,11 \text{ k}\Omega$ (Platin)

2.2 Wolfram: $R_{th} = \text{~~0,11 k}\Omega~~ 0,2 \Omega$

2.3 Kohledraht: $R_e = 1,65 \text{ k}\Omega$

- \rightsquigarrow fährt Helligkeit langsam hoch
- \rightsquigarrow dunkler als Wolfram

3.1 Messbereich: $x = 0,1 \text{ V/SKE}$ $y = 1 \text{ V/SKE}$ Si [S, D]
 Messbereich: $x = 0,1 \text{ V/SKE}$ $y = 1 \text{ V/SKE}$ Ge [D]
 \rightsquigarrow kein Einfluss bei Temperatur Erhöhung

? ~~3.2~~ Messbereich: $x = 0,5 \text{ V/SKE}$ $y = 1 \text{ V/SKE}$ Si [S, D] ~~falsch~~

3.2 Messbereich: $x = 0,1 \text{ V/SKE}$ $y = -K-$ Z [S, D]
 S $x = 1 \text{ V/SKE}$ $y = -K-$
 D $x = 0,1 \text{ V/SKE}$ $y = -K-$

3.3 Messbereich $x = 0,2 \text{ V/SKE}$ $y = 0,5 \text{ V/SKE}$

G. Z.

4

I	U		
0	0	7	7,5
45 μA	0,5V	8,4	8
100 μA	1 V	10	8,5 —
210 μA	1,5V	12	9
350 μA	2 V	14	9,5
520 μA	2,5V	16,5	10
750 μA	3 V	20	10,5
1,05 mA	3,5V	23	11
1,4 mA	4 V	27	11,5
1,9 mA	4,5V	31	12
2,4	5V	36	12,5
3,1	5,5V		
3,9	6 V		
4,8	6,5V		
5,8	7 V		

Handwritten signature

5.1

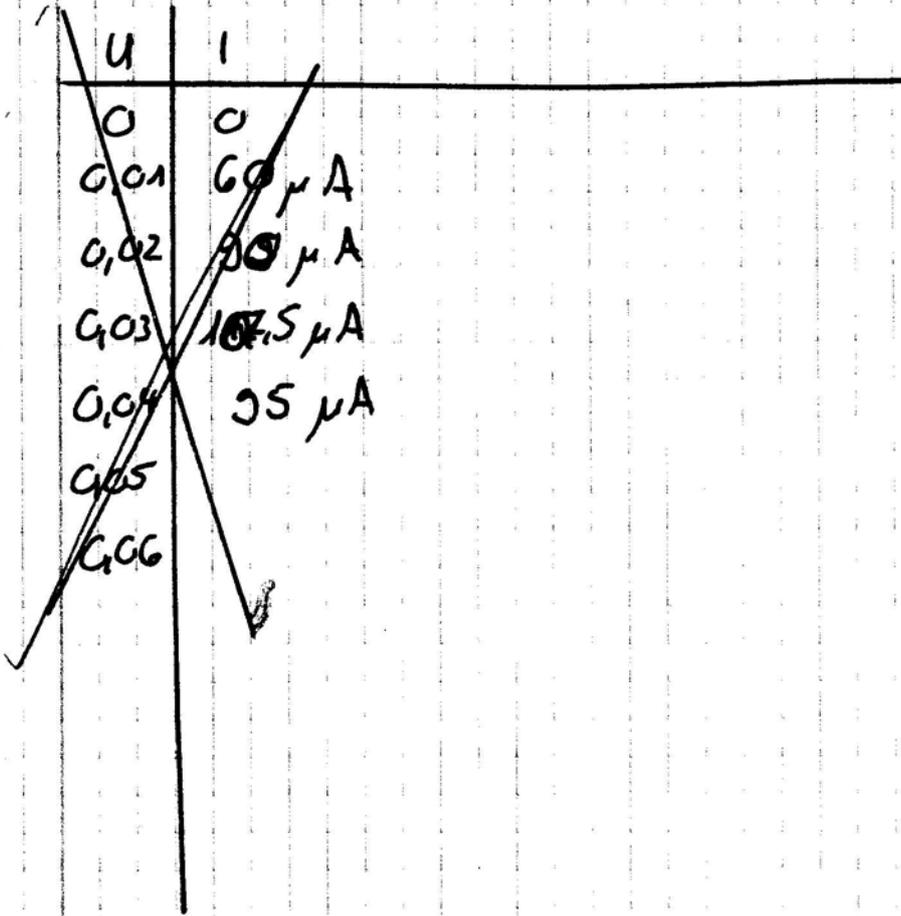
4
10

U	I	U	I	U	I	U	I
0,0	0	0,9	55 μA	1,8	30	3,0	20 20
0,1	50 μA	1,0	45 μA	1,9	25	3,2	20 20
0,2	75 μA	1,1	40 μA	2,0	25	3,4	25
0,3	90 μA	1,2	35 μA	2,1	20	3,6	35
0,4	75 μA	1,2	30 μA	2,2	20	3,8	60
0,5	90 μA	1,4	25 μA	2,3	20	3,9 4,2	75
0,6	80 μA	1,5	25 μA	2,4	20		
0,7	70 μA	1,6	20 μA	2,6	20		
0,8	60 μA	1,7	30 μA	2,8	25		

OK

5.2 $U_0 = 195 \text{ mV}$

$I_u = 20^{-24} \mu\text{A}$; $I_0 = 07 \mu\text{A}$



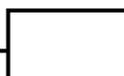
Handwritten signature or initials

Praktikumsauswertung: Widerstandskennlinien

- Versuche P2-51, 52 -

Inhaltsverzeichnis

V Vorwort	2
1. Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands	2
Messung der Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands	2
Anwendungsbeispiel: Heißleiter	4
2. Widerstände von Edelmetallen und Glühwendeln	5
Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands	5
Kalt- und Betriebswiderstand einer 60W-Wolfram-Glühbirne	5
Kalt- und Betriebswiderstand einer 50W-Kohlefadenlampe	5
3. Widerstände unterschiedlicher Halbleiter	6
Messung der I(U)-Abhängigkeit unterschiedlicher Halbleiter	6
Anwendungsbeispiel: Halbleiterdiode, Zenerdiode, Varistor	7
Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Varistors	9
4. Die Tunneldiode	11
Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit einer Tunneldiode	11
Sprungverhalten des Diodenstroms	13
Anwendungsbeispiel: Hochfrequenzoszillator	14



V Vorwort

Diese Versuchsauswertung wurde unter Verwendung des Tabellenkalkulationsprogramms Microsoft EXCEL 2007 angefertigt. Dieses lieferte uns aus den im handgeschriebenen Versuchsprotokoll vermerkten sowie der ggf. computergestützten Aufnahme von Messdaten, die entsprechenden grafischen Darstellung sowie die dazugehörigen Regressionskurven einschließlich deren Funktionsvariablen. Die Berechnung dieser Größen erfolgt dabei über die in den entsprechenden Kapiteln des Skripts zur Fehlerrechnung (Dr. Peter Blüm, Universität Karlsruhe, August 2002) zugrundeliegenden Gleichungen. Die unter Umständen auftauchenden Formelverweise beziehen sich auf die ebenfalls beiliegende Praktikumsvorbereitung.

6 Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstandes

6.1 Messung der Temperaturabhängigkeit

Wie in der Vorbereitung beschrieben soll nun zunächst unter Verwendung einer Wheatstone'schen Messbrücke, die Temperaturabhängigkeit eines Halbleiterwiderstands untersucht werden.

Die Erwärmung des Widerstandes erfolgt hierbei durch einen elektrischen Rohrofen, dessen Innentemperatur, und damit auch die ungefähre Temperatur des Halbleiters, über ein Thermoelement, das mit einem digitalen Voltmeter mit Temperaturmessfunktion verbunden ist, bestimmt werden können. Nach gewissen Temperaturschritten wird der Potentiometerwiderstand der Brückenschaltung soweit verringert, dass das in der Brücke eingebrachte Amperemeter keinen Ausschlag verzeichnet.

In diesem Fall folgt aus der Abgleichsbedingung nach *Formel 2.1.1*:

$$R_{HL} = \frac{R_{Pot}}{R_{Pot,gesamt} - R_{Pot}} \cdot R_{Ref} = \frac{R_{Pot}}{10k\Omega - R_{Pot}} \cdot 100\Omega$$

Formel 1.1.1A

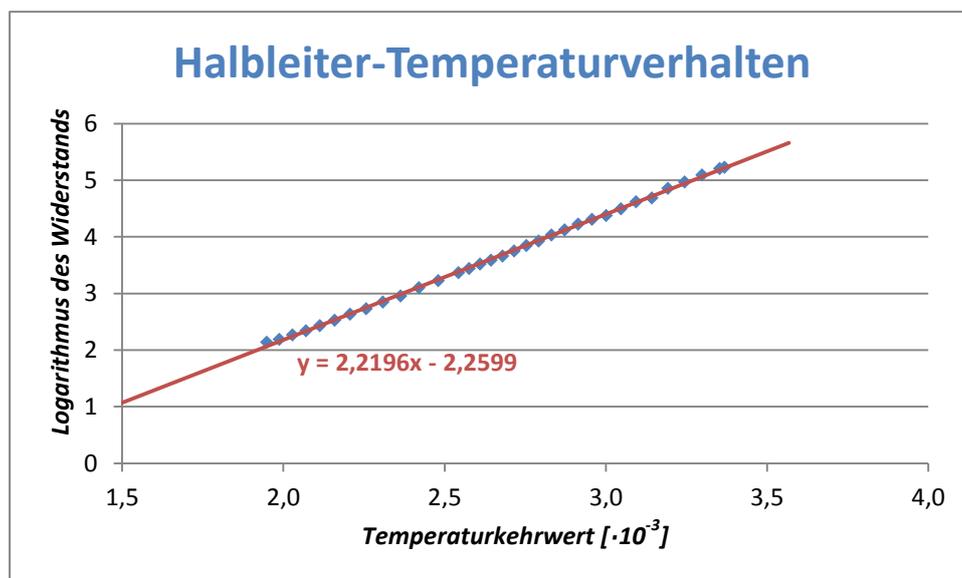
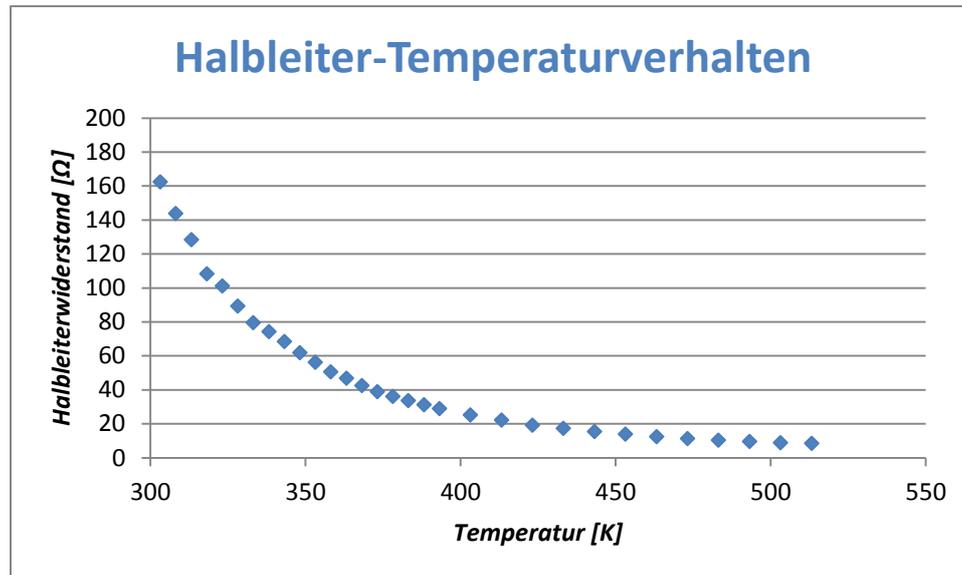
Für eine möglichst genaue Bestimmung des Abgleichpunktes ist darauf zu achten, dass sich das Amperemeter in einem möglichst kleinen Messbereich befindet.

Aus dem Versuch erhalten wir folgende gemessenen bzw. berechneten Werte:

T [K]	R _{Pot} [kΩ]	R _{HL} [Ω]	T [K]	R _{Pot} [kΩ]	R _{HL} [Ω]	T [K]	R _{Pot} [kΩ]	R _{HL} [Ω]
296,9	6,51	186,53	348,2	3,82	61,81	413,2	1,82	22,25
298,2	6,46	182,49	353,2	3,60	56,25	423,2	1,61	19,19
303,2	6,19	162,47	358,2	3,36	50,60	433,2	1,47	17,23
308,2	5,90	143,90	363,2	3,19	46,84	443,2	1,33	15,34
313,2	5,62	128,31	368,2	2,98	42,45	453,2	1,22	13,90
318,2	5,20	108,33	373,2	2,80	38,89	463,2	1,11	12,49
323,2	5,03	101,21	378,2	2,65	36,05	473,2	1,02	11,36
328,2	4,72	89,39	383,2	2,52	33,69	483,2	0,94	10,38
333,2	4,43	79,53	388,2	2,38	31,23	493,2	0,88	9,65
338,2	4,26	74,22	393,2	2,25	29,03	503,2	0,82	8,93
343,2	4,06	68,35	403,2	2,01	25,16	513,2	0,78	8,46

Bemerkung: Um etwaige Temperatureinflüsse durch den Stromfluss zu unterbinden, sollte der Halbleiterwiderstand immer nur kurz zugeschaltet werden. Wegen des schnellen Temperaturanstieges konnte dies aber ab einer Temperatur von 120°C in 5°C-Schritten nicht mehr gewährleistet werden, weswegen wir hier zu 10°C-Schritte übergegangen sind. Wegen des unregelmäßigen Verhaltens des Thermoelements konnten die fehlenden Werte im Nachhinein leider nicht mehr korrekt bestimmt werden.

Tragen wir die Messwerte direkt und über das Verfahren aus der Vorbereitung auf, folgt:



Im obigen Diagramm sehen wir also, dass der Halbleiterwiderstand mit steigender Temperatur sehr schnell abnimmt. Das bedeutet, dass der Halbleiter bei geringeren Temperaturen schlechter leitet, also bei höheren. Bei dem untersuchten Halbleiterwiderstand muss es sich somit um einen Heißleiter (NTC) handeln. Mit der entsprechenden Auftragung im zweiten Diagramm konnte zudem der geforderte exponentielle Verlauf der Kurve bestätigt werden.

Dabei gingen wir nach *Formel 2.2.1* von dem folgenden Zusammenhang aus:

$$R(T) = a \cdot e^{\frac{1}{T}b}$$

Formel 1.1.1A

Aus der RGP-Matrix-Methode erhalten wir für die gesuchten Koeffizienten:

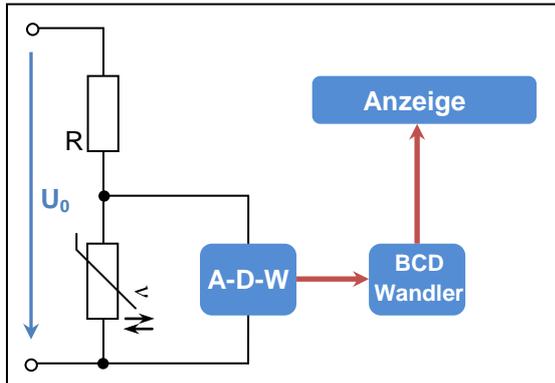
$$b = (2219,6 \pm 9,7)K \quad \ln a = (-2,26 \mp 0,03)\Omega \quad \Rightarrow \quad a = (-0,104 \mp 0,03)\Omega$$

Da die Angaben der oben bestimmten Koeffizienten in der Praxis in Bezug auf eine Nenn-temperatur, die in der Regel bei 25°C liegt, erfolgt, können wir unsere Werte nicht mit den Kenndaten handelsüblicher Heißleiter vergleichen.

6.2 Anwendungsbeispiele: Heißeleiter

Zum Abschluss dieses Versuchsteils wollen wir nun noch einige Praxisbeispiele für die Verwendung eines Heißeleiters in kurzem Umfang besprechen. Dabei interessieren wir uns für die Realisierung einer Temperaturmessschaltung, einer Füllstandsanzeige sowie einer Strombegrenzerschaltung.

Temperaturmessschaltung: Schließen wir den Heißeleiter wie in nebenstehender Schaltung an, so können wir anhand der am NTC abfallenden Spannung auf die Umgebungstemperatur schließen.



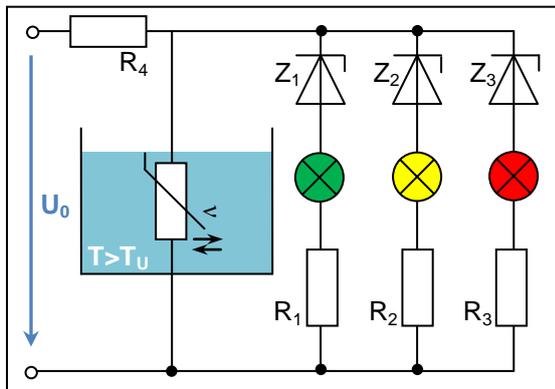
Aus Formel 2.2.1 folgt der Zusammenhang:

$$T(R) = \frac{b}{\ln R(T) - \ln a} \quad \text{Formel 1.2.1A}$$

Mit Hilfe dieses Zusammenhangs konstruieren wir uns aus einer geeigneten Logik-Schaltung einen Analog-Digital-Wandler, der die abfallende Spannung in einen entsprechenden Binär-code, welcher der entsprechenden Temperatur entspricht, umwandelt. Das codierte Signal

wird danach an einen BCD-Wandler zur Ansteuerung einer Siebensegmentanzeige übergeben, die die Temperatur für den Benutzer schließlich visuell dargestellt.

Füllstandsanzeige: Auf ähnliche Weise können wir so auch eine Füllstandsanzeige für eine Flüssigkeit konstruieren, deren Temperatur T im Vergleich zur Umgebungstemperatur T_U verschieden ist (hier: $T > T_U$).

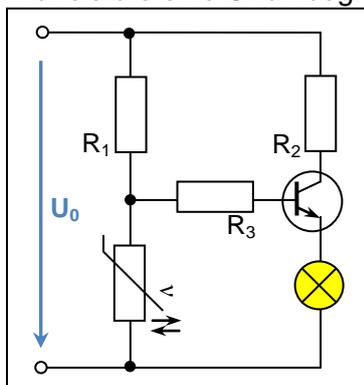


Sinkt der Pegel im Behälter ab, so steigt der Flächenanteil des Heißeleiters der im Kontakt mit der kälteren Umgebung steht, welcher sich darauf abkühlt und seinen Widerstand vergrößert. Nach dem ohm'schen Gesetz steigt damit auch die an ihm abfallende Spannung, die wir im Weiteren für die Realisierung der Anzeigeschaltung verwenden wollen.

Hauptbestandteil dieser Schaltung sind drei Z-Dioden mit unterschiedlicher Zenerspannung, wobei der Wert so gewählt wird, dass bei maxi-

malem Füllstand gerade die Zenerspannung von Z_1 , bei mittlerem Füllstand die Zenerspannung von Z_2 und bei minimalem Füllstand die Zenerspannung Z_3 erreicht wird.

Strombegrenzerschaltung: Abschließend bauen wir nun unter Hinzunahme eines npn-Transistors eine Strombegrenzerschaltung, für in diesem Fall eine Glühbirne, auf. Dabei wird



die Ansteuerung des Transistors über einen variablen Spannungsteiler gewährleistet, wobei zwischen Basis und Emitter der im Kontakt zur Glühbirne stehende Heißeleiter eingesetzt wird.

Der Transistor wird in diesem Fall nur dann durchgeschaltet, wenn der Widerstand des Heißeleiters groß ist, die Glühbirne also kalt ist. Erreicht die Temperatur der Glühbirne jedoch einen kritischen Wert, so dass die Spannung an der Basis-Emitter-Strecke unter $0,7V$ abfällt, sperrt der Transistor die Glühbirne kann sich wieder abkühlen. Der Umschalt- punkt kann hierbei durch den variablen Widerstand R_1 festgesetzt werden.

7 Widerstände von Edelmetallen und Glühwendeln

7.1 Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstandes

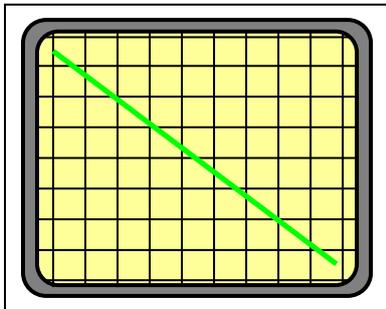
Mit der in der Vorbereitung vorgestellten Oszilloskopschaltung wollen wir nun die Strom-Spannungs-Abhängigkeit eines Edelmetallwiderstands (hier: Platin) grafisch darstellen und aus den Messwerten den Widerstandswert dieses Bauteils bestimmen. Da mit dem Oszilloskop allerdings so ohne weiteres keine Ströme direkt aufgenommen werden können, erfolgt die Messung des Stromes über der an einem Referenzwiderstand R_{Ref} abfallenden Spannung.

Aus dem Ohm'schen Gesetz folgt dann für den Stromwert:

$$I = \frac{U}{R_{Ref}} = \frac{U}{100\Omega}$$

Formel 2.1.1A

Qualitativ ergab sich am Oszilloskop dabei das nebenstehende Bild. Wir sehen deutlich den perfekten linearen Zusammenhang zwischen Strom (y-Achse) und Spannung (x-Achse), was wegen der Verwendung eines Festkörper-Metallwiderstands nicht verwunderlich ist.



Zur Auswertung des Messergebnisses berechnen wir nun die Steigung dieser Kurve, indem wir uns zwei charakteristische Punkte auf der Geraden herausuchen.

Somit ergibt sich für den Widerstand:

$$R = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{\Delta U_x}{\Delta U_y} \cdot R_{Ref} = \frac{1,3V}{1,0V} \cdot 100\Omega = 130\Omega$$

Messen wir denselben Widerstand mit dem analogen Ohmmeter so erhalten wir einen Wert von rund 110Ω . Das entspricht einer Abweichung von ungefähr 18%. Bei der ersten Messmethode muss jedoch berücksichtigt werden, dass durch die Vielzahl an verbauten Bauteilen die resultierende Toleranz entsprechend etwas höher ausfallen kann.

7.2 Kalt- und Betriebswiderstand einer 60W-Wolfram-Glühbirne

Mehr oder weniger phänomenologisch untersuchen wir nun das Widerstandsverhalten einer Wolfram-Glühbirne. Hierzu bestimmen wir zunächst den Kaltwiderstand R_{Kalt} mit Hilfe des analogen Ohmmeters und vergleichen diesen mit dem in der Vorbereitung berechneten Betriebswiderstand $R_{Betrieb}$.

Dabei ergibt sich das folgende Ergebnis:

$$\frac{R_{Kalt}}{R_{Betrieb}} = \frac{62\Omega}{807\Omega} \approx 0,08$$

Der Kaltwiderstand R_{Kalt} ist im Vergleich zum Betriebswiderstand $R_{Betrieb}$ also verhältnismäßig klein. Damit handelt es sich bei dem verwendeten Wendelmaterial Wolfram um einen Kaltleiter. Im erkalteten Zustand erwarten wir also den maximalen Stromfluss. Damit sollte die Wolfram-Glühbirne ihre maximale Helligkeit direkt nach dem Einschalten erreichen, die dann in geringem Umfang abnimmt, was aber wegen dem wirklich geringen Umfang nicht beobachtet werden konnte.

7.3 Kalt- und Betriebswiderstand einer 50W-Kohlefadenlampe

Analog bestimmen wir auch hier nun den Kaltwiderstand R_{Kalt} und vergleichen diesen mit dem berechneten Betriebswiderstand $R_{Betrieb}$. Weiterhin wollen wir auch hier das Leuchtverhalten phänomenologisch beobachten und mit dem Verhalten des Wolframs vergleichen.

Für das Widerstandsverhältnis erhalten wir dieses Mal:

$$\frac{R_{\text{Kalt}}}{R_{\text{Betrieb}}} = \frac{1650\Omega}{968\Omega} \approx 1,70$$

Wie erwartet ist hier nun der Kaltwiderstand R_{Kalt} deutlich größer als der Widerstand R_{Betrieb} im Betrieb. Damit verhält sich der Kohlefaden also ähnlich wie der Heißleiter aus dem ersten Versuchsteil.

Betrachten wir auch hier das Leuchtverhalten, so beobachten wir eine deutlich geringere Helligkeit gegenüber der Wolfram-Glühbirne, die gefühlt gerade einmal halb so groß scheint. Die Erklärung hierfür hatten wir in der Vorbereitung bereits auf die unterschiedlichen Positionen der Intensitätsmaxima bezüglich des elektromagnetischen Spektrums (Wien'sches Verschiebungsgesetz) zurückgeführt.

Weiterhin können wir beobachten dass die Leuchtkraft wegen des obigen Widerstandsverhaltens ihr Maximum erst mit zeitlicher Verzögerung einnimmt.

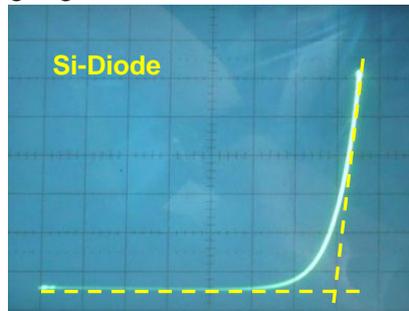
8 Widerstände unterschiedlicher Halbleiter

8.1 Messung der I(U)-Abhängigkeit einer Halbleiterdiode

Mit der oben bereits eingesetzten Halbwellenschaltung soll nun auch das Strom-Spannungs-Verhalten unterschiedlicher Halbleiter oszillographisch aufgetragen, den experimentell bestimmten Verlauf mit dem theoretisch erwarteten Verlauf verglichen, sowie anhand der Verläufe charakteristische Kenngrößen bestimmt werden.

Wegen der Verwendung von Halbwellenspannung können Sperr- und Durchlassrichtung nur separat voneinander untersucht werden. Um das Temperaturverhalten der einzelnen Halbleiter zu untersuchen werden diese in der jeweiligen Beschaltung mit einem Heißluftföhn angeblasen und die Veränderung am Oszilloskop betrachtet.

Silizium- und Germaniumdiode: Nebenstehende Grafiken zeigen den Verlauf der Durchgangskennlinie sowohl für die Silizium- als auch für die Germaniumdiode. Dabei ist jeweils eine sperrende Wirkung bis zu einem gewissen Spannungswert zu beobachten, der bei der Germaniumdiode allerdings im Vergleich zu Siliziumdiode deutlich geringer auszufallen scheint. Als Maß für diesen Spannungswert bestimmen wir jeweils den Schnittpunkt der an die Kennlinie angelegten Tangente mit der Waagechten entlang der Nulllinien. Dieser Wert entspricht der Diffusionsspannung U_{Diff} des jeweiligen Diodentyps.

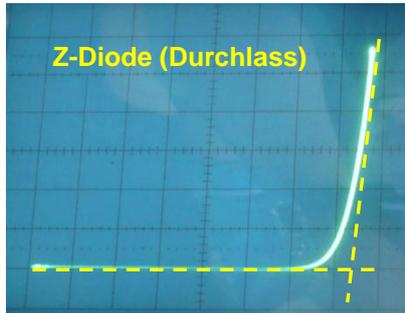


Bei einer x-Achsenkala von 0.1V/SKE erhalten wir für die Siliziumdiode so einen Wert von genau 0.7V, was dem typischen Wert einer Siliziumdiode entspricht. Für die Germaniumdiode erhalten wir bei gleicher x-Achsenkala einen Wert von knapp unter 0.2V, was etwas außerhalb des erwarteten Intervalls 0.2V...0.4V liegt.

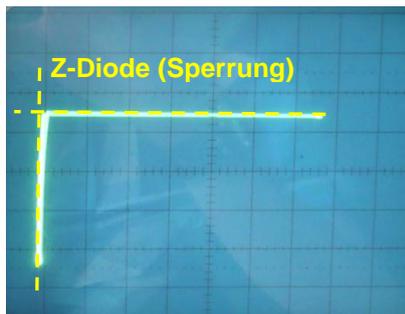
Vergleichen wir die Steigungen der Tangenten beider Kennlinien, so stellen wir zudem fest, dass die Germaniumdiode etwas flacher anzusteigen scheint als die Siliziumdiode. Wegen des nur sehr schwachen, vom Oszilloskop nicht zu registrierenden Sperrstroms, konnte in beiden Fällen keine

aussagekräftige Kennlinie für die Sperrrichtung ermittelt werden. Auch einen Temperatureinfluss (theoretisch: Verschiebung nach links) bei Anblasen mit heißer Luft konnte oszillographisch nicht beobachtet werden. Aller Wahrscheinlichkeit nach reichte das vom Heißluftföhn erzeugte Temperaturintervall für einen spürbaren Effekt ebenfalls nicht aus.

Siliziumzenerdiode: Als weiteres Objekt untersuchen wir nun auch die Siliziumzenerdiode entsprechend der obigen Vorgehensweise, wobei wir uns hier allerdings besonders für die Sperrrichtung interessieren. Die oszillographisch aufgenommenen Bilder sind auch hier wieder nebenstehend abgebildet.



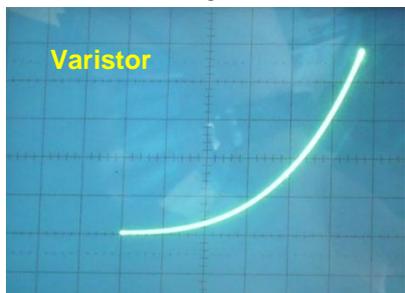
Für die Durchlassrichtung erhalten wir bei einer x-Achsenkala von 0.1V/SKE wie erwartet einen nahezu identischen Verlauf wie bei der gewöhnlichen Siliziumdiode. Lediglich die Diffusionsspannung U_{Dif} hat sich wegen des erhöhten Dotierungsgrades um einige Kommastellen auf einen Wert von etwa 0.74V erhöht.



Anders als bei der gewöhnlichen Siliziumdiode ist es uns hier nun möglich den hin zu kleineren Spannungen verschobenen Durchbruch im Sperrbetrieb zu beobachten. Anhand der Skalengröße von 1V/SKE messen wir dabei eine Zenerspannung von 6.8V. Dieser Wert weicht um 1.2V vom angegebenen Wert von 5.6V ab, wobei man allerdings sagen muss, dass auch Zenerdioden mit einer Zenerspannung von 6.8V im Handel erhältlich sind. Es ist also vorstellbar, dass die vorliegende Z-Diode im Laufe der Zeit bereits durch eine andere Z-Diode ersetzt wurde.

Wie schon bei der gewöhnlichen Halbleiterdiode konnte auch hier wieder die in der Vorbereitung beschriebenen Temperatureffekte nicht beobachtet werden.

Varistor: Da für den Varistor keine entsprechenden Kenngrößen ermittelt werden können, wie für die obigen Dioden, wollen wir die Strom-Spannungs-Abhängigkeit an dieser Stelle lediglich phänomenologisch einordnen. Wie das nebenstehende Diagramm zeigt, steigt der Strom wie erwartet nach einer exponentiellen Gesetzmäßigkeit, die wir in einem folgenden Aufgabenteil noch genauer untersuchen wollen, mit der ebenfalls steigenden Spannung an. Dabei ergibt sich sowohl in „Sperr- als auch in Durchlassrichtung“ ein symmetrischer Kurvenverlauf, der auch an dieser Stelle wieder keinerlei messbare Temperaturabhängigkeit gegenüber der Temperaturerhöhung durch den Heißluftföhn aufzeigt.



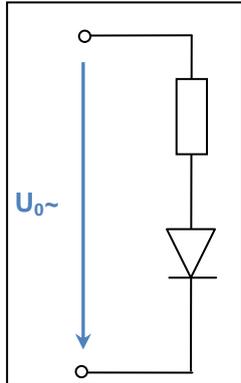
Bemerkung: Die vom Oszilloskop dargestellten Verläufe entsprachen aufgrund der internen Verschaltung des Gerätes nicht den uns gewohnten Darstellungen. Aus diesem Grund wurden die hier dargestellten Kurven durch bildbearbeitende Maßnahme nachträglich neu ausgerichtet.

8.2 Anwendungsbeispiele: Halbleiterdiode, Zenerdiode, Varistor

Im folgenden Abschnitt wollen wir nun auf einige wenige Anwendungsbeispiele für die hier kennengelernten Diodentypen und die dabei zu beachtenden Besonderheiten etwas näher eingehen. Dabei sollen die einfache Gleichrichterschaltung, eine Spannungsstabilisierung, sowie eine Schutzschaltung gegen Spannungsspitzen bei Spulenschaltungen konstruiert werden.

Gleichrichterschaltung: Ihr Hauptanwendungsgebiet finden gewöhnliche Halbleiterdioden vor allem in Schaltungen zur Gleichrichtung von zeitlich nicht konstanten Spannungen. An dieser Stelle wollen wir zur Klärung der grundsätzlichen Gegebenheiten lediglich eine Gleichrichterschaltung betrachten, die aus einer Halbleiterdiode und einem Arbeitswiderstand aufgebaut ist. Schließen wir also an die auf der nachfolgenden Seite dargestellte Schaltung die

zu gleichzurichtende Wechselspannung U an, so wird der Arbeitswiderstand nur dann belastet, wenn die Wechselspannung so gepolt ist, dass sich die Diode in Durchlassrichtung befindet und die angelegte Spannung oberhalb der Schwellspannung U_{Dif} liegt. Der genaue Arbeitspunkt wird dabei durch den Schnittpunkt zwischen der Diodenkennlinie und der Arbeitsgeraden bestimmt.

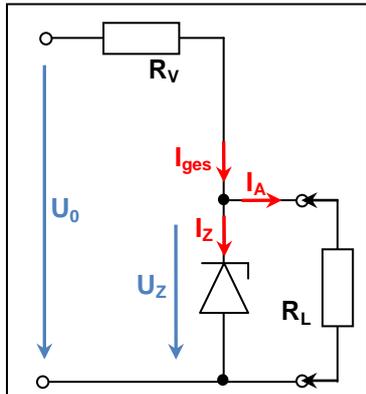


Für die Arbeitsgerade gilt nach *Formel 5.2.2* der Zusammenhang:

$$I(U) = -\frac{1}{R} \cdot U + \frac{U_0}{R} \quad \text{Formel 3.2.1A}$$

Hierbei ist R der Arbeitswiderstand, U_0 die Spannungsamplitude der angeschlossenen Spannungsquelle und U die jeweils an der Diode anliegende Spannung. Durch geeignete Wahl des Widerstandes muss der Arbeitspunkt also so gesetzt werden, dass dieser auf der Diodenkennlinie oberhalb der Schwellspannung aber unter der zur Verlustleistung P_{tot} gehörenden Spannung liegt.

Spannungsstabilisierung: Oftmals unterliegen Gleichspannungsquellen gewissen Spannungsschwankungen, die für etwaige Bauteile unerwünscht oder sogar schädlich sein können.



Um solche Schwankungen zu unterbinden, d.h. eine stabilisierte Spannungsquelle zu realisieren, behilft man sich oft mit einer Schaltung nebenstehender Art. Es sei an dieser Stelle aber darauf hingewiesen, dass solch eine Schaltung nur dann zweckmäßig ist, wenn der Lastwiderstand R_L eine weitgehend konstante Stromaufnahme aufweist. Grundgedanke dieser Schaltung ist, dass die Spannung im Lastkreis, also die Spannung über die Z-Diode, im Allgemeinen nicht über den Wert der Zenerspannung hinausgeht. Die Spannung im Arbeitskreis kann nach oben hin also stabilisiert werden.

Für Dimensionierung stellt sich vorrangig die Frage nach der im Arbeitskreis geforderten Spannung und damit nach der benötigten Zenerspannung U_Z . Weiterhin muss der Vorwiderstand R_V so dimensioniert werden, dass die Verlustleistung P_{tot} der Z-Diode im Normalbetrieb nicht erreicht wird.

Für den maximalen Strom I_{max} durch die Z-Diode gilt somit:

$$I_{max} = \frac{P_{tot}}{U_Z} \quad \text{Formel 3.2.2A}$$

Für den Betrieb muss der Stromwert I_Z durch die Z-Diode einen gewissen Wert betragen:

$$I_Z = I_{min} = 0,1 \cdot I_{max} \quad \text{Formel 3.2.3A}$$

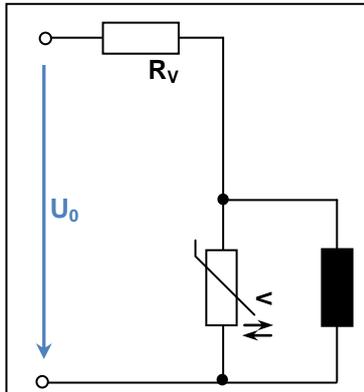
Der Wert für den minimalen Strom I_Z wurde an dieser Stelle lediglich nach einer gebräuchlichen Faustregel bestimmt. Einen genauen Wert erhalten wir aus dem Datenblatt der verwendeten Zenerdiode.

Für den Vorwiderstand R_V gilt somit ausgehend vom Gesamtstrom I_{ges} :

$$R_V = \frac{U_V}{I_{ges}} = \frac{U_0 - U_Z}{I_Z + I_A} = \frac{U_0 - U_Z}{I_Z + \frac{U_Z}{R_L}} \quad \text{Formel 3.2.4A}$$

Um die Schaltung auch nach unten weitgehend zu stabilisieren sollte die angelegte Spannung U_0 stets über der Zenerspannung liegen. Wird im Arbeitskreis beispielsweise eine Spannung von 5.0V gefordert, so verwenden wir in der Praxis eine Zenerdiode mit einer Durchbruchspannung U_Z von 5.1V ($P_{tot} \approx 0.5W$) und eine Betriebsspannung U_0 von 12.0V.

Induktionsschutz: Erfährt eine Spule einen plötzlichen Stromanstieg bzw. -abfall zum Beispiel während der Einschalt- und Ausschaltvorgänge, so induziert die Spule eine hohe Gegenspannung, die der Änderung des äußeren Stromes entgegen zu wirken versucht (Lenz'sches Gesetz).



In einer elektrischen Schaltung können diese Stromüberhöhungen bei gewissen Bauteilen zur Zerstörung führen. Aus diesem Grund ist es vorteilhaft diese Störströme durch günstige Beschaltungen zu vernichten. Oft wird hierzu eine gewöhnliche Halbleiterdiode (Freilaufdiode) parallel zur Spule geschaltet, die durch ihre Schwellspannung die Induktionsspannung ein Stückweit begrenzen.

Eine weitere Möglichkeit ergibt sich wie in nebenstehender Schaltskizze durch Verwendung eines Varistors anstelle der Diode. Im normalen Betrieb ist die über die Spule abfallende

Spannung relativ gering womit der Widerstand des Varistors groß ausfällt. Die Einflussnahme des Varistors ist nur gering. Erzeugt die Spule jedoch während des Ein- oder Ausschaltens einen kurzzeitig großen Strom fällt entsprechend der Kennlinie der Widerstand des Varistors ab, die Spule wird kurzgeschlossen und die zusätzlich auftretende elektrische Leistung in Wärmeenergie umgewandelt.

8.3 Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit eines Varistors

Im nächsten Schritt wollen wir nun die Kennlinie des Varistors durch punktweises Messen von Strom und dazugehöriger Spannung ermitteln. Über den hieraus erhaltenen Verlauf werden wir im Gegensatz zu weiter oben anschließend in der Lage sein auch quantitative Aussagen treffen zu können.

Für die Messung verwenden wir die ebenfalls in der Vorbereitung aufgezeigte Messschaltung mit den entsprechenden analogen Ampère- und Voltmetern.

Im Versuch ergaben sich so die folgenden Wertepaare:

Spannung [V]	Strom [mA]	Spannung [V]	Strom [mA]	Spannung [V]	Strom [mA]
0,0	0,000	4,5	1,900	9,0	12,000
0,5	0,045	5,0	2,400	9,5	14,000
1,0	0,110	5,5	3,100	10,0	16,500
1,5	0,210	6,0	3,900	10,5	20,000
2,0	0,350	6,5	4,800	11,0	23,000
2,5	0,520	7,0	5,800	11,5	27,000
3,0	0,750	7,5	7,000	12,0	31,000
3,5	1,050	8,0	8,400	12,5	36,000
4,0	1,400	8,5	10,000		

Im ersten Diagramm auf der folgenden Seite wurden die Messwerte zunächst direkt übereinander aufgetragen. Wir sehen auch hier wieder den erwarteten und weiter oben bereits bestätigten exponentiellen Verlauf der Kurve. Der Anschaulichkeit wegen wurde hier der dritte Quadrant mit den Messwerten aus dem ersten Quadranten ergänzt.

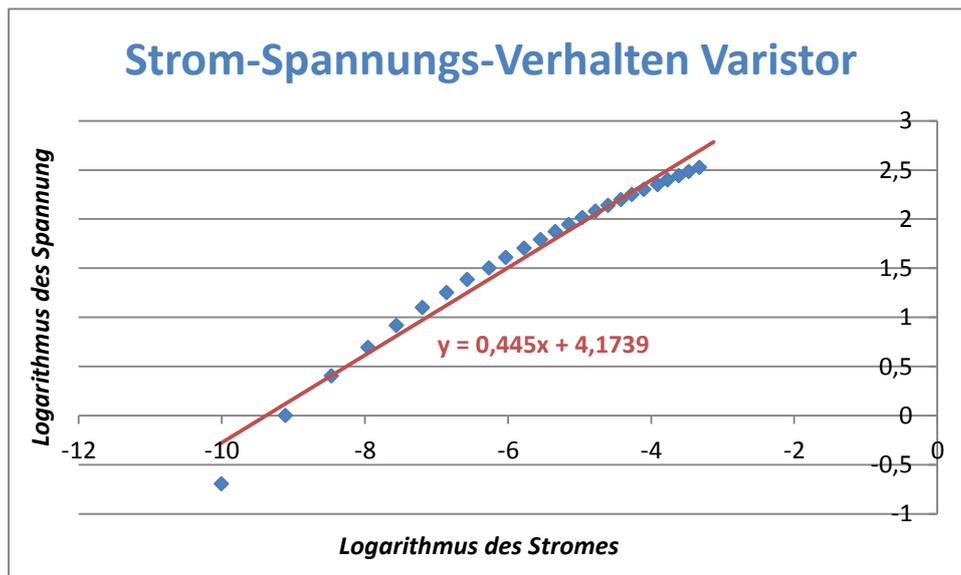
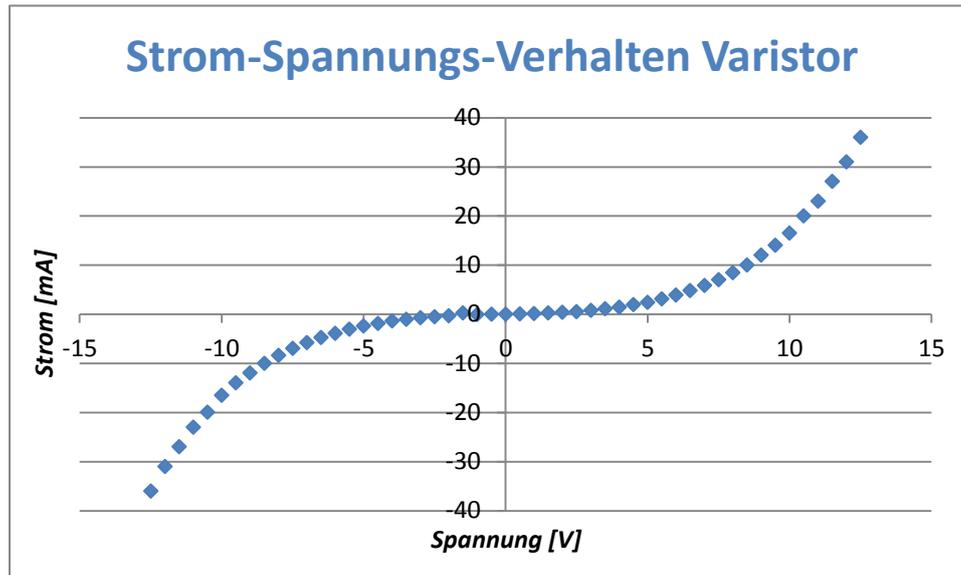
Aus der Vorbereitung erwarten wir nach Formel 4.5.1 einen Zusammenhang gemäß:

$$U(I) = c \cdot I^b$$

Formel 3.3.1A

Die nötige lineare Auftragung zur Bestimmung der Koeffizienten c und b ist im zweiten Diagramm aufgetragen. Die Angabe der beiden bestimmten Koeffizienten erfolgt auf der nächsten Seite nach den beiden Diagrammen.

Für die direkte Auftragung der Messwerte ergibt sich das folgende Diagramm:



Für die gesuchten Koeffizienten b und c erhalten mit Unterstützung von EXCEL:

$$b = 0,45 \pm 0,01 \quad \ln c = (4,17 \mp 0,09)\Omega \Rightarrow c = (64,72 \pm 5,82)\Omega$$

Da die hier verwendete Formel anscheinend in der Praxis keine Anwendung findet, konnte auch an dieser Stelle wieder kein Vergleich mit den Kenndaten handelsüblicher Varistoren durchgeführt werden. Da der Verlauf der Strom-Spannungs-Kurve jedoch mehrfach bestätigt werden konnte, wollen wir es damit auch belassen.

9 Die Tunneldiode

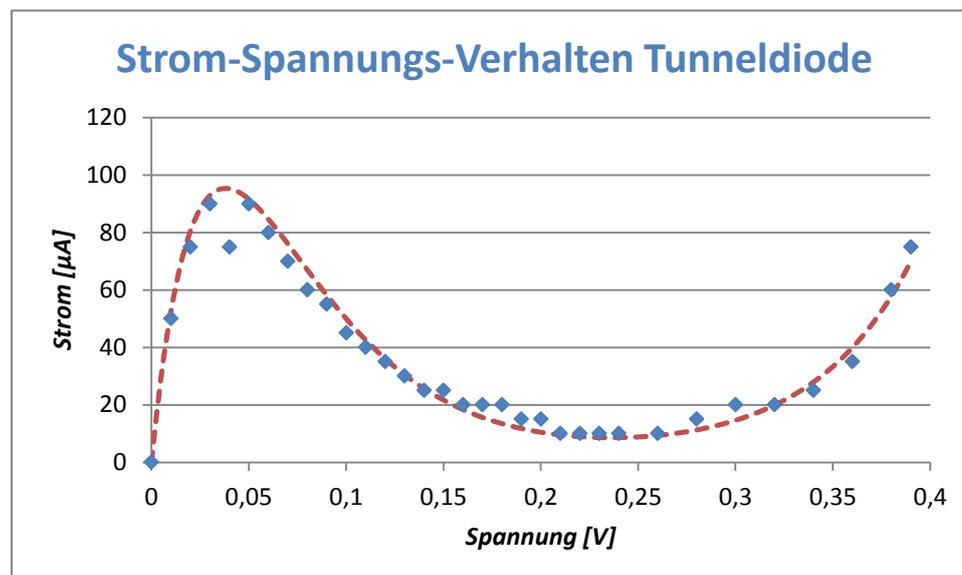
9.1 Punktweise Messung der I(U)-Abhängigkeit einer Tunneldiode

Als letztes Halbleiterelement wollen wir nun noch die in der Vorbereitung ausführlich besprochene Tunneldiode und deren Besonderheiten untersuchen. Hierzu bestimmen wir auch an dieser Stelle zunächst die Strom-Spannungs-Abhängigkeit punktweise mit Hilfe der speziell für die Tunneldiode konzipierten Messschaltung.

Dabei ergaben sich die folgenden Messwerte aus Spannung und Strom:

Spannung [V]	Strom [μ A]	Spannung [V]	Strom [μ A]	Spannung [V]	Strom [μ A]
0,00	0	0,11	40	0,22	10
0,01	50	0,12	35	0,23	10
0,02	75	0,13	30	0,24	10
0,03	90	0,14	25	0,26	10
0,04	75	0,15	25	0,28	15
0,05	90	0,16	20	0,30	20
0,06	80	0,17	20	0,32	20
0,07	70	0,18	20	0,34	25
0,08	60	0,19	15	0,36	35
0,09	55	0,20	15	0,38	60
0,10	45	0,21	10	0,39	75

Eingezeichnet in ein entsprechendes Diagramm ergibt sich so:



Im Diagramm sind die **blau** eingezeichneten Punkte die von uns bestimmten Messwerte, die **rote** Kurve hingegen entspricht einem fit-per-eye entsprechend einer genäherten analytischen Formel.

Die verwendete Formel ist dabei gegeben durch (Halbleiter-Bauelemente, K.-H. Löcherer):

$$I(U) = I_p \cdot \frac{U}{U_p} \cdot e^{1 - \frac{U}{U_p}} + I_S \cdot \left(e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) + G_e \cdot U$$

Formel 4.1.1A

Der **blau** eingefärbte Term entspricht hierbei dem Tunnelstrom, der **rot** eingefärbte Term dem gewöhnlichen Diffusionsstrom einer Halbleiterdiode und schließlich der **grüne** Term einem Überschussstrom infolge metallisch leitender Brücken durch die Sperrschicht hindurch.

Die innerhalb dieser Terme auftretenden Koeffizienten, die durch Anpassung an unsere Messwerte experimentell ermittelt wurden, sollen an dieser Stelle der Vollständigkeit halber nur genannt aber nicht näher erläutert werden.

Die Kenngröße I_p entspricht dem Defektelektronenstrom, I_s dem Sättigungsstrom der Halbleiterdiode im Sperrbetrieb, G einem Leitwert, U_p dem Spannungswert bei Erreichen des maximalen Tunnelstromes und U_T der Temperaturspannung, mit der beispielsweise die Temperatur des Halbleiters bestimmt werden kann.

Für diese Temperaturspannung U_T gilt mit der Boltzmann-Konstante k_B :

$$U_T = \frac{k_B \cdot T}{e}$$

Formel 4.1.2A

Per fit-per-eye-Methode erhalten wir für die oben verwendete Tunneldiode:

$$I_p = 95\mu A ; I_s = 0,027\mu A ; U_p = 38mV ; U_T = 50mV ; G = 10 \frac{1}{\Omega}$$

Entsprechend einiger Literaturangaben besitzt die hier verwendete Germaniumtunneldiode eine Peakspannung von 50mV und einen Sättigungsstrom $0,1\mu A$. Diese Werte decken sich ungefähr mit den hier annäherungsweise bestimmten Werten.

Für die Betriebstemperatur der Tunneldiode ergibt sich nach *Formel 4.1.2A*:

$$T = \frac{U_T \cdot e}{k_B} = \frac{1,6022 \cdot 10^{-19} C \cdot 50mV}{1,3807 \cdot 10^{-23} \frac{J}{K}} = 580,2K = 307,1^\circ C$$

Zusätzliche charakteristischer Punkte der Kennlinie ergeben sich aus dem Aufgabenblatt zu:

	gemessen	Theoriewert	Abweichung
Peakspannung U_p	35mV	50mV	-30%
Peakstrom I_p	95 μA	100mV	-5%
Talspannung U_v	235mV	300mV	-22%
Talstrom I_v	8,6 μA	10 μA	-14%

Die von uns aufgenommenen Messpunkte zeigen eine relativ geringe Streuung um die nach *Formel 4.1.1A* berechnete Kurve. Die Toleranzen zwischen den experimentell und theoretisch ermittelten charakteristischen Punkten liegen unserer Meinung nach ebenfalls im Rahmen der uns möglichen Messgenauigkeit. Einziger Bereich, der uns etwas stutzig machte, ergibt sich im Peak des Tunnelstroms. Dort fällt der Strom mit Erhöhung der Spannung zunächst ab, steigt dann aber erneut wieder an. Ursache für dieses Verhalten konnte auch nach längerer Suche, mehreren Wiederholungen und Austausch von Messgeräten und der Tunneldiode nicht gefunden werden. Aller Wahrscheinlichkeit nach handelt es sich hierbei um eine Wechselwirkung zwischen Tunneldiode und der Messschaltung.

Als weitere interessante Größe der Tunneldiode wollen wir an dieser Stelle zudem auch das Widerstandsverhalten in Abhängigkeit der angelegten Spannung untersuchen. Hierzu verwenden wir zwei unterschiedliche Berechnungsmethoden für den jeweiligen Widerstand:

(a) Berechnung punktuell nach dem Ohm'schen Gesetz:

$$R(U) = \frac{U}{I}$$

Formel 4.1.3A

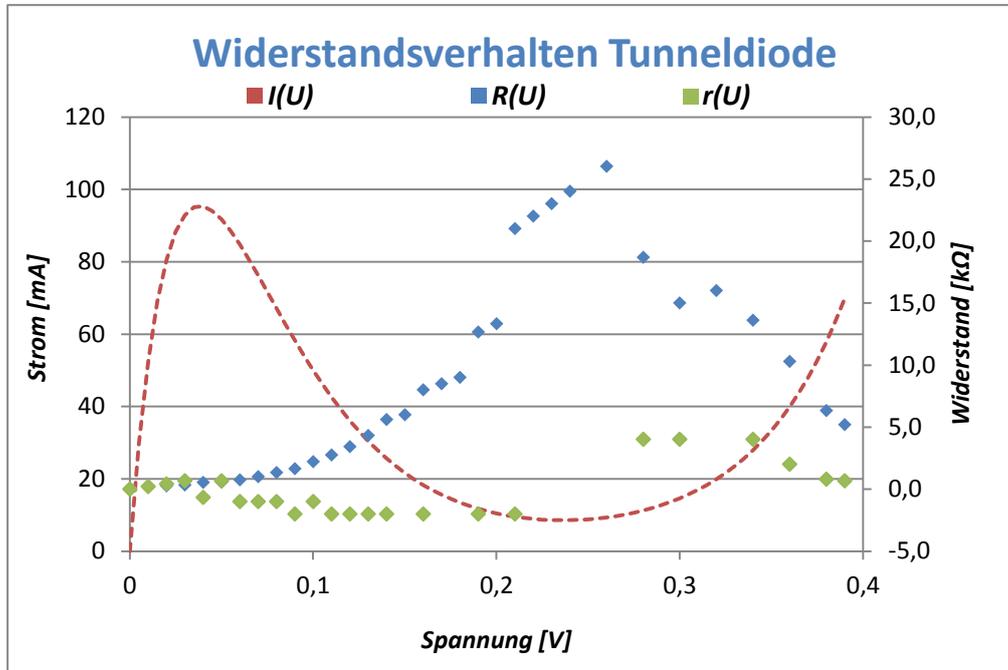
(b) Berechnung differentiell mittels Sekantensteigung:

$$r(U) = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_i - U_j}{I_i - I_j} ; i < j$$

Formel 4.1.4A

Die jeweils berechneten Werte zeichnen wir zur anschaulicheren Darstellung zusammen mit der theoretischen Kennlinie in ein gemeinsames Diagramm ein. Auf eine Angabe in tabellarischer Form wollen wir an dieser Stelle aus Gründen der Offensichtlichkeit verzichten.

Für das gesuchte Diagramm erhalten wir dann also:



Wir sehen an dieser Stelle einen deutlichen Unterschied zwischen den Messpunkten des ohm'schen Widerstandes (**blau**) und des differentiellen Widerstandes (**grün**). Weiterhin zeigt sich der für die Tunneldiode charakteristische negative differentielle Widerstand im Bereich zwischen Peak und Tal der Kennlinie, wohingegen der ohm'sche Widerstand durchgehend positiv ausfällt. Aus diesem Grund ist die Verwendung des ohm'schen Widerstandes im Allgemeinen an dieser Stelle weniger aussagekräftig als der differentielle Widerstand. Ihr jeweiliges Widerstandsmaximum, ob positiv oder negativ, erreichen beide Kurven im Bereich von 25mV...30mV.

Bemerkung: Da sich das Ampèremeter im geforderten Messbereich als zu unempfindlich herausstellte, konnten im Bereich des negativen differentiellen Widerstandes leider nur wenige Messwerte exakt aufgenommen werden (vgl. Messreihe).

9.2 Sprungverhalten des Diodenstroms

Wie in der Vorbereitung beschrieben kann es ab einem gewissen Werte des Arbeitswiderstandes dazu kommen, dass der Strom der Tunneldiode zwischen den Schnittpunkten von Arbeitsgerade und Kennlinie hin und her springt.

Im folgenden Versuch wollen wir dieses Verhalten nun phänomenologisch untersuchen, indem wir als Arbeitswiderstand den Innenwiderstand des Ampèremeters bei zwei unterschiedlichen Messbereichen heranziehen und die jeweilige Arbeitsgerade zusammen mit der gefitteten Diodenkennlinie in ein Diagramm einzeichnen.

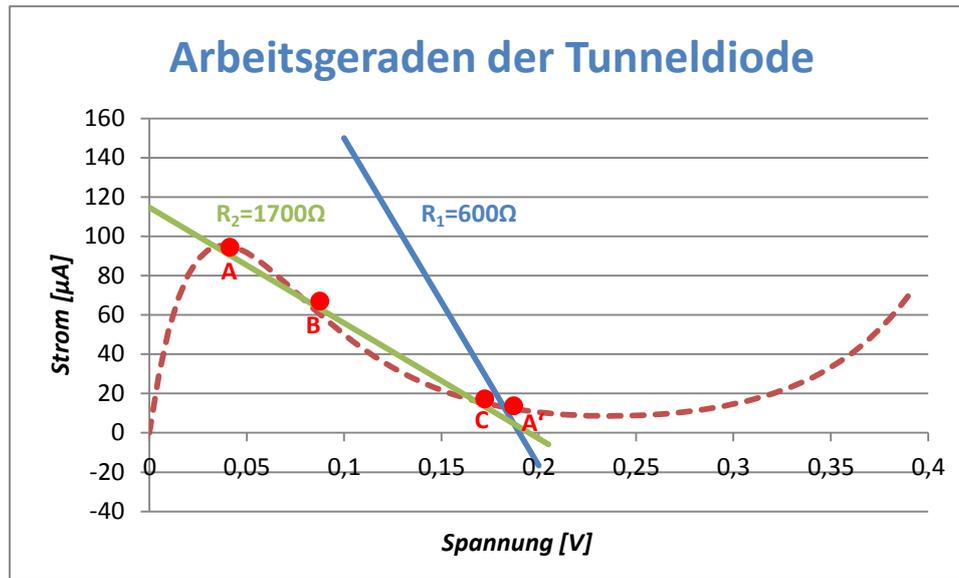
Nach *Formel 3.2.1A* gilt für die Arbeitsgerade der Zusammenhang:

$$I(U) = -\frac{1}{R} \cdot U + \frac{U_0}{R}$$

Formel 4.2.1A

Hierbei wurde der Betriebsspannung U_0 durch Messung ein Wert von 195mV zugeschrieben.

Für die Arbeitsgeraden der Innenwiderstände $R_1=600\Omega$ und $R_2=1700\Omega$ ergibt sich so:



Im Falle des Innenwiderstandes R_1 erhalten wir lediglich einen Schnittpunkt **A'** zwischen der Arbeitsgerade und der Kennlinie. Demzufolge erwarten wir an dieser Stelle auch keinerlei Sprungverhalten.

Erhöhen wir allerdings den Innenwiderstand durch Verkleinern des Messbereichs auf einen Wert von R_2 , so stellen wir plötzlich drei Schnittpunkt **A**, **B** und **C** fest. Hierbei sind lediglich die Zustände A und C stabil. B ist ein instabiler Zustandspunkt, der in Folge dessen im Betrieb nicht eingegangen sondern übersprungen wird. Dieses Sprungverhalten machte die Tunnelodiode lange Zeit zum schnellsten bekannten Schalter in der Elektrotechnik.

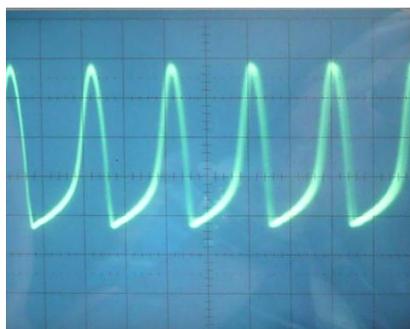
Für die beiden Sprungwerte des Stromes erhalten wir also theoretisch und experimentell:

	Theoretischer Wert	Experimenteller Wert	Abweichung
I_A	97,1µA	97µA	-0,1%
I_C	20,6µA	22µA	+6,8%

Damit konnten die theoretischen Zusammenhänge unerwartet gut im Experiment bestätigt werden. Leider konnte ein Hin- und Herspringen zwischen den beiden Punkten, was bei der anderen Gruppe bereits durch einen kleinen Lufthauch möglich war, nicht erzielt werden. Die hierzu einzustellende Toleranz ist im Allgemeinen einfach viel zu gering.

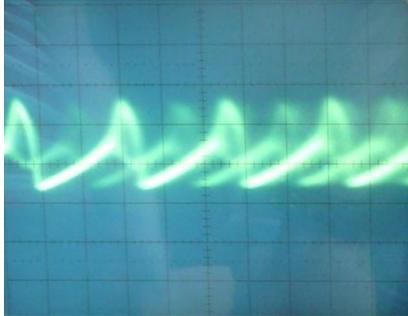
9.3 Anwendungsbeispiel: Hochfrequenzoszillator

Zu guter Letzt wollen wir als Anwendungsbeispiel nun noch den negativen differentiellen Widerstand der Tunnelodiode ausnutzen um damit das Oszillieren eines Hochfrequenzoszillators anzufachen. Hierzu schließen wir zunächst in Reihe zur Tunnelodiode eine weitere Spule und zur grafischen Darstellung der Schwingung über die Tunnelodiode das Oszilloskop an.



Erhöhen wir in diesem Zustand nun die von außen angelegte Spannung, so setzt mit Erreichen der Peakspannung U_p ein oszillierendes Verhalten entsprechend der nebenstehenden Grafik ein. Dies entspricht zunächst dem Schwingfall des Oszillators. Mit weiterer Erhöhung der Spannung kann zusätzlich auch der Kriechfall erzeugt werden. Die dazugehörige Grafik ist auf der folgenden Seite dargestellt. Der aperiodische Grenzfall wäre

theoretisch gesehen ebenfalls einstellbar, wofür aber die Spannung auf einen exakten Punkt eingestellt werden müsste, was in der Praxis jedoch schier unmöglich ist.



Zum Schluss wollen wir an dieser Stelle anhand des Schwingfalles noch die Frequenz der Schwingung bestimmen. Hierzu wurde die Zeitskala des Oszilloskops auf einen Wert von $0.5\mu\text{s}/\text{SKE}$ eingestellt.

Damit folgt für Periodendauer T und Frequenz f :

$$T \approx 0,95\mu\text{s} \Rightarrow f = \frac{1}{T} \approx 1,05\text{MHz}$$

Somit liegt der Wert wie gefordert im Definitionsbereich der Hochfrequenten Wellen von $1\text{MHz} \dots 30.0\text{MHz}$ und eignet sich mit entsprechenden Schaltungserweiterungen beispielsweise zum Einsatz in Mobil-, Radio- oder der Fernsehtechnik.