



ulm university universität
uulm

Grundpraktikum der Elektrotechnik

Versuch 8: Karl-Ferdinand-Braun-Versuch

Institut für Mikroelektronik
Universität Ulm



Grundpraktikum Elektrotechnik

Versuch 8: Karl-Ferdinand-Braun-Versuch

Inhaltsverzeichnis

1 Einführung	1
1.1 Halbleiter	1
1.2 Der pn-Übergang	3
1.3 Die pn-Diode	6
1.4 Weitere Diodentypen	10
1.5 Messautomatisierung	12
2 Vorbereitende Aufgaben	13
2.1 Diodenkennlinie	13
2.2 Schaltungen zur Messung von Kennlinien	13
2.3 Begrenzerschaltungen	14
2.4 Gleichrichterschaltungen	14
3 Versuchsdurchführung	14
3.1 Kennlinien von Ge- und Si-Dioden	14
3.2 Kennlinie einer Z-Diode	15
3.3 Begrenzerschaltungen	15
3.4 Graetz-Gleichrichter	15
3.5 Leuchtdioden	16

1 Einführung

In diesem Versuch stehen die technischen Eigenschaften von Dioden im Vordergrund, jedoch werden Anfangs die physikalischen Grundlagen erläutert, um ein Verständnis für die Funktionsweise dieser Halbleiterelemente zu schaffen.

Der Gleichrichteffekt der Halbleiter wurde 1874 vom späteren Nobelpreisträger Karl Ferdinand Braun entdeckt, dies war die Grundlage für die Entdeckung und Entwicklung der heutigen Dioden.

1.1 Halbleiter

Festkörper können in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Isolatoren haben bei allen Temperaturen einen sehr hohen elektrischen Widerstand.
- Leiter haben einen sehr geringen Widerstand, der jedoch bei wachsender Temperatur zunimmt, sie werden daher Kaltleiter genannt.
- Halbleiter haben bei tiefen Temperaturen einen hohen Widerstand, der bei höheren Temperaturen abnimmt, sie werden daher Heißleiter genannt.

Das weitaus wichtigste Material für die Herstellung von Dioden und Transistoren ist das Halbleitermaterial Silizium. Für die speziellen Verwendungszwecke sind auch Germanium, ebenfalls aus der IV. Gruppe des Periodensystems, sowie die sogenannten III-V-Verbindungen gebräuchlich. Die gängigsten Halbleitermaterialien zusammen mit typischen Anwendungen sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Übersicht über gängige Halbleiterbauelemente und Materialien.

Gruppe	Bauelement	Halbleiter
IV	Dioden, Photodioden, Phototransistoren, Solarzellen	Si, Ge
III-V	LED, Laserdioden, schnelle Dioden, Transistoren	GaAs, GaP, InGaAsP, InSb, InAs
II-VI	Photowiderstände (sichtbares Licht)	CdS, CdSe
IV-VI	Photowiderstände (Infrarot)	PbS, PbSe, PbTe
V-VI	Peltierelemente	Bi ₂ Te ₃

1.1.1 Eigenhalbleiter

Sehr reine halbleitende Materialien werden Eigenhalbleiter oder intrinsische Halbleiter genannt. Bei tiefen Temperaturen sind alle Valenzelektronen (Elektronen in den äußersten Orbitalen, die Bindungen eingehen können) durch kovalente Bindungen zwischen Nachbaratomen festgehalten. Die Elektronen können sich praktisch nicht bewegen, sodass die Leitfähigkeit gegen Null geht. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Wärmeenergie, wodurch die Elektronen immer stärker um ihre Ruhelage schwingen, bis sich einzelne Elektronen aus ihrer Bindung lösen. Sie stellen frei bewegliche Ladungsträger dar und

erhöhen die Leitfähigkeit des Materials. Das freie Elektron hinterlässt jedoch eine Fehlstelle, ein sogenanntes „Loch“, das nun ebenfalls als Ladungsträger betrachtet werden kann. Elektronen können von ihrem Platz auf eine Fehlstelle springen, was äquivalent zur Bewegung des Lochs in umgekehrter Richtung ist. Somit können auch Löcher durch den Festkörper wandern und einen Ladungstransport hervorrufen.

Legt man an einen Halbleiter eine Spannung an, so werden die Elektronen zum positiven Pol, die Löcher zum negativen Pol wandern. Elektronen und Löcher tragen damit zu einem Strom in gleicher Richtung bei. Löcher sind jedoch weniger beweglich als Elektronen, da ihre effektive Masse größer ist. Daher ist im Eigenhalbleiter der Elektronenstrom stets größer als der Löcherstrom. Bei Raumtemperatur ist die thermische Energie ausreichend, um eine große Anzahl freier Elektronen und Löcher in einem Eigenhalbleiter freizusetzen, dabei liegt die elektrische Leitfähigkeit zwischen der eines Leiters und der eines Isolators.

1.1.2 Störstellenhalbleiter

In den meisten Anwendungen verwendet man halbleitende Materialien, bei denen Fremdatome in das Kristallgitter eingebaut wurden, dieser Vorgang wird als „Dotierung“ bezeichnet. Die so entstehenden Halbleiter heißen Fehlstellenhalbleiter oder extrinsische Halbleiter. Wie im Folgenden gezeigt wird, werden durch die Dotierung zusätzlicher Ladungsträger in den Kristall eingebracht. Man unterscheidet zwei Dotierungsmöglichkeiten bei Halbleitern der IV. Gruppe:

- p-Dotierung durch Einbringen von Fremdatomen mit drei Valenzelektronen
- n-Dotierung durch Einbringen von Fremdatomen mit fünf Valenzelektronen

Bei der Dotierung nehmen die zugefügten Fremdatome Gitterplätze des Halbleiterkristalls ein. Bei der p-Dotierung besitzt jedes Fremdatom nur drei Valenzelektronen, daher kann eine der vier kovalenten Bindungen des vierwertigen Atoms nicht zustande kommen, es entsteht ein zusätzliches Loch. Gebräuchliche Elemente für die p-Dotierung sind Bor, Gallium und Indium. Bei der n-Dotierung können von den fünf Valenzelektronen der Fremdatome nur vier eine kovalente Bindung mit dem vierwertigen Halbleiter-Atom eingehen. Das fünfte Elektron ist nur schwach gebunden und wird leicht zu einem freien Leitungselektron. Typische Elemente für die n-Dotierung sind Antimon, Phosphor und Arsen. Da Fremdatome mit drei Valenzelektronen aus dem Kristallgitter Elektronen aufnehmen, werden sie auch Akzeptoren (p-Dotierung) genannt, analog heißen Fremdatome mit fünf Valenzelektronen auch Donatoren (n-Dotierung).

Das Dotieren hat zur Folge, dass bei Raumtemperatur die Zahl der Ladungsträger gegenüber dem Eigenhalbleiter stark erhöht wird. Sowohl der undotierte Halbleiter als auch die Dotieratome müssen in großer Reinheit vorliegen um den Grad der Dotierung und damit die gewünschten elektrischen Eigenschaften steuern zu können. Die durch Dotierung entstandenen freien Ladungsträger (Elektronen bei n-Dotierung, Löcher bei p-Dotierung) werden Majoritätsladungsträger genannt. Daneben existieren jedoch noch Minoritätsladungsträger (Löcher im n-dotierten, Elektronen im p-dotierten Material), welche durch thermische Anregung entstehen.

Für typische Dotierraten eines mit Fremdatomen dotierten Halbleiters sind die dadurch erzeugten Ladungsträger wesentlich zahlreicher als die Ladungsträger thermischen Ursprungs, dieses Verhältnis kann z.B. in n-leitendem Silizium eine Größenordnung von 10 000:1 erreichen. Da die Anzahl der durch Dotierung erzeugten Ladungsträger nicht

temperaturabhängig ist ändert sich der spezifische Widerstand eines solchen Störstellenhalbleiters über einen großen Temperaturbereich nur wenig. Steigt die Temperatur jedoch stark an, sodass die Anzahl der thermisch erzeugten Ladungsträger die durch Dotierung erzeugten Ladungsträger übertrifft, so wird der spezifische Widerstand stark temperaturabhängig und das Verhalten des Halbleiters gleicht dem des Eigenhalbleiters.

1.1.3 Rekombination

Verlässt in einem Halbleiter ein Valenzelektron mit ausreichender thermischer Energie seinen Gitterplatz, so werden zwei Ladungsträger erzeugt: ein Loch und ein freies Elektron. Die freien Elektronen und die Löcher bewegen sich ungeordnet durcheinander, somit fließt kein Nettostrom. Die Menge der thermisch erzeugten Elektron-Loch-Paare ist abhängig von der Temperatur und der Breite der Energielücke im Kristall. Stoßen ein freies Elektron und ein Loch zusammen, so wird das Elektron zu einem Valenzelektron und das Loch verschwindet, dieser Vorgang heißt Rekombination. Die Rekombinationsrate ist abhängig von der Anzahl der Löcher und freien Elektronen im Material, der Temperatur sowie der Anzahl der Störstellen in der Kristallstruktur.

1.1.4 Ladungsträgerbeweglichkeit

In Halbleitern ist die Ladungsträgerbeweglichkeit freier Elektronen μ_n größer als die der Löcher μ_p , in Silizium bei Raumtemperatur beträgt der Unterschied beispielsweise $\mu_n \approx 3\mu_p$. Der absolute Wert der Ladungsträgerbeweglichkeit wird durch die Temperatur und die Kristallstruktur beeinflusst. Störstellen und Verunreinigungen im Kristall behindern die Bewegung der Ladungsträger, weswegen es bei der Herstellung von Halbleitermaterialien auf möglichst perfekte Kristallstrukturen ankommt. Aus dem selben Grund ist die Beweglichkeit bei Eigenhalbleitern höher als bei Störstellenhalbleitern. Bei ansteigenden Temperaturen schwingen die Atome im Kristallgitter stärker, dadurch sinkt die Ladungsträgerbeweglichkeit.

1.1.5 Leitfähigkeit

Die Leitfähigkeit σ eines Halbleiters ist gegeben durch

$$\sigma = e(n\mu_n + p\mu_p) \quad (1)$$

mit der Elektronenladung e , den Elektronen- und Lochdichte n und p und den jeweiligen Ladungsträgerbeweglichkeiten μ_n und μ_p . Bei einem Eigenhalbleiter steigen die Ladungsträgerkonzentrationen mit steigender Temperatur stark an, da durch die größer werdende Wärmeenergie immer mehr Elektronen aus ihrer kovalenten Bindung gelöst werden. Dieser Effekt ist stärker als die Abnahme der Ladungsträgerbeweglichkeiten, sodass die Leitfähigkeit mit steigender Temperatur zunimmt, das Material ist ein Heißleiter.

1.2 Der pn-Übergang

Bei einem n-dotierten Halbleiter sind Donatoratome mit einem überzähligen Valenzelektron eingebaut. Entfernt sich nun das überschüssige Elektron vom Donatoratom, so lässt es ein positives Ion der Ladung $+e$ zurück. Dieses positive Ion ist unbeweglich, da es auf einem Gitterplatz festgehalten wird. Das heißt, ein Halbleiter des n-Typs ist mit festen

positiven Donator-Ionen und beweglichen negativen Elektronen besetzt. Umgekehrt besitzen p-dotierte Halbleiter feste negative Akzeptor-Ionen und bewegliche positive Löcher, beide Halbleiterarten sind in Abbildung 1 dargestellt.

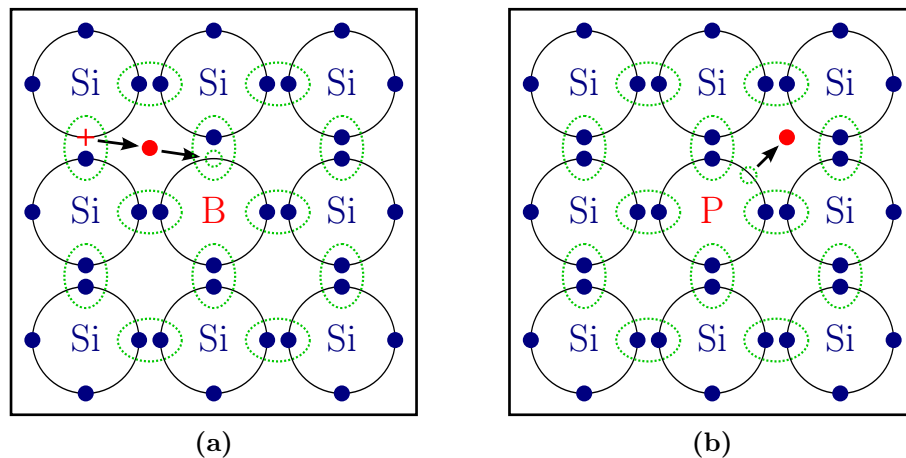


Abbildung 1: Dotierter Halbleiter mit (a) p-Dotierung und (b) n-Dotierung.

Wird an einen Halbleiterkristall mit homogener p- oder n-Dotierung eine Spannung angelegt, so fließt derselbe Strom unabhängig von der Polung der Spannung. Diese Bewegung wird Driftstrom genannt.

Verwenden wir nun ein Halbleitermaterial, das aus einem p- und einem n-dotierten Bereich in direktem Kontakt bestehen, so besteht ein großer Unterschied in der Leitfähigkeit je nach Polung der Spannung, der Halbleiterkristall wirkt als Gleichrichter. Die Grenzschicht zwischen p- und n-leitendem Material innerhalb eines Halbleiterkristalls bezeichnet man als pn-Übergang. Durch das wechselseitige Konzentrationsgefälle werden Löcher aus dem p-dotierten in den n-dotierten Halbleiter diffundieren und dort mit freien Elektronen rekombinieren, analog wandern die freien Elektronen des n-Halbleiters zu Löchern im p-Bereich. Diese Bewegung von Ladungsträgern in einem Konzentrationsgefälle wird Diffusionsstrom genannt.

Da jedoch die im Kristallgitter festsitzenden Donator- bzw. Akzeptor-Ionen ihren Platz nicht verlassen können, wirkt die sich aufbauende Spannung zwischen p-dotiertem und n-dotiertem Halbleiter der Diffusion der freien Ladungsträger entgegen, sie kommt zu einem Stillstand, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen Diffusionskraft und elektrischem Feld eingestellt hat. Die wechselseitige Diffusion betrifft daher nur ein relativ schmales Gebiet in der Nähe des pn-Übergangs, das sogenannte Raumladungs- oder Verarmungsgebiet. Innerhalb des Raumladungsgebietes entsteht auf Seite des n-Halbleiters eine ortsfeste positive Ladung, auf Seite des p-Halbleiters eine negative Ladung. Diese beiden Ladungen bilden eine Potentialbarriere, das Gebiet außerhalb der Raumladungszone ist dagegen elektrisch neutral.

1.2.1 Vorspannung in Sperrrichtung

Wird bei einem pn-Übergang der positive Pol einer Spannungsquelle mit der n-Zone und der negative Pol mit der p-Zone verbunden, so ist der Übergang in Sperrrichtung vorgespannt. Die freien Elektronen im n-Halbleiter werden zum positiven Pol, die freien Löcher im p-Material zum negativen Pol gezogen wie in Abbildung 2 gezeigt. Da die Majoritätsladungsträger vom pn-Übergang weggezogen werden, wird die Zahl der für die

Stromleitung zur Verfügung stehenden Ladungsträger stark verringert. Man bezeichnet das Raumladungsgebiet deshalb auch als Sperrschicht.

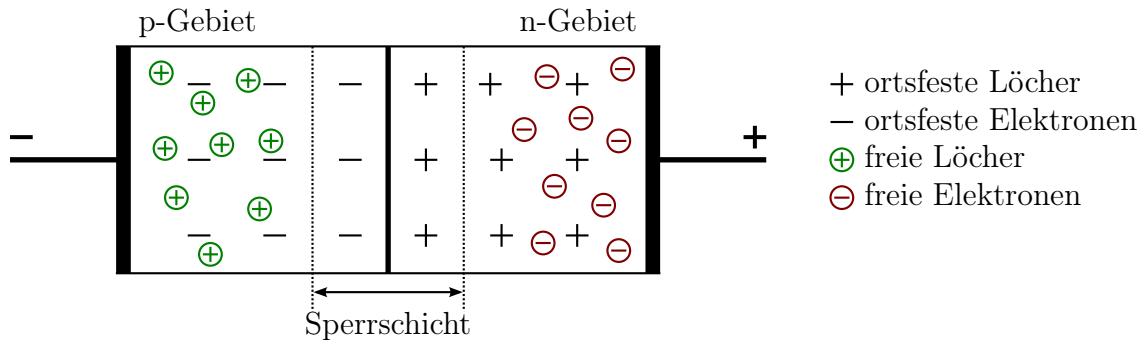


Abbildung 2: Ladungsverteilung am pn-Übergang in Sperrrichtung.

Die in Sperrrichtung angelegte Spannung ermöglicht es jedoch den Minoritätsladungsträgern, die Potentialbarriere zu überwinden, sodass ein kleiner Sperrstrom entsteht. Die Minoritätsladungsträger werden thermisch erzeugt, somit hängt der Sperrstrom hauptsächlich von der Temperatur des Kristalls ab.

Da sich beim in Sperrrichtung vorgespannten pn-Übergang außer den Minoritätsladungsträgern im Raumladungsgebiet keine beweglichen Träger befinden, ist dieses Gebiet nahezu ein Isolator. Auf beiden Seiten dieses Isolators befindet sich ein Gebiet mit einer hohen Konzentration an beweglichen Trägern, sodass die Anordnung als Kondensator betrachtet werden kann. Die Kapazität eines Kondensators ist antiproportional zur Distanz der leitenden Gebiete, dies ist auch hier der Fall. Daher ist die Kapazität des in Sperrrichtung vorgespannten pn-Übergangs abhängig von der Breite der Verarmungsschicht, die von der Vorspannung und Dotierung bestimmt wird.

1.2.2 Vorspannung in Durchlassrichtung

Wird der positive Pol einer Spannungsquelle mit dem p-Halbleiter und der negative Pol mit dem n-Halbleiter verbunden, so ist der pn-Übergang in Durchlassrichtung vorgespannt. Durch die angelegte Spannung werden die Löcher im p-Gebiet vom negativen Pol und die freien Elektronen im n-Gebiet vom positiven Pol angezogen wie in Abbildung 3 dargestellt. Die Majoritätsladungsträger der beiden Bereiche überschwemmen die Raumladungszone und werden nach dem Übertritt in den jeweils anderen Bereich zu Minoritätsladungsträgern. Dort rekombinieren sie, sodass ein Strom durch den Übergang fließen kann, der bei einer geringen Zunahme der Spannung rasch ansteigt. Dieser Strom wird als Durchlassstrom bezeichnet.

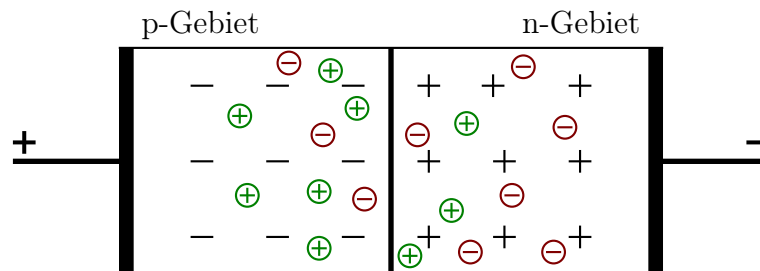


Abbildung 3: Ladungsverteilung am pn-Übergang in Durchlassrichtung.

1.3 Die pn-Diode

Eine pn-Diode ist ein pn-Übergang, bei dem sowohl für den p-dotierten wie auch für den n-dotierten Halbleiter das gleiche Grundmaterial (z.B. Si) verwendet wurde. Die Charakteristik einer Diode besteht in ihrer Kennlinie $I_D(U_D)$, wie in Abbildung 4 gezeigt. Wird die Spannung in Durchlassrichtung (grüner Bereich) von 0 V zu positiven Werten erhöht, fließt ein mit der Spannung exponentiell ansteigender Strom, der Widerstand nimmt dabei exponentiell ab.

Bei einer Spannungserhöhung in Sperrichtung misst man zunächst den niedrigen Sperrstrom (blauer Bereich), der Widerstand ist sehr groß.

Erhöht man die Sperrspannung weiter, steigt der Sperrstrom oberhalb der sogenannten Durchbruchspannung plötzlich rasch an (roter Bereich). In der Nähe der Durchbruchspannung werden die Minoritätsladungsträger so stark beschleunigt, dass sie bei Zusammenstößen mit Atomen im Kristallgitter kovalente Bindungen auftrennen und dadurch weitere Ladungsträger erzeugen. Diese Ladungsträger können nun ihrerseits weitere Bindungen auftrennen, sodass eine lawinenartige Vermehrung der Ladungsträger erfolgt. Beim einem derartigen Lawinendurchbruch in Sperrichtung kann der Strom so groß werden, dass das Halbleiterelement zerstört wird, wenn dieser nicht begrenzt wird.

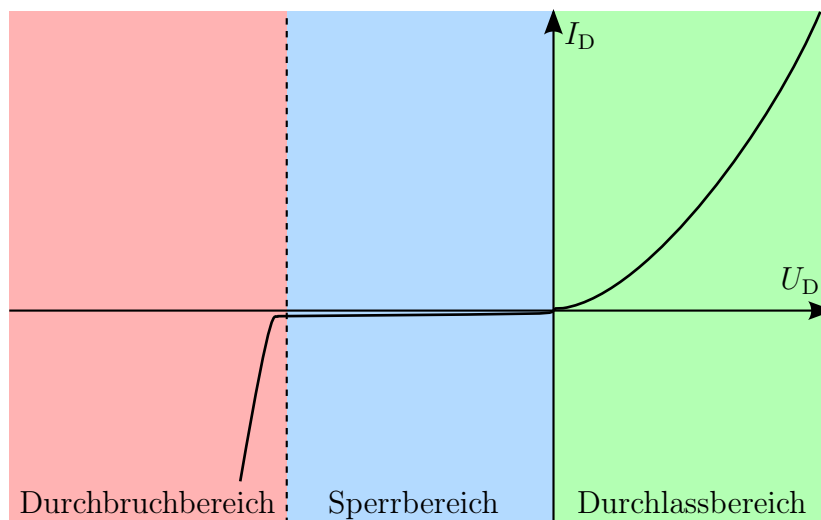


Abbildung 4: Die verschiedenen Bereiche in der Kennlinie einer Diode.

Für die beiden gebräuchlichsten Halbleitermaterialien Ge und Si bestehen charakteristische Unterschiede in der Kennlinie: Bei Ge-Dioden sind Sperrstrom und Durchlassstrom etwa 10 mal so groß wie für Si-Dioden. Dadurch wird auch die Schwellenspannung einer Si-Diode Si mit ca. $U_S = 0.6 \text{ V}$ etwa doppelt so groß wie bei einer Ge-Diode mit $U_S = 0.3 \text{ V}$.

1.3.1 Ideale Diodenkennlinie im Durchlassbereich

Für die (ideale) Kennlinie einer Diode im Durchlassbereich gilt nach der Shockleyschen Diodentheorie:

$$I_D = I_S \cdot \left(e^{\frac{U_D}{U_T}} - 1 \right) \quad (2)$$

mit dem Sättigungssperrstrom I_S und der Temperaturspannung U_T , die gegeben ist durch

$$U_T = \frac{k_B T}{q} = 26 \text{ mV (bei Zimmertemperatur)}. \quad (3)$$

mit der Boltzmann-Konstante k_B , der Temperatur T und der Elementarladung q . Für $U > U_T$ ist $I \gg I_S$. Dann kann die Kennlinie der Diode folgendermaßen vereinfacht werden:

$$I_D = I_S \cdot e^{\frac{U_D}{U_T}} \quad (4)$$

Durch die Vernachlässigung von I_S erhält man in der halb-logarithmischen Darstellung der idealen Kennlinie eine Gerade.

1.3.2 Reale Diodenkennlinie

Bei einer realen Diodenkennlinie gibt es einige Abweichungen von der idealen Kennlinie:

- die Bahnwiderstände reduzieren die Steigung im Durchlassbereich,
- die Durchbruchspannung U_{BR} begrenzt die maximal mögliche Sperrspannung,
- Oberflächeneffekte erhöhen den Sättigungsstrom und verformen die Kennlinie in der Nähe des Nulldurchganges.

Im Durchlassbereich weichen die Kennlinien bei großen Strömen deutlich von der in (4) gegebenen Geradenform bei halblogarithmischer Darstellung ab, da ein merklicher Spannungsabfall an den Bahnwiderständen auftritt, die durch einen Serienwiderstand R_B beschrieben werden können, daraus folgt für die äußere Diodenspannung U_D

$$U_D = U_{D'} + I_D R_B \quad (5)$$

mit der inneren Diodenspannung $U_{D'}$.

Außerdem ist bei kleinen Strömen eine weitere Abweichung der Steigung der realen Diodenkennlinie von der idealen Kennlinie zu sehen, diese wird mit dem Emissionskoeffizienten $n \approx 1 \dots 2$ beschrieben, der vom Material der Diode und dem Herstellungsprozess abhängt.

Zunächst soll der Einfluss des Emissionskoeffizienten n betrachtet werden, der Serienwiderstand R_B wird zunächst vernachlässigt. Abbildung 5 zeigt die Kennlinien mit und ohne Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten in halblogarithmischer Darstellung. An einem beliebigen Punkt i der Kennlinie unter Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten ist der Strom I_i gegeben durch

$$I_i = I_S \cdot e^{\frac{U_i}{n U_T}} \quad (6)$$

$$\ln \frac{I_i}{I_S} = \frac{U_i}{n U_T} \quad (7)$$

Betrachtet man nun die Differenz aus zwei Punkten I_1 und I_2 nach (7) kann n folgendermaßen errechnet werden:

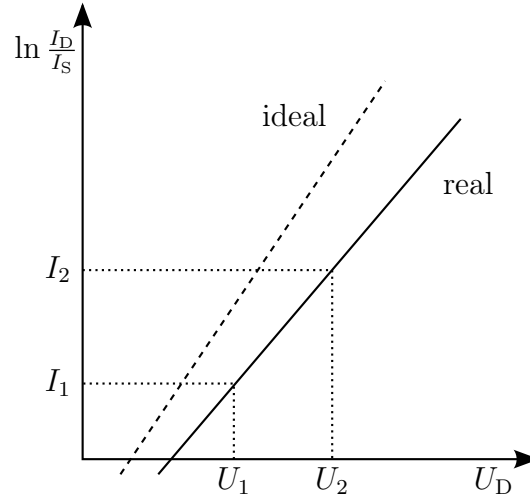


Abbildung 5: Kennlinie einer Diode mit und ohne Berücksichtigung des Emissionskoeffizienten n .

$$\ln \frac{I_2}{I_S} - \ln \frac{I_1}{I_S} = \frac{U_2}{nU_T} - \frac{U_1}{nU_T} \quad (8)$$

$$\ln \frac{I_2}{I_1} = \frac{U_2 - U_1}{nU_T} \quad (9)$$

$$n = \frac{U_2 - U_1}{U_T \cdot \ln \frac{I_2}{I_1}} \quad (10)$$

Die Diodenkennlinie unter zusätzlicher Berücksichtigung des Bahnwiderstandes R_B ist in Abbildung 6 dargestellt.

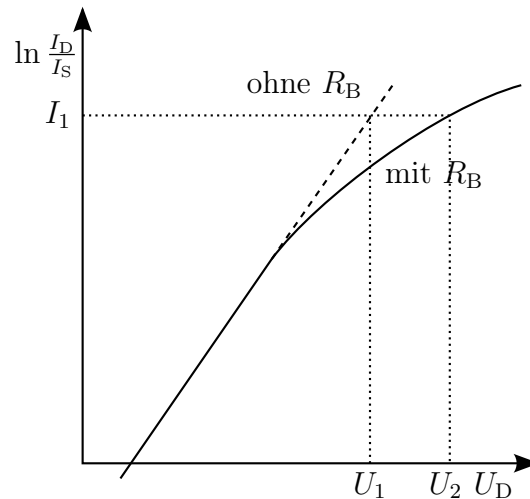


Abbildung 6: Kennlinie einer Diode mit und ohne Berücksichtigung des Bahnwiderstandes R_B .

Hieraus lässt sich R_B berechnen. Für den Punkt auf der Gerade ohne Berücksichtigung von R_B ergibt sich:

$$I_1 = I_S \cdot e^{\frac{U_1}{nU_T}} \quad (11)$$

$$\ln \frac{I_1}{I_S} = \frac{U_1}{nU_T} \quad (12)$$

Für den Punkt auf der Geraden mit Berücksichtigung von R_B ergibt sich:

$$I_1 = I_S \cdot e^{\frac{U_2 - I_1 R_B}{nU_T}} \quad (13)$$

$$\ln \frac{I_1}{I_S} = \frac{U_2 - I_1 R_B}{nU_T} \quad (14)$$

Durch Gleichsetzen von (12) und (14) folgt daraus folgt für R_B :

$$R_B = \frac{U_2 - U_1}{I_1} \quad (15)$$

1.3.3 Die Diode im Netzwerk

Wird eine Diode über einen Widerstand R an eine Gleichspannung U_0 angeschlossen wie in Abbildung 7 dargestellt, so stellt sich ein stabiler Arbeitspunkt ein. Nach der Maschenregel gilt:

$$U_0 = I \cdot R + U_D \rightarrow I = -\frac{U_D}{R} + \frac{U_0}{R} \quad (16)$$

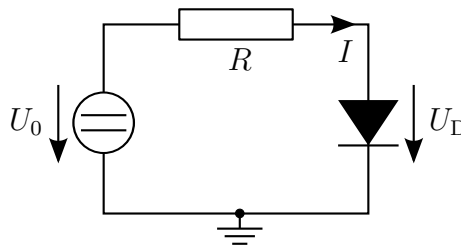


Abbildung 7: Die Diode im Netzwerk zur Bestimmung des Arbeitspunktes.

Diese Gleichung stellt die Arbeitsgerade des Netzwerkes dar, sie ist gemeinsam mit der Diodenkennlinie in der Strom-Spannungs-Charakteristik in Abbildung 8 eingetragen. Die Schaltung wird sich im Betrieb so einstellen, dass beide Gleichungen erfüllt sind, dies ist im Schnittpunkt der Arbeitsgeraden und der Diodenkennlinie der Fall, dieser Punkt wird daher auch Arbeitspunkt der Schaltung genannt.

Werden nur kleine Änderungen von Strom und Spannung um den Arbeitspunkt herum betrachtet, lässt sich die Diodenkennlinie durch eine Gerade annähern wie sie in Abbildung 8 in rot dargestellt ist. Sie kann die Kennlinie bei kleinen Signalschwankungen näherungsweise ersetzen. Dieser Vorgang wird Linearisierung oder Kleinsignalanalyse genannt und vereinfacht eine Netzwerkanalyse stark, da alle Bauteile als lineares Element betrachtet werden. Die Tangente im Arbeitspunkt beschreibt den differentiellen Leitwert g_{diff} im Arbeitspunkt, der differentielle Widerstand r_{diff} im Arbeitspunkt kann durch den Kehrwert berechnet werden.

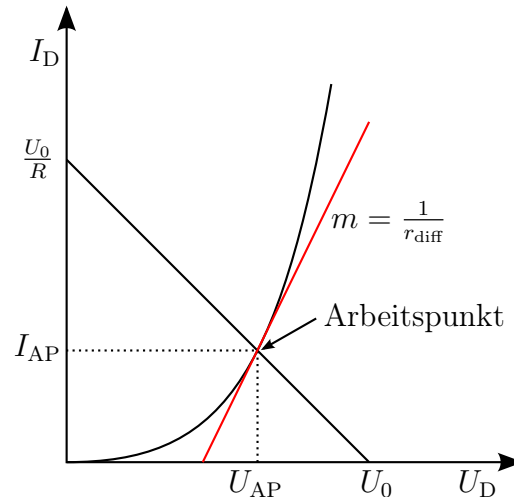


Abbildung 8: Diodenkennlinie und Arbeitsgerade und der daraus resultierenden Linearisierung im Arbeitspunkt.

1.4 Weitere Diodentypen

1.4.1 Zener-Diode

Zener-Dioden, auch Z-Dioden genannt, sind Dioden mit genau spezifizierter Durchbruchspannung, die im Gegensatz zu pn-Dioden für diesen Betrieb ausgelegt und spezifiziert sind. In Durchlassrichtung verhalten sie sich dagegen wie normale Dioden. Die Durchbruchspannung wird durch eine spezielle Dotierung mit geringer Sperrschichtdicke eingestellt, Z-Dioden sind mit Durchbruchspannungen von 3 V bis 300 V erhältlich. Ihr Schaltsymbol ist in Abbildung 9 dargestellt. Beim Zener-Durchbruch wird die von außen angelegte Feldstärke in der Sperrschicht so groß, dass Valenzelektronen aus ihren Bindungen gerissen werden und als Leitungselektronen auftreten. Beim Erreichen der Durchbruchspannung steigt der Sperrstrom steil an, der differentielle Widerstand sinkt erheblich. Da eine große Stromänderung nur eine kleine Spannungsänderung zur Folge hat, eignet sich eine Z-Diode zur Spannungsbegrenzung und -stabilisierung einer Schaltung.

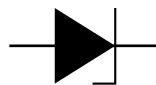


Abbildung 9: Schaltsymbol einer Zenerdiode.

1.4.2 Kapazitätsdiode

Wie bereits in Abschnitt 1.2.1 erklärt, verhält sich die Diode in Sperrichtung wie ein Kondensator, die Kapazität nimmt dabei mit zunehmender Sperrspannung ab. Durch eine geeignete Dotierung können so genannte Kapazitätsdioden hergestellt werden, die diesen Effekt besonders ausgeprägt zeigen, ihr Schaltsymbol ist in Abbildung 10 dargestellt. Die Maximalkapazität beträgt je nach Typ 5 pF bis 300 pF, das Verhältnis zwischen Minimal- und Maximalkapazität kann bis zu 10:1 erreichen.

Aufgrund ihrer hohen Güte bis ins UHF-Gebiet eignen sich Kapazitätsdioden zur Realisierung von Schwingkreisen mit spannungsgesteuerter Resonanzfrequenz z.B. in Radios oder Mobiltelefonen.

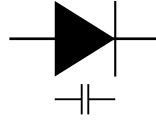


Abbildung 10: Schaltsymbol einer Kapazitätsdiode.

1.4.3 pin-Diode

Bei pin-Dioden wird zwischen den hochdotierten p- und n-Gebieten eine undotierte (intrinsische) Zwischenschicht eingefügt. Somit kommt es beim Anlegen einer Spannung in Sperrichtung zu einer größeren Raumladungszone als bei einer normalen pn-Diode, diese Zone enthält nur wenige freie Ladungsträger und ist somit hochohmig.

Bei Polung in Durchlassrichtung wird die i-Zone von beiden Seiten mit Ladungsträgern überschwemmt, in diesem Gebiet ist aufgrund der Reinheit jedoch die Lebensdauer τ der Ladungsträger besonders hoch, sodass die Diode auch dann leitend bleibt, wenn nur kurze Spannungspulse mit $t_p \ll \tau$ angelegt werden. Sie wirkt dann wie ein ohmscher Widerstand, dessen Widerstandswert proportional zum mittleren Strom $\overline{I_D}$ ist. Daher kann eine pin-Diode als gleichstromgesteuerter Wechselspannungswiderstand oder Hochfrequenzschalter eingesetzt werden. Zudem erreicht eine pin-Diode durch die i-Schicht ein besseres Durchlassverhalten und Spannungsfestigkeit für hohe Spannungen, sie kann daher als Gleichrichterdiode oder Schutzdiode für Hochspannungsanwendungen verwendet werden.

1.4.4 Leuchtdiode

Leuchtdioden (kurz LEDs von englisch *light-emitting diode*), auch Lumineszenzdioden genannt, sind spezielle pn-Dioden, die in Durchlassrichtung betrieben werden, sodass eine starke Rekombination auftritt. Die dabei frei werdende Energie wird bei Si- und Ge-Halbleitern größtenteils in Wärme umgesetzt, während III-V-Verbindungshalbleiter wie GaAs oder GaP einen Teil der Energie in Form von Photonen (Lichtquanten) freisetzen. GaAs-Dioden emittieren im Infraroten ($\lambda = 900 \text{ nm}$), GaP-Dioden im Gelb-Grünen ($\lambda = 555 \text{ nm}$). Dazwischen liegende Spektrallinien lassen sich durch Mischkristalle der beiden Halbleiter erzeugen. Das Schaltsymbol einer LED ist in Abbildung 11 dargestellt.

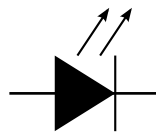


Abbildung 11: Schaltsymbol einer LED.

1.4.5 Photodiode

Bei einer Photodiode (auch Fotodiode) handelt es sich um eine Halbleiterdiode, die sichtbares Licht in elektrischen Strom umwandelt, ihr Schaltsymbol ist in Abbildung 12 dargestellt. Dies erfolgt durch den inneren Photoeffekt der Diode, der an einem pn- oder pin-Übergang stattfindet. Treffen dort Photonen ausreichender Energie auf die Diode, so werden dort Ladungsträger erzeugt.

Im Kurzschlussbetrieb erzeugen diese Ladungsträger einen Photostrom, der über große Bereiche proportional zum Lichteinfall ist, in diesem Modus kann die Diode zur Helligkeitsmessung oder Übertragung von Informationen verwendet werden. Wird die Photodiode dagegen in Vorwärtsrichtung betrieben dient sie als Photoelement und liefert elektrische Energie, dies wird unter anderem in Solarzellen ausgenutzt.

Photodioden für sichtbares Licht bestehen häufig aus Silizium, für Infrarot kommt oft Germanium zur Verwendung, in speziellen Ausführungen können Photodioden auch IR-, UV- oder Röntgenstrahlen umwandeln.

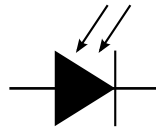


Abbildung 12: Schaltsymbol einer Photodiode.

1.5 Messautomatisierung

Für die Messungen der Diodenkennlinien können Sie auf ein bereitgestelltes *MATLAB*-Skript zur Messautomatisierung zurückgreifen, das die Messwerte von zwei per USB angeschlossenen Multimetern ausliest und in eine *MATLAB*-Variable und wahlweise in eine CSV-Datei schreibt. Sie können das Skript mit dem Namen *read_multimeter.m* im Moodle-Portal im Ordner des Versuches herunterladen.

Zur korrekten Funktionalität des Skriptes müssen zunächst die COM-Ports der angeschlossenen Multimeter bestimmt werden. Verbinden Sie hierzu zwei Multimeter des Typs *Agilent U1232A* mit den bereitliegenden USB-Kabeln mit Ihrem Messcomputer. Starten Sie anschließend den Windows Geräte-Manager und überprüfen Sie, ob dort unter Anschlüsse (COM & LPT) zwei Geräte *Proflific USB-to-Serial Comm Port* aufgeführt sind. Sollte dies nicht der Fall sein oder sollte einer der Ports mit einem gelb hinterlegten Ausrufezeichen versehen sein, probieren Sie die Multimeter an einen anderen USB-Anschluss anzuschließen. Tauchen beide Geräte als funktionsfähig im Geräte-Manager auf, notieren Sie sich die jeweiligen Nummern der COM-Ports.

Legen Sie ein Arbeitsverzeichnis für diesen Versuch an und kopieren Sie das Skript in diesen Ordner. Navigieren Sie in *MATLAB* in dieses Arbeitsverzeichnis. Die Messung lässt sich nun durch Eingabe folgenden Befehls starten:

```
data_XXX=read_multimeter('COM1','COM2');
```

Dabei müssen die Bezeichnungen 'COM1' und 'COM2' durch die jeweiligen Geräteschnittstellen ersetzt werden. *data_XXX* enthält nach Abschluss des Skriptes die eingelesenen Werte als Array, der Variablenname *data_XXX* kann und sollte dabei für jede Messung neu vergeben werden, um keine Werte zu überschreiben.

Zusätzlich können die Messwerte auch als CSV-Datei exportiert werden, hierzu wird beim Start des Skriptes ein Dateiname abgefragt. Wird dieser angegeben, findet ein CSV-Export statt, wird der Dateiname leer gelassen, wird keine CSV-Datei generiert. Die CSV-Datei benötigen sie ausschließlich, wenn Sie die Datenauswertung nicht in *MATLAB*, sondern in einem anderen Programm, z.B. *Excel*, vornehmen möchten.

Anschließend befindet sich das Skript im Wartezustand, durch Drücken der Enter-Taste (leere Eingabe) wird ein weiterer Messwert aufgenommen. Nach Abschluss der letzten

Messung kann durch eine beliebige Eingabe und anschließende Bestätigung mit der Enter-Taste das Skript beendet und die Messwerte gespeichert werden.

2 Vorbereitende Aufgaben

Bitte bearbeiten Sie die Vorbereitungsfragen sorgfältig vor dem Praktikum, da die Ergebnisse für eine erfolgreiche Bearbeitung der Versuche notwendig sind. Die Antworten sind als Bestandteil des Protokolls am Versuchsende abzugeben. Sollten Sie noch offene Fragen haben, können Sie diese Ihrem Tutor während dem Kolloquium stellen.

Zu einer sorgfältigen Vorbereitung gehört es ebenfalls, eine Vorlage für das Versuchsprotokoll vorzubereiten, sodass Sie nur noch Messwerte und Ergebnisse ergänzen müssen, um zu gewährleisten, dass Sie den Versuch im vorgesehenen Zeitrahmen erfolgreich abschließen können.

2.1 Diodenkennlinie

Wie unterscheidet sich der Verlauf einer idealen Diodenkennlinie ohne die Vernachlässigung von $-I_S$, von der vereinfachten Kennlinie? Beschreiben Sie die Unterschiede qualitativ.

Berechnen Sie die Diodenspannung $U_{D,\text{grenz}}$ in Abhängigkeit von der Temperaturspannung U_T , unterhalb derer sich die Vereinfachung als Fehler größer 1 % auswirkt. Vernachlässigen Sie hierfür den Bahnwiderstand R_B und den Emissionskoeffizienten n .

2.2 Schaltungen zur Messung von Kennlinien

Die Messschaltungen für pn-Dioden im Durchlass- bzw. Sperrbereich sind in Abbildung 13a und 13b dargestellt.

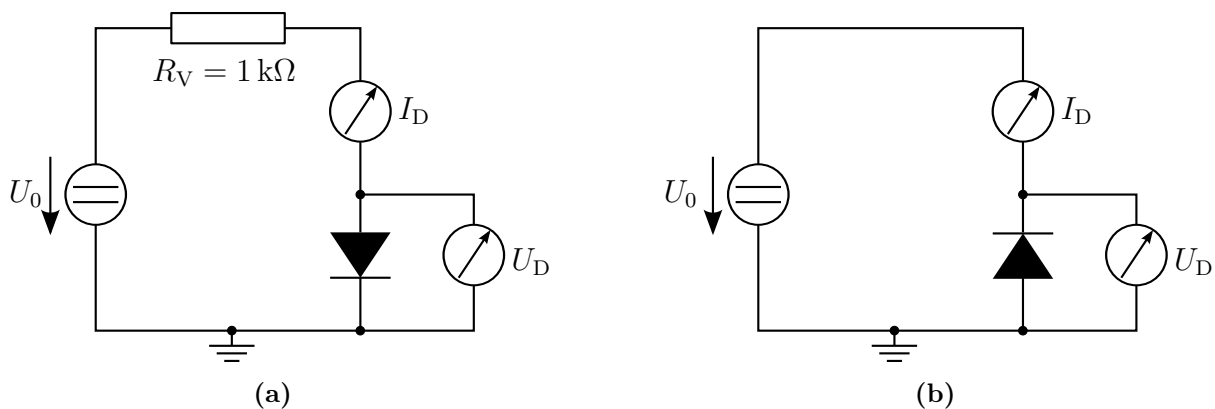


Abbildung 13: Messaufbau für die Kennlinienbestimmung im (a) Durchlassbereich und (b) Sperrbereich.

Erklären Sie, warum für die beiden Bereiche verschiedene Messschaltungen verwendet werden müssen und die Funktion des Vorwiderstandes R_V in Abbildung 13a.

Wie können Sie den Messaufbau aus Abbildung 13a modifizieren, wenn Ihnen ausschließlich Spannungsmessgeräte zur Verfügung stehen, Sie aber dennoch die Diodenkennlinie aufnehmen möchten?

2.3 Begrenzerschaltungen

Erklären Sie die Funktion der Begrenzerschaltung nach Abbildung 14 für eine variable Eingangsspannung U_{in} von -15 V bis 15 V und skizzieren Sie die Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung $U_{\text{out}}(U_{\text{in}})$.

Mit welcher einfacheren Schaltung, die nur mit einer Diode auskommt, können Sie die gleiche Charakteristik erzielen? Skizzieren Sie die Schaltung.

2.4 Gleichrichterschaltungen

Erklären Sie die Funktion des Brückengleichrichters nach Abbildung 15 ohne Lastkapazität C_L . Was sind die Vorteile und Nachteile eines solchen Gleichrichters gegenüber einem Einweggleichrichter bestehend aus einer einzelnen Diode?

3 Versuchsdurchführung

3.1 Kennlinien von Ge- und Si-Dioden

Nehmen Sie zunächst die Kennlinien einer Ge- und einer Si-Diode im Durchlassbereich auf. Da die im Praktikum verwendeten Multimeter *Agilent U1232A* im Bereich von $600\text{ }\mu\text{A}$ bis 10 mA sehr ungenaue Messwerte ausgeben müssen Sie stattdessen die Schaltung aus Vorbereitungsaufgabe 2.2 verwenden, bei der Sie die Messschaltung aus Abbildung 13a für die Spannungsmessung angepasst haben. Verwenden Sie auf alle Fälle einen Vorwiderstand $R_V = 1\text{ k}\Omega$, da die Dioden sonst zerstört werden können. Verwenden Sie Kanal *CH1* oder *CH2* der Spannungsquelle und achten Sie auf einen maximalen Diodenstrom von 20 mA . Bei einem Vorwiderstand $R_V = 1\text{ k}\Omega$ bedeutet dies, dass Sie maximal eine Spannung von 20 V anlegen dürfen. Sollten Sie mit dem Aufbau unsicher sein, sprechen Sie Ihren Betreuer an.

Um die Messungen zu beschleunigen, sollten Sie das automatisierte Messskript, das in Abschnitt 1.5 vorgestellt wurde, verwenden. Nehmen Sie pro Diode mindestens 30 Messwerte auf.

Nehmen Sie anschließend die Kennlinien der beiden Diodentypen im Sperrbereich unter Verwendung des Messaufbaus aus Abbildung 13b auf. Stellen Sie das Multimeter dabei auf den Messbereich μA . Achten Sie darauf, dass maximal $600\text{ }\mu\text{A}$ fließen und die Diodenspannung 30 V nicht übersteigt. Wenn Sie die Polarität der Multimeter richtig wählen, erhalten Sie von vornherein das richtige Vorzeichen der Messwerte für Ihre Diodenkennlinie.

Kombinieren Sie die Messwerte für Sperr- und Durchlassbereich und tragen Sie die Diodenkennlinien unter Verwendung von *MATLAB* oder *EXCEL* in linearer Darstellung in ein gemeinsames Diagramm ein. Zeichnen Sie außerdem ein weiteres Diagramm, das nur den Durchlassbereich zeigt und bestimmen Sie die Schwellenspannung U_S bei der 1 mA Strom fließt. Welche Unterschiede zwischen Ge- und Si-Dioden fallen Ihnen auf?

Tragen Sie nun jeweils die Kennlinien für den Durchlassbereich in halblogarithmischer Darstellung auf. Bestimmen Sie nun den Emissionskoeffizienten n für die beiden Diodentypen. Betrachten Sie hierfür zunächst die halblogarithmische Kennlinie und begründen Sie, warum Sie nur Messpunkte mit geringen Strömen ($I_D < 100\text{ }\mu\text{A}$) für die Bestimmung des Serienwiderstandes wählen dürfen. Welchen weiteren Effekt könnten Sie mit einem Messpunkt bei höheren Strömen berechnen?

3.2 Kennlinie einer Z-Diode

Nehmen Sie nun die Kennlinie der Zener-Diode auf und tragen Sie Sie in linearer Darstellung in ein Diagramm ein. Für den Durchlassbereich verwenden Sie die modifizierte Schaltung aus Aufgabe 2.2. Überlegen Sie wie die Messschaltung für die Zener-Diode für den Sperrbereich aussehen muss und begründen Sie Ihre Entscheidung. Im Sperrbereich dürfen maximal 20 mA fließen. Sollten Sie bezüglich des Messaufbaus unsicher sein, fragen Sie Ihren Betreuer, da die Dioden ansonsten zerstört werden können.

3.3 Begrenzerschaltungen

Bauen Sie die Begrenzerschaltung aus Abbildung 14 mit Silizium-Dioden auf und achten Sie darauf, den korrekten Vorwiderstand zu verwenden. Variieren Sie nun die Eingangsspannung U_{in} zwischen -15 V bis 15 V in Schritten von 1 V und nehmen Sie mit Hilfe des Messkriptes sowohl die Eingangsspannung U_{in} als auch die Ausgangsspannung U_{out} mit Hilfe zweier Multimeter auf.

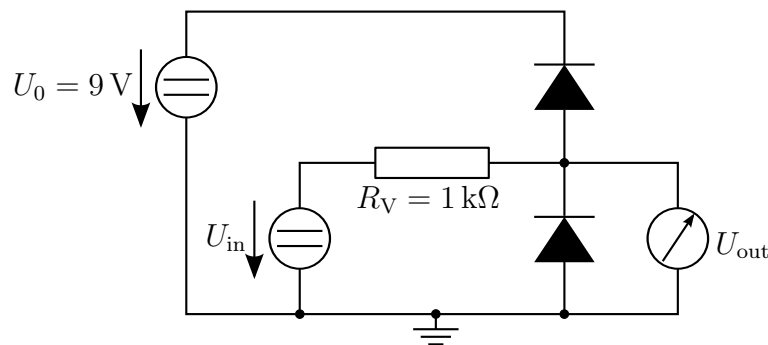


Abbildung 14: Begrenzerschaltung mit zwei Dioden.

In Aufgabe 2.3 haben Sie eine vereinfachte Form der Schaltung entworfen. Bauen Sie diese auf und verifizieren Sie die Funktionalität indem Sie auch hier die Ausgangscharakteristik messen. Stellen für beide Schaltungen die Ausgangsspannung als Funktion der Eingangsspannung $U_{\text{out}}(U_{\text{in}})$ in einem gemeinsamen Diagramm dar. Erklären Sie, wozu eine solche Schaltung eingesetzt werden könnte.

3.4 Graetz-Gleichrichter

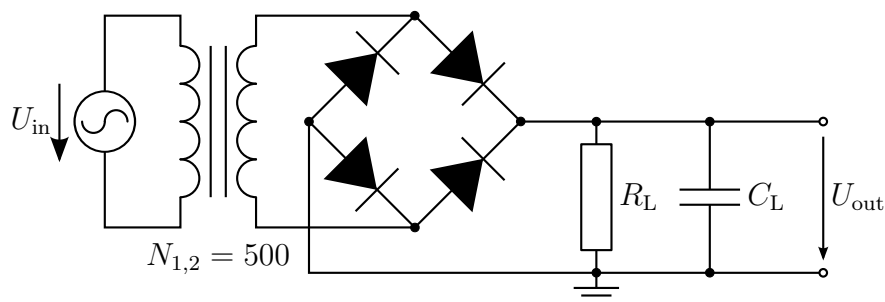


Abbildung 15: Messaufbau des Graetz-Gleichrichters mit Transformator.

Bauen Sie den Brückengleichrichter nach Abbildung 15 mit Silizium-Dioden auf. Generieren Sie das Eingangssignal U_{in} mit Hilfe des Frequenzgenerators im Oszilloskop, stellen

Sie dabei ein Sinussignal mit einer Amplitude von $U_{pp} = 5\text{ V}$ und einer Frequenz von $f_{in} = 1\text{ kHz}$ ein.

Messen Sie für folgende Kombinationen aus R_L und C_L die zeitlichen Ausgangssignale mit dem Oszilloskop und stellen Sie es zusammen mit dem Eingangssignal dar. Sie können hierfür die *MATLAB*-GUI oder die Save-Funktion des Oszilloskopes nutzen. Bestimmen Sie außerdem für jedes Ausgangssignal die Amplitude $U_{out,pp}$ der Restwelligkeit und den RMS-Wert $U_{out,RMS}$ des Ausgangssignals.

1. $R_L = 10\text{ k}\Omega$, C_L entfernt
2. $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $C_L = 100\text{ nF}$ (Die 100 nF Kondensatoren sind häufig aus einem früheren Versuch mit schwarzem Klebeband abgeklebt)
3. $R_L = 10\text{ k}\Omega$, $C_L = 2.2\text{ }\mu\text{F}$
4. $R_L = 1\text{ k}\Omega$, $C_L = 2.2\text{ }\mu\text{F}$

Erklären Sie die Messergebnisse. Wieso wird der Transformator für diesen Messaufbau benötigt?

3.5 Leuchtdioden

Messen Sie die Kennlinie einer LED im Durchlassbereich unter Verwendung der modifizierten Schaltung aus Aufgabe 2.2 mit einem maximalen Strom von 20 mA und plotten Sie die Kennlinie in linearer Darstellung.

Nehmen Sie nun an, Sie möchten zwei dieser LEDs mit einem Strom von 10 mA an einer 5 V Spannungsquelle betreiben. Schalten Sie die LEDs hierfür parallel oder seriell? Begründen Sie Ihre Entscheidung, berechnen Sie einen passenden Vorwiderstand für die LEDs und zeichnen Sie die fertige Schaltung auf.

Evaluation

Auf der Moodleseite gibt es zu jedem Versuch eine Umfrage zur Evaluation. Bitte helfen Sie die Qualität des Praktikums zu verbessern, indem Sie uns Rückmeldung geben wie Sie die Versuchsdurchführung empfunden haben!

Loggen Sie sich beide einzeln vom Praktikumsrechner aus ein und beantworten Sie die Umfrage noch direkt nach der Versuchsdurchführung bevor Sie das Praktikum verlassen!