

DIODEN-KENNLINIE

Ziel und Anmerkungen

In diesem Praktikum wird das Oszilloskop des Moku:Go-Messgerätes und sein integrierter Wellenformgenerator verwendet um die Kennlinien von Dioden zu untersuchen. Bringen Sie Ihren eigenen Laptop mit und *installiere* (vorab) die Moku:Go Software.

Verständnisfragen zur Vorbereitung

1. Erkläre mithilfe einfacher Skizzen die Gleichrichterwirkung einer Halbleiterdiode.
2. Beschreibe die I(U)-Kennlinie eines p-n-Übergangs.
3. Beschreibe das Messverfahren zur Bestimmung einer I(U)-Kennlinie.
4. Erkläre strom- und spannungsrichtige Messungen.
5. Der Strom durch eine unbekannte LED soll 20 mA keinesfalls überschreiten. Zum Schutz der Diode wird ein Vorwiderstand R_V vor die Diode geschaltet. Wie groß muss der Vorwiderstandswert sein, um den Stromfluss ganz sicher unter 20 mA zu halten, wenn die verwendete Quelle eine Spannung von 6,0 V besitzt? Hinweis: Da wir uns ganz sicher sein wollen und uns die Diode unbekannt ist, kann der Widerstand der Diode selbst vernachlässigt werden.

Stichwörter: Kennlinie, Diode, LED, p-n-Übergang, stromrichtig und spannungsrichtig

Literatur

1. Leonhard Stiny, Aktive elektronische Bauelemente, Springer, ISBN 978-3-658-14387-9 *eBook*
2. Rainer Parthier, Messtechnik, Springer, ISBN 978-3-658-27131-2 *eBook*

Inhaltsverzeichnis

1 Grundlagen	2
1.1 Halbleiterdiode	2
1.1.1 Eigenleitung	2
1.1.2 Störstellenleitung	4
1.1.3 p-n-Übergang	5
1.1.4 Ideale Kennlinie	6
1.2 Leuchtdioden (LED)	7
1.2.1 Funktionsweise	7
1.2.2 Bestimmung von h	8
1.3 Kennlinie	8
1.3.1 Allgemeine Grundlagen zu Strom- und Spannungsmessungen	8
1.3.2 Strom- und Spannungsmessung im Praktikum	9
2 Aufgabenstellung	10
3 Versuchsdurchführung	11
3.1 Diodenkennlinie	11
3.2 Messung von h	11
4 Anhang	12
4.1 Wie funktioniert ein Steckbrett?	12
4.2 Kennlinien-Messung mit dem Moku	13

1 Grundlagen

In diesem Praktikumsversuch untersuchen wir Halbleiterdioden und vermessen ihre besonderen Eigenschaften. Im ersten Teil der Anleitung sind die Grundlagen von Halbleiterdioden erläutert, sowie die Funktionsweise von Leuchtdioden und wie man mit diesen das Planck'sche Wirkungsquantum h bestimmen kann. Außerdem werden Verfahren zur Strom- und Spannungsmessung diskutiert. Im zweiten Teil sind Aufgabenstellung und Informationen zur Versuchsdurchführung erläutert.

1.1 Halbleiterdiode

Die Diode ist das einfachste und grundlegendste Halbleiterbauelement, das aus einem einzigen p-n-Übergang besteht. Da p-n-Übergänge das grundlegende Funktionsmerkmal vieler Halbleiter sind, ist ein fundiertes Wissen über das Verhalten von Dioden entscheidend auch für andere Komponenten und Anwendungen, wie z.B. Transistoren.

1.1.1 Eigenleitung

Halbleiter besitzen unterschiedlich elektrische Leitfähigkeiten (wie der Name vermuten lässt) und lassen sich anhand dessen zwischen Isolatoren und Metallen einordnen. Um den Mechanismus dieser *Halbleitung* zu verstehen, müssen wir uns die Kristallstruktur ansehen. Hierfür sehen wir uns technisch wichtige Halbleiter, wie z.B. Silizium (Si), Germanium (Ge) oder Galliumarsenid (GaAs) an, welche eine spezielle Gitterstruktur aufweisen: Jedes Atom hat vier Nachbarn. Die

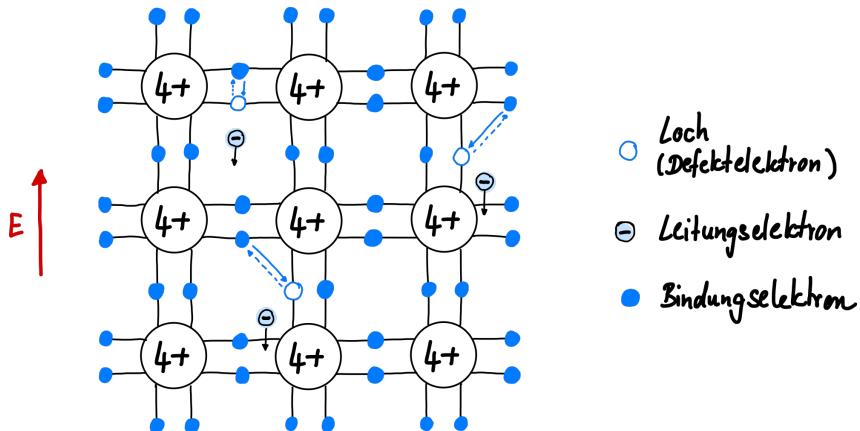


Abbildung 1: Modell der Eigenleitung.

Bindung zwischen zwei Nachbarn erfolgt durch Elektronenpaar-Bindungen. Für diese Bindung werden alle 4 Valenzelektronen (Elektronen auf der äußersten Elektronenschale) eines Atoms benötigt, wodurch die Bindungen gesättigt sind. Am absoluten Nullpunkt, $T = 0\text{K}$, sind keine freien beweglichen Ladungsträger aufgrund fehlender Wärmebewegung vorhanden und der Halbleiter ist ein Isolator.

Steigt die Temperatur so nehmen einzelne Elektronen thermische Energie auf und können ihre Bindung verlassen und durch den Kristall wandern. Der Isolator wird nun leitend, weshalb diese Elektronen nun *Leitungselektronen* genannt werden. Wird jetzt ein äußeres elektrisches Feld angelegt, werden sich diese Elektronen vorzugsweise entgegen der angelegten Feldrichtung bewegen und damit einen Stromfluss erzeugen. Des Weiteren entsteht ein Loch an jeder Stelle zurück, an der ein Elektron die Bindung verlassen hat. Hier kann ein benachbartes Elektron ohne wesentlichen Energieaufwand reinhüpfen, da die Bindungsenergie die gleiche bleibt. Jedoch wird nun ein Loch an anderer Stelle im Kristall hinterlassen. Die Löcher bewegen sich bei Anlegen des externen Feldes vorzugsweise in dieselbe Richtung, wie das Feld angelegt ist und tragen somit ebenso zur Leitfähigkeit bei. Dieses Prinzip der Eigenleitung ist in Abbildung 1 dargestellt.

Die Dichte, n_i , von Leitungselektronen und Löchern ist identisch und hängt maßgeblich von der Temperatur T ab:

$$n_i \propto \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right) \quad (1)$$

Diese Funktion (auch Boltzmannfaktor genannt) ist ein Maß für die Wahrscheinlichkeit mit der ein Valenzelektron in einem Halbleiter mit Temperatur T genügend thermische Energie besitzt um die Bindungsenergie ΔW zu überwinden.

Bei Raumtemperatur (etwa $T = 300\text{K}$) ist die Dichte für reines Ge $n_i \approx 2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Erhöht sich die Temperatur um 20K steigt die Dichte erheblich an, auf etwa 10^{14} cm^{-3} . Das bedeutet, dass auch die Leitfähigkeit aufgrund der Eigenleitung steigt. Gleichzeitig erhöht sich mit zunehmender Dichte aber auch die Wahrscheinlichkeit, dass Löcher und Elektronen rekombinieren. Dies passiert, wenn Elektronen durch die hohe thermische Energie sehr häufig im Kristall aufgrund von Stößen Energie verlieren und leicht gefangen werden können. Befindet sich der Halbleiter jedoch im thermischen Gleichgewicht, so wird die gleiche Anzahl von Elektronen-Loch-Paaren erzeugt wie sie durch Rekombination verschwindet.

1.1.2 Störstellenleitung

Für die Herstellung von p- und n-Schichten wird das Halbleiter-Material entsprechend dotiert. Hoch reine Si- oder Ge-Kristalle werden mit Elementen der III. oder IV. Hauptgruppe verunreinigt um deren Leitfähigkeit zu erhöhen. Diese Fremdatome werden auf einzelne Gitterplätze verteilt. Wird in Silizium (Si) ein fünfwertiges Element wie Phosphor eingebaut, so entsteht ein n-Halbleiter. Verwendet man stattdessen ein dreiwertiges Element wie Bor, entsteht ein p-Halbleiter.

n-Dotierung: Fünfwertige Atome haben 5 Valenzelektronen, wobei nur vier zum Einbau in den Siliziumkristall benötigt werden und Elektronenpaar-Bindungen erzeugen. Dies ist in Abbildung 2(a) dargestellt. Das fünfte Außenelektron ist überflüssig und daher nur sehr schwach an den Atomrumpf des Fremdatoms gebunden und löst sich schon bei sehr geringer Energiezufuhr (Temperatur) ab. Übrig bleibt der positiv geladene Atomrumpf (Donatoratom). Hinweis: Der positive Atomrumpf ist im Gegensatz zu einem positiven Loch bei der Eigenleitung nicht beweglich, da alle Bindungen existieren und keine Elektronen-Fehlstellen bestehen. Es kommt aber zum Auftreten frei beweglicher Elektronen, die eine Eigenleitung verursachen und somit das Entstehen von Löchern. In n-dotierten Halbleitern überwiegen die negativen Elektronen als bewegliche Ladungsträger und sind Majoritätsträger. Löcher hingegen treten sehr viel weniger auf und man nennt diese Minoritätsträger.

p-Dotierung: In p-dotierten Halbleitern werden nun dreiwertige Atome mit nur 3 Valenzelektronen verwendet. Für den Einbau werden aber 4 Valenzelektronen benötigt um genügend Elektronenpaar-Bindungen mit dem Silizium-Kristall herzustellen. Dies ist in Abbildung 2(b) dargestellt. Ist die Temperatur nicht allzu niedrig, so gibt es eine bestimmte Wahrscheinlichkeit, dass sich das Fremdatom ein weiteres Elektron aus der Umgebung holt, um seine Bindungen zu sättigen. Das dreiwertige Fremdatom wird daher auch Akzeptoratom genannt. An der Stelle des Fremdatoms entsteht dadurch ein Überschuss an negativer Ladung und in der Umgebung ein positives Loch, da einem Siliziumatom nun ein Elektron fehlt. Hierbei kommt es also zu frei beweglichen Löchern und ortsfeste negative Atomrümpe. Doch auch hier gibt es eine minimal Eigenleitung was zu beweglichen Elektronen und Löchern führt. In p-dotierten Halbleitern überwiegen die positiven Löcher und sind Majoritätsträger, wohingegen Elektronen die Minoritätsträger sind.

Durch Dotierung erhält man also auch bei relativ geringen Temperaturen eine Leitfähigkeit. Dies nennt man die Störstellenleitung oder extrinsische Leitung. Das Produkt der Dichte von beiden Ladungsträgersorten, $n \cdot p$, ist unabhängig von der Dotierung und hängt lediglich vom Halbleiter ab:

$$n \cdot p = n_i^2 \propto \exp\left(-\frac{\Delta W}{k_B T}\right) \quad (2)$$

Dotiert man beispielsweise Ge mit einem Sb-Atom auf 10^6 Ge-Atome so sind bei Raumtemperatur fast alle Sb-Atome ionisiert, d.h. die Konzentration der Leitungselektronen als Majoritätsträger ist $n = n_{\text{sb}} \approx 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ und damit viel größer als die oben berechneten Werte für die Eigenleitung. Die Konzentration der Minoritätsträger, also der Löcher, ist nach Gleichung 2 etwa $p \approx 4 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$.

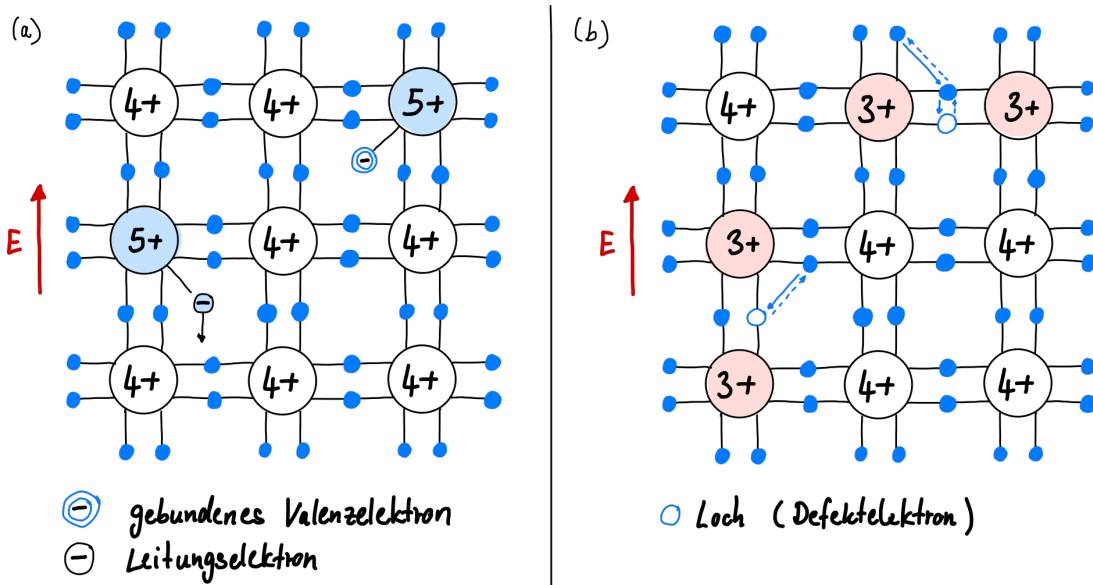


Abbildung 2: Modell der Störstellenleitung für (a) die Elektronenleitung und (b) die Löcherleitung.

1.1.3 p-n-Übergang

Ein p-n-Übergang eines Halbleiters entsteht bei dem Kontakt eines n- mit einem p-Halbleiter. Für nicht zu große Spannungen wird man feststellen, dass ein wesentlicher Stromfluss nur in eine Richtung fließt. Der p-n-Übergang wirkt also wie ein Gleichrichter und wird Halbleiter-Diode, oder kurz Diode, genannt.

Um die Gleichrichterwirkung zu verstehen muss man sich das Gleichgewicht der auftretenden Ströme zwischen dem p- und n-Gebiet ansehen. An der Grenzschicht zwischen p- und n-Halbleiter ist ein sehr abruptes Konzentrationsgefälle zu beobachten, was thermodynamisch instabil ist. Auf der einen Seite befinden sich frei bewegliche Löcher im Überfluss, während auf der anderen Seite mehr Elektronen zu finden sind. Bei dem Kontakt eines p-Halbleiters mit einem n-Halbleiter diffundieren Elektronen aus dem n-Gebiet in das p-Gebiet über und freie Löcher aus dem p-Gebiet ins n-Gebiet, um das Konzentrations-Ungleichgewicht abzubauen. Diese Diffusion trägt zu einem elektrischen Strom I_D bei. Dadurch kommt es in der Grenzschicht der beiden Materialien zu einer Rekombination. Die Elektronen füllen die Löcher und die freien Ladungsträger verschwinden im Grenzgebiet. In der Nähe der Kontaktzone bleiben die ortsfesten, nicht beweglichen geladenen Atomrümpfe zurück und bilden eine Raumladung, die ein elektrisches Feld erzeugt. Sie wirken eine abstoßende Kraft auf die freien Ladungsträger der anderen Zone aus und sorgen dafür, dass nicht alle frei beweglichen Ladungsträger rekombinieren. Dies resultiert im Feldstrom I_F der beweglichen Ladungsträger, welche im Gleichgewicht des p-n-Übergangs (ohne Anlegen einer äußeren Spannung) genau dem Strom der Diffusion, I_D , entspricht. In der Grenzschicht bildet sich eine sogenannte Raumladungszone aus, die frei von beweglichen Ladungsträgern ist, und somit, ohne äußere elektrische Beschaltung, nicht leitet!

Nun gibt es noch Teilströme, die bei diesem Gleichgewicht zwischen Diffusions- und Feldstrom berücksichtigt werden müssen, um den Verlauf der Diodenkennlinie zu verstehen. Eine kleine Anzahl von Löchern, die vom p- ins n-Gebiet diffundieren, rekombinieren wieder mit Elektronen. Umgekehrt gibt es auch eine kleine Anzahl von Elektronen, die auf der p-Seite rekombinieren.

Dieser Anteil des Diffusionsstroms ist der *Rekombinationsstrom* I_R . Dieser muss durch einen Teil des Feldstroms, I_F , den sogenannten *Generationsstrom* I_G (hierbei handelt es sich um thermisch erzeugte Elektron-Loch-Paare) ausgeglichen werden. Wäre dieser Strom nicht gegeben, würde es kein Gleichgewicht geben und die Ladungen würden sich an einer Seite des p-n-Übergangs anhäufen.

Die Löcher und Elektronen des Rekombinationsstroms müssen bei der Diffusion durch die Grenzschicht ein elektrisches Feld und somit eine Barriere, eine Potentialschwelle U_D , überwinden. Für die Ladungsträger des Generationsstrom gilt dies nicht. Sie werden hingegen vom dem elektrischen Feld beschleunigt und können über die Potentialschwelle abfließen. Es wird allerdings Energie ΔW für ihre Erzeugung benötigt. Es gilt also:

$$I_R \propto \exp\left(-\frac{eu_D}{k_B T}\right) \quad (3)$$

$$I_G \propto \exp\left(-\frac{\Delta W}{2k_B T}\right) \quad (4)$$

$$(5)$$

Legt man nun eine äußere positive Spannung U an (Pluspol an die p-Schicht), so wird diese Potentialschwelle abgebaut. Bei Anlegen einer negativen Spannung wird sie erhöht.

- **Durchlassrichtung:** Hierfür wird der Pluspol der Spannungsquelle an die p-Schicht angelegt. Die Pole der Spannungsquelle üben eine abstoßende Kraft auf die frei beweglichen Ladungsträger aus. Dadurch werden diese in die Raumladungszone gedrängt. Je nach Größe der angelegten Spannung wird die Raumladungszone kleiner oder verschwindet ganz. Es findet eine Rekombination von Elektronen und Löchern in der Grenzschicht statt, wobei die Stromquelle kontinuierlich Elektronen nachliefert. Elektronen vom Minuspol bewegen sich in die n-Zone, während der Pluspol gebundene Elektronen aus der p-Zone absaugt, wodurch dort neue Löcher entstehen. Es kommt zu einem Stromfluss vom Plus zum Minuspol (technisch gesehen).
- **Sperrrichtung:** Hierfür wird der Pluspol der Spannungsquelle an die n-Schicht angelegt. Die Pole der Spannungsquelle üben eine Anziehungskraft auf die frei beweglichen Ladungsträger aus und die Raumladungszone vergrößert sich. Die p-n-Schicht sperrt.

1.1.4 Ideale Kennlinie

Der Rekombinationsstrom ändert sich durch das Anlegen eines externen Feldes U um die den Faktor $\exp(eU/k_B T)$, der Generationsstrom bleibt gleich. Für den Gesamtstrom einer Diode ergibt sich damit:

$$I(U) = I_R(U) + I_G = I_R(U) - I_R(0) = I_R(0) \cdot \exp\left(\frac{eU}{k_B T} - 1\right) \quad (6)$$

Dies ist die ideale Kennlinie eines p-n-Übergangs. Abweichungen von der Idealkennlinie kommen unter anderem durch folgendes zustande:

- Elektronen und Löcher könnten auch in der Grenzschicht zwischen p- und n-Gebiet re kombinieren. Die Kennlinie würde in Durchlassrichtung dann schwächer ansteigen, was durch einen weiteren exponentiellen Term in Gleichung 6 ausgeglichen werden kann.

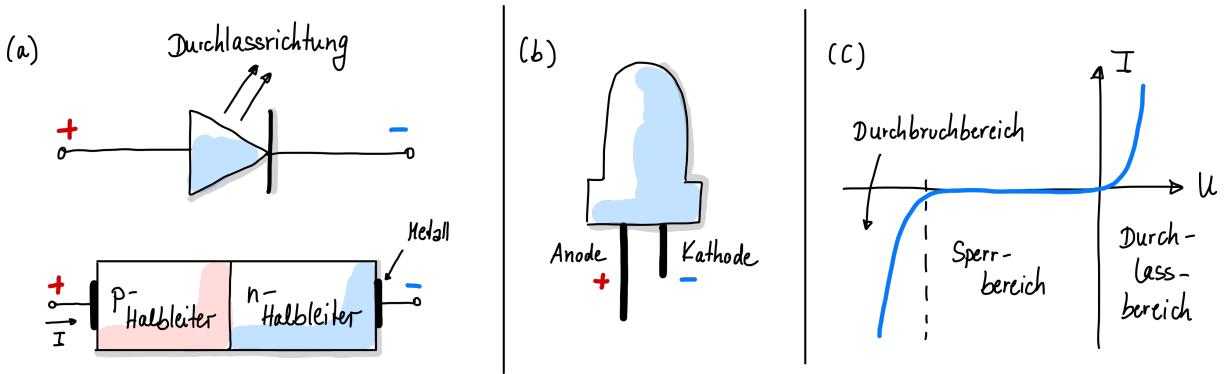


Abbildung 3: (a) Halbleiter-Diode als Schaltbild und schematisch in Durchlassrichtung.

(b) Schema einer LED mit Kathode und Anode.

(c) Strom-Spannungs-Kennlinie der p-n-Übergangs.

- Bei großen Spannungen in Sperrichtung kann es zu Stoßionisationen der Ladungsträger an der Grenzschicht kommen wodurch Lawineneffekte ausgelöst werden können (Zener-Effekt). Der Strom in Sperrichtung würde dadurch stark ansteigen.

1.2 Leuchtdioden (LED)

Bei Leuchtdioden (kurz LED von englisch light-emitting diode ‚lichtemittierende Diode‘, auch Lumineszenz-Diode) handelt es sich ebenfalls um Halbleiterdioden. Hierbei wird jedoch elektromagnetische Strahlung ausgesendet, wie z.B. Licht, Infrarotstrahlung oder UV-Strahlung. Damit dies passiert, müssen sie in Durchlassrichtung geschaltet werden, andernfalls leuchten sie nicht. Die Wellenlänge des ausgesandten Lichts ist von der Dotierung und den verwendeten Halbleitermaterialien abhängig.

1962 wurde die LED erfunden und diente zunächst nur als Leuchtanzeige und zur Signalübertragung. Mittlerweile sind sie auch im Alltag zu finden, wie z.B. in LED-Leuchtmitteln, da sie effiziente Lichtquellen bieten, die nur einen geringen Energiebedarf und hohen Wirkungsgrad haben.

1.2.1 Funktionsweise

LEDs sind meistens III/V Halbleiter, d.h. sie bestehen aus Elementen der 3. und 5. Hauptgruppe des Periodensystems, z.B. Galliumphosphid (GaP), Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) oder Indiumgalliumnitrid (InGaN). Die Materialien sind extra so gewählt, dass die Energie, E , die bei der Rekombination eines Elektrons mit einem Loch entsteht, dem des sichtbaren Lichts, mit einer Wellenlänge λ , entspricht:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (7)$$

wobei $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js das Planck'sche Wirkungsquantum ist, $c = 299792458$ m/s die Lichtgeschwindigkeit und $\nu = c/\lambda$ die Frequenz des Lichts. Doch auch die Dotierung spielt eine Rolle bei der Energie der ausgesandten Strahlung.

Ausgangsmaterial ist wieder ein Halbleiterkristall, der Verunreinigungen bzw. Fehlstellen enthält, die dafür sorgen, dass die Rekombination von Elektron und Loch keine Aussendung von

Licht ermöglicht. Dadurch wäre der Wirkungsgrad einer LED extrem schlecht. Man benötigt also eine bestimmte Schichtung von unterschiedlich dotierten Materialien, welche die gewünschten Ausstrahlungseigenschaften haben.

Damit eine LED leuchtet, muss sie in Durchlassrichtung betrieben werden. Durch die externe Beschaltung werden Elektronen bzw. Löcher wieder in die Raumladungszone der p-n-Übergangs gedrängt, wo es zur Rekombination kommt. Die hierbei freiwerdende Energie wird in Form von Strahlung abgegeben. Hierbei entsteht kaum Wärme, die abgeführt werden muss, was besonders praktisch und offensichtlich auch sehr effizient ist. Der Vorgang in einer LED ist der inverse Effekt zur Funktion einer Solarzelle. Bei der Solarzelle wird Energie von Lichtteilen, Photonen, die in die Sperrsicht eindringt, verwendet um Elektronen-Loch-Paare zu binden.

1.2.2 Bestimmung von h

Jedem Elektron-Loch-Paar wird aufgrund der extern angelegten Spannungsquelle die Energie $e \cdot U_S$ zugeführt, wobei U_S den Schwellspannungswert angibt, ab dem die Diode leitend wird. Die freiwerdende Energie beträgt im Idealfall genau die Energie des Photons, d.h. es gilt

$$e \cdot U_S = h \cdot \nu \quad (8)$$

Aus der Messung der Schwellspannung kann also das Planck'sche Wirkungsquantum berechnet werden. Es muss allerdings mit signifikanten Abweichungen zum Literaturwert gerechnet werden, da die Schwellspannung nicht exakt definiert ist, sondern eine bestimmte Bandbreite aufweist. Für eine weitergehende Erklärung müsste das Bändermodell des Halbleiters berücksichtigt werden. Außerdem sind Messabweichungen aufgrund von Wärmebewegungen im Kristall und Verunreinigungen im Halbleiter zu erwarten.

1.3 Kennlinie

Jedes Bauteil oder Komponente führt das an ihr anliegende Eingangssignal, u , in ein bestimmtes Ausgangssignal, y , über. Wie diese Überführung genau aussieht beschreibt die sogenannte **Kennlinie**, $y(u)$, die für jedes Bauteil unterschiedlich aussehen kann. In diesem Praktikum werden $I(U)$ -Kennlinien von Dioden und LEDs gemessen. An die Diode wird eine Spannung angelegt und die Stromstärke gemessen. Um die gesamte Kennlinie zu messen, wird die Spannung variiert und die Stromstärke kontinuierlich gemessen. Messwerte für Spannung und Strom werden aufgeschrieben bzw. abgespeichert. In aller Regel werden hierfür ein Strom- und ein Spannungsmessgerät verwendet. Wie die beiden Messgeräte an die Diode angeschlossen werden, ist hierbei besonders zu beachten, um Fehlerquellen zu minimieren.

Zunächst wollen wir betrachten wie *normalerweise* Strom und Spannung zur Bestimmung von Kennlinien gemessen werden und welche Fehler hierbei auftreten können. Im Anschluss diskutieren wir einen Alternative zur Strom- und Spannungsmessung, welche im Praktikumsversuch verwendet wird.

1.3.1 Allgemeine Grundlagen zu Strom- und Spannungsmessungen

Um einen Strom durch einen Widerstand oder eine Diode zu messen, wird das **Strommessgerät** (typischerweise mit einem kleinen Innenwiderstandswert zwischen $0,01 - 1 \Omega$) *in Reihe* zur Komponente geschaltet. Für eine Spannungsmessung schaltet man das **Spannungsmessgerät** (typischerweise mit hohem Innenwiderstandswert zwischen $1 - 10 M\Omega$) *parallel* zu der Komponente

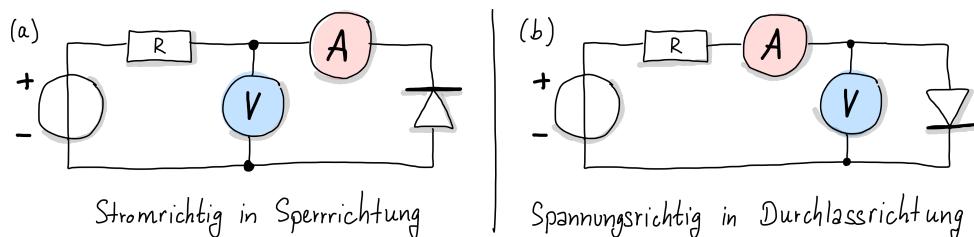


Abbildung 4: Beschaltung zur Messung der Kennlinie eines Widerstands. Links ist die stromrichtige und rechts die spannungsrichtige Beschaltung gezeigt.

an. Für die Messung der $I(U)$ -Kennlinie benötigen wir die gleichzeitige Messung von Strom und Spannung und müssen beide Geräte an den Schaltkreis anschalten. Hierfür gibt es zwei Möglichkeiten, wie in Abbildung 4 dargestellt. Je nachdem wie hoch die Innenwiderstandswerte in den Messgeräten im Vergleich zum Widerstandswert der Diode sind, sollte entweder eine *strom- oder spannungsrichtige* Beschaltung gewählt werden.

1. Ist die Diode in **Sperrrichtung** geschaltet, wird die Messung *stromrichtig* durchgeführt, wie in Abbildung 4(a) dargestellt, D.h. der gemessene Strom ist exakt der Strom durch die Diode. Der Spannungsmesser dagegen misst nicht exakt den Spannungsabfall über der Diode, sondern den Spannungsabfall über der Serienschaltung von Diode und Strommesser. In Sperrrichtung hat die Diode einen sehr hohen Widerstand und es kommt zu einer sehr geringen Stromstärke. Würde man in diesem Fall *spannungsrichtig* messen, so würde der Strom durch Diode und durch Spannungsmessgerät gemessen werden, wobei beide einen ähnlichen Widerstandswert aufweisen und das Ergebnis mit einem größeren Fehler behaftet wäre. Da bei kleinen Stromstärken der Spannungsabfall am Strommesser (Innenwiderstand sehr klein) aber fast zu vernachlässigen ist, macht man bei der *stromrichtigen* Schaltung der Messgeräte bei der Spannungsmessung keinen großen Fehler.
2. Ist die Diode in **Durchlassrichtung** geschaltet, wird die Messung *spannungsrichtig* durchgeführt, wie in Abbildung 4(b) dargestellt. D.h. die gemessene Spannung entspricht exakt dem Spannungsabfall über die Diode. Der Strommesser dagegen misst nicht exakt den Strom durch die Diode, sondern den Strom durch die Parallelschaltung von Diode und Spannungsmesser. In Durchlassrichtung hat die Diode einen geringen Widerstand und trägt signifikant zur Stromstärke bei. Würde man in diesem Fall *stromrichtig* messen, so würde die Spannung, die sowohl an Diode als auch Strommessgerät mit vergleichbaren Widerstandswerten abfällt, gemessen werden und der Messfehler wäre größer. Da aber der Strom durch den Spannungsmesser (Innenwiderstand sehr groß) fast zu vernachlässigen ist, macht man bei dieser Art der *spannungsrichtigen* Schaltung der Messgeräte bei der Strommessung keinen großen Fehler.

Hinweis: Besitzt man für die Messung sehr gute Messgeräte, d.h. ein Voltmeter mit extrem hohem Innenwiderstand und ein Ampermeter mit fast vernachlässigbarem Innenwiderstand, so ist es nahezu unerheblich, ob man stromrichtig oder spannungsrichtig misst.

1.3.2 Strom- und Spannungsmessung im Praktikum

Im Praktikum werden Sie sowohl Strom- als auch Spannungsmessung mit den Spannungseingängen des Oszilloskops im **Moku:Go** vornehmen. Für die Strommessung wird hierfür ein *Shunt*-

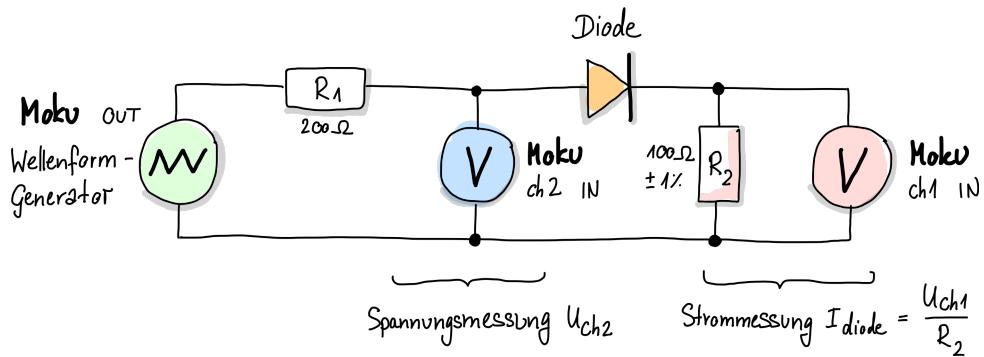


Abbildung 5: Anschluss der Diode in Durchlassrichtung. R_1 ist die Ausgangsimpedanz des Wellenformgenerators des Moku's. Durch Abgreifen der Spannung an R_2 kann später der Diodenstrom berechnet werden.

Widerstand in die Schaltung integriert, an dem die Spannungsmessung vorgenommen wird. In diesem Fall handelt es sich um eine stromrichtige Messung, obwohl die Messung der Diodenkennlinie in Durchlassrichtung erfolgt. Da wird allerdings den *Spannungsmessfehler* am Shunt-Widerstand mitmessen, kann das Ergebnis am Ende korrigiert werden. Um die I-U-Kennlinie für Dioden und LEDs zu bestimmen, wird die Schaltung wie in Abbildung 5 gezeigt mittels einem Steckbrett aufgebaut. R_1 ist hierbei die Ausgangsimpedanz des Wellenformgenerators des Moku:Go's. Der Oszilloskop-Kanal 2 des Moku's wird verwendet, um die Spannung zu messen, die sowohl an der Diode als auch an einem Strombegrenzungs- und Messwiderstand (R_2) anliegt. Anschließend misst der Oszilloskop-Kanal 1 die Spannung an R_2 , einem 100- Ω -Widerstand mit einer Toleranz von 1%, und ermöglicht so die Berechnung des Stroms durch die Diode:

$$I_{\text{diode}} = \frac{U_{\text{ch}1}}{R_2} = \frac{U_{R_2}}{R_2} \quad (9)$$

Nach den oben erläuterten Grundlagen würde bei der Spannungsmessung ein Fehler auftreten, da die Spannung sowohl an der Diode als auch an R_2 gemessen wird. Die Spannung an R_2 wird allerdings mit Oszilloskop-Kanal 1 mitgemessen und wir können die fehlerbehaftete Spannungsmessung korrigieren:

$$U_{\text{ch}2} = U_{\text{diode}} + U_{R_2} \quad (10)$$

$$\Rightarrow U_{\text{diode}} = U_{\text{ch}2} - U_{R_2} = U_{\text{ch}2} - U_{\text{ch}1} \quad (11)$$

2 Aufgabenstellung

Aufgabe 1: Bestimme die Kennlinie einer Diode in Durchflussrichtung.

Aufgabe 2: Stelle die Messergebnisse halb-logarithmisch in einem Diagramm dar und vergleiche den Verlauf $\log(I(U))$ mit dem der idealen Gleichrichterkennlinie in Gleichung 6.

Aufgabe 3: Bestimme die Kennlinien mehrerer LEDs.

Aufgabe 4: Stelle die Messergebnisse in einem Diagramm dar.

Aufgabe 5: Bestimme das Planck'sche Wirkungsquantum mit Messabweichung.

3 Versuchsdurchführung

Messaufbau Baue die elektronische Schaltung von Abbildung 5 mithilfe des Steckbretts auf. Verbinde Ausgangskanals 1 des Moku:Go's mit dem Eingang der Schaltung. Verbinde die beiden Oszilloskop-Eingänge des Moku:Go's wie in der Abbildung dargestellt.

3.1 Diodenkennlinie

Messung Mit dem Wellenformgenerator-Ausgang des Mokus wird eine Rampe als Versorgungsspannung angelegt. Folge hierfür den Anweisungen im Anhang. Kontrolliere die Messdaten-Datei auf Vollständigkeit.

Auswertung Berechne I_{diode} und U_{diode} nach Gleichungen 9 und 11. Stelle das Messergebnis $I(U)$ halb-logarithmisch ($\log(I(U))$) mit einem Auswerteprogramm (Python, Matlab) dar. Prüfe ob der Strom im wesentlichen exponentiell mit der Spannung ansteigt. Vergleiche die Steigung der Ausgleichsgeraden mit dem Vorfaktor im Exponenten einer idealen Kennlinie in Gleichung 6 für Raumtemperatur. Bestimme näherungsweise durch Extrapolation der Ausgleichsgeraden auf $U = 0$ den Rekombinationsstrom $I_R(U = 0)$.

3.2 Messung von h

Um h zu bestimmen werden die Kennlinien von mehreren LEDs aufgenommen. Die Schaltung zur Aufnahme der Kennlinie einer LED ist der gleiche wie bei der Kennlinienaufnahme für gewöhnliche Halbleiter-Dioden. Die Messung erfolgt wieder in Durchlassrichtung. Im Versuch werden die Kennlinien von verschiedenen LEDs aufgenommen und miteinander verglichen, hier:

- rot: $625 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$
- gelb: $590 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$
- blau: $468 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$
- grün: $568 \text{ nm} \pm 10 \text{ nm}$

Messung Messe die Kennlinie von 4 verschieden farbigen LEDs wie schon für die Diode und speicher die Messdaten. Kontrolliere die Messdaten-Datei auf Vollständigkeit.

Auswertung Berechne I_{diode} und U_{diode} nach Gleichungen 9 und 11. Stelle das Messergebnis $I(U)$ halb-logarithmisch ($\log(I(U))$) mit einem Auswerteprogramm (Python, Matlab) für die verschiedenen LEDs in einem Diagramm dar. Welcher Zusammenhang ist zwischen Farbe der LED und der Schwellspannung zu erkennen? Bestimme die Schwellspannung für jede LED inkl. Messabweichung (Fehlerfortpflanzung) und berechne h nach Gleichung 8 für jede LED. Begründe warum der ermittelte Wert vom Literaturwert abweicht.

4 Anhang

4.1 Wie funktioniert ein Steckbrett?

Zum grundlegenden Testen eines Schaltungsentwurfes bieten sich Steckbretter (im Englischen breadboards genannt) an. Steckbretter gibt es in verschiedenen Ausführungen. Dennoch ist der grundlegende Aufbau identisch und lässt sich üblicherweise in folgende Teile zerlegen:

- ein langer Bus am Rand für die Spannungsversorgung (größere Steckbretter haben meist zwei dieser Busse: einen auf der linken Seite, einen auf der rechten),
- mehrere Lochreihen in der Mitte zum Stecken der Bauelemente (üblicherweise Rastermaß 2,54 mm),
- manche Steckbretter haben bereits Steckerbuchsen für die Spannungsversorgung oder zusätzliche Versorgung (meistens Bananen-/Büschelstecker). Die Platinen im Praktikum haben so etwas nicht, wird bei diesem Versuch aber auch nicht benötigt.

Wichtig zu wissen ist, dass einige der Löcher auf dem Steckbrett untereinander leitend verbunden sind. In der schematischen Darstellung des Steckbretts sind diese Verbindungen in Grau eingezzeichnet. Im Versorgungsbuss verlaufen sie in zwei parallelen Spalten von oben nach unten, während in der Mitte des Steckbretts jeweils 5 Löcher horizontal zu einer Zeile zusammengefasst sind.

Zwischen zweien dieser Zeilenblöcke verläuft ein größerer Spalt. An dieser Stelle können DIP-ICs (Integrierte Schaltkreise in Dual-Inline-Bauform) auf das Brett gesteckt werden. Die eine Reihe der Beinchen steckt dann links neben dem Spalt und die andere rechts davon.

Andere Bauteile wie z. B. Widerstände, Kondensatoren oder Transistoren können an beliebiger anderer Stelle innerhalb der Blöcke eingebaut werden. Um sie untereinander zu verbinden, kann man entweder jeweils ein Bein der Bauteile in eine gemeinsame Zeile stecken oder – für längere Wege – mit Drahtbrücken arbeiten.

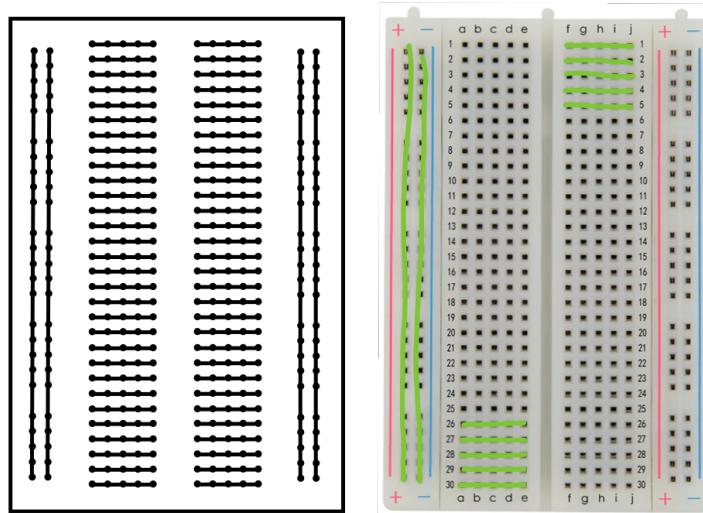


Abbildung 6: Foto und Schema eines Steckbretts mit Verbindungslien.

4.2 Kennlinien-Messung mit dem Moku

1. Starte die Moku:Go App auf dem PC und verbinde dich mit dem Moku-Gerät per USB-C oder WiFi. WiFi-Kennung und Passwort sind auf der Unterseite des Moku:Messgeräts.
2. Wähle das Moku:Messgerät in der App aus und starte die Anwendung.
3. Wähle die Oszilloskop-Anwendung aus.
4. Verbinde den Ausgangskanal Ch1 des Moku:Go's mit dem Eingang des Schaltkreises.
5. Verbinde die Eingangskanäle Ch1 und Ch2 wie in Abbildung 5 mit dem Schaltkreis. Ch1 misst die Spannung über R_2 woraus der Diodenstrom berechnet wird.
6. Starte den Wellenform-Generator in der Moku:App indem du unten rechts auf das runde Sinuswellen-Symbolen klickst.
7. Wähle als Funktion eine Rampe aus und wähle die Kenngrößen so, dass die Diode ausschließlich in Durchlassrichtung betrieben wird (vermeide negative Spannungswerte). Z.B.: Frequenz: $f = 50 \text{ Hz}$, Amplitude: $A = 3,2 \text{ Vpp}$, Offset: $A_0 = 1,6 \text{ Vpp}$
8. Schalte den Messausgang ein.
9. Starte den Mathekanal und wähle XY aus.
10. Vergleiche die Kurven mit denen in Abbildung 7.
11. Speicher die Messdaten in eine .csv oder .mat Datei ab. Kontrolliere die Messdatei.

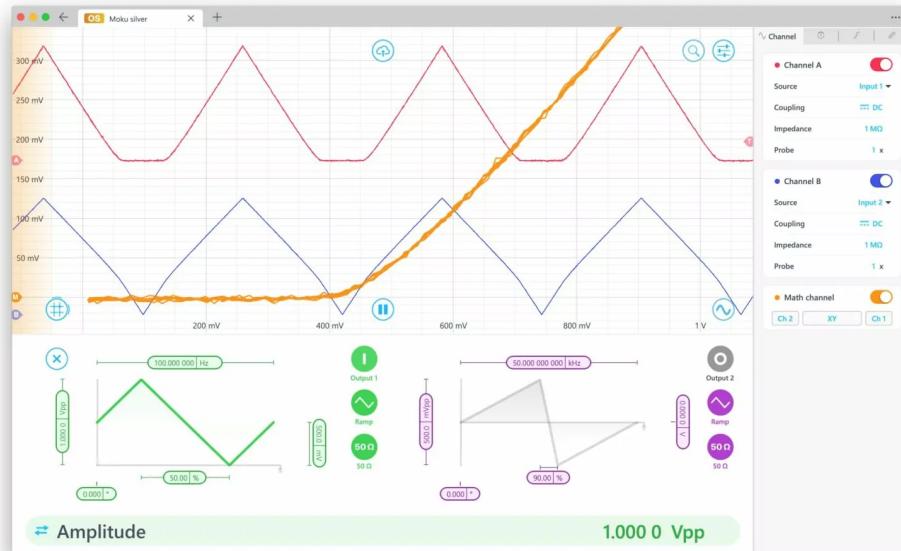


Abbildung 7: Moku:Go Oszilloskop mit X-Y-Mathe-Operator (orange Kurve) und Wellenformgenerator (unten links in grün).