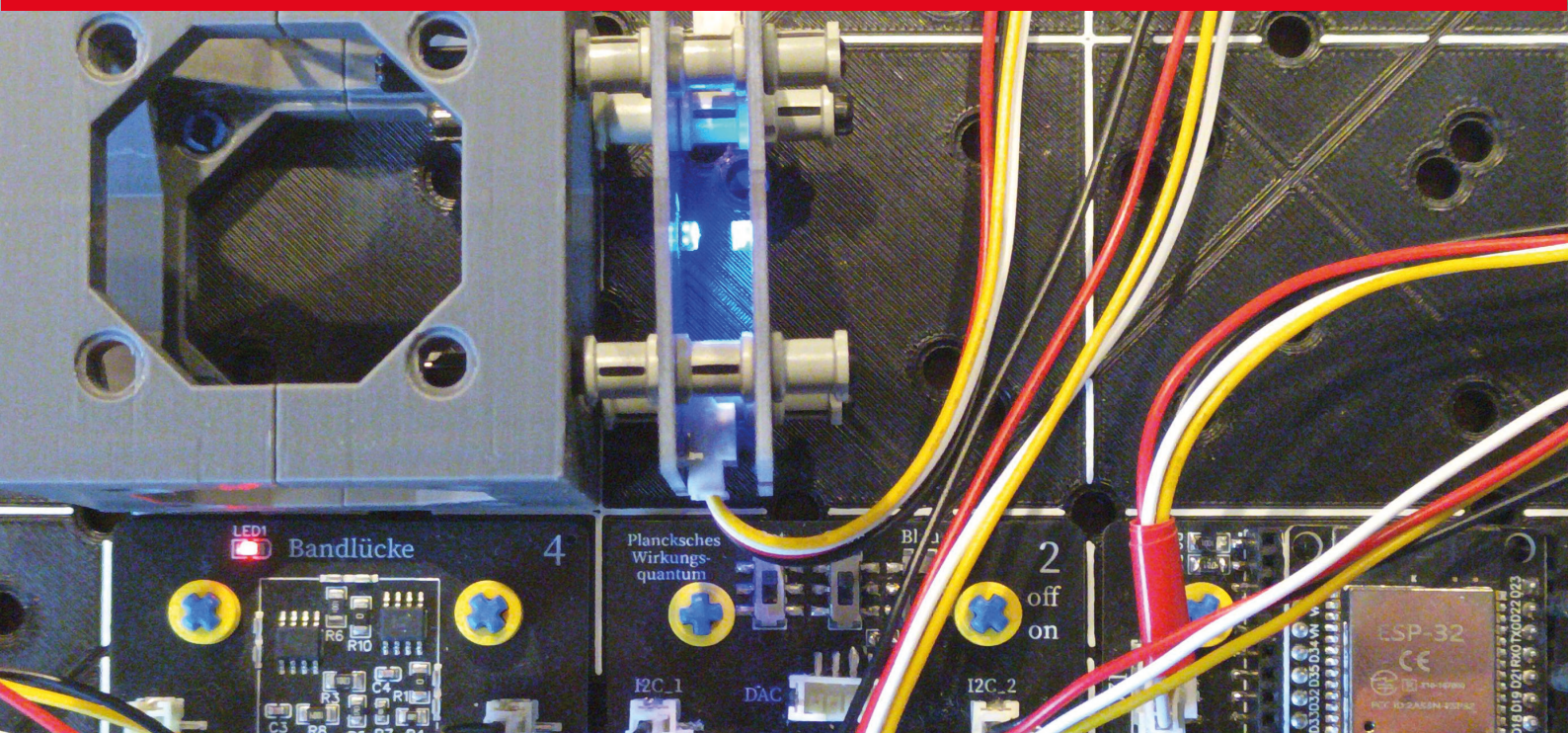


DIY-Quantenexperimente

Bandlücke



Versuchsanleitung Photoeffekt und Bandlücke

Dr. Michael Bennemann, Damian Gorihs (2026, v0.1)

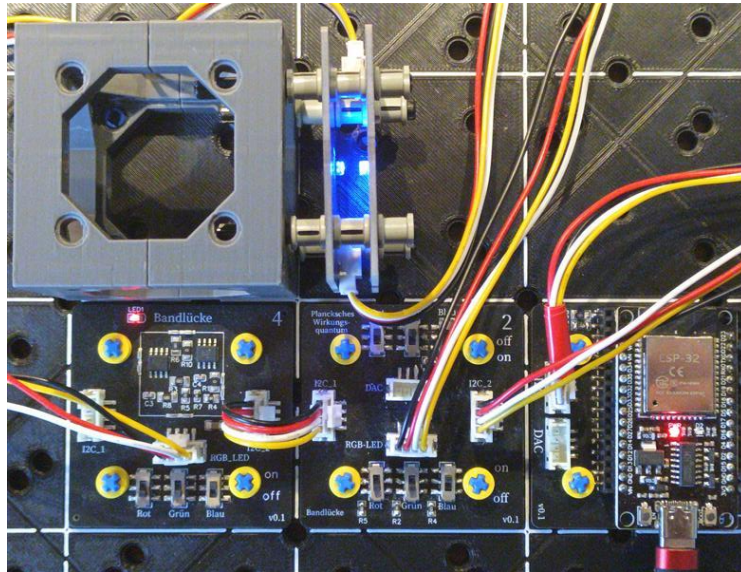


Abbildung 1: Versuchsaufbau „Bandlücke“.

Einleitung

Bestrahlt man eine Zinkplatte mit UV-Strahlung, werden Elektronen aus der Oberfläche herausgelöst. Wird die Platte dagegen mit sichtbarem Licht (380 – 780 nm) bestrahlt, egal welcher Menge, treten keine Elektronen aus. Grund dafür ist, dass zum Herausschlagen eines Elektrons eine bestimmte Energie nötig ist. Die Photonen (Lichtteilchen, kleinste Energieeinheiten) von sichtbarem Licht haben diese Energie nicht. Erst die Photonen von UV-Strahlen haben genug Energie, um Elektronen aus einer Zinkplatte herauszuschlagen. Dieses Phänomen namens **äußerer Photoelektrischer Effekt** kann nur erklärt werden, wenn man den Teilchencharakter von Licht betrachtet. Betrachtet man Licht als kontinuierliche Welle müssten die Elektronen kontinuierlich mehr Energie aus dem auftretenden Licht aufnehmen können bis ihre Energie ausreicht aus der Oberfläche auszutreten zu können. Könnten die Elektronen kontinuierlich mehr und mehr Energie aufnehmen, wäre es egal wieviel Energie die Photonen der auf sie treffende Strahlung haben. Bei niedriger Energie würde es nur länger dauern bis die Elektronen genug Energie aufgenommen haben, um die Oberfläche zu verlassen. Dies ist aber nicht der Fall. Für diese Entdeckung, dass einzelne Photonen mit einer hinreichend hohen Energie nötig sind, um Elektronen aus einer Oberfläche herauszuschlagen, bekam Albert Einstein einen Nobelpreis.

Versuchsanleitung äußerer Photoeffekt

Den äußeren Photoelektrischen Effekt kann man mit einer Zinkplatte, einem Kunststoffstab (z.B. Heißkleber), einem Lederlappen, einem Elektroskop und einer UV-Kammer demonstrieren (Abb. 2).

Durch Reibung von einem Kunststoffstab mit Leder gehen Elektronen auf den Kunststoffstab über. In einem Elektroskop ist ein Metallplättchen beweglich an einem Metallhalter befestigt. Durch Abstreifen des Kunststoffstabes an den Metallteilen des Elektroskops werden Elektronen auf den Metallhalter und das Metallplättchen übertragen. Da der Halter und das Plättchen nun negativ geladen sind, stoßen sie sich ab. Da das Metallplättchen an seinem oberen Ende drehbar aber ortsfest montiert ist, nimmt sein unteres Ende einen möglichst großen Abstand zum Metallhalter ein und zeigt ähnlich wie bei einer Tachonadel die Stärke der negativen Ladung an.

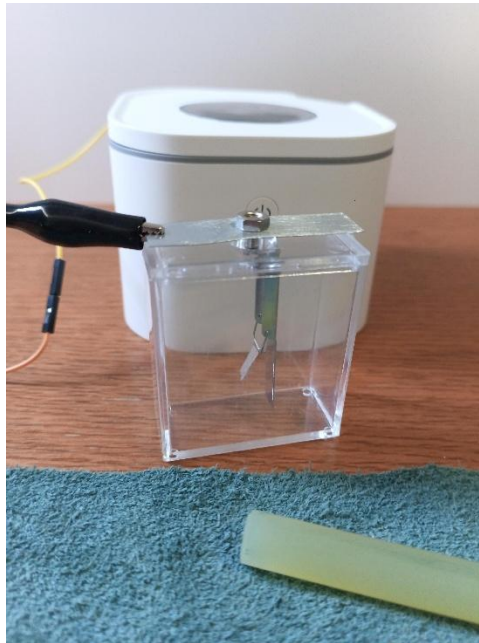


Abbildung 2: Versuchsaufbau zur Demonstration des Photoeffektes. Das Elektroskop im Vordergrund wurde mittels Heißkleberstab und Ledertuch aufgeladen. Im UV-Sterilisationsgerät befindet sich eine Zinkplatte, die leitend mit dem Elektroskop verbunden ist. Durch die UV-Strahlung im Gerät kann das Elektroskop entladen werden.

Verbindet man nun den Halter des Elektroskops mit einer Zinkplatte und bestrahlt diese mit UV-Strahlung, nimmt die negative Ladung des Elektroskops ab. Dies liegt daran, dass UV-Strahlung in der Lage ist Elektronen aus dem Zinkblech herauszuschlagen und diese durch die zusätzlichen Elektronen im Elektroskop ersetzt werden. Sichtbares Licht ist dazu nicht in der Lage. Würde man das negativ geladene Elektroskop mit angeschlossener Zinkplatte nicht mit UV-Licht bestrahlen würde die negative Ladung länger erhalten bleiben.

Im folgenden Video können Sie sich den Versuch anschauen und erhalten weitere Tipps zur Durchführung: <https://www.youtube.com/watch?v=LFW50jg2MAM>

Für den Versuch wird UV-Strahlung benötigt. Diese ist für das menschliche Auge nicht sichtbar, aber sehr gefährlich. Daher nutzen wir für den Versuch eine geschlossene UV-Sterilisationskammer (https://www.amazon.de/dp/B0FL1TQP8H?ref_=ppx_hzsearch_conn_dt_b_fed_asin_title_1&th=1). Diese verfügt über einen Sicherheitsmechanismus, der das UV-Licht abschaltet, wenn der Deckel geöffnet wird. Es kann entweder das ganze Elektroskop mit angeschlossener Zinkplatte oder auch nur die Zinkplatte in die UV-Sterilisationskammer platziert werden.

Orbitale

Die negativ geladenen Elektronen in einem Atom sind durch elektrostatische Kräfte an den positiven Kern gebunden, sie umkreisen diesen und bilden die Elektronenhülle. Elektronen können sich im gebundenen Zustand auf unterschiedlichen Energieniveaus befinden. Im Grundzustand befinden sich Elektronen auf dem Niveau mit der geringsten Energie. Durch Anregung können Elektronen Energie aufnehmen und in **angeregte Zustände**, also höhere Energieniveaus, wechseln. Wenn Elektronen Energie wieder abgeben, fallen Sie wieder in den energiearmen Grundzustand zurück.

Dieser Prozess findet zum Beispiel statt, wenn weiße Kleidung oder bestimmte Farbstoffe unter Schwarzlicht (ultraviolette Strahlung) leuchten. Diesen Vorgang nennt man **Fluoreszenz**. Elektronen werden dabei durch energiereiche ultraviolette Strahlung (UV-Strahlung) angeregt, nehmen die Energie des Lichtes auf und nehmen damit einen angeregten Zustand an. Sehr kurze Zeit später geben die Elektronen die aufgenommene Energie wieder in Form von sichtbarem Licht ab. Dieses sichtbare Licht hat weniger Energie (und damit eine größere Wellenlänge) als die UV-Strahlung.

In isolierten Atomen, also Atomen ohne weitere Atome in ihrer Nähe, befinden sich die Elektronen nicht irgendwo im Raum um das Atom, sondern in sogenannten **Orbitalen** (Abb. 3). Die Orbitale haben unterschiedliche **Energieniveaus** und können jeweils nur bestimmte Mengen an Elektronen aufnehmen. Die Orbitale sind immer derart mit Elektronen gefüllt, dass die Elektronen in Orbitalen mit möglichst niedrigem Energieniveau liegen (Abb. 4). Nehmen Elektronen Energie auf, wechseln sie in ein Orbital mit einem höheren Energieniveau. Die Energie, die die Elektronen dabei aufnehmen, muss aber genau der Differenz der Energieniveaus der Orbitale entsprechen.

Bei Atomen in Festkörpern, also Atomen mit vielen weiteren Atomen in ihrer Nähe, überlappen sich die Orbitale und die Elektronen in den Orbitalen beeinflussen sich gegenseitig. Dies führt dazu, dass keine sehr schmale isolierte Energieniveaus mehr gibt. Stattdessen gibt es breitere **Energiebänder** (sehr viele dicht nebeneinander liegende Energieniveaus), in denen sich die Elektronen aufhalten.

Wie bei den Orbitalen werden zunächst die Energiebänder mit den niedrigen Energien besetzt. Das energiereichste Band, welches noch vollständig mit Elektronen besetzt ist, nennt man **Valenzband**. Das Band mit der nächsthöheren Energieniveau wird als **Leitungsband** bezeichnet. Bei Isolatoren und Halbleitern enthält das Leitungsband keine Elektronen. Bei Isolatoren ist der Energieunterschied zwischen dem Valenzband und dem Leitungsband groß, bei Halbleitern ist der Unterschied kleiner. Den Unterschied in den Energieniveaus zwischen Valenz- und Leitungsband nennt man **Bandlücke** (Abb. 5). Bei einem großen Unterschied zwischen den Energieniveaus spricht man von einer großen Bandlücke. Bei Leitern, also allen Metallen, befinden sich Elektronen im Leitungsband, oder das Valenz- und Leitungsband überlappt sich. Das in Metallen teilweise mit Elektronen gefüllte Leitungsband ist der Grund, warum Metalle bei Raumtemperatur Strom leiten können. Es sind viele bewegliche Elektronen als Ladungsträger vorhanden, die sich beim Anlegen eines elektrischen Feldes durch das Metall bewegen können.

Bei Halbleitern müssen erst durch Energiezufuhr (z.B.: Licht oder Wärme) Elektronen ins Leitungsband angehoben werden. Bei Nichtleitern ist sehr viel Energie dafür nötig Elektronen ins Leitungsband zu befördern.

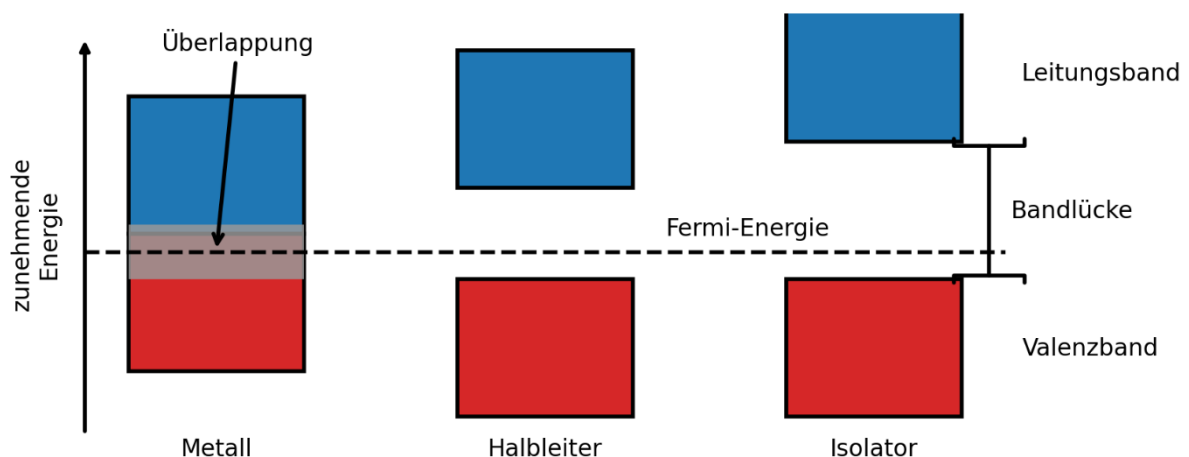


Abbildung 5: Bandlücke bei Metallen, Halbleitern und Isolatoren.

Leuchtdioden (kurz LED, englisch: *light-emitting diode*, deutsch: „lichtemittierende Diode“) enthalten einen Halbleiter mit einem p- und einem n-dotierten Bereich (Abb. 6). Der n-dotierte Bereich hat überschüssige Elektronen und der p-dotierte Bereich hat unbesetzte Elektronenregionen. Die überschüssigen Elektronen im n-dotierten Bereich haben ein höheres Energieniveau als die unbesetzten Energieregionen im p-dotierten Bereich. Legt man eine Spannung an den Halbleiter an, gehen die Elektronen vom n-dotierten Bereich in den p-dotierten Bereich über. Beim Einnehmen der unbesetzten

Energierregionen im p-dotierten Bereich geben die Elektronen ihre Energie in Form von Photonen ab und strömen in Richtung des Pluspols der Spannungsquelle. Vom Minuspol der Spannungsquelle werden neue Elektronen zum n-dotierten Bereich nachgeliefert. Die Wellenlänge der abgegebenen Photonen hängt von dem Material des Halbleiters ab. Ein übliches Halbleitermaterial ist Galliumarsenidphosphid. Durch unterschiedliche Mengenverteilungen kann mit diesem Halbleitermaterial rotes, oranges und gelbes Licht erzeugt werden. Die unterschiedliche chemische Zusammensetzung des Halbleitermaterials sorgt dafür, dass die Unterschiede in den Energieniveaus des Valenz- und des Leitungsband sich unterscheiden, die Bandlücken sind also unterschiedlich groß. Je größer die Bandlücke in dem Halbleitermaterial einer LED ist, desto kurzwelliger ist das Licht, welches die LED abstrahlt. Blaue LEDs haben also eine große Bandlücke, rote eine kleine.

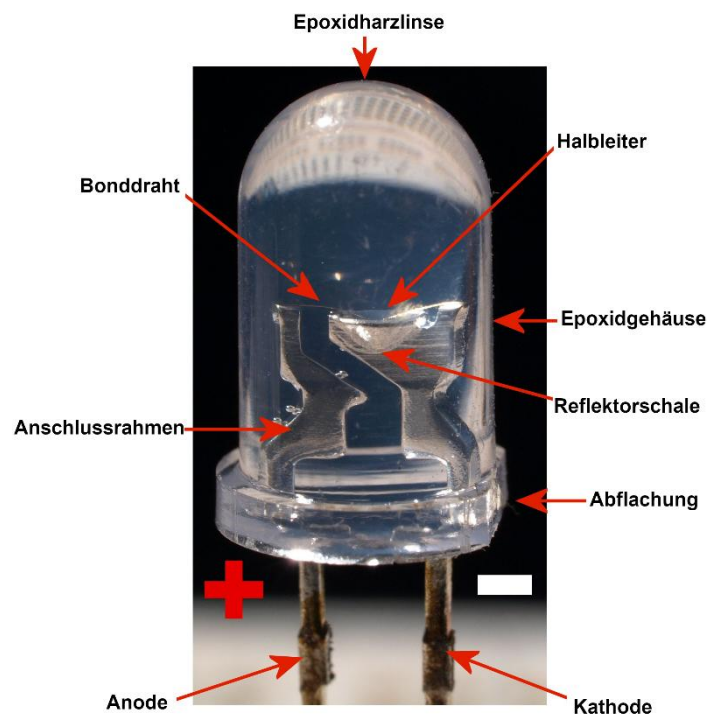


Abbildung 6: Aufbau einer LED. Verändert nach: derivative work: Pschemp (talk)Uvled_highres_macro.jpg: Grapetonix, CC BY 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

In **Solarzellen** macht man sich einen ähnlichen Effekt wie bei dem Versuch mit der Zinkplatte und der UV-Strahlung namens **innerer Photoelektrischer Effekt** zu Nutze. Solarzellen bestehen ähnlich wie LEDs aus zwei übereinander liegenden Schichten von Silizium. Die obere Schicht enthält neben Silizium noch Phosphoratome. Phosphoratome haben fünf Elektronen und Siliziumatome haben vier. So ist eins der Elektronen nur leicht gebunden und kann sich freier bewegen (n-dotierte Schicht). Die untere Schicht enthält neben Silizium noch Boratome. Diese haben nur 3 Elektronen, so dass diese Schicht einen Elektronenmangel aufweist (p-dotierte Schicht). Trifft UV-Strahlung auf die obere Schicht werden Elektronen freigesetzt – es wird also Strom produziert. Durch die np-

Schicht wird das Herauslösen von Elektronen begünstigt und Elektronen von „Elektronenlöchern“ räumlich getrennt. Ohne diese Schicht wurden die Elektronen direkt wieder in die „Elektronenlöcher“ zurückfallen. Verbindet man die obere mit der unteren Schicht leitend über Kabel, fließen die Elektronen von der oberen in die untere Schicht, so dass die aus der oberen Schicht herausgelösten Elektronen, durch die in die untere Schicht fließenden Elektronen ersetzt werden. Den durch das Kabel fließenden Strom kann man für elektrische Verbraucher nutzen.

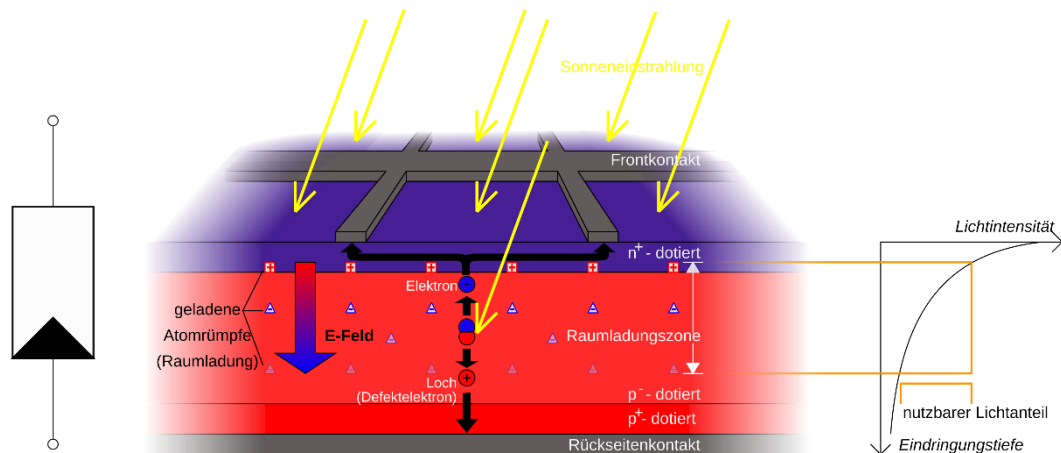


Abbildung 7: Funktionsweise von Solarzellen. Degreen at German Wikipedia, CC BY-SA 2.0 DE <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/deed.en>>, via Wikimedia Commons.

Solarzellen kann man als LEDs nutzen und LEDs als Solarzellen

Durch den ähnlichen Aufbau von Solarzellen und LEDs kann man Solarzellen auch als LEDs und LEDs auch als Solarzellen nutzen. Legt man an Solarzellen eine Spannung an geben Sie Infrarotes Licht ab, welches wir Menschen nicht sehen können (Abb. 8). Bestrahlt man LEDs mit geeignetem Licht wird in ihnen Strom produziert (siehe Versuch Bandlücke). Beide sind allerdings für den jeweils anderen Verwendungszweck nicht optimiert und somit ist die Effizienz stark begrenzt.

Demonstration der Bandlücke

Auch in **Photodioden** macht man sich den **inneren Photoelektrischen Effekt** zu nutze. In Photodioden befindet sich ein ähnlicher Aufbau aus Halbleitern wie in Solarzellen und auch LEDs. Durch Anpassung der chemischen Zusammensetzung der Halbleiter sind Photodioden für Licht mit bestimmten Wellenlängen empfindlich – genau wie bei LEDs. Man kann sogar LEDs als Photodioden/Solarzellen verwenden. Verwendet man eine LED als Photodiode spaltet sich nur ein Elektron von dem Halbleitermaterial ab, wenn das einfallende Licht mindestens die Wellenlänge (oder eine kleinere Wellenlänge) hat, welches die LED abstrahlen würde, wenn man an ihr eine Spannung anlegen würde. Blaue

LEDs müssen also mindestens mit energiereichem blauem Licht bestrahlt werden, rote LEDs geben bereits Elektronen ab, wenn Sie mit mindestens energiearmem rotem Licht bestrahlt werden. Der Prozess der Lichterzeugung in LEDs durch Bestromung ist also umkehrbar (mit einem geringen Wirkungsgrad). Wenn man den Strom verstärkt, der von einer LED bei adäquater Beleuchtung produziert wird, kann man damit eine weitere LED zum Leuchten bringen.

Mit unserem **Versuchsaufbau „Bandlücke“** kann man diese Vorgänge experimentell nachvollziehen. In dem Versuchsaufbau nutzen wir zwei RGB-LEDs. Das sind LEDs in die in ein LED-Gehäuse eine rote, grüne und blaue LED eingebaut ist. Eine dieser RGB-LEDs nutzen wir als Lichtquelle und eine RGB-LED nutzen wir als Photodiode.

Für den Versuch Bandlücke brauchen Sie die Platinen: 1 (ESP), 2 (Bandlücke und Plancksches Wirkungsquantum), zwei Mal die Platine 3 (RGB-Leds) und die Platine 4 (Bandlücke). Der ESP dient bei diesem Versuchsaufbau nur der Stromversorgung.

Verbinden Sie die Platinen 1, 2 und 4 mit den vieradrigen Kabeln an den I2C Steckverbindungen untereinander (Abb. 9). Verbinden Sie eine 3er Platine mit der Platine 2 über die Steckverbindung mit der Beschriftung „RGB-LED“. Verbinden Sie die zweite 3er Platine mit der Platine 4 auch an der Steckverbindung mit der Beschriftung „RGB-Platine“. Platzieren Sie die beiden 3er Platinen mit wenig Abstand, so dass die RGB-LEDs einander gegenüberstehen. Sie können dazu Lego-Kreuzstangen und Buchsen (Design ID: 3713) nutzen.

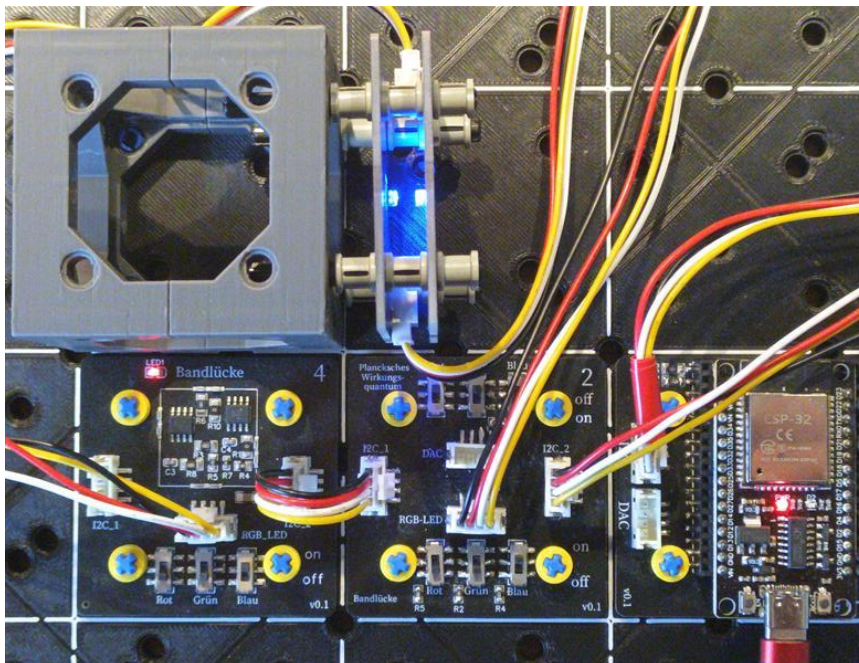


Abbildung 8: Versuchsaufbau des Bandlücken Experiments. In der unteren Reihe sieht man die Platinen 4, 2 und 1. Oben sind die zwei 3er Platinen zu sehen, die senkrecht ausgerichtet sind, so dass die beiden RGB Leds sich direkt gegenüberstehen. Mit dem Schalter auf der Platine 2 bei der Beschriftung „Blau“ wurde die blaue LED auf der angeschlossenen Platine 3 eingeschaltet. Auf der Platine 4 wurde auch der Schalter bei „Blau“ eingeschaltet. In der RGB-LED, die als Photodiode verwendet wurde, wurde in der blauen LED ein Strom erzeugt. Dies kann man daran erkennen, dass die rote LED oben links auf Platine 4 leuchtet.

Mit den drei Schaltern auf Platine 2 rechts neben der Beschriftung „Bandlücke“ können Sie auf der angeschlossenen Platine 2 die rote, grüne oder blaue LED einschalten. Diese RGB-LED wird als Lichtquelle genutzt. Die RGB-Led, die an Platine 4 angeschlossen ist, wird als Photodiode verwendet. Auf der Platine 4 kann man über die drei Schalter wählen, ob die rote, grüne oder blaue LED mit der weiteren Elektronik (Darlington-Verstärkerschaltung) auf der Platine verbunden ist. Falls Strom in den Photodioden-LEDs durch adäquate Bestrahlung produziert wird, wird dieser durch die Darlington-Verstärkerschaltung verstärkt und bringt die rote LED links von der Beschriftung „Bandlücke“ auf der Platine 4 zum Leuchten.

Probieren Sie nacheinander aus mit rotem, grünem und blauem Licht aus der Lichtquellen-RGB-LED Strom in der roten, grünen und blauen Photodioden-LED zu produzieren. Tragen Sie in der folgenden Tabelle auf bei welcher Kombination aus Licht und Photodioden-LED Strom produziert wurde und damit die rote LED geleuchtet hat. Erklären Sie Ihre Ergebnisse in Ihren eigenen Worten.

Tabelle 1: Tabelle zum Festhalten der Ergebnisse des Bandlückenexperiments. Tragen Sie in jedes freie Feld ein, ob die rote Anzeige-LED auf Platine 4 geleuchtet hat (Ja/Nein).

Ergebnisse Exp. Bandlücke		Photodioden-RGB-LED		
		Rot	Grün	Blau
Lichtquelle (RGB-LED)	Rot			
	Grün			
	Blau			

Exkurs – Funktionsweise der Schaltung zur Verstärkung des Stroms in der Photodioden-RGB-LED

Wenn Licht auf die RGB-LED trifft, arbeitet sie im Detektorbetrieb wie eine Photodiode und erzeugt einen kleinen Photostrom. Dieser Strom fließt dabei vom invertierenden Eingang des Operationsverstärkers (LM358) weg in Richtung Masse, weil die Diode im Sperrbetrieb betrieben wird. Somit erzeugt der Photostrom einen negativen Strom am OpAmp-Eingang und der invertierende Eingang des LM358 wird leicht nach unten gezogen. Da der Operationsverstärker versucht, seine Eingänge auf gleichem Potenzial zu halten, reagiert er auf diesen nach unten gezogenen Eingang, indem er seinen Ausgang entsprechend nach oben steuert. Der Rückkopplungswiderstand (R8) wandelt diesen winzigen Photostrom proportional in eine Spannung um – je höher der Photostrom, desto stärker steigt die Ausgangsspannung des TIA. Der parallel geschaltete Kondensator stabilisiert den Verstärker, indem er hochfrequentes Rauschen und Störspitzen dämpft. Damit entsteht aus dem schwachen Photostrom eine saubere, deutlich messbare Spannung.

Diese verstärkte Ausgangsspannung gelangt dann an den Komparator (LM393). Dort wird sie mit einer festen Referenzspannung verglichen, die durch Widerstände definiert ist. Solange der Photostrom (und damit die TIA-Ausgangsspannung) noch zu gering ist, bleibt der Komparatorausgang in seinem inaktiven Zustand. Durch die Schmitt-Trigger-Rückkopplung wird außerdem eine Hysterese erzeugt: Der Komparator schaltet erst bei einem klar definierten oberen Schwellenwert ein und erst bei einem niedrigeren Schwellenwert wieder aus. Dadurch werden kleine Schwankungen und Rauschen im Signal zuverlässig unterdrückt.

Sobald jedoch genügend Licht einfällt, steigt der Photostrom an, wodurch der TIA seinen Ausgang weiter anhebt, bis die Komparatorschwelle überschritten wird. In diesem Moment schaltet der LM393 um und sein Open-Collector-Ausgang zieht die LED-Leitung auf Masse. Dadurch fließt Strom durch die Anzeige-LED, die gut sichtbar aufleuchtet. Die LED zeigt also eindeutig an, dass der Photostrom aus der RGB-LED groß genug geworden ist, um die definierte Schwelle zu überschreiten.

Damit verwandelt die gesamte Schaltung einen minimalen, nach Masse fließenden Photostrom der RGB-LED in ein verstärktes analoges Signal und schließlich in ein sauberes digitales An/Aus-Signal mitsamt visueller Anzeige.

Bei **VCC = 3,3 V** schaltet der Schmitt-Trigger ungefähr bei:

- **Einschalten (LED an):**

$$U_{\text{TIA}} \approx 92 \text{ mV}$$

- **Ausschalten (LED aus):**

$$U_{\text{TIA}} \approx 81 \text{ mV}$$

Die Hysterese beträgt also rund **11 mV** am Ausgang des TIA.

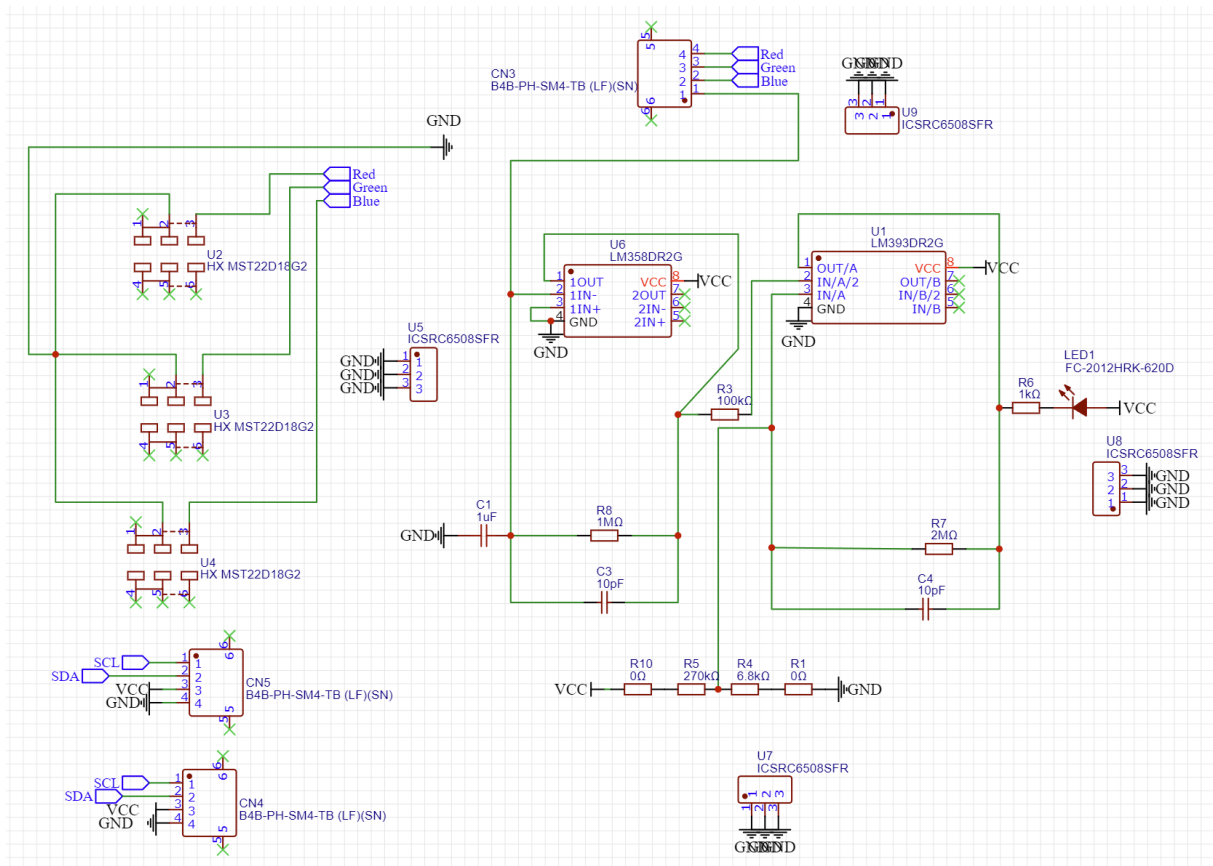


Abbildung 9: Schaltplan Platine 4.

Disclaimer:

LEGO® ist eine Marke der LEGO Group. Dieses Produkt steht in keiner Verbindung zur LEGO Group und wird von ihr nicht autorisiert oder unterstützt.

Projektpartner



Gefördert durch:

