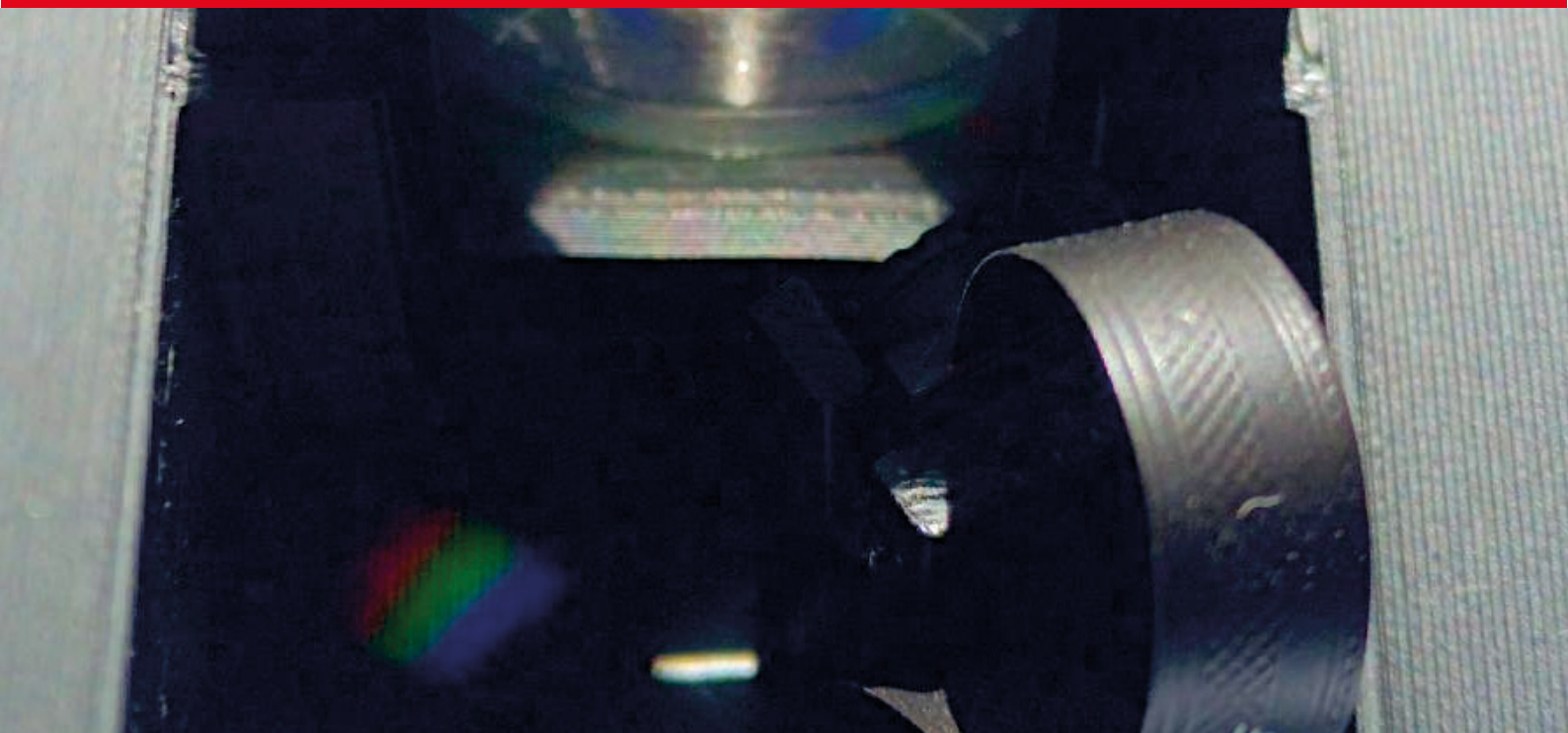


DIY-Quantenexperimente

Spektrometer



HRW-FabLab Photospektrometer

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

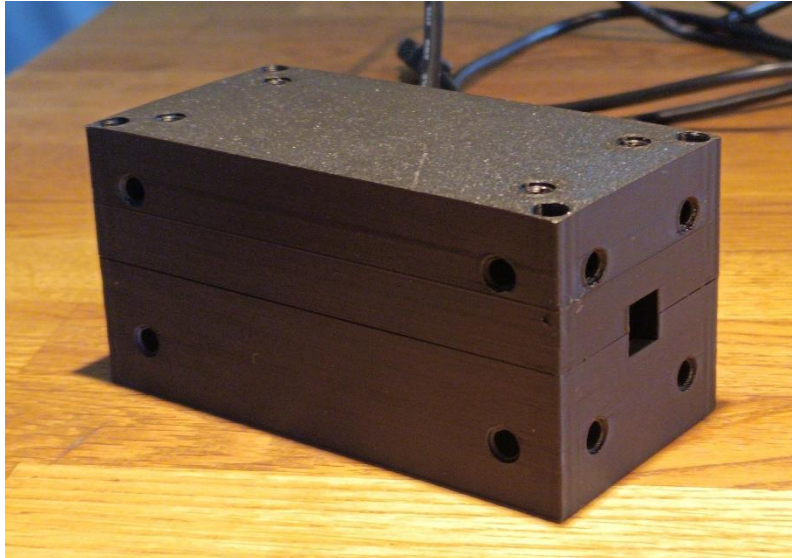


Abbildung 1: HRW-Photospektrometer. Hinter dem dunklen rechteckigen Bereich auf der rechten Seite des Spektrometers befindet sich der Lichteinlass.

Passend zu unserem QuFabLab-Würfelsystem haben wir am HRW-FabLab das HRW-FabLab Photospektrometer (LabSpec) entwickelt, welches mit wenigen kostengünstigen Komponenten und wenigen 3D-gedruckten Teilen nachgebaut werden kann (Abb. 1). Unser Spektrometer kann über ein USB-Kabel an einen Computer angeschlossen und mit kostenloser Software betrieben werden. Mit einem Spektrometer kann man Schülern und Studenten viele unterschiedliche Aspekte von der Lichtzusammensetzung bis hin zu quantentechnologischen Phänomenen anschaulich vermitteln (Abb. 2). In Kapitel 4 finden Sie eine Beispiel-Unterrichtseinheit in der Spektren von verschiedenen Lichtquellen miteinander verglichen werden und auf die unterschiedlichen Weisen der Entstehung von Photonen in den Lichtquellen eingegangen wird.

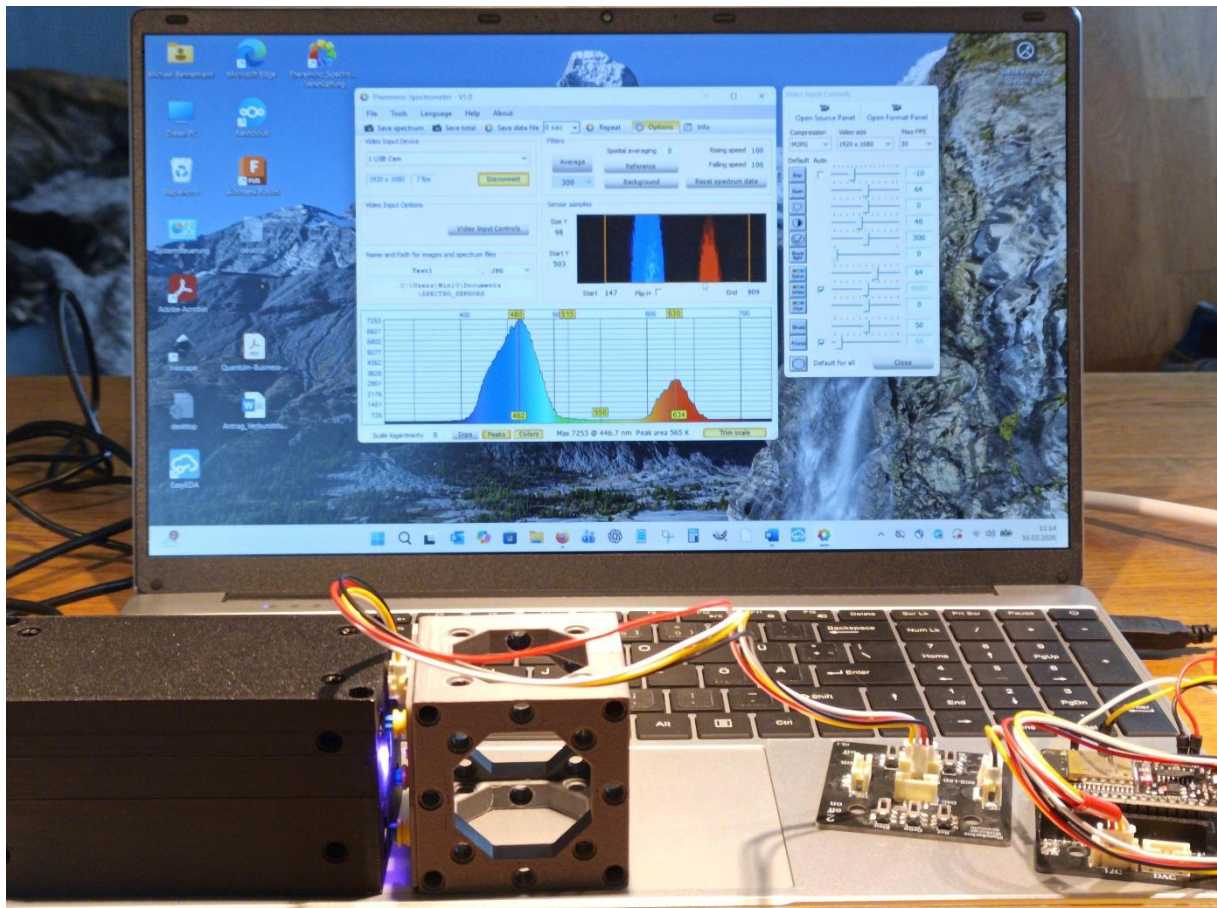


Abbildung 2: Photospektrometer (links unten) beleuchtet mit rotem und blauem Licht aus einer RGB-LED (montiert an dem Würfel vor dem Spektrometer). Auf dem Bildschirm sind die Ausschläge des roten und blauen Lichts erkennbar.

1. Funktionsweise Spektrometer

Für den Zusammenbau unseres Spektrometers benötigen Sie:

- 3D-Drucke: Gehäuse, Linsenhalter, Halter Beugungsgitter, optischer Spalt ($\sim 150 \mu\text{m}$)
- Kollimationslinse (Brennweite: 45 mm; Durchmesser: 25 mm)
- Optisches Gitter (1000 Linien/mm)
- USB-Kamera (OV5640 Kamera mit festem Fokus und USB-Adapter)
- 4 Lego Verbinder (Bauteilnummer: 6279875)

Bezugsquellen für alle Materialien finden Sie in Kapitel 2.

Licht fällt durch den **optischen Spalt** in das Spektrometer (Abb. 3). Der optische Spalt begrenzt das einfallende Licht räumlich auf eine sehr schmale vertikale Linie. Des Weiteren reduziert er die Menge an Licht, die ins Spektrometer fällt und begünstigt, dass möglichst viel Licht von vorne ins Spektrometer fällt.

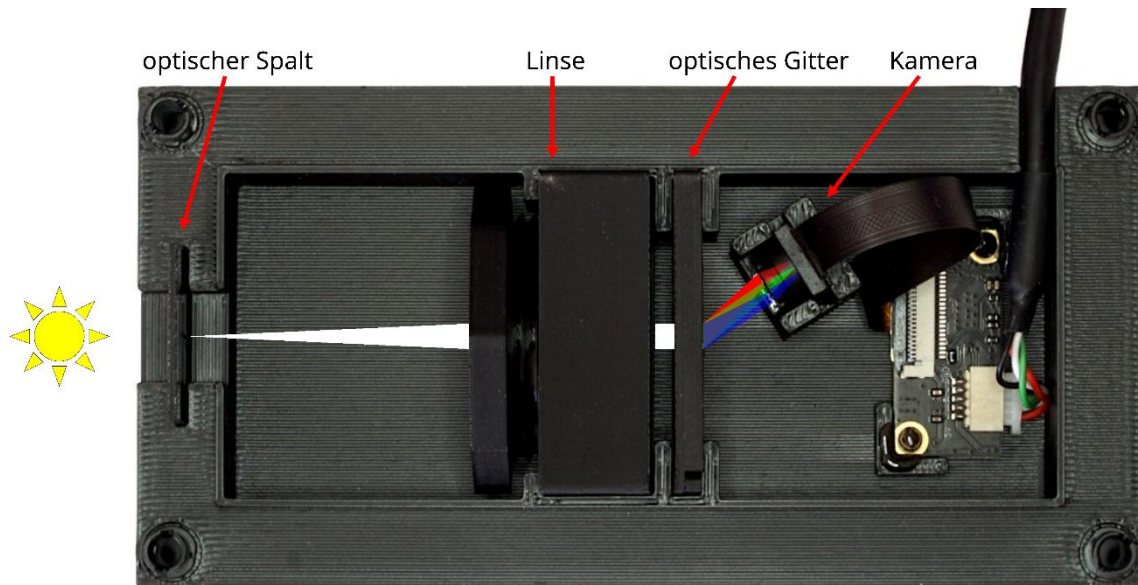


Abbildung 3: Innerer Aufbau unseres HRW-FabLab Spektrometers mit dargestelltem Strahlengang. Die Oberseite des Spektrometer-Gehäuses wurde entfernt.

Der Spalt liegt im Fokuspunkt der **Linse**. Dadurch erzeugt die Linse ein paralleles Strahlenbündel aus dem keilförmigen Licht, welches durch den Spalt in das Spektrometer eintritt. Dadurch treffen alle Strahlen senkrecht auf das optische Gitter.

Das Herzstück des Spektrometers ist das **optische Gitter**. Die optischen Vorgänge an einem optischen Gitter sind vergleichbar mit denen an einem Doppelspalt. Hinter jedem Spalt breitet sich eine Lichtwelle aus (Abb. 4). Diese wechselwirken miteinander. Das Wechselwirken nennt man interferieren und den Vorgang Interferenz. Bei dem Vorgang entsteht ein sogenanntes Interferenzmuster.

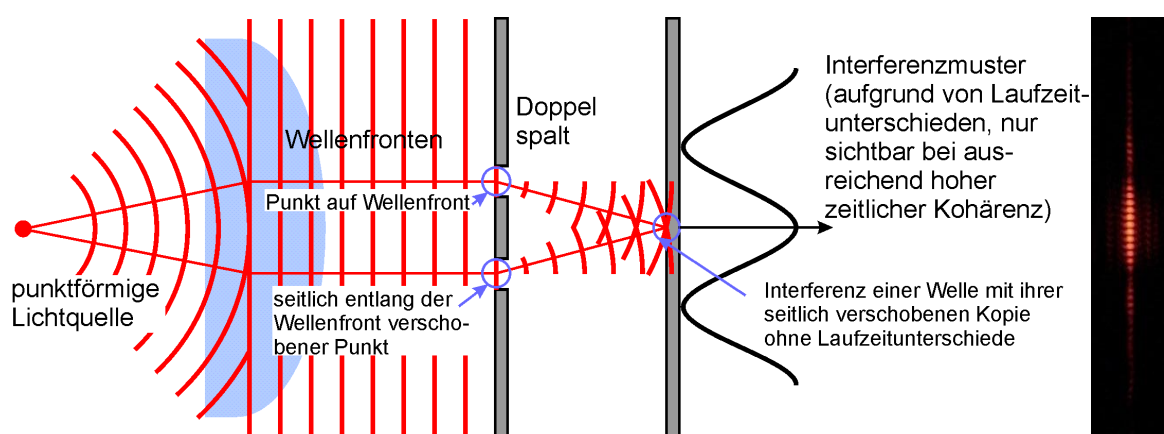


Abbildung 4: Beugung am Doppelspalt. Schematische Entstehung eines Interferenzmuster am Doppelspalt (linkes Bild: Sarina Wunderlich, CC BY-SA 2.0 DE <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.0/de/deed.en>>, via Wikimedia Commons, rechtes Bild verändert nach: Jordgette, CC BY-SA 3.0 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0>>, via Wikimedia Commons).

Beim Doppelspaltexperiment schickt man Licht auf zwei sehr schmale parallele Spalte und misst dahinter auf einem Schirm, wo „Treffer“, also einzelne Photonen, ankommen. Wenn beide Spalte offen sind, sieht man nach vielen Treffern ein Muster aus hellen und dunklen Streifen.

Quantenphysikalisch erklärt man das so:

- Licht besteht aus Energiepaketen, den Photonen oder Lichtteilchen. Ein Photon ist jedoch kein winziges Kügelchen, das schon vorher eine feste Bahn hat. Es wird durch eine **Wellenbeschreibung** beschrieben, die angibt, **wie wahrscheinlich** es ist, an einem bestimmten Ort später nachgewiesen zu werden. Vereinfacht ausgedrückt beschreibt die einhüllende Amplitude der Welle die Aufenthaltswahrscheinlichkeit eines Photons.
- Hinter dem Doppelspalt gibt es **zwei mögliche Beiträge** zum Ergebnis: der Anteil, der vom ersten Spalt kommt, und der Anteil, der vom zweiten Spalt kommt. Solange man **nicht feststellt**, welchen Spalt das Photon „genommen“ hat, müssen diese beiden Beiträge **gemeinsam** berücksichtigt werden.
- Da sich die Amplituden der Wellenlängen über die zurückgelegten Wege ändern, muss man diesen mitberücksichtigen. Je nachdem, wie lang die Wege zu einem Punkt auf dem Schirm sind, kommen die beiden Amplituden dort in einem **passenden** oder **unpassenden** Takt an:
 - Passen sie zusammen, verstärken sie sich: An solchen Stellen ist die **Nachweiswahrscheinlichkeit** groß. Dort sammelt man viele Treffer → ein heller Streifen.
 - Passen sie gegeneinander, schwächen sie sich: An solchen Stellen ist die **Nachweiswahrscheinlichkeit** sehr klein. Dort kommen kaum Treffer an → ein dunkler Streifen.
- Den Takt bezeichnet man auch als Phase. Die Phase wiederholt sich jede Wellenlänge.
- Wichtig: Es wird dabei **kein Photon „halbiert“** und auch nichts „ausgelöscht“, was schon als Teilchen am Schirm unterwegs wäre. Jedes einzelne Photon wird immer als **ganzer** einzelner Treffer registriert. Das Streifenmuster entsteht erst, wenn man **sehr viele** einzelne Treffer sammelt und ihre Verteilung anschaut.
- Sobald man versucht herauszufinden, **durch welchen Spalt** das Photon ging (also Weginformation gewinnt), geht genau diese gemeinsame Überlagerung (Superposition) verloren. Dann verhalten sich die beiden Wege wie zwei getrennte Möglichkeiten, die sich nicht mehr „im Takt“ überlagern – und das Interferenzmuster verschwindet.

Kurz gesagt: Beim Doppelspalt interferieren nicht die Photonen „miteinander“, sondern die **Möglichkeiten** (die beiden Wege) interferieren – und dadurch entstehen auf dem Schirm Bereiche mit hoher und niedriger Nachweiswahrscheinlichkeit.

Den Takt und die Amplitude der Lichtwellen kann man auch als Täler und Berge darstellen. Treffen an einem Punkt hinter dem Doppelspalt zwei Berge der Lichtwellen aus den Spalten zusammen, ist die Lichtintensität an diesem Punkt besonders stark. Trifft ein Berg und ein Tal aufeinander ist die Nachweiswahrscheinlichkeit eines Photons gering und in diesem Punkt ist es dunkel. Diesen Vorgang nennt man Interferenz (s. Abb. 5).

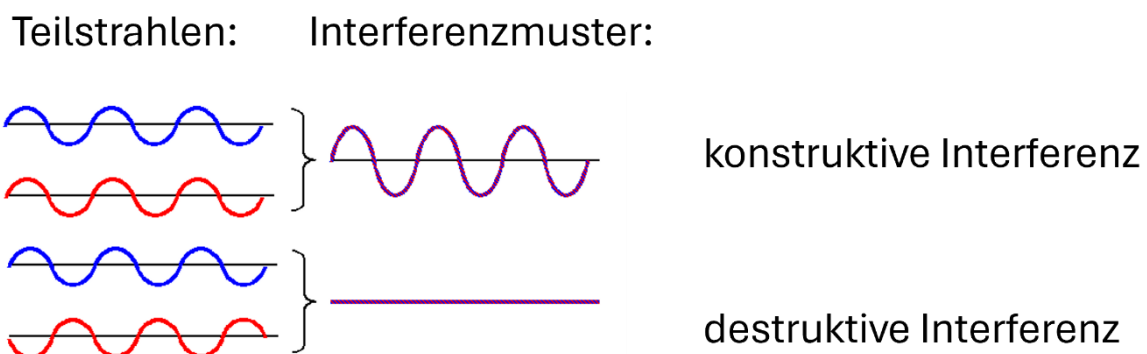


Abbildung 5: Interferenz von zwei Lichtwellen mit identischer Phase und mit um eine halbe Wellenlänge verschobener Phase.

Ein optisches Gitter hat sehr feine linienförmige Strukturen. Bei unserem Gitter sind es 1000 pro Millimeter (s. Abb. 6). Hinter jeder dieser Strukturen entsteht eine neue Welle. Dies sorgt dafür, dass das Muster aus hellen und dunklen Bereichen (Interferenzmuster) schmalere Linien aufweist.

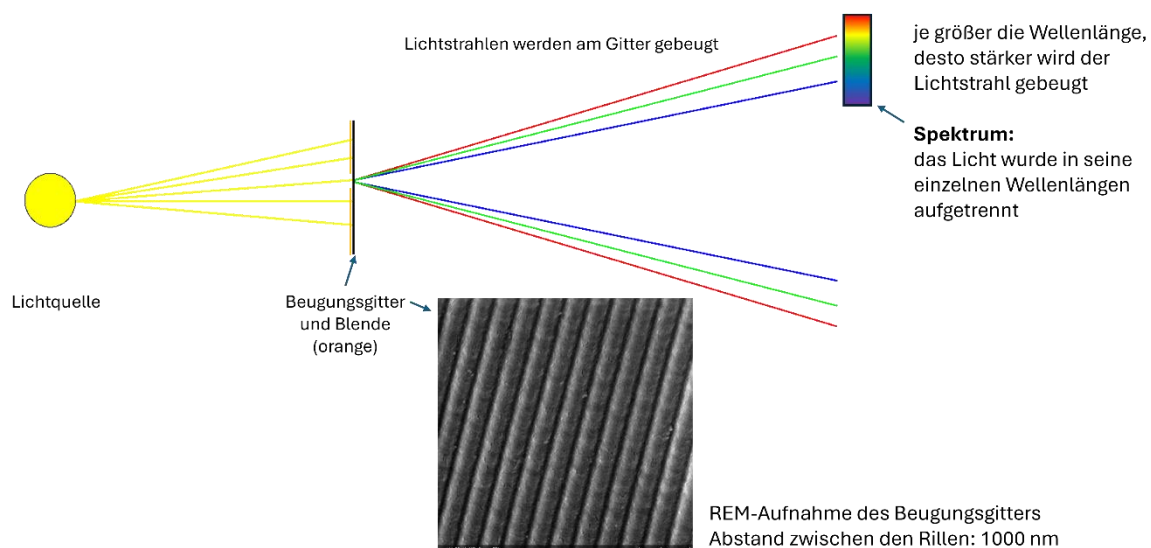


Abbildung 6: Beugung am Gitter. Die Abbildung stellt die Beugung vereinfacht dar. Bei jeder beleuchteten Linie des Beugungsgitter entsteht eine sich kreisförmig ausbreitende Welle, die mit den anderen Wellen interferiert. Die farbigen Linien stellen nur das Ergebnis der Interferenz an einem bestimmten Punkt dar.

Der Lichtstrahl, der auf das optische Gitter trifft, geht zum Teil gradlinig durch das Gitter (Beugung nullter Ordnung, nicht dargestellt). Weitere Teile des Lichtstrahls teilen sich in zwei Bereiche auf (Beugung erster Ordnung), die in bestimmten Winkeln stehen. Man sagt Licht wird gebeugt. Je größer die Wellenlänge des Lichtes ist, desto stärker wird das Licht gebeugt (=desto größer ist der Winkel zum nicht gebeugten Lichtstrahl). Daher wird weißes Licht in seine verschiedenen Wellenlängen aufgespalten (s. Abb. 6). Die verschiedenen Wellenlängen treffen im Spektrometer als feine Linien auf den Sensor der Kamera. Die Kamera ist so eingestellt, dass sie ein scharfes Bild des optischen Spalts auf den Sensor wirft. Da die unterschiedlichen Wellenlängen unterschiedlich stark gebeugt werden, sieht man für jede Farbe eine Abbildung des Spalts.

Die **Kamera**, welche so ausgerichtet ist, dass das sichtbare Spektrum von 400-700 nm mittig auf dem Sensor zentriert ist, misst die Intensität des Lichtes auf jedem Pixel. Die gesamte Intensität in jeder Pixelspalte wird in der Software gemittelt und es wird ein Spektrum ausgegeben, in dem die Intensitäten für die verschiedenen Wellenlängen ausgegeben werden. Der Fokus der Kamera liegt im Unendlichen. So werden die Interferenzen durch die Kollimationslinse und die Kameralinse scharf auf dem Kamerasensor abgebildet. Optimalerweise würde man in einem Spektrometer eine Kamera verbauen deren Sensoren für alle Wellenlängen gleich empfindlich sind. Solche Sensoren gibt es aber nicht. Auch die Sensoren in monochromen Kameras haben unterschiedliche Empfindlichkeiten für unterschiedliche Wellenlängen und sind deutlich teurer als übliche Farb-Kameras. Farb-Kameras haben vor dem Sensor Farb-Filter, die hauptsächlich rotes, grünes und blaues Licht durchlassen. Da wir eine solche Farb-Kamera in unserem Spektrometer verwenden ist unser Spektrometer besonders empfindlich für diese Wellenlängen (s. Abb. 7). Die gemessenen Spektren geben daher hauptsächlich Informationen über das Vorhandensein einer bestimmten Wellenlänge, aber die Intensität einer bestimmten Wellenlänge in einer Lichtquelle kann mit unserem Spektrometer nicht präzise bestimmt werden. Aus didaktischen Gründen ist eine farbige Anzeige des gemessenen Spektrums in der Software im Fenster Sensor samples aber hilfreich.

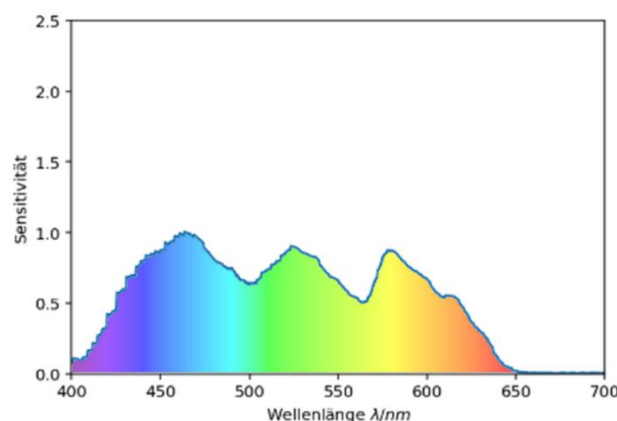


Abbildung 7: Sensitivität von RGB-Kameras für die verschiedenen Wellenlängen. Die höchste Sensitivität zeigt die Kamera für rotes, grünes und blaues Licht.

2. Zusammenbau des Spektrometers

Notwendige Materialien:

3D-gedrucktes Gehäuse, Linsenhalter, Halter optisches Gitter, optischer Spalt:

auf unserer Website www.qufablab.de finden Sie stl Dateien namens Spektrometer (Ober- und Unterseite), Linsenhalter, Halter optisches Gitter und optischen Spalt und Hinweise zum 3D-Druck.

Optischer Spalt:

Sie können den optischen Spalt 3D drucken oder mit einem Lasercutter ausschneiden. Entsprechende Dateien finden Sie auf unserer Website.

Platzieren Sie den optischen Spalt in das Gehäuse des Spektrometers, so dass der Spalt senkrecht ausgerichtet ist.

Beugungsgitter:

152 x 38 mm – reicht für 5 Spektrometer

<https://astromedia.de/Das-Durchlicht-Beugungsgitter-GW-1000-mit-Diarahmen> (4,90 €)

150 x 300 mm – reicht für 50 Spektrometer

<https://astromedia.de/Das-Durchlicht-Beugungsgitter-gross-1000> (15 €)

schneiden Sie die Folie auf eine Größe von etwa 28 x 28 mm zurecht und fügen Sie sie in den Halter für das optische Gitter ein. Das optische Gitter muss so in das Spektrometer eingesetzt werden, dass Strukturen auf dem optischen Gitter senkrecht verlaufen. Dies können Sie überprüfen, indem Sie einen Laser auf das Gitter ausrichten. Wenn das Interferenzmuster Punkte auf einer horizontalen Linie zeigt, ist das Gitter richtig orientiert.

Linse:

fügen Sie die Linse in die 3D-gedruckte Halterung und stecken Sie sie in das Spektrometer-Gehäuse (Planfläche zum Spalt, gewölbte Seite zum optischen Gitter).

https://astromedia.de/OptiMedia-Acrylglas-Linse-OM12?gad_source=1&gad_campaignid=18702949605&gbraid=0AAAAACVRhXyleG1nAQ9Oj_oZyjkyaUpA&gclid=EAIaIQobChMImdHPp8GAKAMV55mDBx3KrzsDEAYYASABEgKdkPD_BwE

Alternative Quelle für 1000 Stück:

<https://www.durovis.com/en/product.html?id=8>

OV5640 Kamera mit festem Fokus und USB-Adapter:

https://de.aliexpress.com/item/1005005590089007.html?spm=a2g0o.order_list.order_list_main.80.722a5c5fXzAEKo&gatewayAdapt=glo2deu (~10 €)

oder:

https://www.amazon.de/Keenso-USB-Kameramodul-Weitwinkel-Kameramodul-OV5640-Chip-Support-Fenster-Android-System/dp/B07QXPYXWL/ref=sr_1_11?_mk_de_DE=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91&crd=3S7A21V2QIDF1&dib=eyJ2ljojMSJ9.xVDwNwiPa3BrNkK56y3X3K0YYtAwUr4qP3112umlZR8wfZSS-69Xpj0OOYgeLN7fZLmgem8X9gJ4zTn26P3mqPZpUa7V7yhqlcUztmxMK_UDJgCQuuBR3ORN0ARi4ozGH_SFT5-UO4XhzqjfeaKkdG6A8125JjgPlp3ocevJo2meKHOz0k3btz3lxUsqLPQB1ZEG8WvQLzxp6GNJ9jgx4_5DN2y2lg5tltqY31n5SU.NYX_oQT_Uy2YhI9mPOCQPNcy8clvNk8fwjIRVGR9NFZE&dib_tag=se&keywords=Ov5640+Kamera+usb&qid=1757344836&sprefix=ov5640+kamera+usb%2Caps%2C118&sr=8-11 (~30 €)

Platzieren Sie die Kamera in die vorgesehene Halterung im Gehäuse und schrauben Sie die Platine daneben fest. Verwenden Sie dazu zwei Schrauben mit einer Länge von 5 mm.

Lego Verbinder 6279875:

https://www.lego.com/de-de/pick-and-build/pick-a-brick?icmp=PAB_All_Pieces&query=6279875 (0.06 €)

platzieren Sie je einen Lego-Verbinder in die Löcher an den Ecken des Gehäuses. Fügen die die beiden Hälften des Gehäuses zusammen.

3. Bedienung des Spektrometers

Zur Verwendung des Spektrometers empfehlen wir die kostenlose Theremino-Spektrometer Software V 5.0 (s. Abb. 8):

https://www-theremino-com.translate.goog/downloads/automation?_x_tr_sl=auto&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de

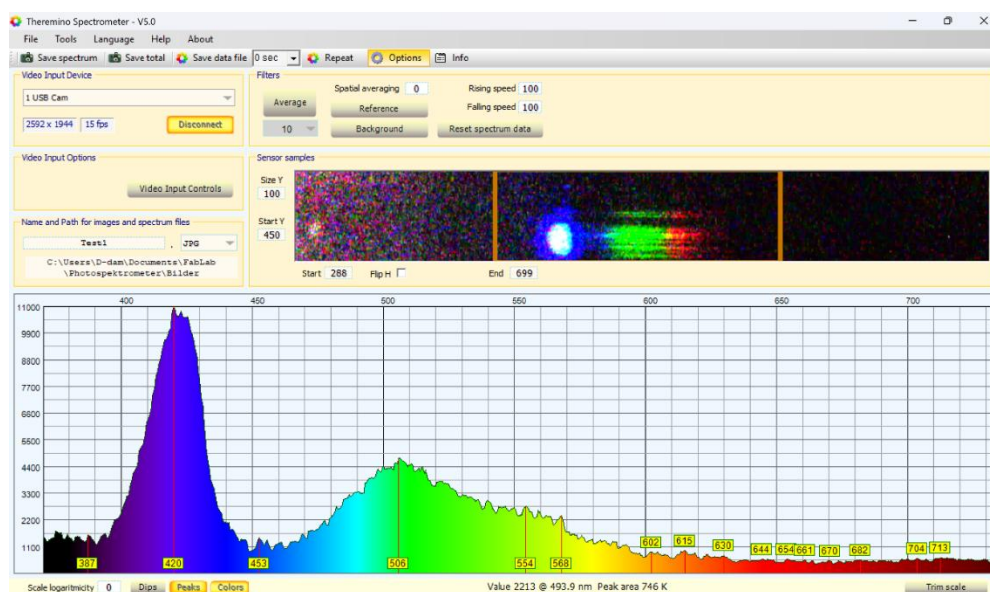


Abbildung 8: Theremino Software.

Schließen Sie das Spektrometer mit dem USB-Kabel an Ihren Rechner an und öffnen Sie die Theremino Software. Wählen Sie unter “Video Input Device“ „USB Cam“ aus. In den “Video Input Options“ kann unter anderem die Auflösung und Belichtungszeit eingestellt werden. Die OV5640 Kamera hat eine maximale Auflösung von 2592×1944 Pixel. Stellen Sie diese Auflösung ein und YUY2 unter Compression. Dabei wird automatisch eine Bildrate (MAX FPS) von 2 Bilder pro Sekunde eingestellt. Unter diesen Einstellungen können Sie die besten Messungen machen. Da 2 Bilder pro Sekunde aber eine geringe zeitliche Auflösung sind, können Sie auch zunächst die Einstellung auf bei Compression auf MJPG stellen, dann wird 15 FPS eingestellt.

Unter dem Spektrum sollten Sie „Colors“ auswählen, damit bei dem Spektrum Farben angezeigt werden. Wenn Sie „Peaks“ auswählen, werden die Wellenlängen angezeigt, die am stärksten im Spektrum vertreten sind.

Bei der ersten Nutzung des Spektrometers müssen Sie das Spektrometer kalibrieren. Dabei legen Sie fest, dass bestimmte Messwerte zu einer bestimmten Wellenlänge gehören. Zur Kalibration müssen Sie Licht mit einer bekannten Wellenlänge in das Spektrometer leuchten und diese Wellenlänge den gemessenen Werten zuordnen.

Sie können dazu die RGB-LED aus unserem Kit verwenden. Eine genauere Kalibrierung kann mittels zweier (oder dreier) Lasern mit unterschiedlichen Farben vorgenommen werden. Da diese aber meist nicht vorhanden sind, beschreiben wir hier die Kalibrierung mittels der RGB-LED: Die RGB-LED in unserem Kit hat folgende Peak-Wellenlängen: Rot: 630 nm, Grün: 515 nm, Blau: 460 nm. Leuchten Sie mit der roten und blauen LED der RGB-LED wie in Abbildungen 2 und 9 dargestellt in das Spektrometer.

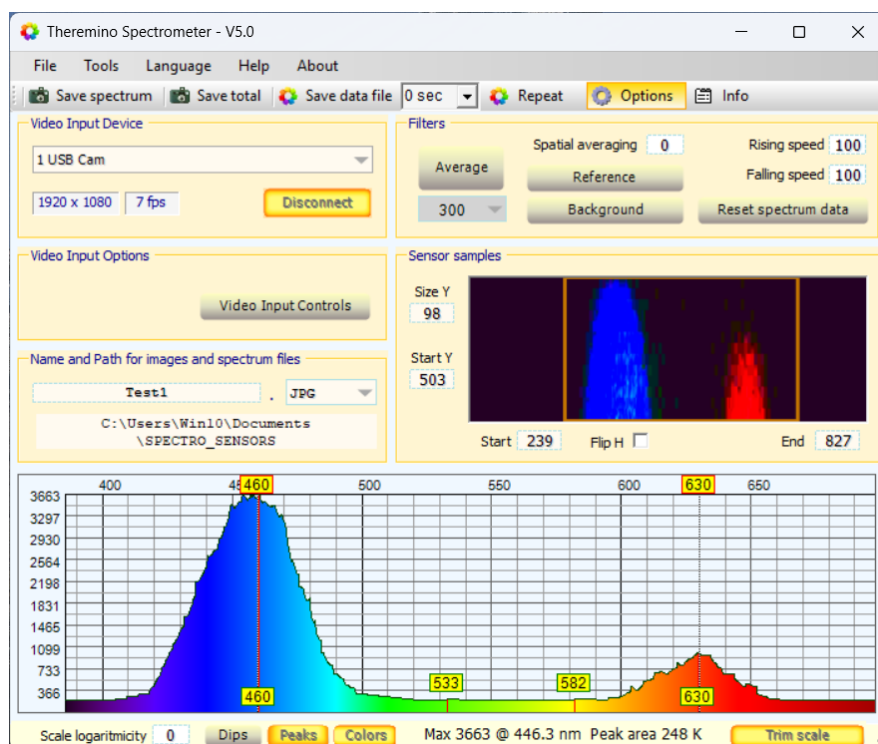


Abbildung 9: Kalibrierung mittels blauen und roten Lichts.

Da die LED recht hell ist stellen Sie die Belichtung (Exp.) auf etwa -10 ein (Abb. 10).

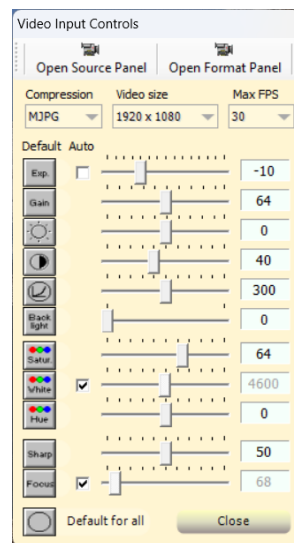


Abbildung 10: Einstellung zur Kalibrierung mit reduzierter Belichtungszeit (EXP.).

Optimieren Sie die Position der RGB-LED vor dem Spektrometer, so dass das rote und blaue Licht vom Spektrometer detektiert wird. Wählen Sie zur Kalibration bei „Tools“ „Trim Points“ aus und eine der beiden Einstellungen. Mit Rechtsklick auf die Skala über dem Spektrum, wo die Wellenlängen angezeigt werden, können Sie einen neuen Trimpunkt (bestimmte Wellenlänge für die Kalibrierung) hinzufügen. Dieser wird dort eingefügt, wo Sie hin klicken. Mit dem Mausrad können Sie in das Spektrum rein- und rauszoomen und beim Reinzoomen die Position des Trimpunktes genauer bestimmen. Legen Sie Trimpunkte bei 630 und 460 nm an und löschen Sie die automatisch erzeugten Trimpunkte durch Rechtsklick und löschen. Es müssen immer mindestens 2 Trimpunkte vorhanden sein. Sie müssen bei 2 vorhandenen Trimpunkten also erst neue Trimpunkte erstellen, um welche löschen zu können.

Durch Anklicken mit der linken Maustaste und Ziehen können die Trimpunkte entsprechend zu den Ausschlägen im Spektrum verschoben werden. Verschieben Sie den Trimpunkt bei 460 nm in die Mitte des Ausschlags des blauen Lichtes und den Trimpunkt bei 630 nm in die Mitte des Ausschlags des roten Lichtes. Bei optimaler Einstellung entsprechen die unter dem Spektrum angezeigten Peaks der Ausschläge den Wellenlängen 460 und 630 nm (Abb. 9).

Falls bei Ihnen der rote Peak links und der blaue rechts angezeigt wird, müssen Sie über dem Spektrum das Häkchen bei Flip H setzen oder entfernen.

Noch etwas genauer können Sie das Spektrometer kalibrieren, wenn Sie nun nur die grüne LED einschalten, einen Trimpunkt bei 515 nm erstellen und diesen auf die Mitte des Ausschlags des grünen Lichtes ziehen:

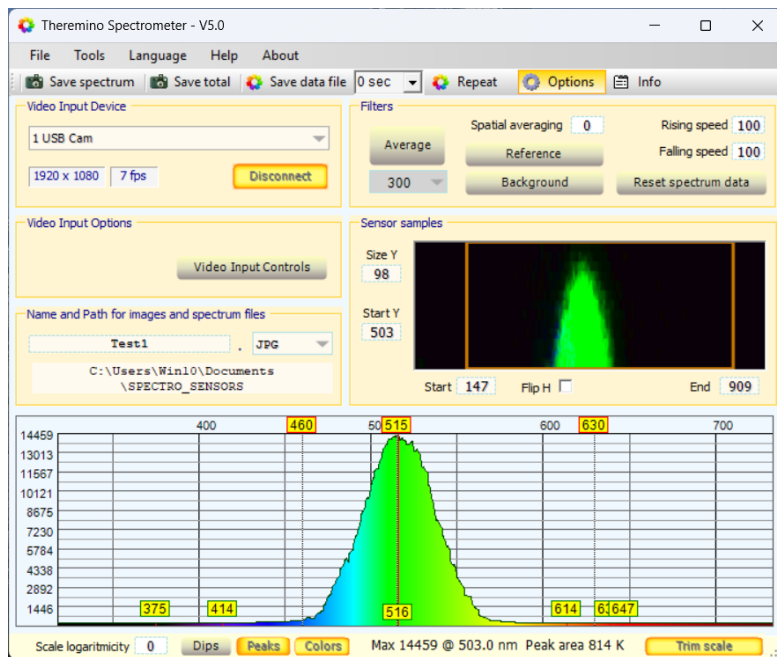


Abbildung 11: Zusätzliche Kalibrierung mittels grünem Licht.

Einen alternativen Aufbau zur Kalibration des Spektrometers können Sie Abbildung 12 entnehmen. Bei der Verwendung des Spektrometers ist darauf zu achten, dass die Kamera nicht überblendet wird. Dazu kann z.B. durch indirekte Beleuchtung mit Schirm gemessen werden. In dem Aufbau wird das Licht einer RGB-LED mittels einer Linse kollimiert (erster Würfel), durch einen Spiegel um 90 Grad umgeleitet und trifft dann auf einen Strahlteiler. Dieser wirft das Licht auf einen weißen Schirm. Von diesem wird das Licht reflektiert und es fällt darauf durch den Strahlteiler in das Spektrometer.

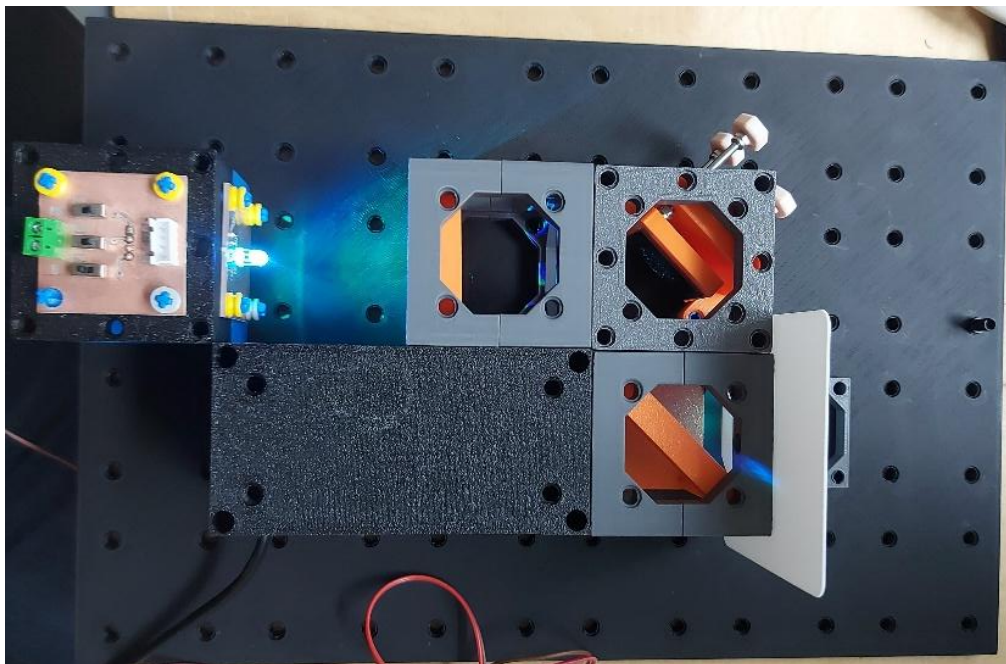


Abbildung 12: Messung des Spektrums der roten, grünen und blauen LED in einer RGB-LED.

Wenn Sie das Spektrometer kalibriert haben, kann die Kalibration unter „File“ – „Save calibration as“ abgespeichert werden.

Unter „File“ - „Load Calibration“ kann die Kalibrationsdatei für die Kalibrierung wieder geladen werden.

4. Unterrichtseinheit: Vergleich der Spektren verschiedener Lichtquellen

Licht ist der Teil der elektromagnetischen Strahlung, den Menschen sehen können. Menschen können elektromagnetische Strahlung sehen, die Wellenlängen von etwa 380 bis 780 nm haben (Abb. 13). Licht mit einer Wellenlänge um 470 nm ist blau, um 535 nm grün und um 650 nm ist rot. Als weiß nehmen wir Licht wahr, wenn gleiche Anteile an rotem, grünem und blauem Licht in unser Auge fallen. Weißes Licht mit einer festen Wellenlänge gibt es demnach also gar nicht!

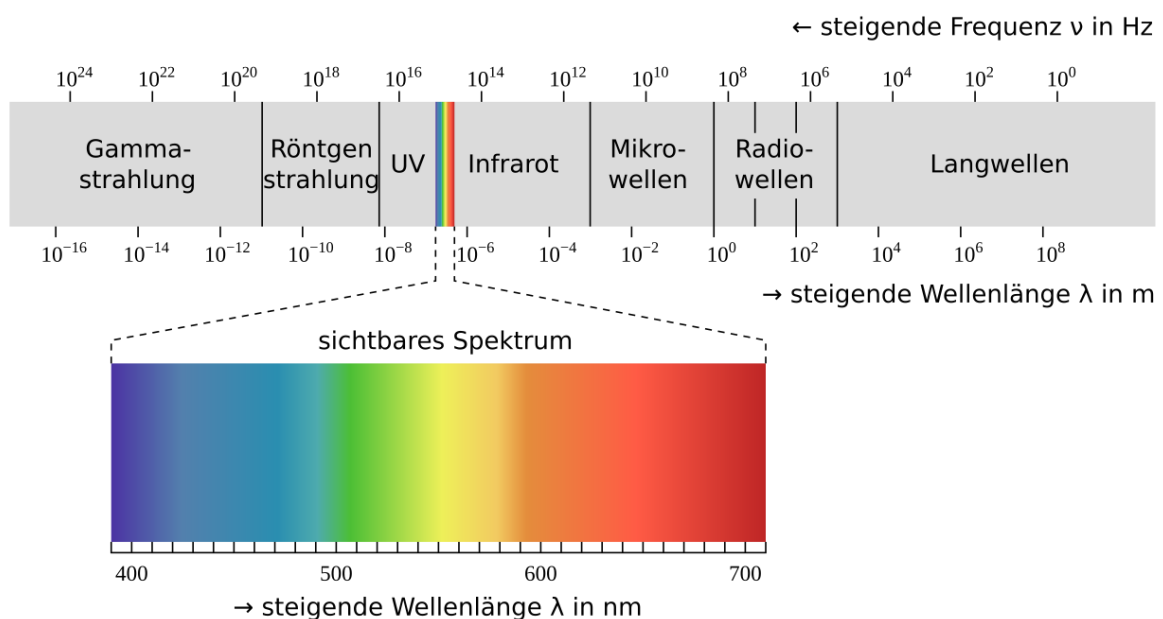


Abbildung 13: Elektromagnetisches Spektrum.

Matt, CC BY-SA 2.5 <<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/2.5>>, via Wikimedia Commons

Mit Photospektrometern kann man untersuchen aus welchen Wellenlängen Licht aus einer bestimmten Quelle zusammengesetzt ist. Das Licht der **Sonne** enthält von allen sichtbaren Wellenlängen etwa gleich viele Bestandteile. Daher erscheint uns das Licht der Sonne weiß. Trägt man die Menge an Licht bei verschiedenen Wellenlängen auf erhält man ein sogenanntes Spektrum (s. Abb. 14).



Abbildung 14: Spektrum des Sonnenlichtes. Andreas Pridzun, CC BY-SA 3.0 <<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>>, via Wikimedia Commons.

Die Sonne ist aber nicht unsere einzige Lichtquelle. Wir erzeugen auch Licht mit Glühlampen, Halogenlampen, Energiesparlampen, LEDs und einigen weiteren Techniken. Das Licht, welche diese Lampen abgeben, unterscheidet sich jeweils in ihren Spektren, also wie viel Licht einer bestimmten Wellenlänge die Lichtquellen enthalten.

In **Glühlampen und Halogenlampen** wird ein Draht mittels Stroms so stark erhitzt, dass er glüht. Hierbei wird Licht abgegeben, welches ein in etwa ähnliches Spektrum wie Feuer hat. Es wird dabei sehr viel infrarote Strahlung abgegeben, welches wir nicht sehen, aber als Wärmestrahlung spüren können. Die infrarote Strahlung macht bei Glühlampen etwa 95% aus (Abb. 15). Es wird also viel mehr Wärme als Licht erzeugt. Weil diese Art der Lichterzeugung sehr ineffizient ist, wurden Glühlampen auch verboten.

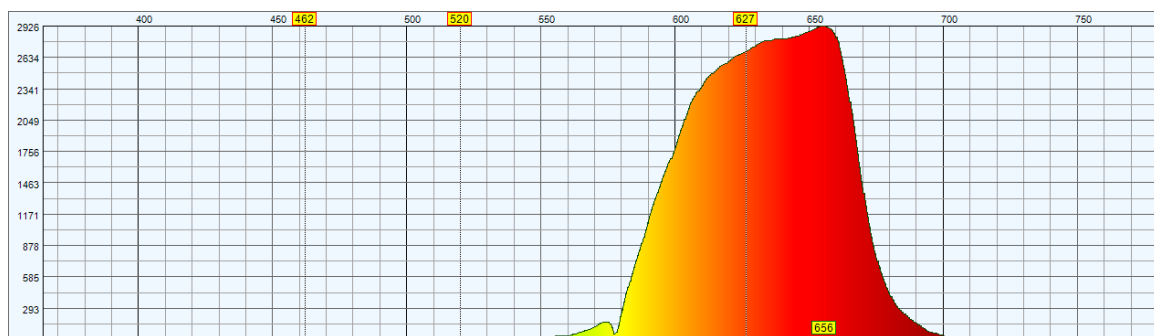


Abbildung 15: Mit unserem LabSpec aufgenommenes Spektrum einer 12 Volt Glühlampe (kontinuierliches Spektrum Schwarzkörper). Die in unserem LabSpec verbaute Kamera ist nur bis etwa 670 nm empfindlich. Daher hört das Spektrum etwa dort auf, obwohl der größte Anteil der abgegebenen Strahlung über 670 nm liegt.

Gasentladungsröhren bestehen aus einem Glasröhrchen, welches mit einem Gas gefüllt ist. An den zwei Enden des Glasröhrchens sind Elektroden eingeschmolzen. Zwischen diesen Elektroden wird eine Spannung angelegt. Diese sorgt dafür, dass Elektronen aus einer Elektrode austreten und auf die andere Elektrode beschleunigt werden. Auf dem Weg treffen die Elektroden auf die Gasatome und befördern ein Elektron

des Gases auf ein höheres Energieniveau. Bei Herunterfallen des Elektrons des Gases auf das Ursprungsenergieniveau wird Energie in Form von Licht bei charakteristischen Emissionslinien abgegeben. Durch die charakteristischen Emissionslinien des Spektrums lässt sich bestimmen welches Gas in der Gasentladungsröhre verwendet wird (Abb. 16). Dabei werden oft Edelgase wie Neon verwendet, welches auch den bekannten Neonröhren den Namen verleiht. Alternativ werden aber auch Gasentladungsröhren mit Natrium- oder Quecksilberdampf verwendet. Quecksilberdampf war in den **Energiesparlampen** enthalten, die nach dem Verbot von Glühlampen und vor der Optimierung von LED-Lampen üblich waren. Quecksilber emittiert bei Anregung Licht im UV-Bereich. Bei Quecksilberdampflampen sorgt aber eine Phosphorbeschichtung auf der Innenseite des Glasröhrchens dafür, dass die UV-Emissionslinie des Quecksilbers durch Fluoreszenz in ein breiteres Spektrum umgewandelt wird, wodurch die Quecksilberdampflampe "weißes Licht" emittiert. Weil Quecksilber giftig ist und beim Zerschlagen der Lampen austritt, wurde 2023 die Produktion und der Import von diesen Lampen in der EU verboten.

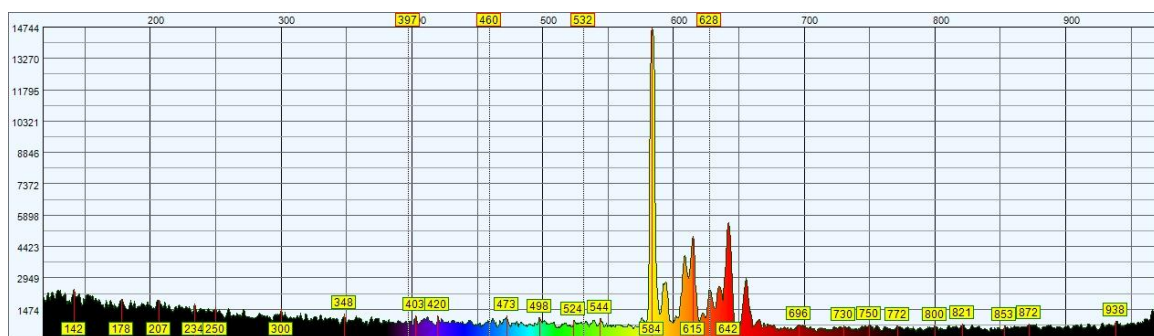


Abbildung 16: Mit unserem LabSpec aufgenommenes Spektrum einer Neon Gasentladungsröhre (Energiesparlampe) mit charakteristischen Emissionslinien.

LEDs (Leuchtdioden) enthalten einen winzigen Halbleiter mit einer genau definierten chemischen Zusammensetzung. Elektronen im Halbleiter werden durch Elektrizität angeregt und springen in einen höheren Energiezustand. Wenn die Elektronen zurückspringen, werden Photonen emittiert. Die Wellenlänge des emittierten Photons hängt von der chemischen Zusammensetzung des Halbleitermaterials ab. Je größer der Unterschied zwischen den Energieniveaus ist, desto kürzer ist die Wellenlänge des emittierten Lichtes. Bei einer großen Stufe entsteht also blaues energiereiches Licht, bei einer kleineren rotes (Abb. 17).

LEDs sparen im Vergleich zur Glühlampe Energie, weil sie viel mehr der aufgenommenen elektrischen Energie als Licht abgeben und weniger Energie in Form von Wärme verloren geht. LEDs haben des Weiteren den Vorteil, dass sie kein giftiges Quecksilber enthalten.

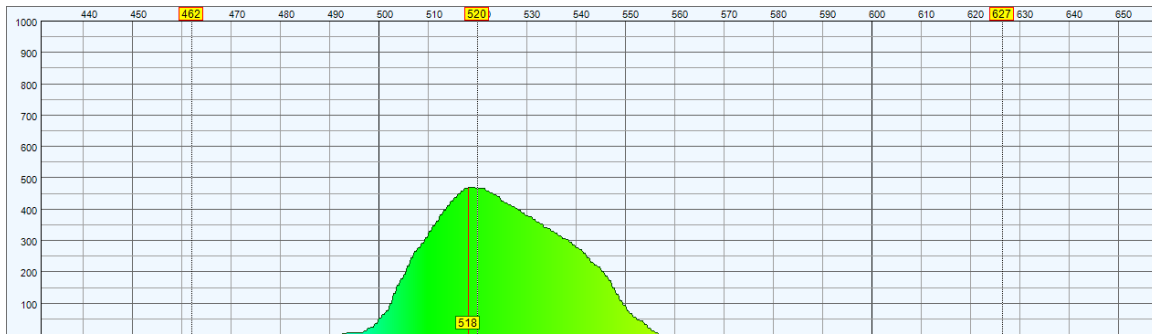


Abbildung 17: Mit unserem LabSpec aufgenommenes Spektrum einer grünen LED.

Laser ist ein Akronym für **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation (deutsch: Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung). Dabei wird der Effekt der stimulierten Emission genutzt, um einen kohärenten Lichtstrahl zu erzeugen. Stimulierte Emission ist ein Effekt, bei dem ein angeregtes Elektron durch ein Photon dazu angeregt wird, in ein tieferes Niveau zu fallen und ein zweites Photon mit den gleichen Eigenschaften (Wellenlänge, Richtung, Polarisierung, Phase) wie das erste Photon zu emittieren. Wodurch beide Photonen kohärent sind und sich durch konstruktive Interferenz verstärken. Die Energie des ankommenden Photons muss der Energie des Elektronen Übergangs entsprechen. Durch diese Kohärenzeigenschaften eines Lasers sind die Emissionslinien eines Lasers im Vergleich zu anderen Lichtquellen sehr schmal wie in Abbildung 18 gezeigt.

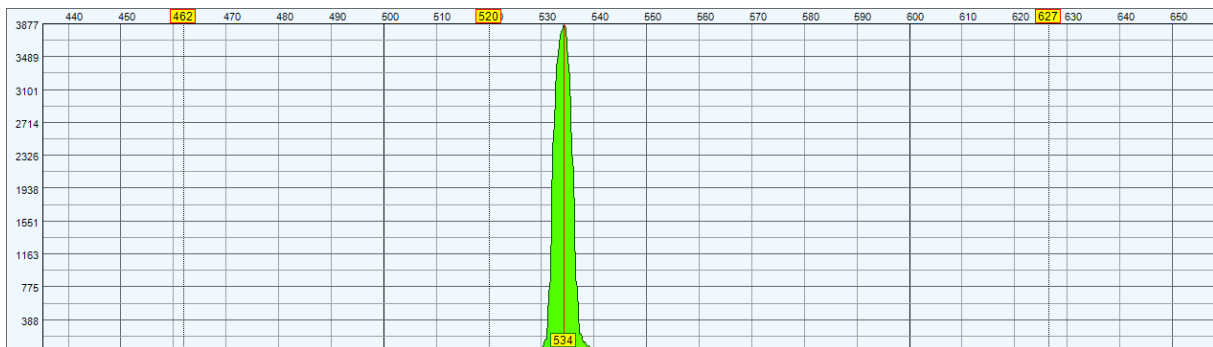


Abbildung 18: Mit unserem LabSpec aufgenommenes Spektrum eines grünen 532 nm Laser.

Wofür ist es hilfreich das Spektrum einer Lichtquelle zu kennen?

Durch Vermessung des Spektrums kann man Lampen auswählen, die eine Lichtzusammensetzung haben, die **Menschen** als angenehm wahrnehmen. Des Weiteren kann untersucht werden, ob Lampen schädliche UV-Strahlung abgeben. Allerdings kann unser Spektrometer nur sehr langwellige UV-Strahlung detektieren. Für kurzwelligere UV-Strahlung ist unser Spektrometer blind. Unser Spektrometer kann also nicht dazu verwendet werden nachzuweisen, dass eine Lichtquelle keine UV-Strahlung aussendet!

Pflanzen werden häufig für besseres Wachstum beleuchtet. Für die Fotosynthese brauchen Pflanzen besonders rote und blaue Anteile des Lichtes. Mit grünem Licht können Sie nichts anfangen. Daher reflektieren Pflanzen grünes Licht. Dies ist der Grund warum Pflanzen grün aussehen. Durch Vermessung des Spektrums kann man Lampen auswählen, die genau die Wellenlängen aussenden, die Pflanzen für die Fotosynthese brauchen.

Wie beim Natrium in der Natriumdampflampe geben auch andere Atome ein ganz charakteristisches Spektrum ab. So kann die chemische Zusammensetzung von Materialien analysiert werden. Dieses Verfahren wird auch eingesetzt, um nach **außerirdischem Leben** auf Exoplaneten zu suchen. Dazu wird die Atmosphäre der Exoplaneten spektrometrisch analysiert. Zum Beispiel können die Gase Sauerstoff, Methan, CO₂ und auch Wasser ein Hinweis auf außerirdisches Leben auf einem fernen Planeten sein.

5. Kalibration der Video Input Controls

Im Bereich Video Input Controls lassen sich verschieden Nachbearbeitungseffekte einstellen. Grundsätzlich wird das analoge elektrische Signal des Kamerasensor durch den Image Signal Processor (ISP) auf dem Kameramodul in ein digitales Signal umgewandelt und an den Computer weitergeleitet.

$X_{IN} \rightarrow ISP \rightarrow X_{OUT}$

Dabei werden die Einstellungen in den Video Input Controls als Anweisungen zur Nachbearbeitung an den ISP übertragen. Um die Messung nicht zu verfälschen, müssen die Parameter optimalerweise so gesetzt werden, dass die Nachbearbeitungseffekte die physikalische Messung möglichst wenig verfälschen. Eine physikalisch vollständig korrekte Messung ist bei dem verwendeten Kameramodul jedoch nicht zu erreichen.

Die grundsätzliche Problematik bei günstigen Kameramodulen, wie dem von uns verwendeten ist, dass die genauen technischen Spezifikationen des ISP nicht öffentlich einsehbar sind. Eine exakte Rekonstruktion der Bildverarbeitung durch vergleichende Messungen ist nur sehr eingeschränkt möglich, da die einzelnen Funktionen der Bildverarbeitung teils mehrfach an unterschiedlichen Stellen der Bildverarbeitungs-Algorithmus greifen und deren Auswirkungen sich in Teilen überschneiden. Dies wirkt sich vor allem auf die Fähigkeit des Photospektrometers aus, relative Intensitäten eines oder mehrerer Spektren zu interpretieren und vergleichen. Die Zuordnung von Wellenlängen eines Spektrums wird durch die Funktion des ISP nicht beeinflusst.

Auch wenn die genaue Funktionsweise des ISP nicht bekannt ist, ist es dennoch wichtig die einzelnen Nachbearbeitungseffekte und damit verbundene mögliche Fehlerquellen im Ansatz nachzuvollziehen. Dazu finden sich in den folgenden Punkten grobe Erläuterungen zu den einzelnen Einstellungsmöglichkeiten.

Zu beachten ist, dass es sich hier lediglich um eine theoretische Beschreibung der Funktionen handelt, diese unterscheiden sich teils stark von den effektiv gemessenen Auswirkungen auf das Bildsignal des verwendeten Kameramoduls!

Weiterhin sind die hier definierten Parameter nicht 1 zu 1 mit den im ISP implementierten Parameter gleichzusetzen!

Format/Kompression:

Das Format, in dem das Kameramodul die Signale an den Computer sendet, ist die erste wichtige Einstellung. Hier gibt es zwei Optionen, MJPEG und YUY2. Aufgrund der Kompression in MJPEG, ist das YUY2 Format zu bevorzugen.

MJPEG

Im MJPEG-Format unterliegen die einzelnen Frames einer digitalen Kompression. Im Detail ist der Prozess der Bildkompression relativ komplex, es lässt sich jedoch sagen,

dass durch die Kompression wichtige Informationen im Bild verloren gehen und die Messungen u.a. aufgrund von Rundungen der Eingangswerte nicht mehr reproduzierbar sind.

YUY2

Im YUY2-Format hingegen wird das Bild nicht komprimiert. Für ein besseres Verständnis der Bildverarbeitung Pipeline durch die Video Input Controls ist im Folgenden grob die Umwandlung des analogen Farbsignals in ein digitales YUY2 Signal skizziert.

Analog_{IN} -> ADC -> Demosaicing -> RGB -> YUY2

An erster Stelle steht bei den meisten Kamerasensoren die sogenannte Bayer Pixelmatrix.

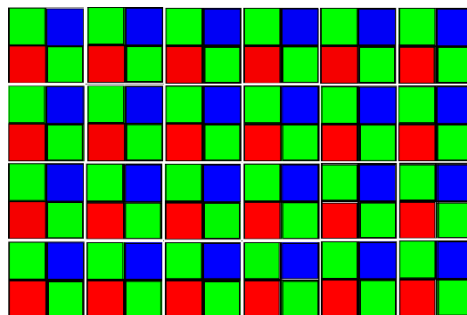


Abbildung 19: Bayer Pixelmatrix. Romkur, CC BY-SA 3.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>, via Wikimedia Commons

Hier wird für jedes Farbpixel ein analoges Signal aufgenommen, zu erkennen ist das Verhältnis der Pixel zwischen Grün:Rot:Blau von 2:1:1. Im ersten Schritt, der Analog - Digital - Umwandlung (ADC) werden die analogen Signale jedes Pixels in einen digitalen Helligkeitswert übersetzt. Im nächsten Schritt, dem sogenannten Demosaicing, wird für jedes Farbpixel der jeweils fehlenden R, G bzw. B Wert, anhand der benachbarten Farbpixel interpoliert. Dadurch erhält man einen vollständigen RGB-Wert für jedes Pixel. Im Anschluss wird aus dem RGB-Wert der YCbCr Wert des YUY2 Format berechnet. Dabei teilen sich zwei benachbarte Pixel einen Farbabweichungswert C_b und C_r , der Helligkeitswert Y ist für jedes Pixel individuell. Der unterschiedlichen Einstellungen der Video Input Controls greifen dabei an unterschiedlichen Stellen in dieser Bildverarbeitungskette und werden im Einzelnen genauer beschrieben.

Der Y Wert errechnet sich aus den gewichteten Helligkeiten des RGB-Pixels

$$Y = g_R * R + g_G * G + g_B * B.$$

Die Gewichtungsfaktoren sind dabei oft gegeben durch

$$g_R = 0.299$$

$$g_G = 0.587$$

$$g_B = 0.114.$$

Diese Gewichtung ist begründet durch die unterschiedlichen Empfindlichkeiten des menschlichen Auges in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen. Dabei ist unser Auge vor allem im grünen Wellenlängenbereich sehr sensitiv. Jedoch verzerrt dies die Messung hinsichtlich der korrekten physikalischen Farbwiedergabe und muss daher beachtet werden.

Wie bereits erwähnt teilen sich zwei benachbarte Pixel die Werte für die Blauabweichung C_b und die Rotabweichung C_r vom neutralen Wert.

$$C_b = 128 + 0,564 * (B-Y)$$

$$C_r = 128 + 0,713 * (R-Y)$$

Welche nach der Berechnung pro Pixel zwischen zwei Pixel gemittelt wird.

Zur Erzeugung des Spektrums werden die Helligkeitswerte Y des YUY2 Formats in der Theremino Software spaltenweise aufsummiert und als Spektralverlauf dargestellt.

Auflösung:

Die Auflösung des aufgenommenen Bildes wird unter dieser Option festgelegt.

Eine höhere Auflösung erhöht auch die generelle Auflösung des Spektrometers und sollte daher, um bestmögliche Ergebnisse zu erzielen auf den maximalen Wert gesetzt werden. Jedoch führt dies zu einer geringeren Bildwiederholungsrate des Kameramoduls und kann zu Problemen bei schwacher Computer Hardware führen.

Bildwiederholungsrate:

Die Bildwiederholungsrate wird unter dieser Option festgelegt. Dieser Wert bestimmt wie Bilder pro Sekunde (FPS) das Kameramodul an den Computer sendet. Eine hohe Einstellung erfordert mehr Leistung sorgt aber für eine bessere Aktualisierungsrate der Theremino Software.

Gain/Verstärkung:

Der Gain entspricht einer einfachen Multiplikation des digitalen Eingangssignals im ISP.

$$X_{OUT} = X_{IN} * G$$

Dieser Schritt erfolgt meist zwischen der ADC und dem Demosaicing. Da es sich hier um eine lineare Verstärkung des gesamten Bildbereich handelt, kann dieser Wert für in erster Näherung beliebig angepasst werden. Es muss jedoch beachtet werden, dass zum einen

auch das Hintergrundrauschen mitskaliert wird. Zum anderen muss beachtet werden, dass man durch die Verstärkung in hellen Bildbereichen im “Clipping“ landet. Also die Helligkeitswerte bei einem Maximum abgeschnitten werden. Beide Punkte können relative Vergleiche innerhalb des Spektrums und im Vergleich mit anderen Spektren verzerren. Daher empfiehlt es sich beim Vergleich mehrerer Messungen untereinander diesen Wert konstant zu lassen.

Belichtungszeit:

Die Belichtungszeit t_{exp} ist der Wert, der beschreibt, wie lange jedes Frame der Kamera aufgenommen wird. Es entspricht also einer analogen Integration des Bildes. Der Wert EXP , der hier angegeben wird entspricht einer logarithmischen Skala.

$$t_{exp} = 2^{EXP} \cdot t_0$$

Eine Änderung des Wertes um 1, bspw. von $EXP = -1$ auf -2 , entspricht also einer Halbierung der Belichtungszeit. Der Wert t_0 entspricht der Belichtungszeit bei $EXP = 0$.

Der Wert für die Belichtungszeit kann je nach Messbedingungen beliebig gesetzt werden, um das beste Signal zu erzielen. Es muss jedoch darauf geachtet werden, dass die Auto Anpassung des Wertes ausgeschaltet ist, um vergleichbare Aufnahmen zu erhalten. Zudem muss darauf geachtet werden, dass durch eine zu hohe Belichtungszeit keine Sättigung einzelner Bildbereiche stattfindet. Weiterhin muss beachtet werden, dass der Dunkelstrom bzw. Hintergrund sich ebenfalls bei hoher Belichtungszeit verstärkt.

Bei schwache/dunklem Eingangssignal bietet es sich an zuerst die Belichtungszeit zu erhöhen, um ein gutes Signal zu bekommen, da hier das Signal/Rausch Verhältnis besser ist, im Vergleich zur Korrektur über den Gain Faktor.

Helligkeit:

Der Helligkeitswert fügt dem Spektrum einen Offset hinzu.

$$X_{OUT} = X_{IN} + \text{Offset}$$

Dieser Schritt findet, ähnlich wie die Verstärkung oft zwischen ADC und Demosaicing statt. Der Wert ist standardmäßig auf null gesetzt und kann so belassen werden. Um den Hintergrund zu entfernen, bietet sich die Funktion Background an.

Kontrast:

Der Kontrast ist eine Funktion bei dem die Abweichung der Helligkeitswerte von einem Mittelwert, dem sogenannten Pivot P , mit einem Faktor K skaliert werden. Dabei kann dieser Schritt je nach Kameramodul auf den RGB-Wert oder den YUY2 Wert angewendet werden. Der RGB-Wert wird dabei wie folgt angepasst

$$R_{OUT} = P + (R_{IN} - P) \cdot K_R$$

$$G_{OUT} = P + (G_{IN} - P) * K_G$$

$$B_{OUT} = P + (B_{IN} - P) * K_B.$$

Zusätzlich sind die Skalierungsfaktoren oft nicht einheitlich und unterscheiden sich für jeden Farbkanal. Im Falle der Kontrastbildung über das YUY2 Format wird die Kontrastskalierung nur auf den Y Wert angewendet.

$$Y_{OUT} = P + K * (Y_{IN} - P)$$

Sofern ein Skalierungsfaktor ungleich 1 gewählt wird, bewirkt dies eine Verzerrung der relativen Intensität des Spektrums!

Hier muss angemerkt werden, dass bei der hier verwendeten Kamera und Kontrastwerten unter <50 eine Sättigungsinversion im wiedergegebenen Bild eintreten kann, also überbelichtete Bereiche als schwarz dargestellt werden und damit die Maxima der Spektrallinien abgeschnitten werden.

Gamma:

Vereinfacht beschreibt der Gammawert, ähnlich wie der Kontrast eine Skalierung der Helligkeitswerte. Diese ist im Gegensatz zum Kontrast aber nicht linear, sondern entspricht grob einer Potenzfunktion der Form

$$Y_{OUT} = Y_{IN}^{1/\gamma}.$$

Dies resultiert in dieser Darstellung einem höheren Kontrast in dunkleren Bereichen für $\gamma > 1$ und einem höheren Kontrast in hellen Bereichen für $\gamma < 1$. Faktisch wird dies aber meist nicht durch eine Potenzfunktion implementiert, stattdessen erfolgt die Implementierung oft über die Look Up Table (LUT) oder stückweise definierte Funktionen.

Sättigung:

Die Sättigung verhält sich ähnlich wie der Kontrast, nur dass hier statt der Helligkeit, die Farbabweichungen vom Mittelwert mit einem Faktor s skaliert werden.

$$Cb_{OUT} = s \cdot (Cb_{IN} - 128) + 128$$

$$Cr_{OUT} = s \cdot (Cr_{IN} - 128) + 128$$

Farbton (Hue):

Die Einstellung des Farbtons entspricht einer Rotation des Farbkreises, also einer zyklischen Neuzuordnung der gemessenen Farben. Je nach Einstellung verschiebt man also gemessenen Farbwerte entlang des Farbkreises. Bspw. können dadurch grüne Farben, je nach Richtung mehr ins blaue oder rote verschoben werden.

Weißabgleich:

Der Weißabgleich skaliert vereinfacht die RGB-Farbkanäle

$$R_{OUT} = g_R * R_{IN}$$

$$G_{OUT} = g_G * G_{IN}$$

$$B_{OUT} = g_B * B_{IN}$$

Die Skalierung dient dazu die Objekte in ihrer natürlichen Farbe darzustellen und einen durch die Umgebungsbeleuchtung erzeugten Farbstich zu kompensieren. Beispielsweise bei Verwendung von Lampen mit niedriger Farbtemperatur bzw. hohem Rotanteil.

Schärfe:

Die Schärfe Einstellung verstärkt den Kontrast zwischen Helligkeitsübergängen von benachbarten Pixeln.

Hintergrund:

Die Einstellung des Hintergrundes verändert den Hintergrund eines Bildes, um diesen vom Vordergrund abzuheben. Dies ist je nach Kameramodul unterschiedlich implementiert sein. Mögliche Auswirkungen auf das Bild sind ein künstliches unscharf stellen des Hintergrundes oder Kontraständerungen hinsichtlich des Helligkeits- oder Farbkontrasts.

Fokus:

Die Fokus Einstellung verschiebt digital die Fokusebene im Bild und simuliert dementsprechend eine künstliche Unschärfe außerhalb der Fokusebene.

Zusammenfassend ist es nicht möglich die Werte der Video Input Controls so zu setzen, dass keine Abweichungen zur physikalischen Realität auftreten. Um aber eine Reproduzierbarkeit zwischen Aufnahmen zu gewährleisten, sollten die Einstellungen zwischen verschiedenen Messungen nicht verändert werden und alle automatischen Einstellungen über die Checkbox in den Video Input Controls deaktiviert werden.

Eine grobe Empfehlung für die zu setzenden Einstellungen ist:

Gain: Nach Bedarf

Belichtungszeit: Nach Bedarf

Helligkeit: 0

Kontrast: 50

Gamma: 100

Sättigung: 50

Farbton: 4600

Weißabgleich: 0

Schärfe: 0

Hintergrund: 0

Fokus: 0

5. Vergleich mit einem High-End Spektrometer

Bei dem hier vorgestellten HRW-FabLab Spektrometer handelt es sich um ein kostengünstiges Photospektrometer für didaktische Zwecke. Daher wurde bei der Entwicklung kein Fokus auf Messgenauigkeit gelegt. Dennoch ist es interessant, einen qualitativen Vergleich zu anderen auf dem Markt erhältlichen Spektrometern zu ziehen. Verglichen wird das HRW-FabLab Spektrometer mit dem LR2 Breitbandspektrometer von Laserteck für 1800 €. Das LR2 Spektrometer ist werksseitig kalibriert. Das HRW-FabLab Spektrometer wurde wie beschrieben durch eine RGB-LED kalibriert, deren genaue Peak-Wellenlängen durch das LR2 Spektrometer bestimmt wurden. Um die gemessene Linienbreite und Wellenlänge eines 532 nm Lasers zu bestimmen, werden beide Spektrometer parallel mittels Strahlteiler betrieben wie in Abbildung 20 dargestellt.

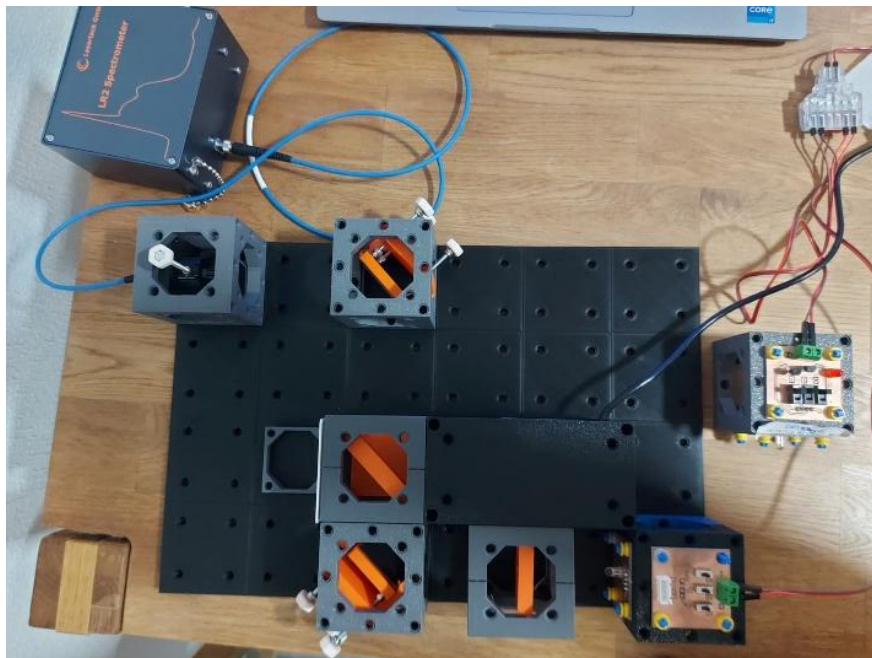


Abbildung 20: Aufbau für eine Parallelmessung mit zwei Spektrometern durch einen Strahlteiler.

Für die Messung des HRW-FabLab Spektrometers wird eine 3D-gedruckte PLA-Schlitzblende mit ca. 0,2 mm Spaltbreite verwendet. Die verwendeten Video Control Setting des HRW-FabLab Spektrometers sind, soweit nicht anders erwähnt:

Auflösung: 2592 x 1944

Format: YUY2

Gain: 62

Belichtungszeit: -4

Helligkeit: 0

Kontrast: 15

Gamma: 100

Sättigung: 50

Farbton: 4600

Weißabgleich: 0

Schärfe: 0
Hintergrund: 0
Fokus: 0

Die Spektren beider Spektrometer wurden jeweils mit Mittelung über 5 Aufnahmen erstellt.

Wie in Abbildung 21 zu erkennen ist, stimmen die gemessenen Spektren beider Spektrometer bis auf eine kleine Verschiebung gut überein.

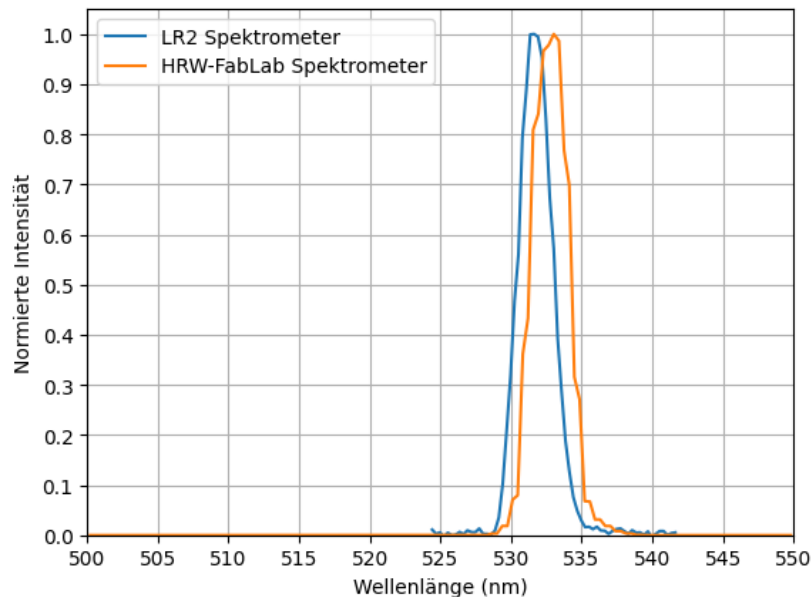


Abbildung 21: Spektren eines 532 nm Lasers aufgenommen mit dem LR2 und unserem LabSpec.

Quantitativ liefert das HRW-FabLab Spektrometer eine Peak Wellenlänge von 533,020 nm und eine Halbwertsbreite (FWHM) von 3,043 nm. Das LR2 Spektrometer hingegen liefert eine Peak Wellenlänge von 531,632 nm und eine FWHM von 2,790 nm.

Die Abweichung der Peak Wellenlänge ist somit $\Delta\lambda = 1,388$ nm und die Abweichung $\Delta\text{FWHM} = 0,253$ nm.

Im Vergleich der Spektren einer Neon Gasentladungsröhre in Abbildung 22 ist zu erkennen, dass das HRW-FabLab Spektrometer eine mit dem LR2 Spektrometer durchaus vergleichbare Auflösung bietet. Jedoch sind die Bereiche oberhalb von 670 nm durch die Sensitivitätskurve des HRW-FabLab Spektrometers unterdrückt.

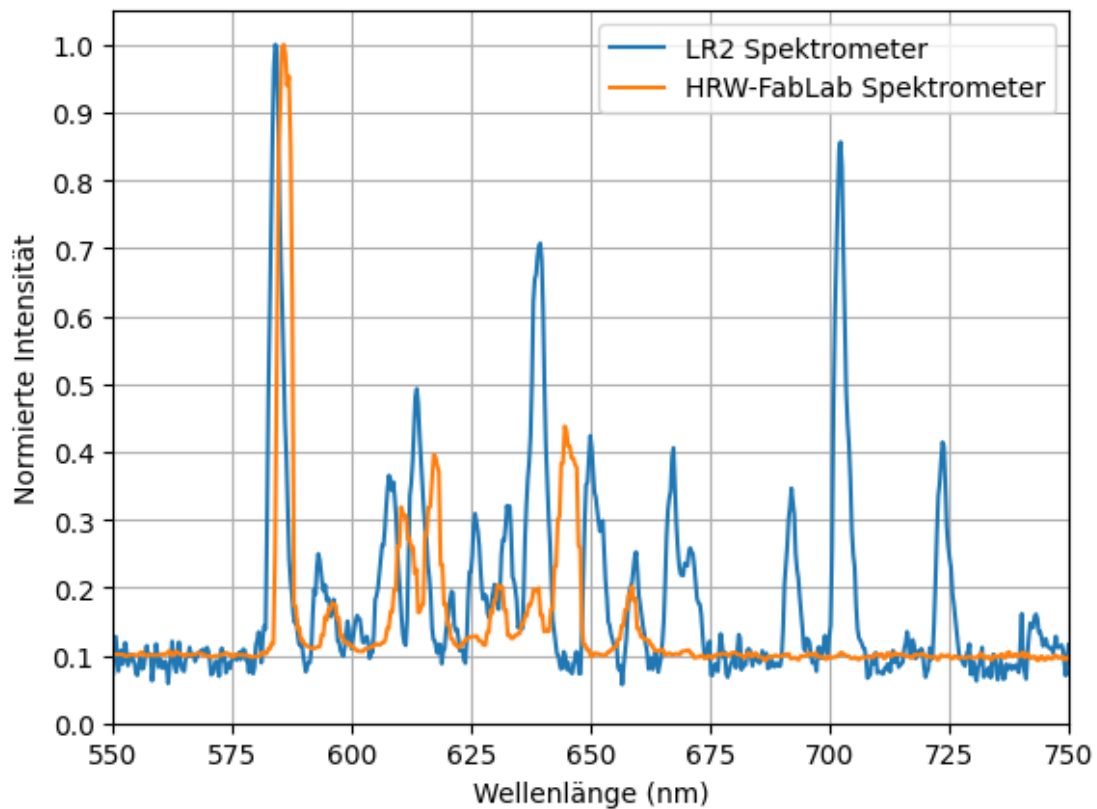


Abbildung 22: Spektren einer Neon-Gasentladungslampe aufgenommen mit dem LR2 und unserem LabSpec. Die Messung des HRW-FabLab Spektrometers wurde mit einer gelaserten Schlitzblende aus schwarzem Acryl mit ca. 250 μm Spaltbreite durchgeführt. Die Video Control Settings für das HRW-FabLab Spektrometer in dieser Messung sind Auflösung 2592 x 1944, Exposure -4, Gain 65, Helligkeit 0, Kontrast 40, Gamma 300. Beide Spektren wurden über 10 Aufnahmen gemittelt.

Die dominante Linie des Neon Spektrums wird vom LR2 Spektrometer bei 583,926 nm gemessen. Das HRW-FabLab Spektrometer wurde mit der Referenzwellenlänge von 585,690 nm kalibriert, dies entspricht einer Abweichung von $\Delta\lambda = 1,764 \text{ nm}$. In Abbildung 23 ist diese Abweichung korrigiert. Dabei wird erkenntlich, dass die Werte hin zu größeren Wellenlängen auseinanderlaufen. Dies hängt mit einer ungenauen Kalibration der Wellenlänge des HRW-FabLab Spektrometers zusammen. Eine genauere Justage ist möglich unter Einbezug von mehr Referenzwellenlängen.

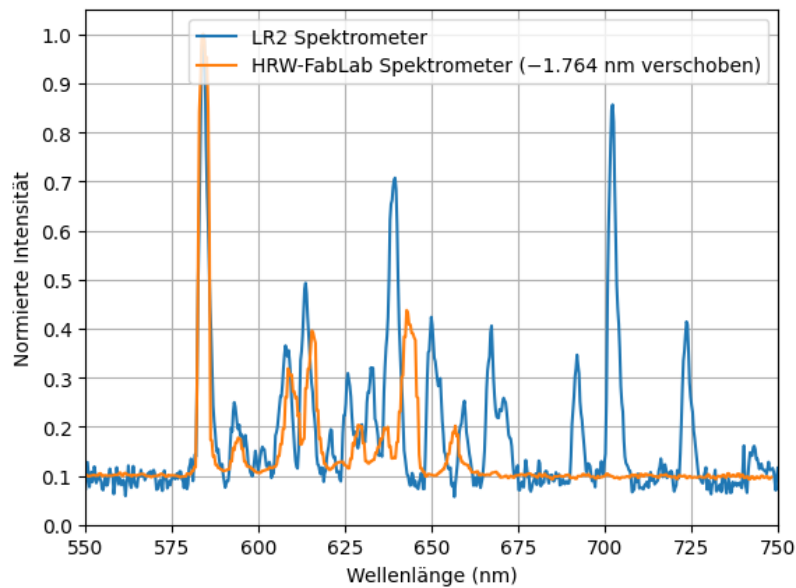


Abbildung 23: Angepasste Messung aus Abbildung 22.

Des Weiteren ist der Vergleich des Spektrums einer Schwarzkörperstrahlers zwischen beiden Spektrometern interessant, siehe Abbildung 24.

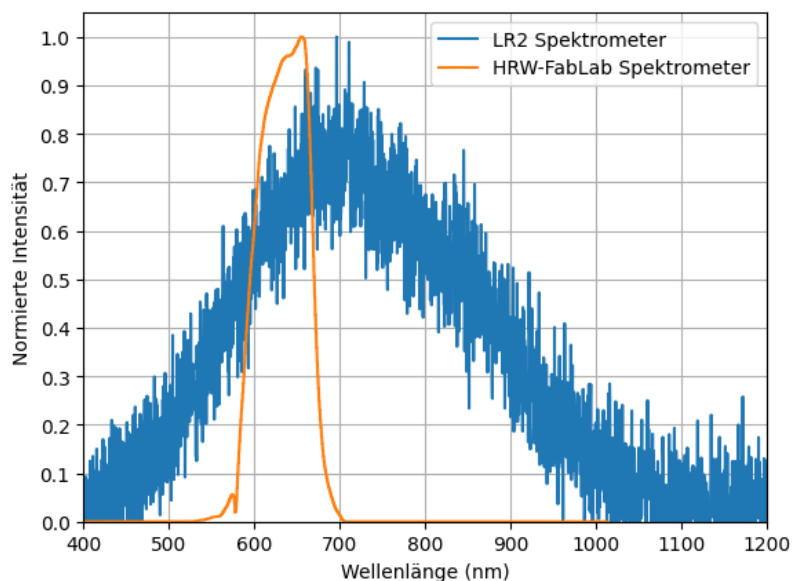


Abbildung 24: Spektren einer 12 Volt Glühlampe aufgenommen mit dem LR2 und unserem LabSpec.

Am Beispiel des Schwarzkörperstrahlers erkennt man gut die technischen Limitationen des HRW-FabLab Spektrometers. Bedingt durch die Sensitivitätskurve des Kamerasensors sind die Bereiche ab ca. 670 nm stark unterdrückt. Zudem lässt sich das Sensitivitätsminimum zwischen roten und grünen Pixeln gut erkennen, welches die Flanke hin zu kürzeren Wellenlängen des Spektrums verfälscht. Verstärkt wird dies wahrscheinlich zusätzlich durch nicht optimal gesetzte Werte im Video Input Managers, dabei zu nennen sind Kontrast und Sättigung.

Abbildung 25 zeigt das Spektrum einer blauen LED mit Phosphorbeschichtung, aufgenommen mit beiden Spektrometern.

Auch bei der Analyse des Spektrums einer blauen LED erkennt man die bereits erwähnten technischen Limitationen in Bezug auf die Sensitivitätskurve und die Video Input Controls. Bedingt durch die Sensitivitätskurve des Kamerasensors wirkt der Spektralverlauf der Phosphorbeschichtung im HRW-FabLab Spektrometer zweigeteilt, was jedoch nicht dem korrekten Spektralverlauf entspricht. Zudem stimmen die relativen Intensitäten beider Spektrometer nicht überein, der Grund dafür liegt auch hier sowohl in der Sensitivitätskurve als auch in den Video Input Controls, im speziellen dem Kontrast und der Sättigung.

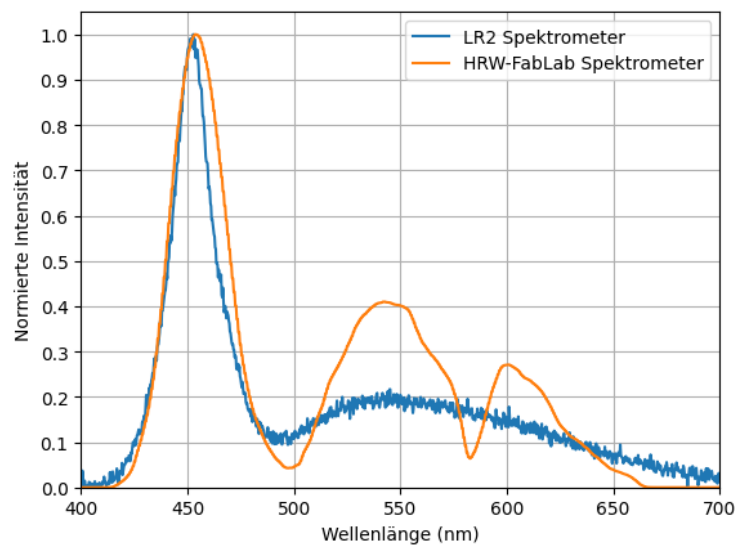


Abbildung 25: Spektren einer blauen LED mit Phosphorbeschichtung aufgenommen mit dem LR2 und unserem LabSpec.

6. Einfluss der Schlitzblendenbreite und der Kollimationslinse

Untersucht wurde auch der Einfluss der Spaltbreiten der Schlitzblenden (Abb. 26).

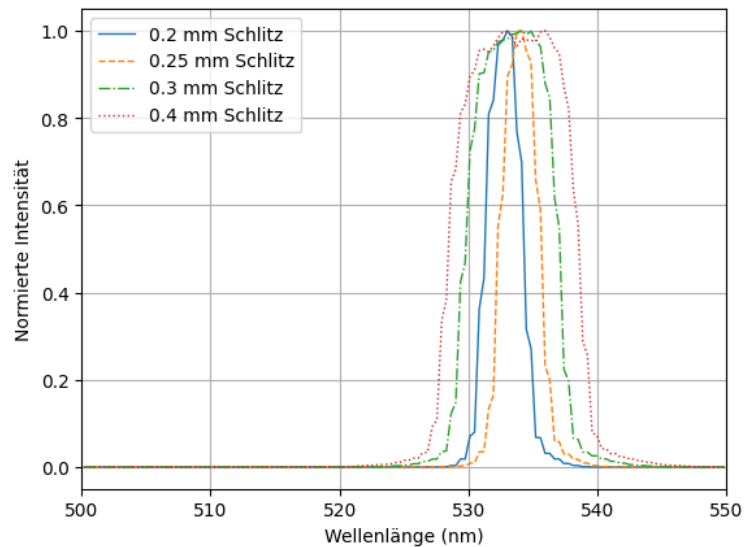


Abbildung 26: Spektren eines 532 nm Lasers gemessen mit dem HRW-FabLab Spektrometer und Schlitzblenden mit unterschiedlichen Spaltbreiten.

In Abbildung 27 sind die Halbwertsbreiten (FWHM) der Messungen gegen die Schlitzblendenbreiten aufgetragen. Zu erkennen ist, dass die FWHM bei kleineren Schlitzblendenbreiten abnimmt und somit die Auflösung steigt.

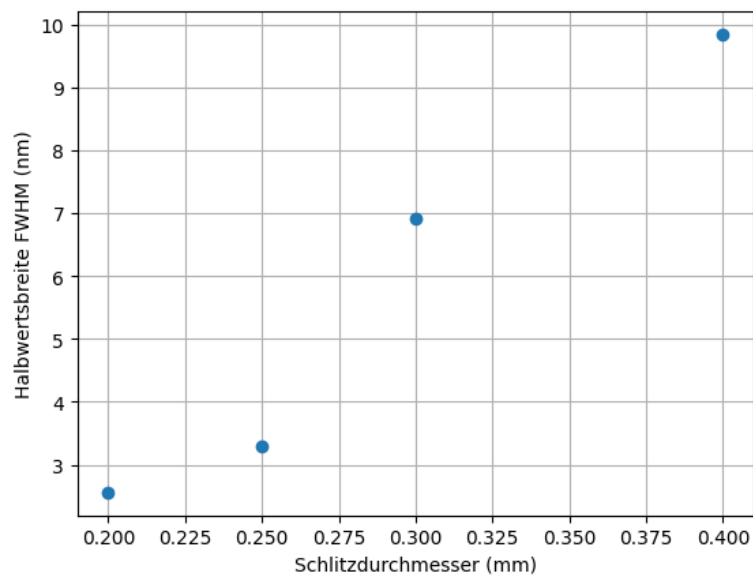


Abbildung 27: Halbwertsbreiten der Messungen aus Abbildung 26, aufgetragen gegen die Breite der Schlitzblenden.

Tabelle 1: Schlitzblendendurchmesser mit zugehöriger Halbwertsbreite.

Schlitzblendenbreite (mm)	Halbwertsbreite (nm)
0,20	2,56
0,25	3,29
0,3	6,92
0,4	9,84

Abbildung 28 zeigt den Einfluss der Kollimationslinse auf die Auflösung des Spektrometers. Ohne Kollimationslinse beträgt die FWHM bei Verwendung einer 0,25 mm Schlitzblende $\text{FWHM} = 13.945 \text{ nm}$. Mit Kollimationslinse reduziert sich die FWHM auf $3,429 \text{ nm}$ um $\Delta\text{FWHM} = 10,516 \text{ nm}$.

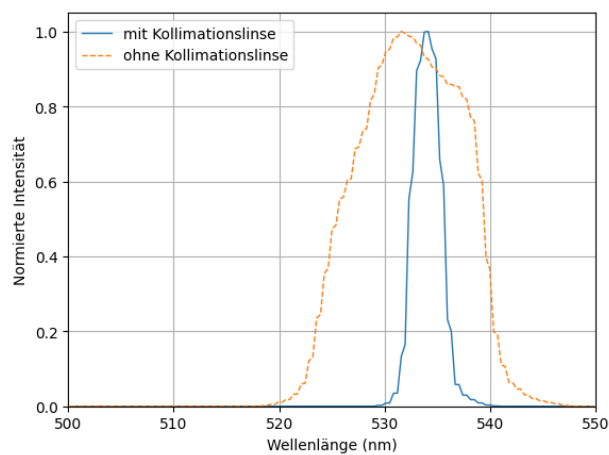


Abbildung 28: Spektren eines 532 nm Lasers gemessen mit dem HRW-FabLab Spektrometer und einer 0,25 mm Schlitzblende, mit und ohne Kollimationslinse.

Projektpartner



Gefördert durch:

