

# Experimentieranleitung

## Ziele:

- Mit dem neuen Sensor der SenseBox arbeiten lernen
- Mit Spektren arbeiten lernen z.B. die Beziehung von Farbe und Wellenlänge anwenden
- Messungen von Spektren der LEDs in der SenseBox mit dem visuellen Eindruck vergleichen
- Die Wirkung eines Farbfilters im Spektrum des transmittierten Lichts entdecken und vorhersehen
- Mit dem Kontext der Spektren und Farbfilter die visuellen Spuren eines NV-Zentrums wiedererkennen

## Benötigte Materialien:

- Sensebox Hauptplatine
- Fluoro-Kit Aufsteckplatine
- Fluoro-Kit Diamanthalterung
- Fluoro-Kit Farbfolienhalterungen mit Folienfilter
- USB-Kabel
- (Möglichlicherweise) Computer um die Sensebox zu Programmieren bspw. mit Blockly
- Mikroskop z.B. Ansteckbar an den Computer; Alternativ Handmikroskop oder starke Lupe etc.
- (Für besonders Interessierte) Spektrometer

*Sollten im Text Begriffe auftauchen, die dir unbekannt sind oder du ihre Bedeutung nochmal nachlesen willst, kannst du sie im angehängten Glossar nachschlagen.*

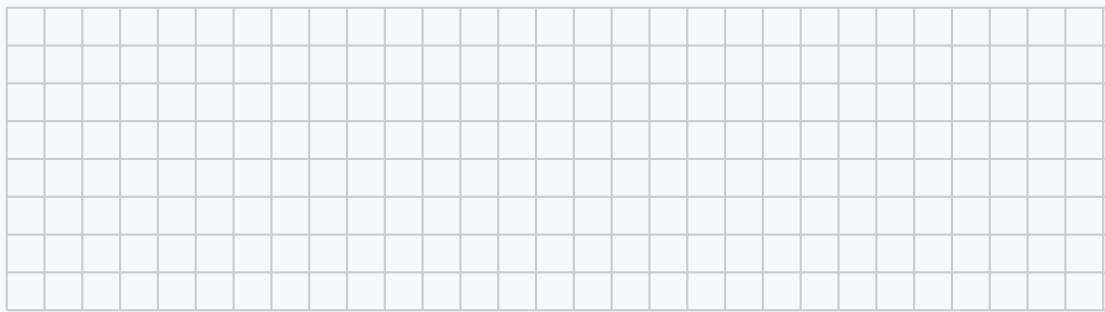
## Kapitel 1: Lichtquellen und Spektren

Sonnenlicht erscheint weiß, enthält jedoch alle Farben des sichtbaren Spektrums. Beim Regenbogen wird dies sichtbar: Das Licht wird in seine Farbanteile zerlegt und zeigt, dass Weiß aus vielen Farben besteht.

### Aufgabe 1

- (a) Betrachtet mit der Lupe (oder Mikroskop) eine vermeintlich weiße Stelle auf einem PC-Bildschirm oder auch, falls Ihr dürft(!), auf eurem Handy an.
- (b) Betrachtet nun verschiedene Farben des Bildschirms durch die Lupe.

Beschreibt eure Beobachtung. Wie werden Farben und weißes Licht von einem Bildschirm generiert?



Wenn euch bewusst ist, dass sich weißes Licht aus verschiedenen Farben zusammensetzt, dann stellt sich für euch vielleicht die Frage, welches Licht noch aus mehreren Farben zusammengesetzt ist. Tatsächlich trifft dies eigentlich auf alles Licht zu, wobei die Unterschiede der Farben sehr klein werden können. Ein guter Laser kommt einer einfarbigen Lichtquelle noch am nächsten. Die LEDs, die im Fluoro-Kit verbaut sind, sind also auch mehrfarbig, obwohl man sie als „blau“, „grün“, „orange“ und „rot“ bezeichnet.

In Abbildung 1 sind die Spektren der von uns verwendeten LEDs eingezeichnet. Man sieht in der obersten Zeile, welche Farbe weiter rechts oder links eingetragen ist. Die blaue Kurve zeigt z.B. das gemessene Spektrum der blauen LED. Also ist das Licht der blauen LED aus verschiedenen Blautönen mit unterschiedlicher Intensität zusammengesetzt. Eine perfekte einfarbige Lichtquelle hätte nur bei der entsprechenden Wellenlänge eine senkrechte Linie als Spektrum. Bei unseren realen Quellen erkennt man aber, dass die Spektren über mehrere Wellenlängen gehen, d.h. die Spektren sind „breiter“. Darum wurde vorhin von einer Farbe gesprochen, die aus mehreren Far-

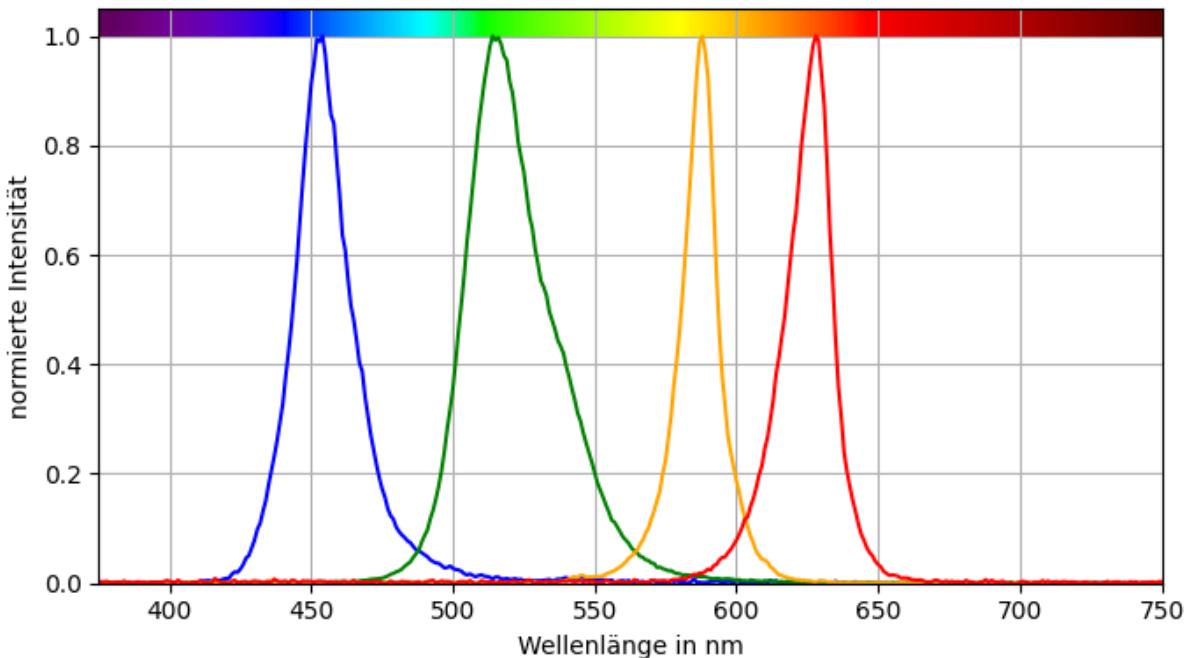


Abbildung 1: Spektren der LEDs im Fluoro-Kit.

ben zusammengesetzt ist. Bei der grünen LED sieht man, dass auch bläuliche und orangefarbene Anteile vorhanden sind. Wenn man die grüne LED also in ihre einzelnen Wellenlängen aufteilen würde, könnte man auch blaues und orangenes Licht erkennen. Es ist also wichtig, immer zu bedenken, dass wir mit realen Lichtquellen arbeiten, die ein breites Spektrum besitzen.

In der Physik lässt sich nun jeder Lichtfarbe eine Wellenlänge zuweisen, auch dem Licht, das für unser menschliches Auge unsichtbar ist. Man spricht allgemein vom Spektrum der elektromagnetischen Strahlung. Die Wellenlänge ist zur Orientierung auf der  $x$ -Achse in Nanometern eingetragen.

### Aufgabe 2

- Steuert mit der SenseBox die LEDs in eurem Fluoro-Kit an. Stellt die Intensität auf einen kleinen Wert und beobachtet ggf. die Spektren der verschiedenen LEDs mit dem Handspektroskop.

## Kapitel 2: Farbfilter

Wir wollen später das Fluoreszenzlicht von speziellen Diamanten betrachten. Dafür müssen wir einige Dinge vorbereiten. In den Filterhalterungen sind Folienfilter eingeklebt. Ein Filter soll später das Licht, das **nicht** mit dem Diamanten wechselwirkt und dabei seine Farbe ändert, abfangen. Somit werden wir nur noch das Leuchten der NV-Zentren des Diamanten selbst, also die Fluoreszenz, sehen. In Abbildung Abbildung 2 ist aufgetragen, wie viel Prozent Licht von 0 bis 100% bzw. von 0 bis 1 ein Filter bei verschiedenen Wellenlängen durchlässt (also transmittiert). Dieser Wert zwischen 0 und 1 wird auch Transmissionskoeffizient genannt.

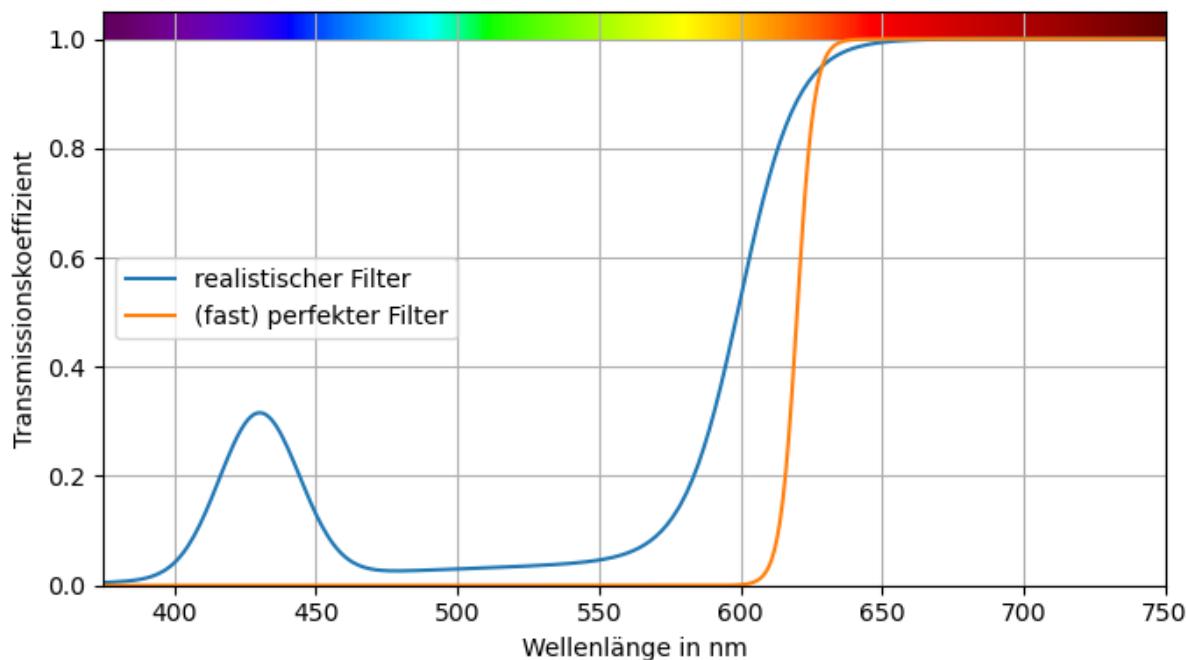
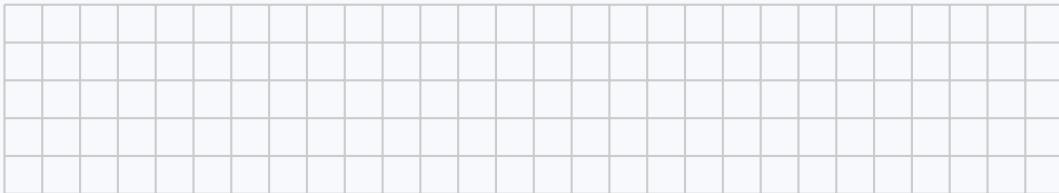


Abbildung 2: Filtertransmissionen bei verschiedenen Wellenlängen.

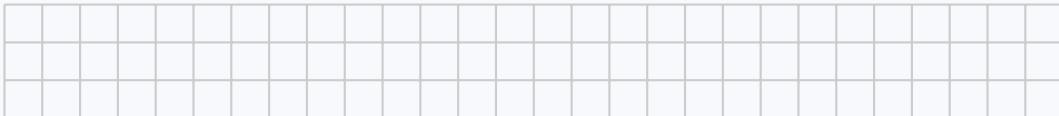
Wir haben für Abbildung 2 einen bestimmten Filter benutzt. Diese Art von Filter ist auch in einer Filterhalterung eingebaut. Wenn die Kurve hoch ist (beim roten Ende des Spektrums rechts), wird viel transmittiert. Das grüne, gelbe und blaue Licht gelangt nicht durch den Filter, wird also (viel) absorbiert. Tatsächlich funktionieren Filter in der Realität unterschiedlich gut, sodass der Filter auch bis zu 30% des an kommenden blauen Lichts durchlässt. Dies ist ebenfalls in Abbildung 2 zu sehen.

## Aufgabe 3

- (a) Versuche das Spektrum des Filters aus Abbildung 2 einem Filter, den ihr auf die LEDs legen könnt zuzuordnen. Probiert dabei alle Filter aus! Schaltet dazu alle LEDs auf niedriger Intensität ein.



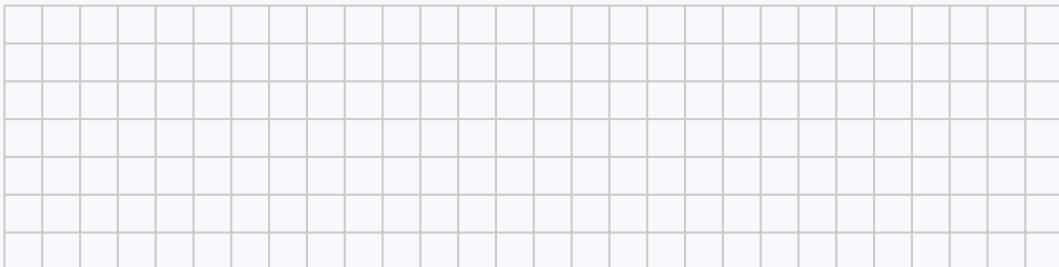
- (b) Was könnt ihr daraus für die anderen Filter schließen? Woher bekommen die Filter ihren Namen?



- (c) Skizziert den Transmissionskoeffizienten abhängig von der Wellenlänge zweier weiterer Filter eurer Wahl in Abbildung 3 und Abbildung 4 ein. Orientiert euch dabei an Abbildung 2. Zeichnet dabei jeweils das reale Spektrum, aber auch ein ideales Spektrum.

- (d) Skizziert das Spektrum des Lichts, das durch den Filter durchkommt, wenn alle vier LEDs durch den Rotfilter leuchten in Abbildung 5. Man legt also über Abbildung 1 den Rotfilter und überlegt sich, welche Wellenlängen durch den Filter durchkommen.

- (e) Vergleicht die Intensitäten der LED in den Diagrammen miteinander vor und nach dem Rotfilter. Welche LED sollte im Experiment viel dunkler werden bzw. noch am hellsten bleiben?



- (f) Überprüft nochmal, ob die gezeichneten Spektren mit euren Beobachtungen an den LEDs mit Filtern übereinstimmen. Beachtet neben den Farben auch die Helligkeit (Intensität).

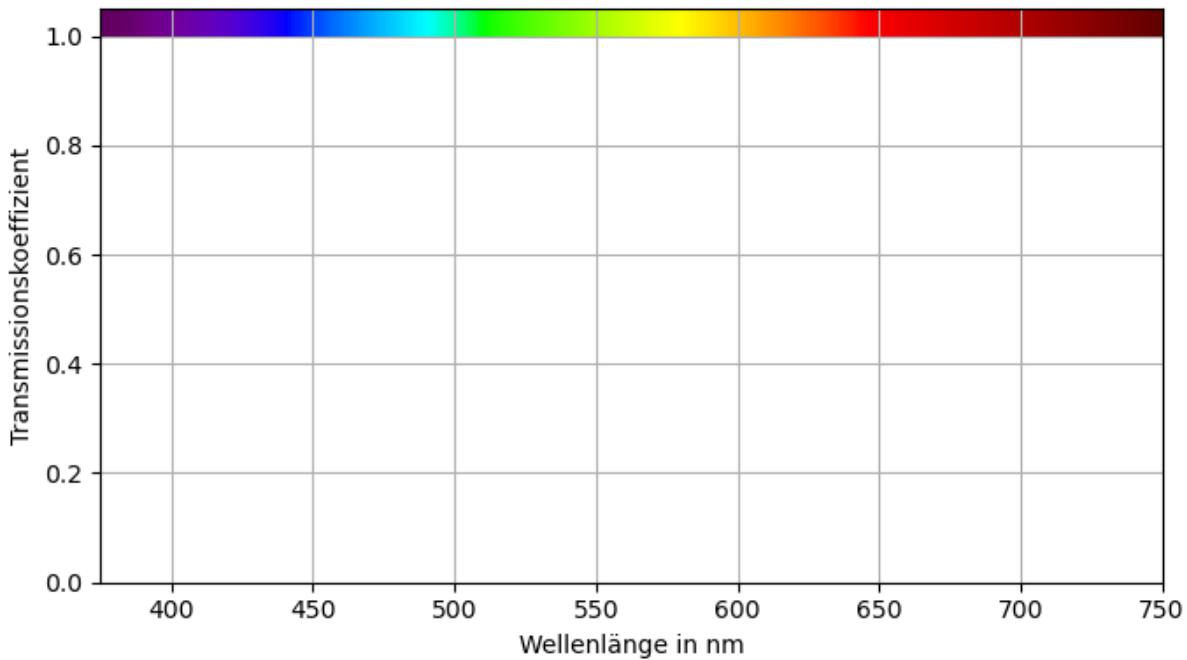


Abbildung 3: Transmissionskoeffiziente abhängig von der Wellenlänge von einem filter.

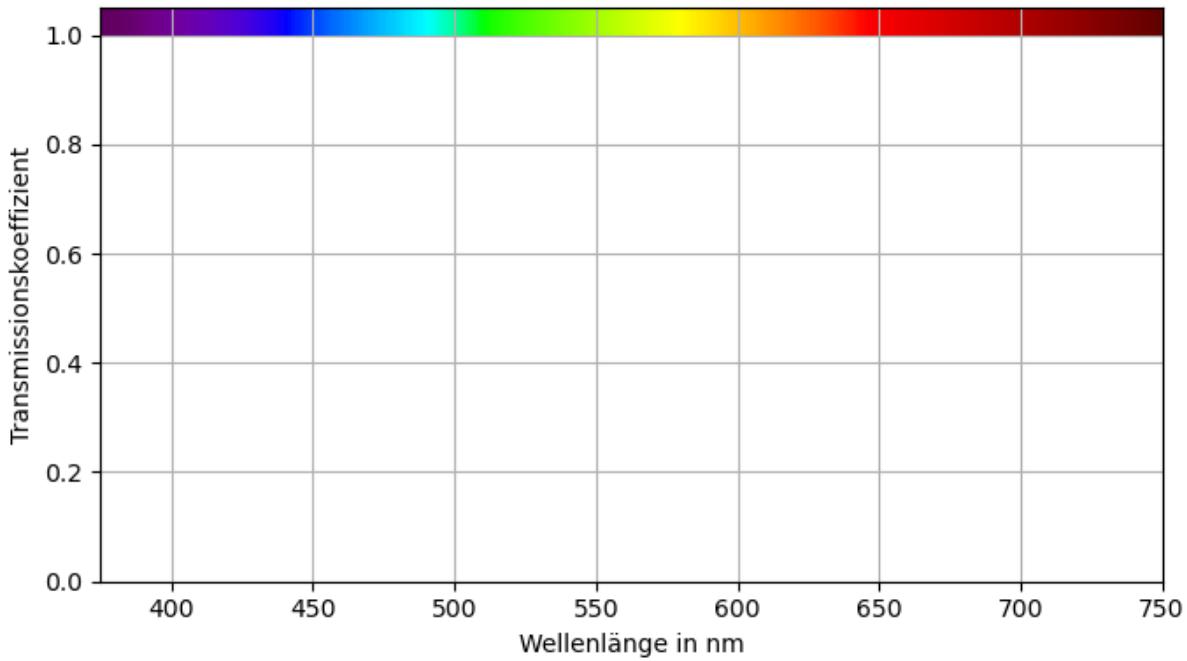


Abbildung 4: Transmissionskoeffiziente abhängig von der Wellenlänge von einem filter.

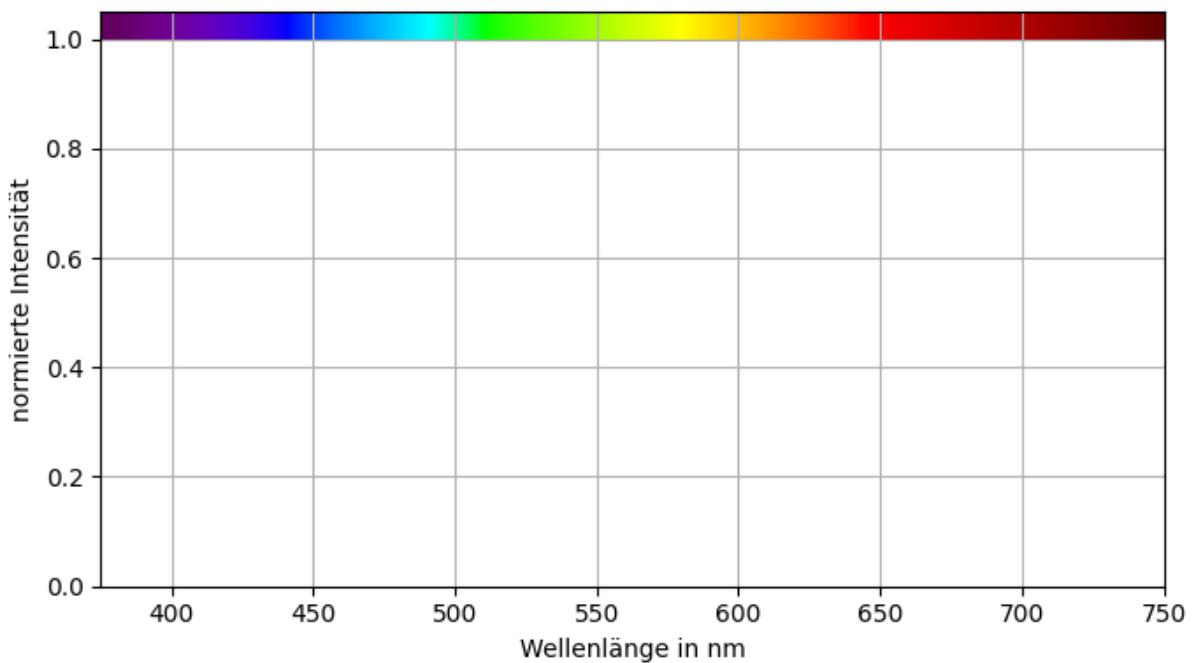


Abbildung 5: Dein eingetragenes Spektrum des LED-Lichts nach dem Rotfilter.

## Kapitel 3: Spektren von NV-Zentren in Diamanten

Diamanten können Defekte aufweisen. Dabei handelt es sich um Fehler in der Diamantstruktur, einem Gitter aus Kohlenstoffatomen. Der Defekt, der für uns interessant ist, ist das sogenannte NV-Zentrum. Dabei handelt es sich um ein Stickstoffatom, welches an der Stelle eines sonst üblichen Kohlenstoffatoms sitzt. Direkt neben dem Stickstoff sitzt eine Fehlstelle, also das Kohlenstoffatom dort fehlt. Diese Kombination wird NV-Zentrum (NV: nitrogen-vacancy) genannt. Eine Eigenschaft dieses Defekts ist die Fluoreszenz. Das NV-Zentrum kann Licht bestimmter Wellenlänge absorbieren und emittiert rötliches Licht (ca. 600 nm – 800 nm). Es wird also immer Licht emittiert, welches eine größere Wellenlänge hat als das eingestrahlte Anregungslicht, das hier von einer LED kommt. Licht mit größerer Wellenlänge besitzt weniger Energie als Licht mit kleinerer Wellenlänge.

Wenn wir aber nun unseren Diamanten mit einer LED anregen, so absorbiert der Diamant nur einen Teil des Lichts und wandelt diesen in rotes Licht um. Der Rest des grünen LED-Lichts bleibt unverändert und ist noch da. Deswegen brauchen wir einen Farbfilter. Da der Farbfilter nicht ideal das Licht der LED herausfiltert, müssen wir also beim finalen Experiment das Fluoreszenzlicht von den NV-Zentren im Diamanten und das LED-Licht gut auseinanderhalten. Das Spektrum der Kombination aus blauer Lichtquelle und Fluoreszenzlicht vom Diamant ist in Abbildung 6 nachgebildet. Das Spektrum nach dem Filter wurde berechnet und gepunktet eingezeichnet.

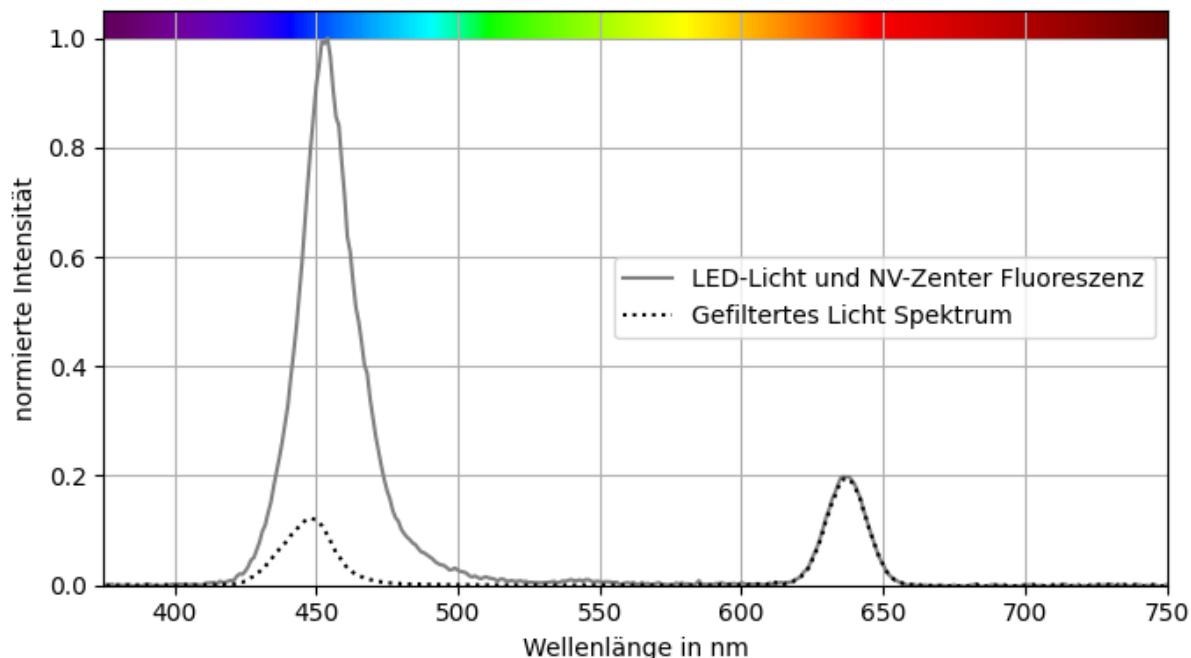


Abbildung 6: Das Spektrum der kombinierten Lichtquellen der blau angeregte NV-Zentren in Diamant vor und nach Filter

Blaues Licht wird immer noch wahrnehmbar sein, jedoch ist die Intensität nun ungefähr gleich groß wie die des gewünschten roten Fluoreszenzlichts. Der Seheindruck setzt sich also aus blau und rot zusammen. Im schlimmsten Fall schimmert der Diamant nicht blau und rot, sondern in einem undifferenzierten lila. In jedem Fall sollte kein grüner oder gelber Farbeindruck entstehen.

## Aufgabe 4

- (a) Regt die NV-Zentren im Diamanten mit der blauen LED an. Setzt auf die Diamanthalterung die Farbfolienhalterung und schaut (mit dem Mikroskop) nach, ob ihr tatsächlich kein grünes oder oranges Licht seht. Vielleicht sieht ihr optimalerweise, das rote und restliche blaue Licht getrennt.
  - (b) Welche Kombinationen aus LED und Filter eignen sich am besten, um die Fluoreszenz zu betrachten? Beschreibt eure Vorüberlegungen und Beobachtungen!

- (c) Betrachtet ggf. das NV-Zentrum ohne Filter durch ein Handspektroskop.

(d) Überlegt euch, welche Farben man für die Anregung des Diamanten benutzen sollte. Überlegt euch, wie dann das emittierte Licht aussieht. Bedenke, dass das sichtbare Spektrum begrenzt ist.

- (e) Warum kann beim Einstrahlen mit einer orangenen LED kein blaues Licht emittiert werden? (Gegen welches physikalische Gesetz würde das verstößen?)

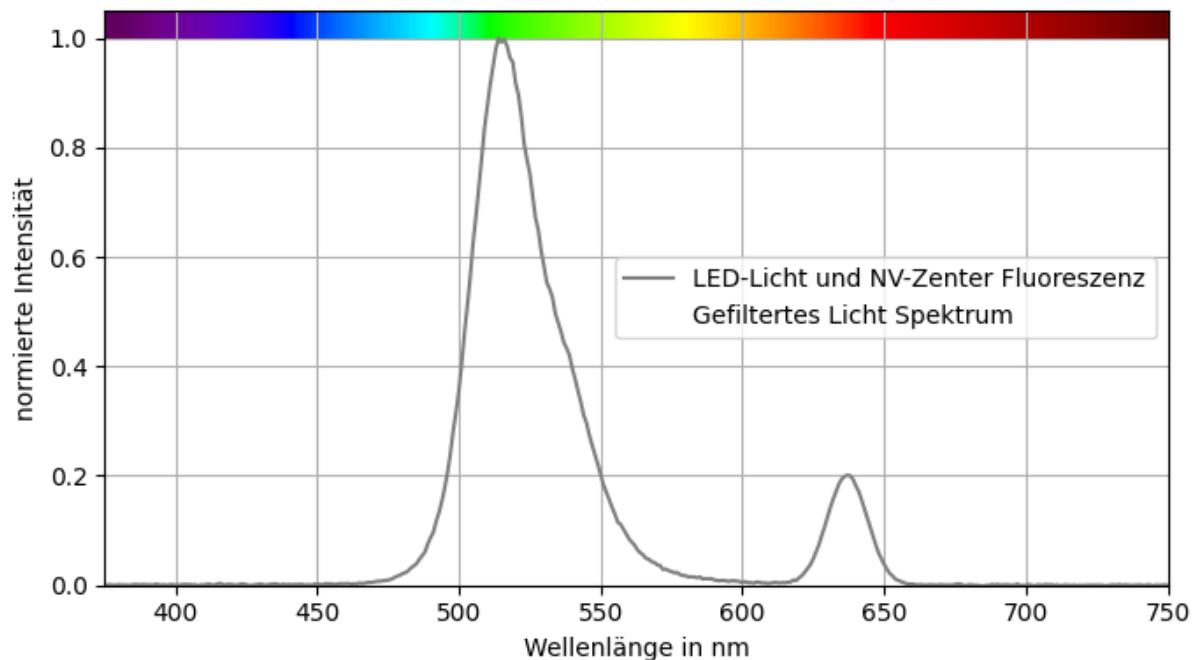


Abbildung 7: Das Spektrum der kombinierten Lichtquellen der grün angeregte NV-Zentren in Diamant vor Filter.

Wir hoffen, ihr habt die Fluoreszenz entdecken können und Spaß beim Experimentieren gehabt. Vielen Dank fürs Mitmachen.

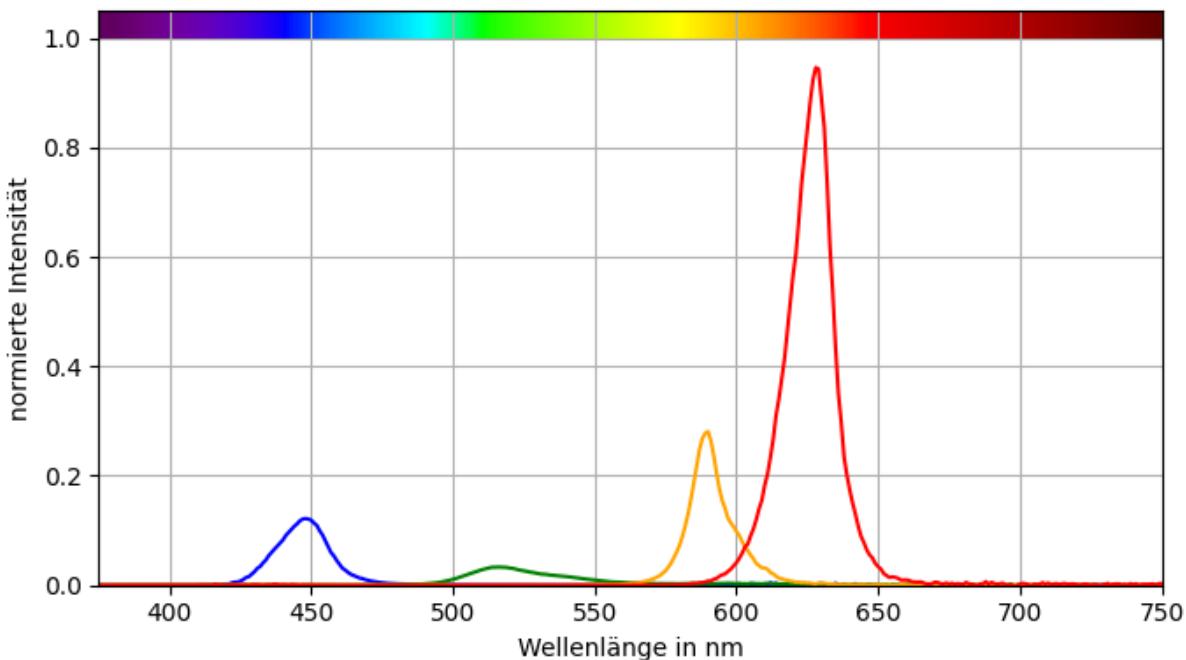


Abbildung 8: Auflösung Filteraufgabe realistischer Filter.

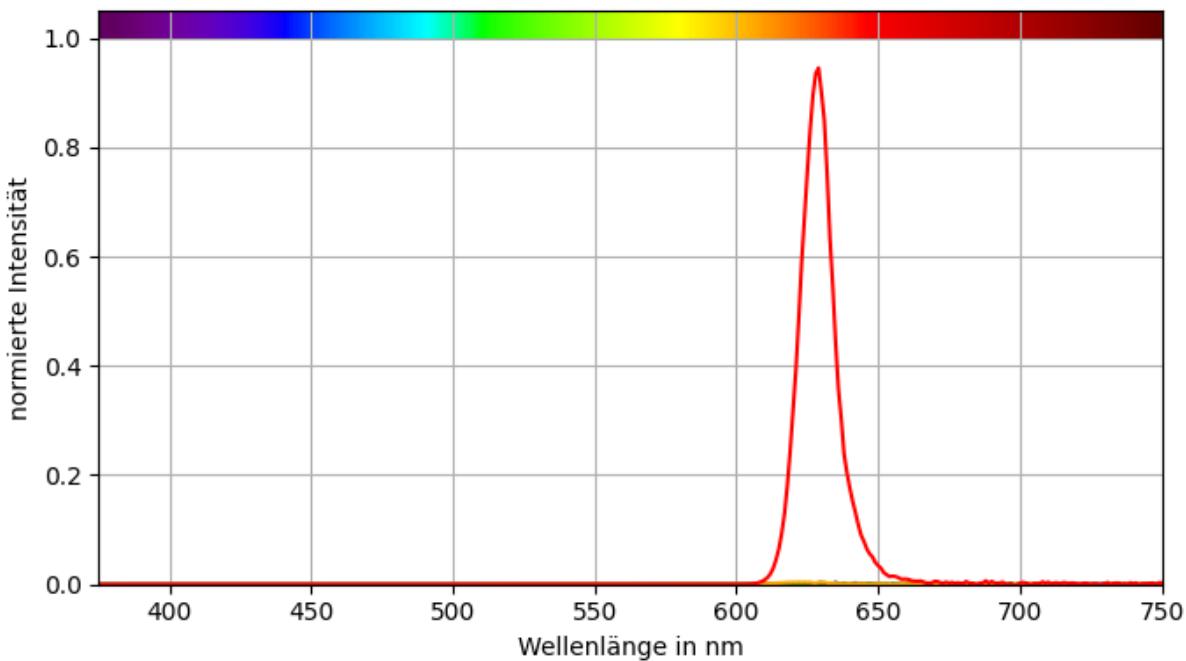


Abbildung 9: Auflösung Filteraufgabe fast perfekter Filter.

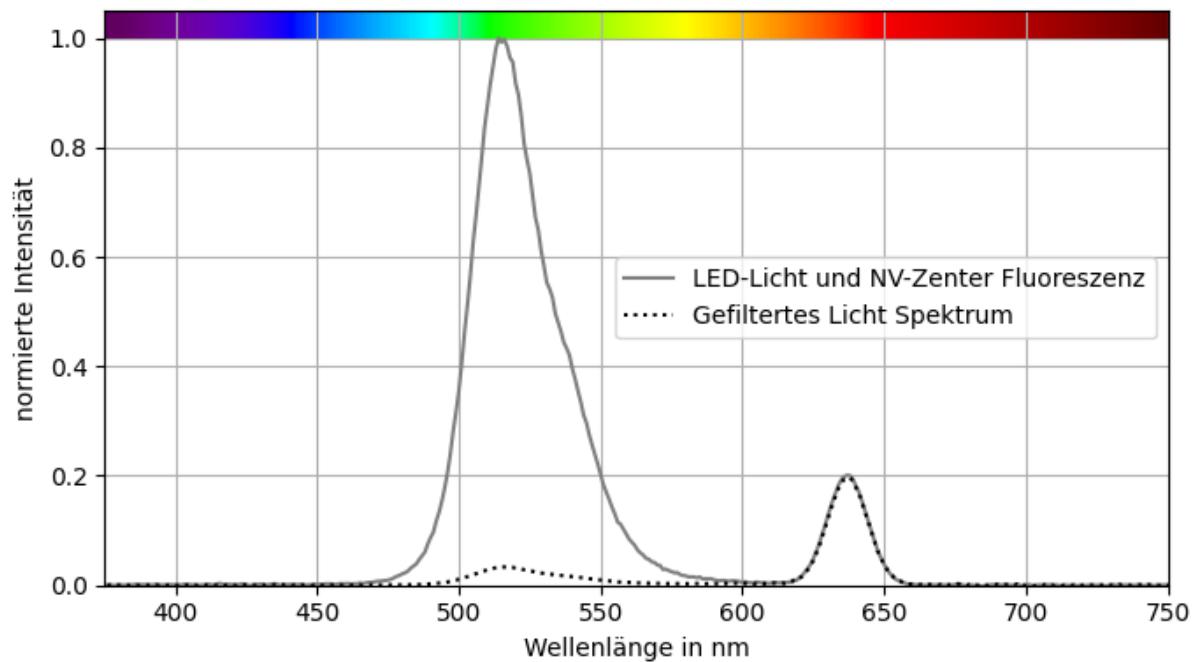


Abbildung 10: Auflösung Das Spektrum der kombinierten Lichtquellen der grün angeregte NV-Zentren in Diamant vor und nach Filter.

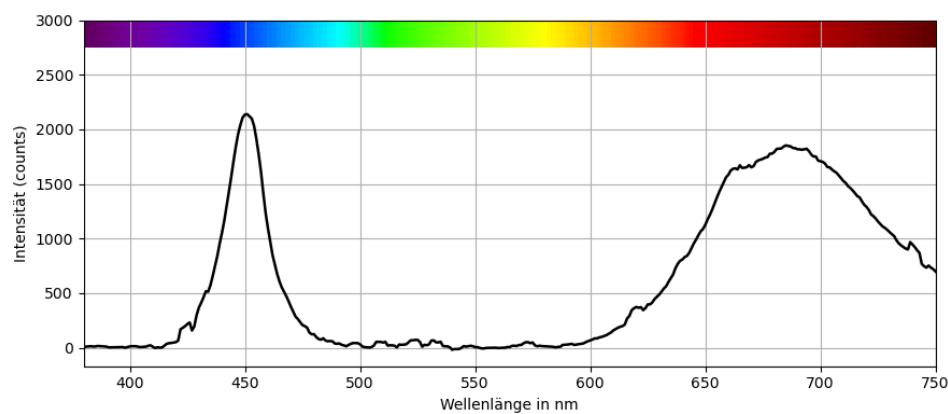


Abbildung 11: Reale Spektralaufnahme des NV-Zentrums unter Anregung mit einer blauen LED und vorgeschaltetem Rotfilter.

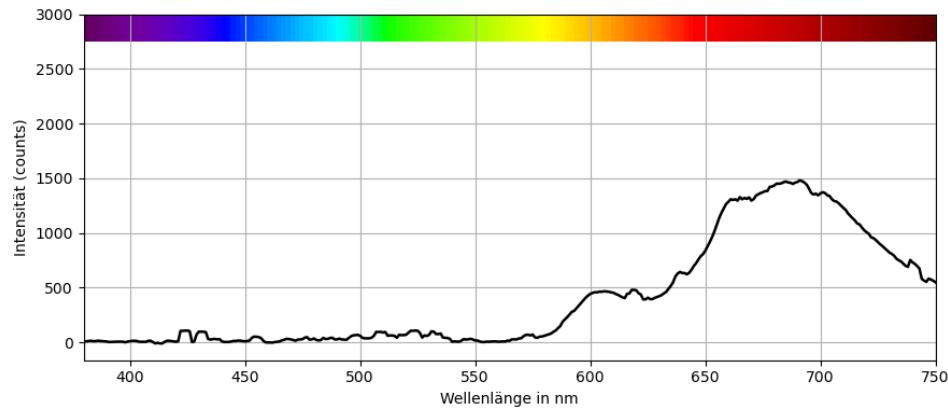


Abbildung 12: Reale Spektralaufnahme des NV-Zentrums unter Anregung mit einer grünen LED und vorgeschaltetem Rotfilter.

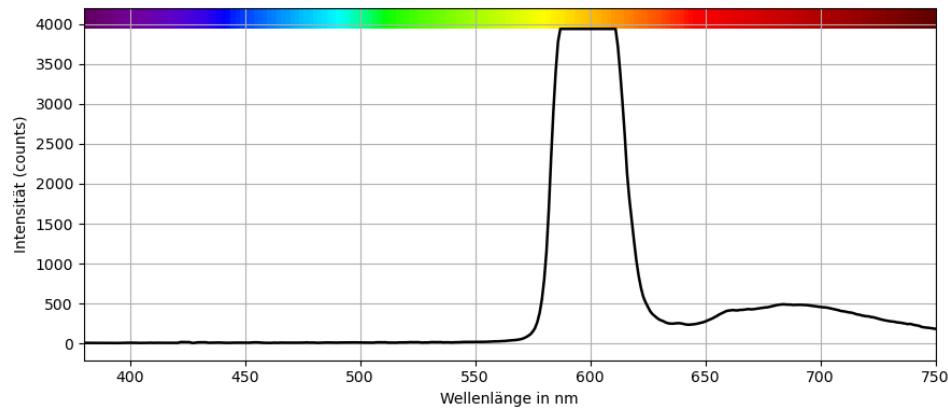


Abbildung 13: Reale Spektralaufnahme des NV-Zentrums unter Anregung mit einer orangenen LED und vorgeschaltetem Rotfilter.

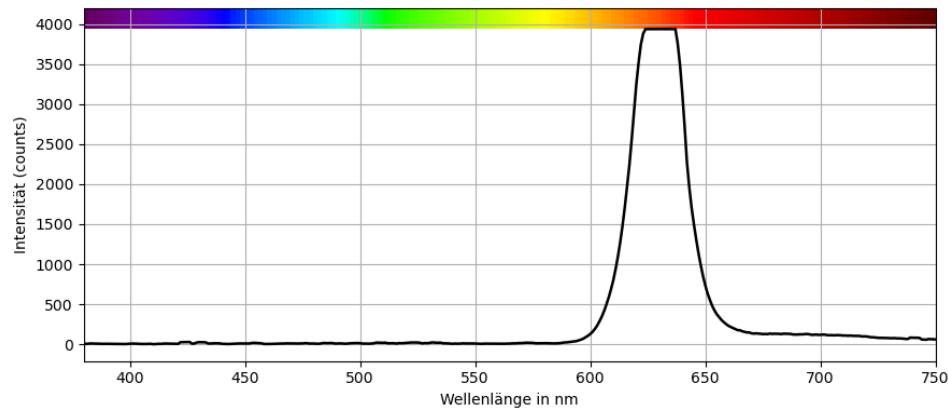


Abbildung 14: Reale Spektralaufnahme des NV-Zentrums unter Anregung mit einer roten LED und vorgeschaltetem Rotfilter.

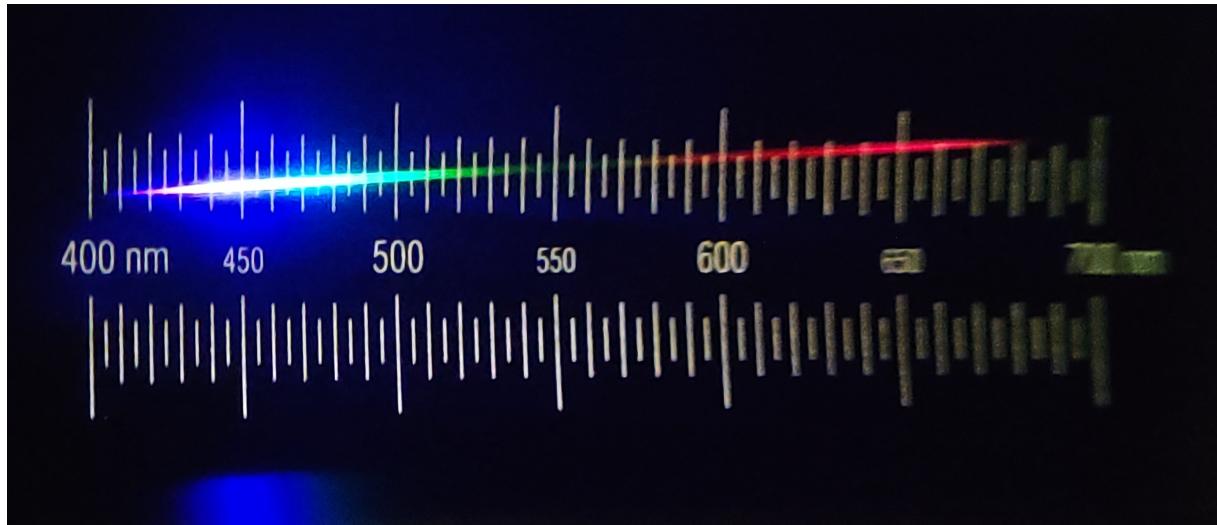


Abbildung 15: Aufnahme der Emission des NV-Zentrums mit dem Handspektroskop, angeregt durch eine blaue LED und ohne optischen Filter.

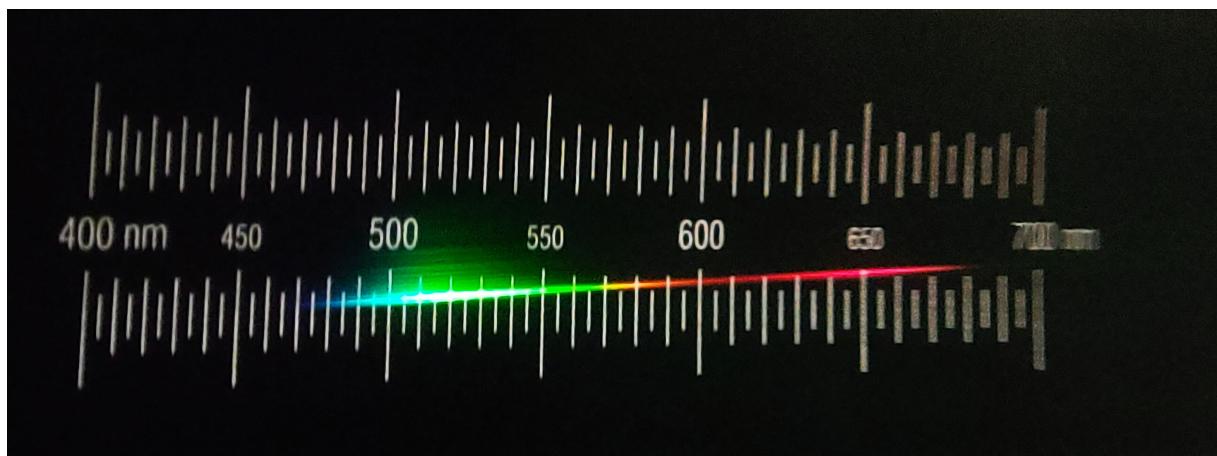


Abbildung 16: Aufnahme der Emission des NV-Zentrums mit dem Handspektroskop, angeregt durch eine grüne LED und ohne Filter.

## Glossar

- **elektromagnetische Strahlung/Welle** ist eine sich im Raum ausbreitende Welle aus elektrischen und magnetischen Feldern. Die elektrische Strahlung ist der damit verbundene Energietransport. Beispiele sind neben Licht auch Radiowellen, Mikrowellen oder Röntgenstrahlung.
- **Farbfilter** lässt nur bestimmte Wellenlängen passieren und blockiert die anderen. Ideale Farbfilter würden nur gewollte Wellenlängen durchlassen (transmittieren). Reale Farbfilter können aber meist die ungewollten Wellenlängen (vor allem in der Nähe der gewollten) nur stark abschwächen und nicht ganz absorbieren.
- **Fluoreszenz** ist das Emittieren von Licht durch ein Material (wie Diamant), nachdem es mit energiereichem Licht angeregt (bestrahlt) wurde.
- **Handspektroskop** ist ein kleines Gerät, mit dem das Spektrum einer Lichtquelle sichtbar gemacht werden kann. Es besteht aus einem Gitter oder Prisma, das das Licht in seine Farben zerlegt, sodass die einzelnen Wellenlängen vor einer Skala sichtbar werden.
- **Leuchtdiode (LED)** ist ein Halbleiterbauelement. Eine LED ist eine Lichtquelle, die das Licht in einer bestimmten Farbe aussendet.
- **Licht** ist eine elektromagnetische Welle, die wir im Bereich von ungefähr 400 bis 700 nm als Farben wahrnehmen.
- **NV-Zentrum (Stickstoff-Fehlstellen)** ist ein Defekt im Diamantgitter. Dabei sitzt an einem Gitterknoten statt einem Kohlenstoffatom ein Stickstoffatom. Direkt neben dem Stickstoffatom fehlt außerdem ein weiteres Kohlenstoffatom, es handelt sich hier also um eine Fehlstelle im Gitter. Das NV-Zentrum, dabei steht das N für nitrogen (Stickstoff) und das V für vacancy (Leerstelle)), absorbiert sichtbares Licht in einer bestimmten Wellenlänge und emittiert Licht mit weniger Energie wieder. Dieser Defekt ist für die Fluoreszenz des Diamanten verantwortlich.
- **Spektrum** zeigt, aus welchen Wellenlängen das betrachtete Licht zusammengesetzt ist. Mit einem Spektroskop/Spektrometer kann das Spektrum aufgenommen und analysiert werden. Dabei wird auch die Intensität (Helligkeit) einer bestimmten Wellenlänge sichtbar.
- **Wechselwirkung von Licht mit Materie** Wenn Licht auf ein Material trifft, kann es durchgelassen (**Transmission**), aufgenommen (**Absorption**) oder zurückgeworfen (**Reflexion**) werden. Außerdem kann ein Material nach der Anregung selbst wieder Licht aussenden (**Emission**).
- **Wellenlänge** bestimmt die Farbe des Lichts. Kleine Wellenlängen erscheinen violett. Mit größer werdender Wellenlänge wird das Licht blau, grün, gelb, orange, rot.